

El presente libro se propone contribuir a la toma de decisiones respecto a la localización o emplazamiento de un nuevo parque eólico en el Ecuador. Para la investigación se profundizó en la implementación de las energías renovables en el país, su fundamentación y las políticas vigentes al respecto; así como los parques eólicos, el estado actual de los proyectos, su caracterización y los criterios a seguir para su localización. Se describe además, el empleo de los métodos multicriterio para la toma de decisiones AHP, TOPSIS y VIKOR, en sus variantes clásicas y neutrosóficas. Por último, se ofrecen los resultados de la aplicación de estos métodos para la elección de la localización de un parque eólico en la Provincia de Chimborazo, a partir de cuatro alternativas estudiadas: San José de Iguata, Loma de Rasutambo, Aña Muyocancha y Páramo de Navag- Rumignokiana.



Isaack Junior Ortiz Aguirre, Ingeniero Industrial, Magister Scientiarum en Gerencia de Empresas: Mención en Gerencia de Operaciones. Docente de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas de la Universidad de Guayaquil, Ecuador. Tutor de varias tesis de grado y proyectos tecnológicos. Ponente y conferencista invitado en diversos eventos científicos nacionales e internacionales. Autor de varios artículos científicos y libros. Email: Isaack_1989@hotmail.com <https://orcid.org/0000-0002-0543-5738>



Manuel Fabricio Reyes Wagnio, Magister en Administración de Empresas, Mención en Negocios Internacionales y Máster en Ingeniería de Software y Sistemas Informáticos. Docente de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas de la Universidad de Guayaquil, Ecuador. Ponente y conferencista invitado en diversos eventos científicos nacionales e internacionales. Autor de varios artículos científicos y libros. Email: manuel.reyesw@ug.edu.ec <https://orcid.org/0000-0002-3102-0034>



Leonel Adalberto Vásquez Cevallos, PhD. en Ingeniería Biomédica (IB), Máster en Telemedicina y Bioingeniería e Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones. Investigador acreditado de la SENESCYT. Docente de tercer y cuarto nivel (Maestría). Autor de investigación y titulación de grado y posgrado con el Grupo de Bioingeniería y Telemedicina de la Universidad Politécnica de Madrid, la Universidad Politécnica Salesiana, La Escuela Superior Politécnica del Litoral y la Universidad de Guayaquil. Email: leonel.vasquezc@ug.edu.ec <https://orcid.org/0000-0002-9332-0825>



Segundo Eugenio Delgado Menoscal, Ingeniero Civil, Magister en Administración Ambiental. Doctor en Ciencias Ambientales. Docente de la Universidad de Guayaquil, a nivel de pregrado y postgrado. Docente de la Universidad Nacional de Piura, a nivel de postgrado y doctorado. Tutor de varias tesis, a nivel de pregrado, postgrado y doctorado, en varias universidades. Autor de diversos libros, artículos científicos y ponencias en eventos nacionales e internacionales. Email: segundo.delgadam@ug.edu.ec <https://orcid.org/0000-0002-4961-0489>



Erick Abraham Lamilla Rubio, Doctor en Ciencias Físicas, Magister en Enseñanza de la Física y Máster en Física, Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones. Docente de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas de la Universidad de Guayaquil, Ecuador. Tutor de varias tesis de grado y proyectos tecnológicos. Investigador de las áreas de la física educacional y experimental, mecánica cuántica, nuevas tecnologías en fibra óptica y las técnicas de caracterización en fibra y óptica no lineal. Email: erick.lamillaru@ug.edu.ec <https://orcid.org/0000-0002-1644-9465>

Los parques eólicos: una mirada desde la administración y gerencia de los proyectos de energía del Ecuador



Isaack Junior Ortiz Aguirre
Manuel Fabricio Reyes Wagnio
Leonel Adalberto Vásquez Cevallos
Segundo Eugenio Delgado Menoscal
Erick Abraham Lamilla Rubio

Los parques eólicos

una mirada desde la administración y gerencia de los proyectos de energía del Ecuador





Sello de calidad 6000/7000

SPI

Scholarly Publishers Indicators

Books in Humanities and Social Sciences



Los parques eólicos: una mirada desde la administración y gerencia de los proyectos de energía del Ecuador

Diseño: Ing. Erik Marino Santos Pérez.

Traducción: Prof. Dr. C. Ernan Santiesteban Naranjo.

Corrección de estilo: Prof. Dra. C. Kenia María Velázquez Avila.

Diagramación: Prof. Dr. C. Ernan Santiesteban Naranjo.

Director de Colección Ciencias e Innovación Tecnológica: Dr. Cs. Susana Cisneros Garbey.

Jefe de edición: Prof. Dra. C. Kenia María Velázquez Avila.

Dirección general: Prof. Dr. C. Ernan Santiesteban Naranjo.

© Mag. Isaack Junior Ortiz Aguirre

Mag. Manuel Fabricio Reyes Wagnio

Dr.C. Leonel Adalberto Vásquez Cevallos

Dr.C. Segundo Eugenio Delgado Menoscal

Dr.C. Erick Abraham Lamilla Rubio

© **Sobre la presente edición**

Esta obra ha sido evaluada por pares académicos a doble ciegos

Lectores/Pares académicos/Revisores: 0042 & 0088

Editorial Tecnocientífica Americana

Domicilio legal: calle 613nw 15th, en Amarillo, Texas.

ZIP: 79104

Estados Unidos de América, 2020

Teléfono: 7867769991

Código IBIC: KNBT

ISBN: 978-0-3110-0003-6



Contenido

| | |
|--|----|
| Capítulo 1. Energías renovables en Ecuador | 1 |
| 1.1. Energía solar | 3 |
| 1.1.1. Energía solar fotovoltaica | 4 |
| 1.1.2. Energía solar térmica | 7 |
| 1.2. Energía hidroeléctrica | 8 |
| 1.3. Biomasa | 13 |
| 1.4. Biogás | 16 |
| 1.5. Energía geotérmica | 18 |
| 1.6. Energía de los océanos | 20 |
| 1.7. Energía mareomotriz | 21 |
| 1.8. Energía undimotriz | 23 |
| 1.9. Energía eólica | 26 |
| 1.10. Políticas para el incentivo del uso de las energías renovables en el Ecuador | 29 |
| 1.11. Hitos de los mecanismos de promoción de las energías renovables en el Ecuador | 33 |
| Capítulo 2. Parques eólicos en Ecuador | 39 |
| 2.1. Parques eólicos offshore | 39 |
| 2.2. Parques eólicos onshore | 40 |
| 2.3. Parques eólicos nearshore | 41 |
| 2.4. Descripción de un aerogenerador | 42 |
| 2.5. Pasos a seguir en la creación de un parque eólico | 47 |
| 2.6. Parques eólicos en Ecuador | 48 |
| Capítulo 3. Métodos multicriterios neutrosóficos para la localización de un parque eólico. | 54 |
| 3.1. Localización de un parque eólico | 54 |
| 3.2. Métodos multicriterio para la toma de decisiones | 58 |
| 3.2.1. Método AHP | 64 |
| 3.2.2. Método TOPSIS | 68 |
| 3.2.3. Método VIKOR | 70 |
| 3.3. Fundamentos básicos sobre neutrosofía | 72 |
| 3.3.1. Método AHP neutrosófico | 75 |
| 3.3.2. Método TOPSIS neutrosófico | 76 |
| 3.3. Método VIKOR neutrosófico | 79 |

| | |
|---|----|
| 3.4. Aplicación de los métodos AHP, TOPSIS y VIKOR neutrosóficos para la elección de la localización de un parque eólico..... | 82 |
| 3.5. Aplicación del método AHP Neutrosófico..... | 85 |
| 3.6. Aplicación del método TOPSIS Neutrosófico..... | 91 |
| 3.7. Aplicación del método VIKOR Neutrosófico..... | 96 |
| Referencias | |

Capítulo 1. Energías renovables en Ecuador

Las energías renovables son aquellas que, en teoría, no se agotarán con el paso del tiempo. Estas fuentes de energía son una alternativa a otras tradicionales y producen un impacto ambiental mínimo. Estas energías son, junto con el ahorro y la eficiencia energética, la clave para un futuro energético limpio, eficaz, seguro y autónomo (Espinoza y León, 2012).

Las fuentes renovables, son aquellas que se regeneran naturalmente obtenidas de flujos energéticos, y pueden aprovecharse industrialmente aplicando tecnologías (Gary & Boyle, 2004).

Las fuentes renovables de energía pueden dividirse en dos categorías: no contaminantes y contaminantes. Entre las primeras están:

- El Sol: energía solar.
- El viento: energía eólica.
- Los ríos y corrientes de agua dulce: energía hidráulica o hidroeléctrica.
- El calor de la Tierra: energía geotérmica.
- Los mares y océanos: energía mareomotriz.
- Las olas: energía undimotriz.

Las energías de fuentes renovables contaminantes son las obtenidas a partir de materia orgánica o biomasa. Son contaminantes ya que en la combustión emiten dióxido de carbono, gas de efecto invernadero. Estas fuentes se incluyen dentro de las energías renovables porque mientras puedan cultivarse los vegetales que las producen, no se agotarán.

Una definición corta que se asume en este libro es la adoptada por la Agencia Internacional de Energía (IEA–*International Energy Agency*, 2015): “Energía renovable es la energía derivada de procesos naturales que son sustituidos a una velocidad mayor que la que son consumidos”.

Una definición ligeramente más amplia, adoptada por la *Texas Renewable Energy Industry Alliance*, señala que energía renovable es cualquier recurso que es regenerado naturalmente en un período corto de tiempo y derivado directamente del sol (por ejemplo: térmica, fotoquímica o fotoeléctrica), indirectamente del sol (por ejemplo: eólica, hídrica, o energía fotosintética almacenada en la biomasa), o de otros movimientos y mecanismos naturales del planeta o medio ambiente (por ejemplo: la energía geotérmica y de las olas). La energía renovable no incluye recursos derivados de combustibles fósiles, residuos de combustibles fósiles, o residuos de fuentes inorgánicas.

Según el Grupo Interagencial de Desarrollo Rural (2003) la energía renovable es cualquier forma de energía de origen solar, geofísico o biológico, que se renueva mediante procesos naturales a un ritmo igual o superior a su tasa de utilización. Se obtiene de los flujos continuos o repetitivos de energía que se producen en el entorno natural y comprende tecnologías de baja emisión de carbono, como la energía solar, la

hidroeléctrica, la eólica, la mareomotriz y del oleaje, y la energía térmica oceánica; así como combustibles renovables tales como la biomasa.

En términos generales, las fuentes de energía renovable pueden ser clasificadas también en convencionales (por ejemplo: hidráulica) y no convencionales (por ejemplo: la energía solar).

Las energías renovables son fuentes de abastecimiento energético respetuosas con el medio ambiente, se producen de forma continua y son inagotables a escala humana. En función de los recursos naturales empleados para la generación de energía existen diferentes tipos de fuentes de energía renovables: los biocarburantes, el biogás, la biomasa, la energía solar, la energía eólica, la minihidráulica, la geotérmica, la energía de las olas y de las mareas, etc. (Fraga y Martínez, 2014).

Las energías renovables son importantes no solo para países altamente desarrollados, sino también en países en vías de desarrollo. Un ejemplo es la utilización de esta energía en zonas rurales aisladas, ya que se puede aprovechar la energía en el mismo lugar donde se produce.

Adicionalmente, se debe tomar en consideración que con la utilización de los recursos renovables se disminuye los problemas ambientales por contaminación, ya que se podría dejar de operar centrales térmicas que son altamente contaminantes (Espinoza y León, 2012).

El uso de energías renovables constituye una medida de mitigación cuando los gases de efecto invernadero no emitidos exceden la suma de las emisiones directas e indirectas. Las tecnologías, junto con las opciones del suministro de energía renovable, acompañadas de mejoras de la eficiencia energética, cumplen con la función potencial de aminorar las emisiones de gases de efecto invernadero.

A pesar de que a nivel mundial, los costos de producción de la energía proveniente de fuentes renovables no convencionales han ido disminuyendo a través de los años, y su madurez tecnológica se va consolidando, todavía existen limitaciones para que estas tengan un importante rol frente a la energía proveniente de fuentes convencionales, como la hidroelectricidad a gran escala o la energía termoeléctrica.

A diferencia de la energía eléctrica que utiliza combustibles fósiles y que, en el Ecuador, hasta 2013 representó cerca del 50 % del total de la energía generada, las energías renovables (ER) son consideradas sustentables, pues por sus características, pueden aportar a las necesidades energéticas sin reducir la disponibilidad de energía en el futuro. A ello se suma el menor impacto ambiental que las ER provocan, así como que están distribuidas, promueven la mano de obra local y constituyen un recurso autóctono, que tiene directo impacto en la anhelada soberanía energética de cualquier país o región (Barragán y Espinoza, 2015).

Las ventajas del empleo de este tipo de energías frente a las convencionales se ponen de manifiesto en diferentes aspectos:

Ventajas medioambientales

- No producen emisiones de CO₂ ni de otros gases contaminantes a la atmósfera.
- No generan residuos de difícil tratamiento.

- Son inagotables.

Ventajas estratégicas

- Son autóctonas
- Evitan la dependencia exterior

Ventajas socioeconómicas

- Crean cinco veces más puestos de trabajo que las convencionales.
- Contribuyen decisivamente al equilibrio interterritorial porque suelen instalarse en zonas rurales.
- Permiten el desarrollo de tecnologías propias

Frente a las evidentes ventajas de las energías renovables y sus restricciones para que se incremente su participación en las matrices energéticas, diversos países están buscando opciones para incentivar su uso.

1.1. Energía solar

Exceptuando la energía mareomotriz y la geotérmica, todas las fuentes de energía renovable provienen, en último término, del sol. Este irradia 174.432.000.000.000 kWh de energía hacia la Tierra, es decir, que nuestro planeta recibe 1.74×10^{17} W de potencia. Esto es aproximadamente 10.000 veces la tasa mundial de consumo energético. Solo una pequeña parte de esta energía, entre el 1 y el 2%, se transforma en movimiento de aire atmosférico o viento.

En una escala global, las regiones alrededor del Ecuador reciben una ganancia neta de energía, mientras que en las regiones polares hay una pérdida neta de energía por radiación (ilustración 1). Esto implica un mecanismo por el cual la energía recibida en las regiones ecuatoriales es transportada a los polos.

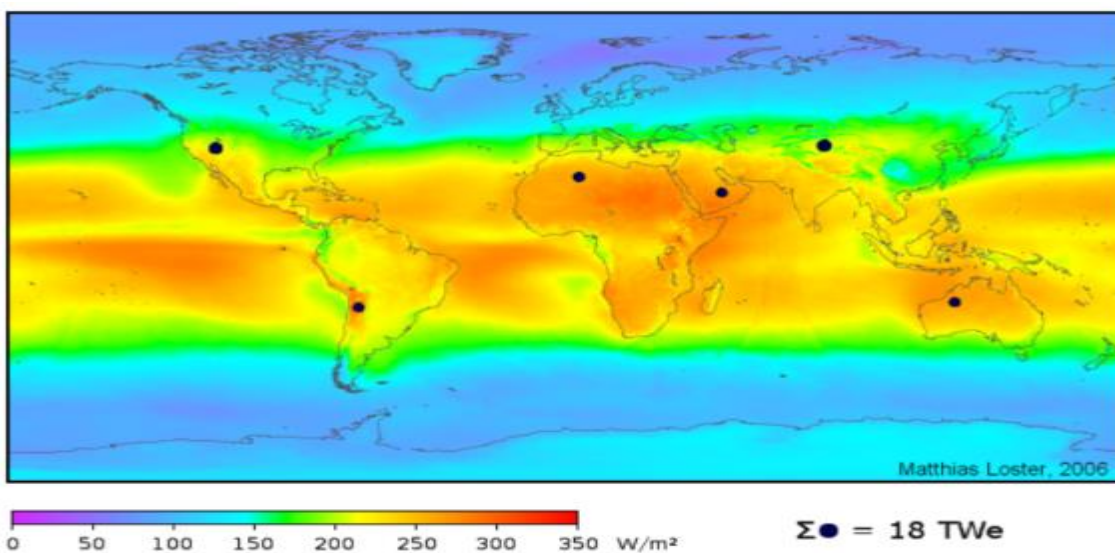


Ilustración 1. Mapa de radiación solar en el planeta y cantidad estimada de energía (Parra, 2018)

Al incidir la radiación solar sobre nuestro planeta, atraviesa el gas atmosférico sin apenas calentarlo; en cambio sí calienta la superficie terrestre que es la que acaba transmitiendo el calor al aire atmosférico en contacto con ella. De esta manera, la tierra es la que calienta directamente la atmósfera y no la radiación solar (Roberts, 2008).

Sin embargo, cuando se habla de energía solar, se entiende que es la energía que se obtiene a partir de la radiación electromagnética procedente del sol. La energía solar es una alternativa que ofrece tantas aplicaciones como ventajas respecto a la energía convencional, ya que se trata de una fuente de energía gratuita, inagotable, y sobre todo, limpia. En la actualidad existen dos formas básicas de energía proveniente del sol:

- Energía solar fotovoltaica
- Energía solar térmica.

1.1.1. Energía solar fotovoltaica

La tecnología solar fotovoltaica consiste en la conversión directa de la radiación del Sol en electricidad, conversión que se realiza a través de los módulos o generadores fotovoltaicos. El generador fotovoltaico, encargado de transformar la energía del Sol en energía eléctrica, está formado por varios módulos fotovoltaicos conectados en serie y/o paralelo, a su vez, cada módulo fotovoltaico está formado por unidades básicas llamadas células fotovoltaicas o células solares.

La conversión fotovoltaica ocurre sin necesidad de ciclos térmicos, cambios químicos o procesos mecánicos que impliquen partes móviles. Esta conversión se produce en los dispositivos llamados células solares que aprovechan ciertas propiedades de los materiales semiconductores.

Un semiconductor es un sólido que permite la circulación de corriente a través de él, bajo ciertas condiciones. De esta manera puede operar como un conductor o un aislante según, por ejemplo, la radiación luminosa incidente.

Cuando un fotón (partícula de luz, portadora de todas aquellas formas de radiación electromagnética) incide sobre una célula solar puede reflejarse, transmitirse o absorberse, cediendo su energía a un electrón del material. Este electrón con exceso de energía podrá moverse por el material hasta alcanzar un contacto. El resultado es la generación por la luz de una corriente eléctrica (Aguilera, 2012).

Un panel solar es el conjunto de pequeñas celdas compuestas principalmente de silicio cristalino o arseniuro de galio (materiales semiconductores) que convierten la luz en electricidad por medio de un efecto fotovoltaico. Este efecto provoca un diferencial de potencial, donde los fotones transfieren la energía de la radiación solar a los electrones del semiconductor, liberándolos de la red cristalina de la celda. El conjunto de estos electrodos forma una corriente eléctrica (ilustración 2) (Parra, 2018).





Ilustración 2. Componentes de un sistema fotovoltaico (ACESOL)

Al Ecuador estar ubicado sobre el centro de la tierra, tiene un potencial solar que sin ser el mejor del planeta, se sitúa en niveles muy convenientes para el aprovechamiento energético. Los datos de radiación solar en el país presentan homogeneidad de los valores a lo largo del año; así por ejemplo, en el observatorio del Coca en la Amazonía, los valores diarios oscilan entre los 3,35 kWh/m² en el mes de mayo y los 4,33 kWh/m² en el mes de septiembre.

Para impulsar el uso de la energía solar, el CONELEC publicó en el año 2008, el Atlas Solar del Ecuador con fines de Generación Eléctrica (ilustración 3). En este documento consta la cuantificación del potencial solar disponible y sus posibilidades de generación eléctrica. Además, se cuentan con políticas que incentivan a las energías renovables como la Regulación 004/11, que ha determinado que tres proyectos solares fotovoltaicos, con potencia cercana a 1 MW cada uno, se encuentren en construcción en las zonas de Malchinguí, Paragachi y Escobar (Espinoza y León, 2012).

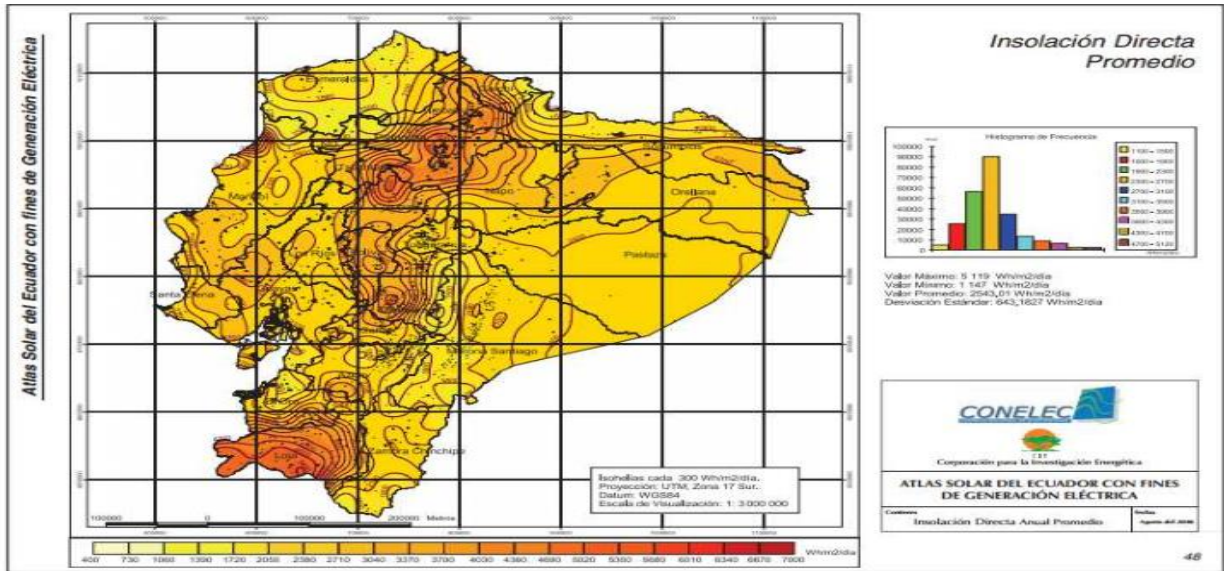


Ilustración 3. Insulación Directa Promedio de Ecuador (Atlas Solar del Ecuador)

Aplicaciones a gran escala como parques fotovoltaicos conectados a la red, están siendo lideradas por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER), tanto en el territorio continental ecuatoriano, como en Galápagos.

A finales del año 2012 e inicios del 2013, el Estado ecuatoriano firmó contratos para la construcción de 15 proyectos fotovoltaicos. Esta decisión se basó en las regulaciones del CONELEC 004/11 y 009/08 (para despacho preferente y precios especiales, respectivamente).



El precio establecido en la normativa (USD 0,40/ kWh) atrajo a las empresas relacionadas con la energía fotovoltaica. Inicialmente se presentaron 17 proyectos por una capacidad total instalada de 284 MW, con lo cual se llenó el cupo de incentivos del CONELEC. De esa potencia, hasta 200 MW se entregarían a empresas que ofertaron siete proyectos de más de 20 MW, y el resto, a firmas con iniciativas de pequeña generación. Todo ello representaba una

inversión de USD 700 millones hasta el 2015 (Revista Líderes, 2012).

El 29 de Enero de 2013 se conectó oficialmente a la red ecuatoriana de electricidad, la Central Fotovoltaica de Paragachi de 1 MW de potencia, constituida por 4.160 paneles de 240 Wp c/u, siendo la primera planta solar de este tipo en el país. La planta ocupa 3,5 hectáreas y está ubicada en la provincia de Imbabura, una de las zonas con mayor irradiación solar de Ecuador (Zigor, 2013).

1.1.2. Energía solar térmica

La energía solar térmica o fototérmica es la primera fuente de energía que se encuentra en el planeta, es la capacidad que tiene un cuerpo de absorber en forma de calor la energía solar incidente del mismo. Estos cuerpos son sistemas que reservan las radiaciones solares por medio de unas placas que calentarán los distintos fluidos hasta que sean utilizados (Fider, 2011).

La energía solar térmica aprovecha la radiación del Sol para calentar un fluido que, por lo general, suele ser agua o aire. La capacidad de transformar los rayos solares en calor es, precisamente, el principio elemental en el que se basa esta fuente de energía renovable. Para calentar los fluidos se emplean unos dispositivos llamados colectores. El calor generado incrementa la temperatura del agua u otro fluido hasta convertirlo en vapor, que es transportado a una turbina, y al girar esta, produce energía eléctrica (Espinoza y León, 2012).

La energía solar térmica pasiva consiste en el aprovechamiento de la energía solar de forma directa sin la necesidad de transformarla en otro tipo de energía, para su utilización inmediata o para su almacenamiento sin la necesidad de sistemas mecánicos ni aporte externo de energía (CATEDU, 2014).

Esta tecnología hace referencia especialmente a la arquitectura bioclimática o arquitectura solar pasiva. En esta, la energía solar es captada, almacenada y distribuida a través de diferentes estructuras constructivas, con lo cual se aprovecha la energía solar térmica sin necesidad de procesos ni dispositivos complejos, sino a través del diseño arquitectónico y estructural, considerando factores como el entorno, materiales, forma y orientación de los edificios, techos, aislamiento térmico, etc. Con ello se reducen las necesidades de iluminación y calefacción (o enfriamiento). La tecnología solar pasiva incluye sistemas con ganancia directa e indirecta para el calentamiento de espacios, el uso de masa térmica y de materiales con cambio de fase para suavizar las oscilaciones de la temperatura del aire, chimeneas solares para mejorar la ventilación natural y el propio calor de la tierra (Vásquez, Urdiales, Espinoza y García, 2015).

La energía solar térmica activa consiste en el aprovechamiento de la energía procedente del sol a través de su concentración, transformación en calor y en algunos casos generación de energía eléctrica (ATECOS, 2011). Este calor puede aprovecharse para cocción de alimentos, para la producción de agua caliente destinada al consumo de agua doméstico, ya sea agua caliente sanitaria, calefacción, o para producción de energía mecánica y, a partir de ella, de energía eléctrica, a través de los sistemas termosolares de concentración (STSC) (Jutglar, 2004 y Ruiz, 2010).

La captación se realiza mediante los denominados colectores, cuya clasificación es:

- De baja temperatura, con temperaturas menores a 100 °C para aplicaciones como: calentamiento de piscinas, calentamiento de agua para baños, etc.
- De media temperatura, con temperaturas entre 100 y 250 °C. para aplicaciones como: los concentradores estacionarios y los canales parabólicos.
- De alta temperatura, con temperaturas superiores a los 500 °C para generar electricidad. Existen tres tipos principales: de plato parabólico, de canal parabólico y los sistemas de torre central.

En Europa, la energía solar térmica, a pesar de estar muy alejada de los objetivos propuestos, cuenta con un futuro muy prometedor, ya que los proyectos, sobre todo los de ámbito doméstico, son relativamente rápidos en ejecutarse. A diferencia de lo que sucede con otras fuentes renovables, la planificación estatal supera los objetivos de la planificación autonómica (Fraga y Martínez, 2014).

En la región latinoamericana apenas se empiezan a considerar estas tecnologías. En Chile, la primera central de la región, de 110 MW (de torre central con sales y un factor de planta del 80 %), inició su construcción en 2014, a cargo de la empresa Abengoa-Chile. La planta tiene un costo aproximado de 1.000 millones de dólares (Veoverde, 2015).

Aunque en el Ecuador no se tiene aún proyectos termosolares en ejecución, se están investigando los potenciales sitios donde pudieran implementarse estas tecnologías. Por ejemplo, el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energía Renovable (INER), en convenio con la Universidad de Cuenca, ha iniciado en el año 2019 el proyecto de investigación denominado Elaboración de un mapa de irradiación solar directa normal y análisis de aplicaciones industriales, viabilidad tecno-económica e impacto ambiental de sistemas termosolares híbridos para el Ecuador. El proyecto contempla entre sus principales objetivos la elaboración de un mapa de irradiación solar normal directa (DNI), el análisis de la viabilidad tecno-económica de alternativas de generación con concentradores termosolares y su posible hibridación con otros combustibles, como el gas natural y la biomasa, y la evaluación del impacto ambiental global de dichos concentradores mediante el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) (Vásquez, Urdiales, Espinoza y García, 2015).

1.2. Energía hidroeléctrica

Una de las propuestas del gobierno ecuatoriano para el cambio de la matriz energética, es la construcción de grandes centrales hidroeléctricas que puedan aprovechar la energía potencial que genere la caída del agua (Castro, 2011).

El Ecuador ha dependido desde hace algunos años de la energía hidráulica. Su primer proyecto fue la Central Hidroeléctrica Paute construida entre los años 1976 y 1991 (Castro, 2011). Hoy en día, el Ecuador cuenta con la construcción de otros proyectos emblemáticos, entre ellos se encuentran Coca Codo Sinclair, Sopladora, Toachi Pilatón, Minas San Francisco, Delsitanisagua, Manduriacu, Quijos, Mazar Dudas (ilustración 4). Algunos de ellos aún se encuentran en ejecución, pero todos estos proyectos tienen la finalidad de poder satisfacer la progresiva demanda de energía que hay en el país, su generación permitiría duplicar la capacidad instalada en hidroelectricidad del Ecuador (Albornoz, 2013).

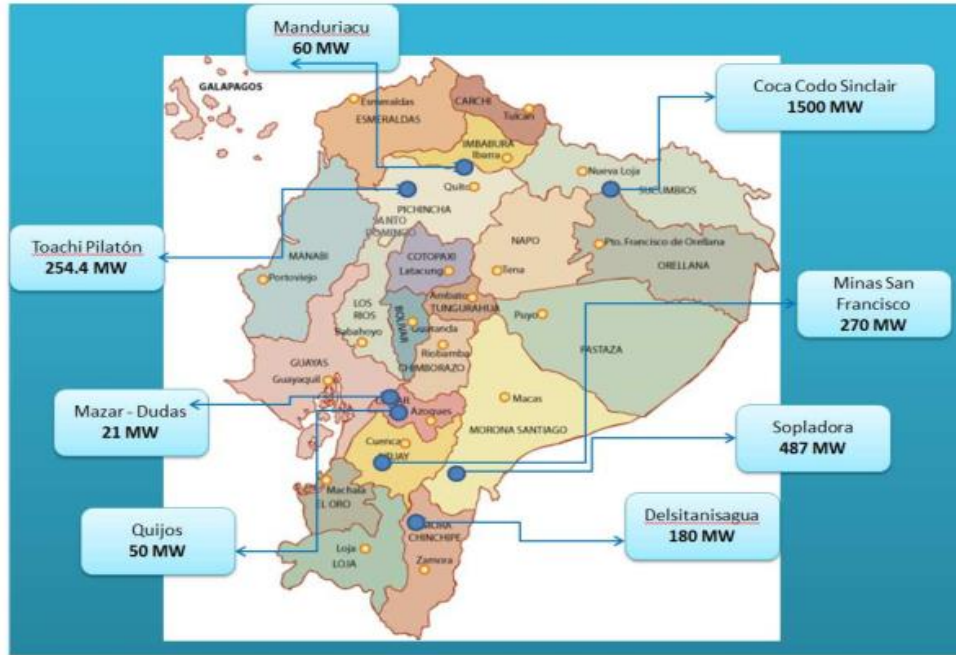


Ilustración 4. Proyectos Hidroeléctricos en Ecuador (Hernández, 2015)

La fuente energética hidráulica proviene, en primera instancia e indirectamente, de la energía solar, debido al ciclo hidrológico natural, a través del cual el agua evaporada es transportada en forma de nubes y niebla a distintos puntos del globo terrestre. Luego en forma de lluvia y nieve pasan a formar los lagos, glaciares y ríos. La superficie terrestre está cubierta en un 71 % de agua.

De manera directa, la energía hidroeléctrica proviene de la energía potencial del agua de las fuentes hídricas naturales. Las centrales hidroeléctricas aprovechan la diferencia de desnivel existente entre dos puntos y el caudal de agua para transformar esa energía potencial en electricidad. La energía se transforma, primero en energía mecánica en la turbina hidráulica, la cual activa el generador que transforma en un segundo paso, la energía mecánica en energía eléctrica (Urgilés, Chávez y Espinoza, 2015).



Las principales ventajas de la generación hidroeléctrica se destacan a continuación.

- Depende directamente del agua, líquido que la naturaleza proporciona de manera permanente y gratuita.
- Los costos ligados a la operación y mantenimiento de una central hidroeléctrica son generalmente bajos, en comparación con otros tipos de generación.
- La vida útil de las centrales hidroeléctricas puede ser superior a 50 años.

- Existe flexibilidad de conexión al sistema, lo cual hace que las centrales se acoplen a la aleatoriedad de la demanda.
- El proceso de generación no está ligado a contaminación ambiental considerable y puede ser combinada con otros beneficios como riego, navegación y turismo.

Las principales desventajas de un proyecto hidroeléctrico se destacan a continuación.

- En comparación con el tiempo de montaje y disponibilidad de una central térmica, la construcción de un proyecto hidroeléctrico requiere de un tiempo mucho mayor que pueden ser hasta varios años.
- La producción energética de una central hidroeléctrica está limitada por la hidrología, la cual depende de la estacionalidad climática de la región.
- Durante la etapa de construcción es inevitable la generación de impactos ambientales considerables en la zona, sin embargo, con la aplicación de un plan de manejo ambiental adecuado, se pueden mitigar y compensar en gran medida.
- Con políticas adecuadas de país, se puede aprovechar la construcción de una central para mejorar las condiciones de vida de las comunidades cercanas al sitio de construcción: mayor empleo, mejora de infraestructura básica, etc.



El Ecuador es un país que abarca un área de 256.370 km², y que dispone de un alto potencial de recursos hídricos, debido principalmente, a la alta pluviosidad y a la presencia de la cordillera de los Andes que atraviesa todo el territorio. De acuerdo con la orientación que pueden tomar las redes fluviales o vertientes hidrográficas del Ecuador continental, se las pueden dividir en dos tipos: la vertiente del Pacífico que son las que atraviesan la región de la costa y cuya desembocadura final es el océano Pacífico; y la vertiente del Amazonas que son las que atraviesan las llanuras del Amazonas, y luego de desarrollarse por cientos de kilómetros finalizan desembocando en el océano Atlántico. Estas dos vertientes están divididas por la cordillera de los Andes.



Ilustración 5. Construcción de la represa Daniel Palacios Izquierdo (HIDROPAUTE CELEC_EP)

Para el sistema hídrico del Ecuador continental se estima un potencial hídrico medido en caudal igual a 16.500 m³ /s; de los cuales 11.715 m³ /s corresponden a la vertiente del Amazonas y 4.785 m³ /s a la vertiente del Pacífico. Según estudios e investigaciones realizadas por el Instituto Nacional de Electrificación (INECEL) (1961-1998) se han clasificado a las cuencas hidrográficas de acuerdo con la importancia de su potencial hídrico aprovechable para el país. De igual manera el INECEL estableció 11 cuencas, pertenecientes a las dos vertientes (Pacífico y Amazonas).



Ilustración 6. Embalse de la Central Hidroeléctrica Mazar HIDROPAUTE CELEC_EP

En la última década, el Estado ecuatoriano ha implementado proyectos de generación de electricidad con el fin de obtener soberanía energética y promover la sostenibilidad del país. Sin embargo, con el cambio de la matriz energética, se acrecentó la dependencia en las fuentes hídricas, con la construcción de 8 megaproyectos hidroeléctricos que, juntamente con los ya existentes, aportaron al país el 57.8% de la electricidad generada en el 2016.

Se nombran a continuación 8 proyectos considerados como emblemáticos por el Gobierno Nacional, se detalla en paréntesis la potencia instalada y la fecha estimada de su operación comercial: Coca Codo Sinclair (1.500 MW; febrero 2016), Sopladora (487 MW; diciembre 2015), Minas San Francisco (270 MW; marzo 2016), Toachi-Pilatón (254 MW; diciembre 2015), Delsitanisagua (180 MW; marzo 2016), Manduriacu (60 MW; marzo 2015), Quijos (50 MW; marzo 2016), y Mazar-Dudas (21 MW; diciembre 2015).

Para determinar un criterio para la reserva mínima de potencia y energía en los distintos escenarios hidrológicos, el Estado ha elaborado un análisis de la generación del sector eléctrico, en el cual se ha tenido en cuenta la garantía de suministro de la demanda, el índice general de energía, los índices de reserva de potencia y de energía, la implementación de las acciones de mantenimiento de las centrales de generación, el índice de indisponibilidad de la misma, así como el índice de predicción de los caudales semanales promedios (Ordoñez y Luna, 2019).

Sobre la base del diagnóstico anterior, para el Plan de Expansión de la Generación 2016 -2025, tanto en el Caso Base como en el Caso de la Matriz Productiva, se ha optado por el criterio de asegurar una provisión mínima de energía del 10% en el supuesto de que se presente un escenario hidrológico semiseco (con al menos un 75% de probabilidad de que ocurra en el futuro), así como del 20% de reserva mínima sin

tomar en cuenta la existencia de interconexiones internacionales. Los resultados de las reservas de energía se presentan para dos escenarios hidrológicos: hidrología media (ilustración 7) e hidrología semiseca (ilustración 8).

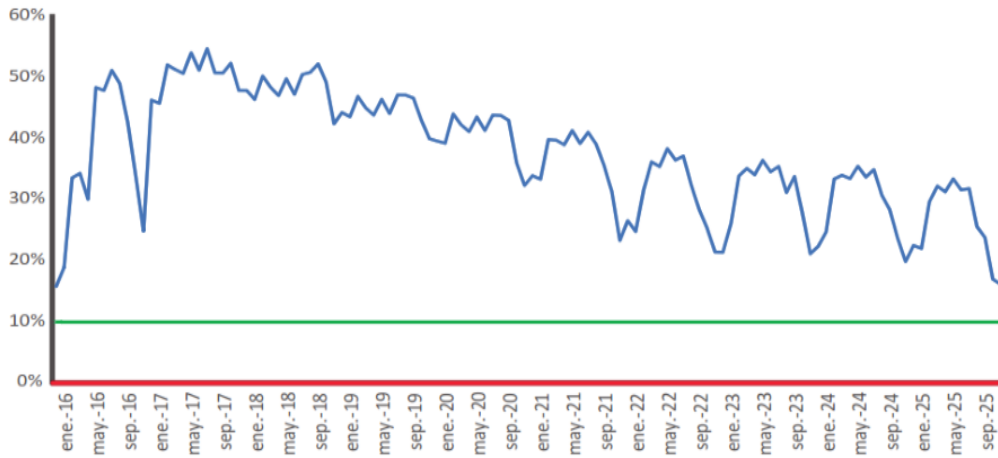


Ilustración 7. Reserva de energía con hidrología media, caso Base (Ordoñez y Luna, 2019)

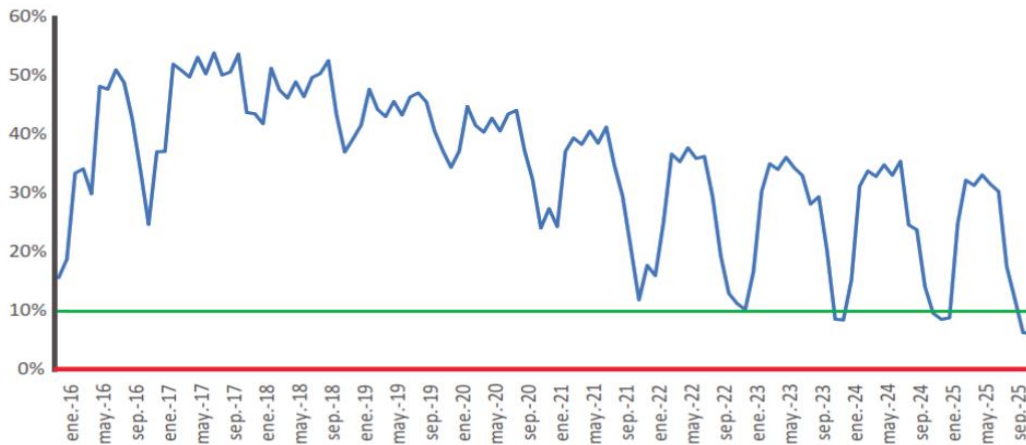


Ilustración 8. Reserva de energía con hidrología semiseca, caso Base (Ordoñez y Luna, 2019)

A pesar de la amplia utilización y aprovechamiento de la energía hidroeléctrica en el país, en ciertas épocas del año, en las que existe poco caudal, todavía entran a funcionar las termoeléctricas, por lo que es necesario buscar otras fuentes de energías renovables que suplan a las hidroeléctricas en épocas de estiaje. Entre ellas está la energía eólica, sobre la cual se están haciendo estudios en varios sitios del país en donde se puede hacer uso de esta energía.

1.3. Biomasa

El término biomasa se refiere a todo material orgánico biodegradable derivado de plantas, animales, o microorganismos (UNFCCC, 2005), que tiene potencial de uso como fuente de energía renovable y/o bioproductos. Entre estos materiales se incluyen la madera y sus residuos, cultivos agrícolas y residuos de su cosecha y procesamiento, residuos municipales orgánicos y desechos animales, entre otros (ilustración 9).

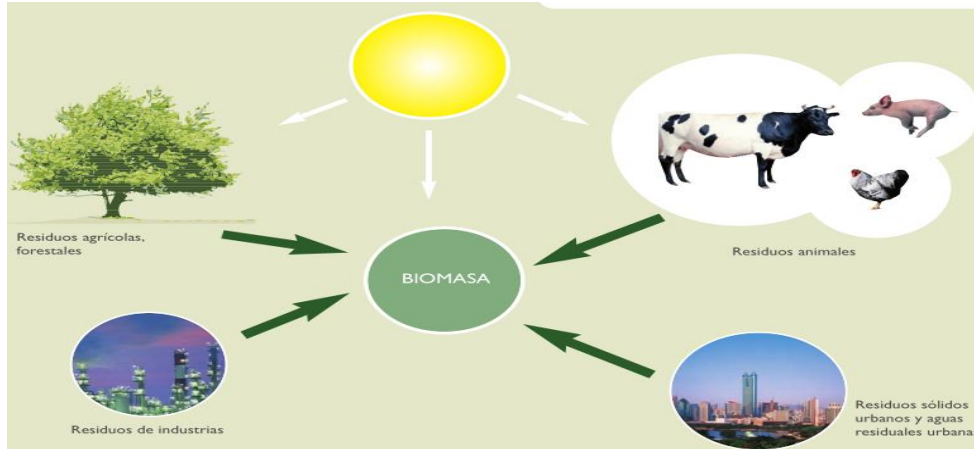


Ilustración 9. Aprovechamiento de la Biomasa (Schallenberg, 2008)

La expresión “biomasa lignocelulósica” es comúnmente empleada para describir residuos que contienen celulosa, hemicelulosa y lignina en su constitución química. Otros materiales como los aceites vegetales, semillas y vegetales; por ejemplo, se incluyen en la categoría de carbohidratos. El término biomasa también incluye gases y líquidos producidos durante la descomposición de materiales orgánicos biodegradables (Basu, 2010).

La biomasa, principalmente en forma de madera, es la fuente de energía más antigua usada por el ser humano y ha sido desde siempre un importante material de construcción para viviendas, embarcaciones, armas, herramientas o utensilios. Su amplio, y hasta excesivo uso, tuvo repercusiones sociales y ambientales importantes en el transcurso del desarrollo de varias sociedades.

La falta de madera debido a la sobreexplotación, por ejemplo, en Japón, ocasionó en siglos pasados disputas entre ciudades, interrupción de construcciones y regulación severa del uso de la madera. La deforestación en suelos ocupados por la cultura Maya ocasionó aparentemente intensa erosión y ha sido considerada una de las causas para el colapso de esta cultura. La sociedad europea, especialmente en el norte, ha experimentado también épocas de severa escasez de madera, debido a la sobreexplotación (Diamond, 2005).

El aprovechamiento de la leña (madera) fue generalizado, hasta inicios del siglo XX, como combustible tanto en países desarrollados como en desarrollo. En países desarrollados, la madera, a través del proceso de pirólisis, proveía de carbón vegetal que era usado en diversos procesos industriales como la metalurgia.



Los beneficios que pueden resultar del uso de la biomasa son varios desde una óptica social, ambiental y económica. Las instalaciones para aprovechar la biomasa requieren ser ubicadas normalmente cerca de las fuentes de generación/producción, o sea, en el campo. Este aspecto beneficia a las áreas rurales mediante la generación de empleo para el cultivo, recolección, pretratamiento y

uso de la biomasa. Los beneficios ambientales de su uso son ampliamente aceptados, y hay consenso respecto a la potencial disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero que resultarían al consumirse biomasa en sustitución de fuentes fósiles de energía (Barragán y Espinoza, 2015).

El uso de la biomasa para la producción de energía persigue normalmente obtener combustibles: líquidos (etanol, biodiesel, metanol, aceite de pirólisis, aceite vegetal, gasolina verde), sólidos (carbón vegetal, biomasa torreficada), o gaseosos (biogás, metano, gas sintético obtenido mediante gasificación) (Basu, 2010).

La biomasa lignocelulósica es con frecuencia considerada neutral en las emisiones de CO₂, debido a que las emisiones de CO₂ producidas en su combustión son aprovechadas para el crecimiento de las plantas durante la fotosíntesis.



Ecuador es un país netamente agrícola, posee una gran cantidad de biomasa proveniente de los recursos agrícolas, forestales y pecuarios (ilustración 10). Los principales productos, para la generación de energía, localizados en el sector agrícola, son: el arroz, banano, caña de azúcar, maíz, café, palma africana, plátano y piña. Por otro lado, en el sector pecuario son las actividades avícola, porcina y bovina. Sin embargo, informes del Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos (2013) reconocen que tal fuente de energía es poco explotada en el país y que existe una tendencia a la disminución de la participación de la biomasa (leña y derivados de la caña de azúcar) como fuente primaria.

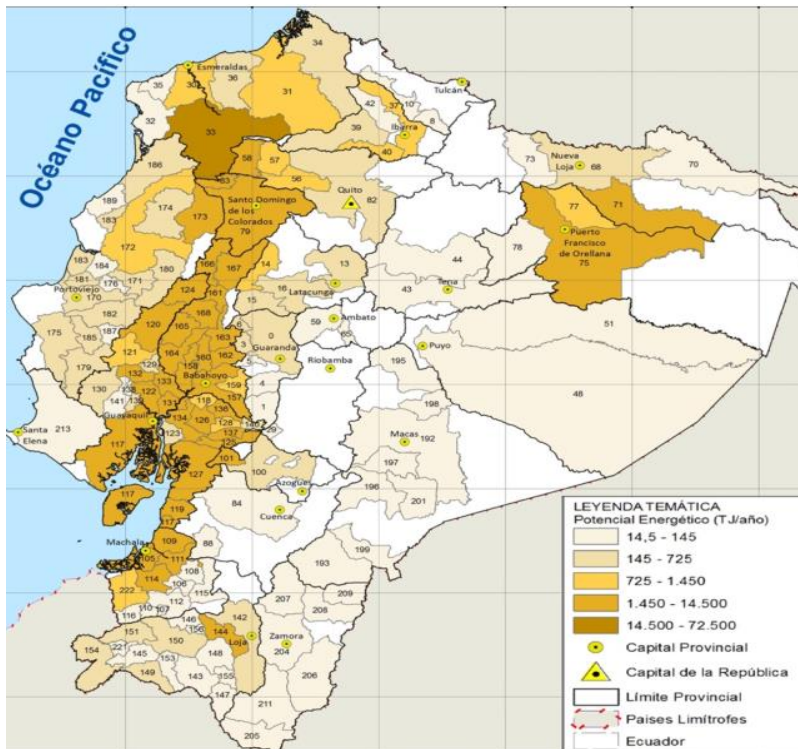


Ilustración 10. Mapa del potencial de biomasa en Ecuador (ATLAS Bioenergético del Ecuador, 2014)

En los últimos años, Ecuador ha incorporado sistemas de cogeneración mediante biomasa, los excesos de energía eléctrica se entregan a la red nacional de energía eléctrica. Hasta ahora el principal cultivo que se ha utilizado para la generación de energía eléctrica es la caña de azúcar en los ingenios azucareros que posee el país. Entre ellos resaltan Ecoelectric (36,5 MW), San Carlos (35 MW) y Escudos (29,8 MW) (Parra, 2018).

A pesar de que se han dado pasos importantes para incentivar el uso de la biomasa con fines energéticos, se requiere todavía de un arduo trabajo para conseguir una mayor participación de esta fuente de energía renovable en la matriz energética nacional. Diversos aspectos podrían ser responsables por el limitado uso de la biomasa en el país, en la actualidad. Entre ellos se pueden mencionar: a) competencia de otros combustibles que actualmente son baratos (bajos precios de gas licuado de petróleo–GLP, diésel y gasolina), b) falta de inventarios de disponibilidad y ubicación de biomasa, c) falta impulso a las tecnologías de transformación de la biomasa tanto para energía como para biomateriales, buscando diversificar la oferta de productos que se podrían elaborar en plantas industriales que ya usan biomasa de una u otra manera (por ejemplo, la adición de biopolímeros, aglomerados, pellets de madera para combustible, etc.), d) falta de capital. Estos factores requieren ser identificados de mejor manera para un adecuado apoyo del Estado a emprendimientos que involucren el uso de este recurso energético y/o para incentivar la inversión privada (Peláez y otros, 2015).

Vale significar que la biomasa que posee el Ecuador también puede desarrollarse para la generación de biocombustibles, desde el año 2010 se ha ido integrando

paulatinamente el biocombustible Ecopaís, en las gasolineras del país, con composición de un 5% de bioetanol y 95 % de gasolina de alto octanaje.

1.4. Biogás

El biogás tiene aprovechamientos térmicos y eléctricos a partir del tratamiento de cuatro tipos de residuos biodegradables, entre los que destacan los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) de los vertederos y los residuos industriales de algunas empresas (cerveceras, azucareras, lácteas y otras) (ilustración 11). Los otros dos tipos, procedentes de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) y los residuos ganaderos (especialmente purines) tienen aprovechamientos dispares.

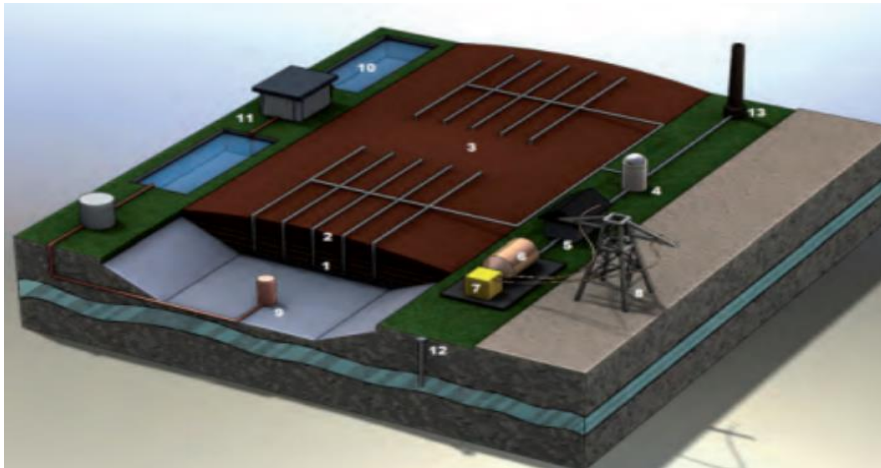


Ilustración 11. Componentes de una planta de biogás en rellenos sanitarios (Guía de usuario generación de electricidad mediante residuos sólidos urbanos)

Ecuador incursionó en la tecnología del biogás en el año de 1974, apoyado por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) y el Cuerpo de Paz de los EE.UU. En el año 1979 se creó el Instituto Nacional de Energía (INE) que en el año de 1980 incursionó en un programa nacional de capacitación y difusión sobre la tecnología de biodigestores (Marchaim, 1992).

El programa sobre biodigestores encabezado por el INE tuvo en la Escuela Superior Politécnica del Litoral–ESPOL un aliado sumamente importante, con quien inició investigaciones tanto en las provincias de Guayas, Manabí y Chimborazo. El INE construyó un biodigestor en Manabí (Rancho Ronald), el cual producía biogás para el funcionamiento de un generador de 2 kW. Mientras tanto, en 1982, investigadores de ESPOL diseñaron, construyeron y realizaron el seguimiento de un biodigestor ubicado en La Moya (Chimborazo) que en un principio produjo un volumen diario de 1.5 m³ de biogás.

Para 1988, Ecuador contaba con alrededor de 65 biodigestores, la mayoría del tipo Hindú, pero solamente 35 % en funcionamiento (Marchaim, 1992). El mayor problema encontrado fue el financiamiento para continuar con el mantenimiento de los biodigestores instalados. La década de los 90 fue una 'década perdida' para los biodigestores, tanto en Ecuador como en el resto de la región, debido principalmente a

que no se lograron cumplir las expectativas generadas con los proyectos de la década anterior.

Es en el 2002 que se tiene noticia de la instalación de los primeros biodigestores tubulares familiares en el valle de Intag (Imbabura) por parte de la Asociación de Campesinos Agroecológicos de Intag (ACAI), que en la actualidad se siguen instalando, y acumulan más de 80 sistemas (ilustración 12). Estos biodigestores entran en el concepto de low-cost digesters (digestores de bajo costo) (Peláez y otros, 2015).



Ilustración 12. Biodigestores tubulares funcionando por más de tres años en Turi (Azuay) y en Las Lajas (El Oro) (Peláez y otros, 2015)

En la actualidad se siguen instalando biodigestores tubulares de mayor variedad de tamaños, con diseños actualizados a los modelos desarrollados en Bolivia (Martí-Herrero y otros, 2014) e incluso cambiando el polietileno tubular por geomembrana de PVC. De este modo ya se están instalando sistemas de biodigestores tubulares en serie que permiten modular la tecnología para tratar residuos de granjas porcícolas medianas (aproximadamente 200 animales).

Biodigestores tecnificados que incorporan dispositivos de calefacción o agitación o fases de pre-tratamiento, también han sido implementados en Ecuador. En 2007 se instaló un biodigestor de laguna cubierta de 1300 m³ de volumen líquido, en provincia Cotopaxi, alimentado principalmente por estiércol de vaca en la hacienda de la empresa AGROGANA y diseñado por la empresa Aqualimpia.



Los biodigestores están entrando en la agenda del país, desde el ámbito del Estado, la investigación, el desarrollo y el surgimiento de proveedores de tecnologías de digestión anaerobia. Desde 2015, hay cuatro Ministerios del Gobierno involucrados en biodigestores, y cada uno con un enfoque complementario a los otros, de ahí que que están empezando a coordinar sus acciones. Los ministerios son: el Ministerio de

Electricidad y Energía Renovable, el Ministerio de Industrias y Productividad, el Ministerio de Agricultura y Ganadería y el Ministerio del Ambiente.

1.5. Energía geotérmica

La energía geotérmica es la energía debida al calor interno de la Tierra que se transmite por conducción hasta la superficie. La explotación de esta fuente de energía se realiza perforando el suelo y extrayendo el agua caliente. Si su temperatura es suficientemente alta, el agua saldrá en forma de vapor y se podrá aprovechar para accionar una turbina de vapor acoplada a un generador eléctrico, que producirá la energía eléctrica. El agua geotérmica utilizada es posteriormente devuelta a inyección al pozo hacia la reserva para ser recalentada, para mantener la presión y sustentar la reserva (León, 2012).

De acuerdo con Yajure y Guzmán (2017), el núcleo de la tierra puede alcanzar los 9.000 °F, este calor fluye fuera del núcleo, calentando el área circundante, lo cual puede crear reservorios subterráneos de agua caliente y vapor.

Según E. C. S.A hay tres métodos para producir energía eléctrica a partir de la energía geotérmica. El primero es llamado vapor seco y consiste en utilizar directamente el vapor geotérmico de 150 °C o más, para accionar las turbinas. El segundo es llamado vapor flash, en el cual el vapor de alta presión es empujado a un separador de baja presión donde crea un poderoso vapor flash, se requieren temperaturas geotérmicas naturales de 180 °C o superiores. El tercer es llamado ciclo binario y consiste en utilizar el calor del agua a bajas temperaturas, de alrededor de 57 °C, para generar vapor en un fluido secundario con un punto de ebullición bajo.

Las ventajas de la energía geotérmica se dan a continuación.

- Las plantas geotérmicas, como las eólicas o solares, no queman combustibles para producir vapor que gire las turbinas. La generación de electricidad con energía geotérmica ayuda a conservar los combustibles fósiles no renovables, y con el menor uso de estos combustibles, se reducen las emisiones que ensucian la atmósfera.
- El área de terreno requerido por las plantas geotérmicas por megavatio es menor que otro tipo de plantas.
- Las plantas geotérmicas están diseñadas para funcionar las 24 horas del día durante todo el año. La central geotérmica es resistente a las interrupciones de generación de energía debidas al tiempo, desastres naturales o acontecimientos políticos que puedan interrumpir el transporte de combustibles.
- Estas centrales pueden tener diseños modulares, con unidades adicionales instaladas en incremento, cuando sea necesario, debido a un crecimiento en la demanda de la electricidad.

Dentro de las desventajas de la energía geotérmica se mencionan las siguientes.

- Pueden desprender ciertas cantidades de sustancias contaminantes como el sulfuro de hidrógeno, arsénico y otros minerales.

- La contaminación también se puede producir a través del agua, por sólidos que se disuelven en ella y, finalmente, escurre con contenido de metales pesados como el mercurio.
- El costo medioambiental puede ser elevado si en las zonas donde se encuentran los puntos calientes se destruyen bosques u otros ecosistemas para instalar las plantas de energía.
- Estas energías que no se pueden transportar tienen como inconveniente que las centrales productoras de electricidad tienen que estar en el punto de localización de esa energía, que a veces está situado en lugares de interés natural, como son los parques naturales, etc.

Al ser el Ecuador un país de carácter vulcanológico, esto lo convierte en un lugar privilegiado a nivel global para alojar fuertes anomalías de flujo de calor terrestre, materia prima para el aprovechamiento de la energía geotérmica (ilustración 13). Estas anomalías se evidencian por la presencia de aproximadamente 40 volcanes activos, que representan un alto potencial energético.

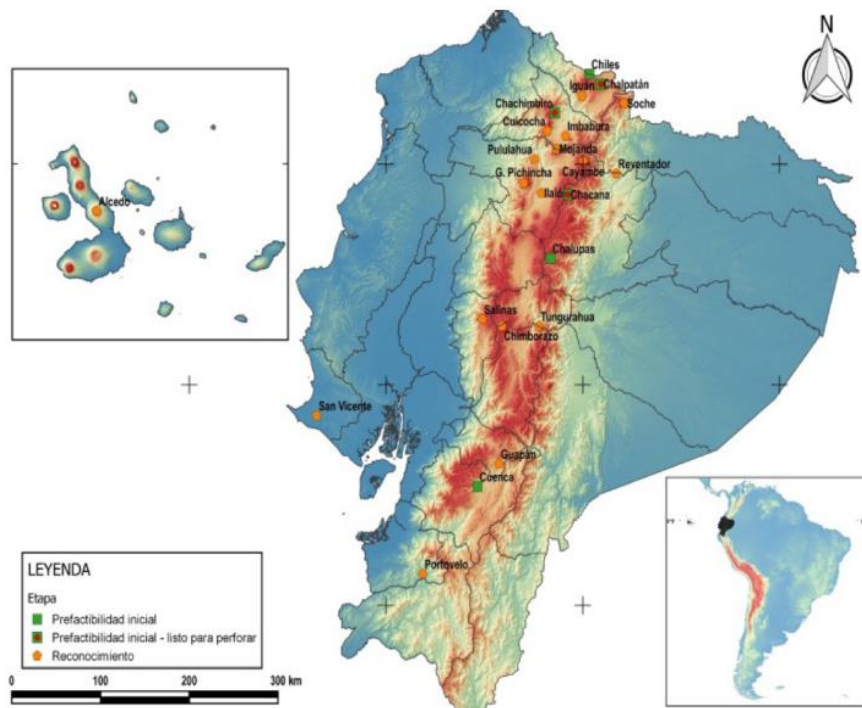


Ilustración 13. Mapa con ubicación de recursos energéticos para generación eléctrica mediante geotermia (Maya, 2015).

La exploración geotérmica en el Ecuador comenzó en 1978, a cargo del Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL). Su objetivo principal fue el aprovechamiento de los recursos geotérmicos de alta entalpía a lo largo, principalmente, de la región Sierra, y de esta forma complementar la generación hidroeléctrica.

Hacia finales del año 2009 e inicios del año 2010, el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable elaboró el Plan para el aprovechamiento de los recursos geotérmicos en el

Ecuador, en el que se presentaba un perfil de las principales áreas geotérmicas del país. Como resultado de este estudio se propuso una lista de prospectos geotérmicos, y se estableció el siguiente orden de prioridad.

- Cachimero (150 MW).
- Chalpatán (130 MW).
- Jamanca/Chacana (129 MW).
- Chalupas (50 MW).
- Cachiycu/Chacana (191 MW)
- Tufiño (138 MW)
- Oyacachi/Chacana (100 MW)
- Alcedo (150 MW)

En el año 2011, el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable orienta al CELEC EP, retomar los estudios de los proyectos geotérmicos. Adicionalmente, en el marco de un acuerdo binacional Ecuador-Colombia se firma un convenio específico con la Empresa de servicios pública mixta ISAGEN de Colombia, para desarrollar los estudios del Proyecto Geotérmico Binacional Tufiño–Chiles–Cerro Negro (Plan Maestro de Electrificación 2012-2021).

Después de transcurridos más de 35 años desde que INECEL realizó la primera evaluación preliminar de los recursos geotérmicos aptos para la generación eléctrica, en ninguna de las áreas prospectivamente interesantes se ha logrado pasar a la Fase de Factibilidad y, por consiguiente, se continúa solamente vislumbrando la existencia del recurso, básicamente en las mismas áreas identificadas en 1979, por el Estudio de Reconocimiento Geotérmico Nacional (Aguilera y Peláez, 2015).

1.6. Energía de los océanos

La reserva potencial energética del mar puede manifestarse de diferentes formas: energía mareomotriz y energía undimotriz. La energía marina o energía de los mares se refiere a la energía renovable producida por las olas del mar, las mareas, la salinidad y las diferencias de temperatura del océano. El movimiento del agua en los océanos del mundo crea un vasto almacén de energía cinética o energía en movimiento. Esta energía se puede aprovechar para generar electricidad que alimente las casas, el transporte y la industria.

La energía de las mareas o mareomotriz tiene lugar como consecuencia del aprovechamiento energético de la diferencia de cotas que se produce en un lugar adecuado entre la pleamar y la bajamar, similar a lo que tiene lugar en una central hidroeléctrica (Caballero, 2011).

Tanto la energía de las olas como las de las mareas no están exentas de problemas tecnológicos, derivados de la corrosión por el agua del mar y la resistencia de estructuras capaces de soportar procesos erosivos tan intensos, lo que dificulta enormemente su utilización. Además, los costos de mantenimiento son elevados, no hay que olvidar que este tipo de instalaciones requiere emplazamientos con oleajes constantes (León, 2012).

Los principales inconvenientes son la localización de lugares donde se produzca una diferencia de cotas lo suficientemente grande como para que la construcción de una instalación de este tipo sea rentable, así como la determinación del potencial existente que varía notablemente entre distintos lugares (Caballero, 2011).

1.7. Energía mareomotriz

La energía mareomotriz es la producida por el movimiento de las masas de agua provocado por las subidas y bajadas de las mareas, así como por las olas que se originan en la superficie del mar por la acción del viento (Grupo Interagencial de Desarrollo Rural, 2003).

Para su utilización, se requiere de la construcción de un dique para el almacenamiento del agua, cuyo movimiento puede hacer girar turbinas y así producir electricidad (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2015).

Este tipo de energía ha tomado fuerza en países como Francia, Canadá, Suiza, Reino Unido, Estados Unidos y China, en los cuales estos sistemas de producción de energía ya se encuentran en operación (ilustración 14) y con proyección de expansión.



Ilustración 14. Sistema SeaGen desarrollado por *Marine Current Turbines Ltd.*, Reino Unido, para producción de energía mareomotriz (Quintero y Quintero, 2015)

Estudios recientes sobre la obtención de energía eléctrica mediante mecanismos de explotación de fuentes de energía renovables han verificado los beneficios económicos, industriales, comerciales y ambientales que sistemas como el de la explotación de la energía mareomotriz traerían al desarrollo de los países (Kaya y Çanka Kiliç 2012).

Algunas investigaciones han avanzado en el aprovechamiento de corrientes de agua a través de la modelación de flujos rápidos (Vennell 2011) y la estimación de potencial energético mediante simulaciones aplicadas a las variables propias de los cursos de agua en diferentes partes del mundo (Walters y otros, 2013).

Sin embargo, el conocimiento de estos sistemas es escaso, particularmente respecto a sus beneficios ambientales en la reducción de la huella ecológica y su potencial energético. Lo anterior, sumado a otros aspectos de gran importancia como la inversión inicial y dependencia tecnológica han retrasado su progreso en países en vía de desarrollo que cuentan con potenciales de recurso mareomotriz. Esta situación pone en evidencia la necesidad de impulsar la investigación relacionada con la producción de energías limpias y nuevas tecnologías que actualmente se están desarrollando en el mundo. Como respuesta a esta problemática, este libro presenta una perspectiva del potencial energético de la energía mareomotriz y su impacto en el ambiente (Quintero y Quintero, 2015).

Como ventaja se indica que se trata de una fuente de energía limpia, sin residuos y casi inagotable. Por otro lado, sus desventajas radican en que solo pueden estar en zonas marítimas, pueden verse afectadas por desastres climatológicos, dependen de la amplitud de las mareas y las instalaciones son grandes y costosas (León, 2012).

Puede resumirse que la energía mareomotriz es una excelente alternativa para la producción de energía eléctrica con un moderado impacto ambiental dentro del medio de instalación que, por supuesto, debe controlarse para poder garantizar su condición de sostenibilidad (Quintero y Quintero, 2015).

Un estudio exploratorio realizado por Guamán, Espinoza y Ribeiro (2017) sobre la integración de la energía del mar en la matriz energética del Ecuador, demostró que existe potencial energético en la sección de océano perteneciente al Ecuador (ilustración 15).

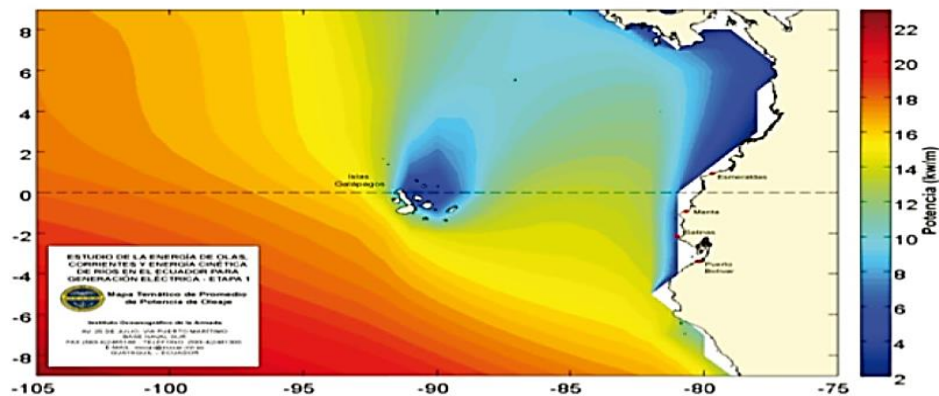


Ilustración 15. Área de estudios marinos para determinar el potencial energético (Instituto Nacional de Preinversión, 2013)

Es factible un proyecto de generación de electricidad de al menos 20 MW, a partir de la corriente de Cromwell, pues los parámetros técnico-económicos así lo indican. De esta forma, la energía del mar se convierte en una vía adicional hacia el objetivo nacional de contar con una matriz de generación de electricidad más limpia. No existe un estudio similar en el país, pero este puede ser el inicio en este sentido.

Además, la presencia de la corriente marina en el eje ecuatorial involucra energéticamente a las Islas Galápagos, específicamente a la Isla Isabela. Sin embargo,

en consideración de dos factores, se concluye que todavía no se puede desarrollar proyectos energéticos en esta región ecuatoriana. El primero, es el impacto ambiental que se generaría durante la instalación en esta zona de alta diversidad ecosistémica a nivel mundial. El segundo, es que la demanda energética de la zona urbana de la isla además de ser pequeña dista considerablemente del sector donde se podría implementar un proyecto energético marino y los gastos en transmisión de energía incrementarían los costos de este.

1.8. Energía undimotriz

La energía undimotriz, o energía olamotriz, es la energía generada por el movimiento de las olas. Es menos conocida y extendida que otros tipos de energía marina, como la mareomotriz, pero cada vez se aplica más (Grupo Interagencial de Desarrollo Rural, 2003).

La energía undimotriz es, de todos los tipos de energía marina, la que se encuentra actualmente en una fase de avance y desarrollo más importante, y prueba bien evidente de esto es la cantidad de tecnologías y patentes existentes, siendo las más destacadas la columna de agua oscilante (*Oscilating Water Column*, OWC) (ilustración 16), el PELAMIS (ilustración 17) y el *PowerBuoy* (ilustración 18).

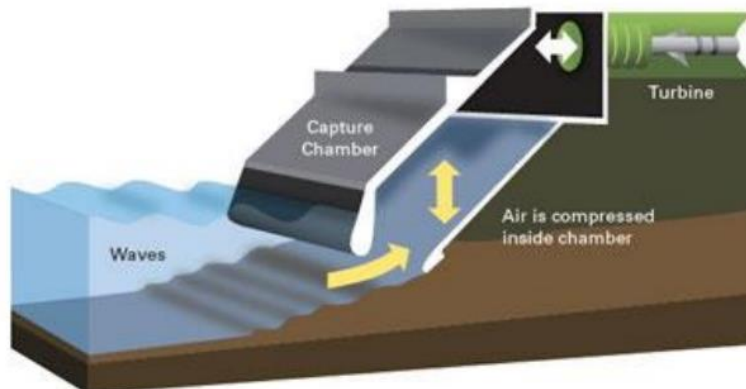


Ilustración 16. Funcionamiento de la tecnología de OWC (www.news.soliclima.com)



Ilustración 17. Aspecto de la tecnología PELAMIS en pleno funcionamiento (www.pelamiswave.com)



Ilustración 18. *PowerBuoy* instalada en Cantabria por un consorcio liderado por IBERDROLA Renovables (Caballero, 2011)

Las ventajas de la energía undimotriz se ofrecen a continuación.

- Es una fuente de energía renovable que se encuentra disponible todo el año.
- Es una buena opción para aquellas zonas en las que no llega el suministro convencional.
- Es una energía que no genera emisiones de gases contaminantes.
- La producción de energía a partir de las olas se genera en mayor cantidad en invierno que en verano, ya que es en esa estación cuando mayor inestabilidad atmosférica hay, y es precisamente también en invierno cuando mayor consumo de energía eléctrica se tiene.

- Es una energía renovable muy concentrada y con gran intensidad energética, lo que permite generar la misma energía eléctrica que con un aerogenerador, pero con un tamaño de dispositivo muy inferior.
- La generación de impactos ambientales del tipo visual es inferior si se compara con otras energías renovables como la eólica *off-shore*. En impactos ambientales sonoros no hay que hacer prácticamente reseña, con la particularidad de si se instalan *off-shore*, la afección a la población en el caso de que sí lo fuera, sería prácticamente nula.
- Al igual que otras energías renovables, el aprovechamiento de un recurso autóctono favorecerá una disminución de la dependencia energética del exterior, con lo que generaría ventajas desde un punto de vista económico.
- El potencial existente en el mundo de esta energía renovable es muy elevado y se encuentra prácticamente sin explotar, por lo que el camino que queda por recorrer hasta alcanzar unos adecuados niveles de potencia instalada es todavía muy largo, lo que pudiera reportar suculentos beneficios para aquellas empresas que estén dispuestas a introducirse en este negocio.
- Forma arrecifes coralinos mejorando fauna y flora.
- No desplaza población.

Las desventajas de la energía undimotriz se ofrecen a continuación.

- El alto costo económico de la inversión inicial hace que haya reticencias por parte de inversores.
- Su utilización se limita a zonas costeras o próximas a la costa, por lo que la evacuación de la energía eléctrica producida puede tener problemas por la falta de capacidad de las redes que se encuentren próximas a la costa.
- Se ha de disponer de mucho espacio para albergar las enormes turbinas, lo cual involucra un impacto ecológico sobre los ecosistemas, habitualmente costeros.
- La tecnología se encuentra todavía en una fase inicial de desarrollo, por lo que es necesario que se desarrollen programas ambiciosos de I+D+i.

En Ecuador, en un estudio realizado por Rodríguez y Chimbo (2017) a partir de la información adquirida de la base de datos disponibles del Inocar, se realizaron los cálculos necesarios para obtener el potencial energético de los mares, y se alcanzó un potencial energético muy bueno. En la ilustración 19 se muestra el área correspondiente al perfil costanero donde se analizó la potencia en KW/m. Se aprecia un contenido energético del oleaje en el territorio ecuatoriano, el cual tiene un valor de 14 KW/m promedio de potencia. Dado que las velocidades de las olas en la costa ecuatoriana no superan el 1 m/s, las zonas con mayor velocidad están en las provincias del Guayas y El Oro con registros máximos de 3 a 4 m/s (Berumen & Llamazares, 2007).

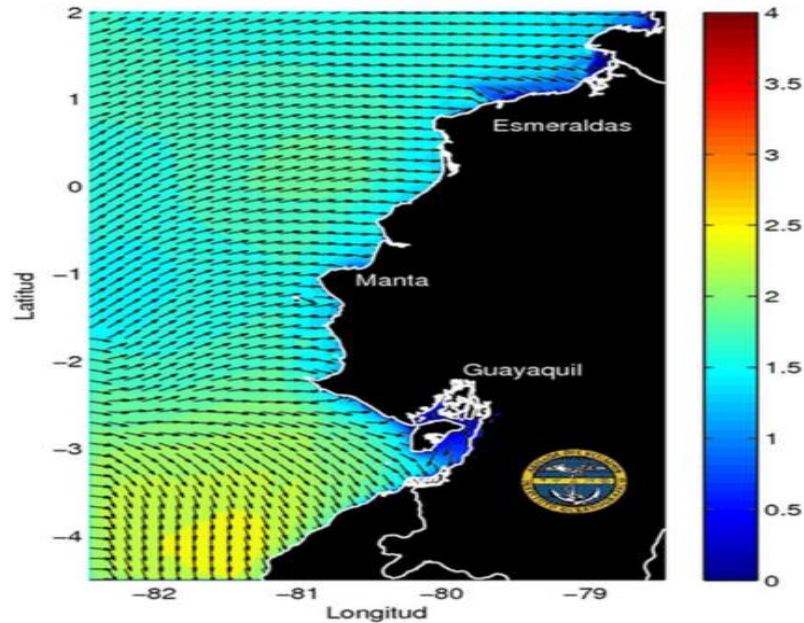


Ilustración 19. Modelo de operación Inocar-SWAM altura de oleaje (Rodríguez y Chimbo, 2017)

En los estudios y cálculos realizados sobre el potencial energético del mar ecuatoriano, se llegó a la conclusión que tiene un gran potencial. Se tendría que realizar un estudio de mercado y analizar su costo-beneficio para conocer si es conveniente o no su aplicación. Los cálculos realizados determinaron que la potencia por metro de frente de ola promedio en el Ecuador es 90,31 KW, aunque esta distribución dista mucho de ser igualitaria, ya que las costas existentes en el Ecuador tienden a tener diferentes potenciales (Rodríguez y Chimbo, 2017).

1.9. Energía eólica

La energía eólica se aprovecha mediante la transformación de la energía cinética del viento en energía eléctrica a través de aerogeneradores. Se utiliza una hélice para transmitir el movimiento que el viento produce en sus palas al rotor de un alternador. Cuando una instalación eólica necesita producir electricidad para verter a la red de distribución se agrupan varios aerogeneradores, y dan lugar a los denominados parques eólicos. Si su objetivo es suministrar electricidad a puntos de consumo aislados (viviendas dispersas, granjas, explotaciones agrícolas, etc.) se utilizan equipos de pequeña potencia, en general de varias decenas de kilovatios (kW) (Espejo, 2006).

La energía eólica para que pueda ser utilizada con cierta eficacia en una zona determinada, las características del viento deben cumplir una serie de condiciones relativas a velocidad, continuidad, estabilidad, etc. Un dato de gran importancia al



respecto es la densidad de potencia del viento, es decir, el valor máximo de la potencia que se puede conseguir por cada unidad de área barrida por el viento. En concreto, por debajo de los 50 vatios/m² no tiene interés el emplazamiento de instalaciones eólicas; y solo por encima de los 200 vatios/m² comienzan a resultar auténticamente rentables. Aun así hay que tener en cuenta que hacen falta densidades de potencia del viento superiores a 1.000 vatios/m² para que los aerogeneradores tengan un rendimiento aceptable (Unesa, 1998).

La energía eólica es una opción limpia, pero la instalación de un parque eólico genera un impacto ambiental que es preciso evaluar de acuerdo con las condiciones del entorno, tanto físico como social, con el fin de introducir las medidas correctoras oportunas. Existe un amplio consenso en nuestra sociedad sobre la coexistencia de las instalaciones eólicas y los entornos en los que se asientan, si bien se producen determinados impactos derivados del aprovechamiento de la energía eólica que no se deben obviar (Espejo, 2006).

A continuación se relacionan los impactos de la energía eólica sobre el medio ambiente, según estudios de la Asociación Española de la Industria Eléctrica (2001).

- Sobre el entorno, los aerogeneradores eléctricos no producen emisiones contaminantes (atmosféricas, residuos, vertidos líquidos) y, por tanto, no contribuyen al efecto invernadero. No obstante, tienen consecuencias medioambientales que dependen fundamentalmente del emplazamiento elegido para su instalación, de su tamaño y de su distancia respecto a zonas de concentración de población. Una instalación eólica de gran tamaño produce alteraciones en el medio físico (impacto visual, sobre las aves, ruido y erosión), y en el medio socioeconómico. Las primeras afectan solo a la superficie ocupada y zonas colindantes. El impacto sobre las aves es pequeño y de tipo fundamentalmente indirecto: posibles colisiones con líneas aéreas y con torres soportes de cables. De hecho, la colisión no suele producirse contra los aerogeneradores, porque las aves se acostumbran rápidamente a su existencia y a su movimiento, e incluso las migratorias desvían su trayectoria cuando el parque eólico se encuentra en la dirección de su vuelo.
- Los elementos característicos de una instalación eólica que producen impacto visual son los aerogeneradores, la caseta, las líneas eléctricas y los accesos a la instalación. Para evitarlo en la medida de lo posible, suelen emplearse colores adecuados, una inserción apropiada de las instalaciones en la orografía del lugar y una cuidada distribución de los aerogeneradores. En relación con los accesos, se evita al máximo el movimiento de tierras, y se recupera inmediatamente la cubierta vegetal afectada al autorizar el paso únicamente al personal de las instalaciones. Por otro lado, el impacto visual de estas instalaciones depende de criterios subjetivos: mientras que un parque de unos pocos aerogeneradores puede llegar a ser incluso atractivo, una gran concentración de máquinas plantea problemas mayores.
- En cuanto al efecto sonoro, un aerogenerador produce un ruido similar al de cualquier otro equipamiento industrial de la misma potencia, con la diferencia de que, mientras los equipos convencionales se encuentran normalmente encerrados en edificios o compartimentos diseñados para minimizar su nivel sonoro, los

aerogeneradores deben trabajar al aire libre y cuentan con un elemento transmisor del sonido que es el propio viento.

- En relación con los impactos por erosión, la mayor incidencia se produce por el movimiento de tierras en la preparación de los accesos al parque eólico. Esta incidencia se puede reducir mediante estudios de trazado y perfiles transversales del camino, así como análisis de impacto sobre la vegetación de las vaguadas y cursos de agua.

Estas energías pueden ser muy variables, en el Ecuador las energías solares se pueden explotar en ciertos sitios, dependiendo de las condiciones geográficas, su capacidad instalada actualmente es menos del 1%, por lo tanto, se catalogan como complemento de la explotación de energías principales (Castro, 2011).

La energía eólica también proviene del sol, debido a que los cambios de temperatura ocasionados por la radiación solar producen movimiento en el aire y provocan el viento, el cual ayuda a mover generadores que producen energía (Fider, 2011).

Los vientos que prevalecen sobre el Ecuador son los vientos alisios, los cuales son vientos que fluyen con velocidad y dirección relativamente constante, estos provienen del Este y, por tanto, se dirigen hacia el país después de cruzar todo el continente. Ello hace que el viento horizontal a mayor escala sea bastante tenue en todo el continente (MEER, 2013).

De forma general, la orografía del Ecuador divide el territorio en cuatro regiones climáticas bien definidas, que le dan características propias. Esto hace que los vientos existentes sean principalmente locales. De Este a Oeste, las regiones son las siguientes (Ordoñez y Luna, 2019).

- La Región Oriental o Amazónica, donde la abundante vegetación de la selva tiene una influencia determinante en la reducción de la velocidad de los vientos alisios, en aquellos sitios más cercanos al suelo.
- La Región Sierra, donde los Andes presionan los vientos, y resulta una acentuación de estos debido al efecto Venturi. Sin embargo, estos vientos abundantes se encuentran en lugares muy altos, en los que además de la difícil accesibilidad, la energía eólica se reduce al mismo tiempo que se reduce la densidad en función de la altitud.
- La Región Costera donde los vientos alisios del Este interactúan con dos corrientes locales: la brisa propiciada por el cambio de la temperatura del continente y del océano, y el flujo de aire de los valles montañosos ocasionado por la presencia e incidencia de la Cordillera de los Andes. La interacción del viento global con el local, da lugar en este escenario a una mayor variación geográfica del recurso y a la ubicación de ciertas regiones con velocidades algo mayores a las del medio.
- Las Islas Galápagos que combinan tres importantes cualidades para comprender su distribución eólica: son islas, son volcanes y están bajo la acción de los vientos alisios. Por el hecho de ser islas, reciben un viento global menos agitado que en el continente; no obstante, los vientos alisios en esta latitud baja son de intensidad.

Según artículo publicado en bnamericas.com (2017), el potencial bruto estimado de las energías renovables no convencionales en el país es de 1.670MW, con un potencial

factible a corto plazo de 884MW, de acuerdo con el atlas Eólico del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (ilustración 20).

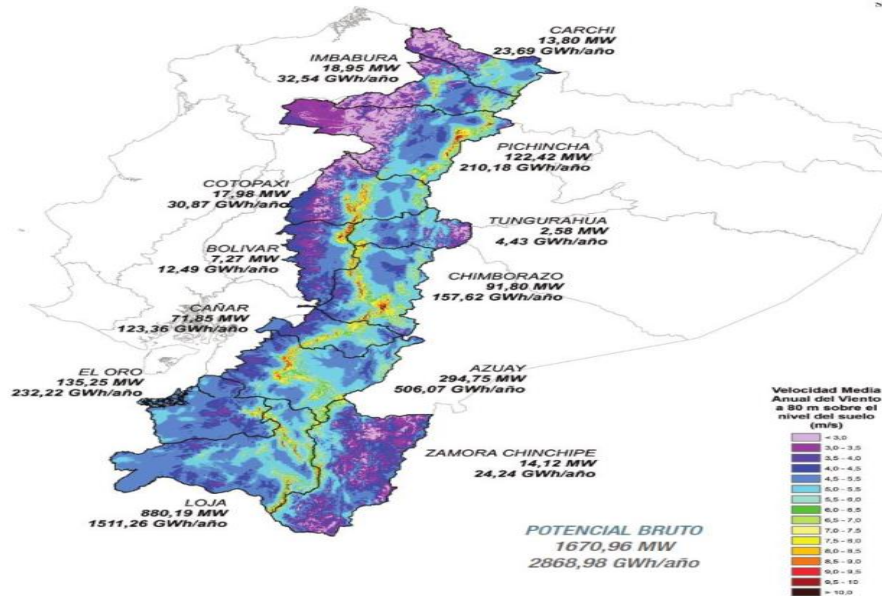


Ilustración 20. Potencial eólico bruto del Ecuador (bnamericas.com, 2017)

San Cristóbal, Baltra y Loja son algunas de las ciudades más reconocidas para los proyectos de energía eólica. En la provincia de Loja se sitúa uno de los proyectos más emblemáticos de energía eólica llamado Parque Eólico Villonaco, que se encuentra ubicado a una altura aproximada de 2.720 metros. Este proyecto ayuda a reducir anualmente en 35 mil toneladas las emisiones de CO₂ (Corporación Eléctrica del Ecuador, 2014). El equivalente de esta generación de energía podría abastecer hasta a 150 mil viviendas ecuatorianas (MEER, 2013).

1.10. Políticas para el incentivo del uso de las energías renovables en el Ecuador

El término energía renovable no había sido notorio como lo es actualmente en Ecuador, esto se debe a la preocupación nacional y mundial que trae el calentamiento global. Se define como un fenómeno producido por el aumento de la temperatura del planeta; a este fenómeno se le atribuye innumerables causantes, entre estas: las actividades humanas y el aumento de la demanda en combustibles fósiles, su utilización es una de las diez amenazas más importantes para la salud pública mundial (Organización Mundial de la Salud, 2007).

La sustentabilidad es otro término que se ha convertido en un tema muy discutido, los expertos han anunciado continuamente descubrimientos que señalan que el planeta cada vez experimenta un aumento de temperaturas comparadas con las tres décadas anteriores, y produce anomalías que se han observado año tras año. A consecuencia de estos hallazgos, se siguen buscando nuevas opciones para desacelerar este proceso de calentamiento (Hansen, Sato, & Ruedy, 2012).

En Ecuador, se han venido elaborando nuevos estudios con el paso de los años, con la finalidad de encontrar nuevas alternativas de disminución del consumo de

combustibles, y remplazarlo mediante la utilización de la energía que se encuentra en los recursos naturales que brinda el planeta. Entre ellos la radiación solar, las mareas, el viento y la energía hidroeléctrica. Estos recursos son considerados inagotables debido a su regeneración continua (ilustración 21).

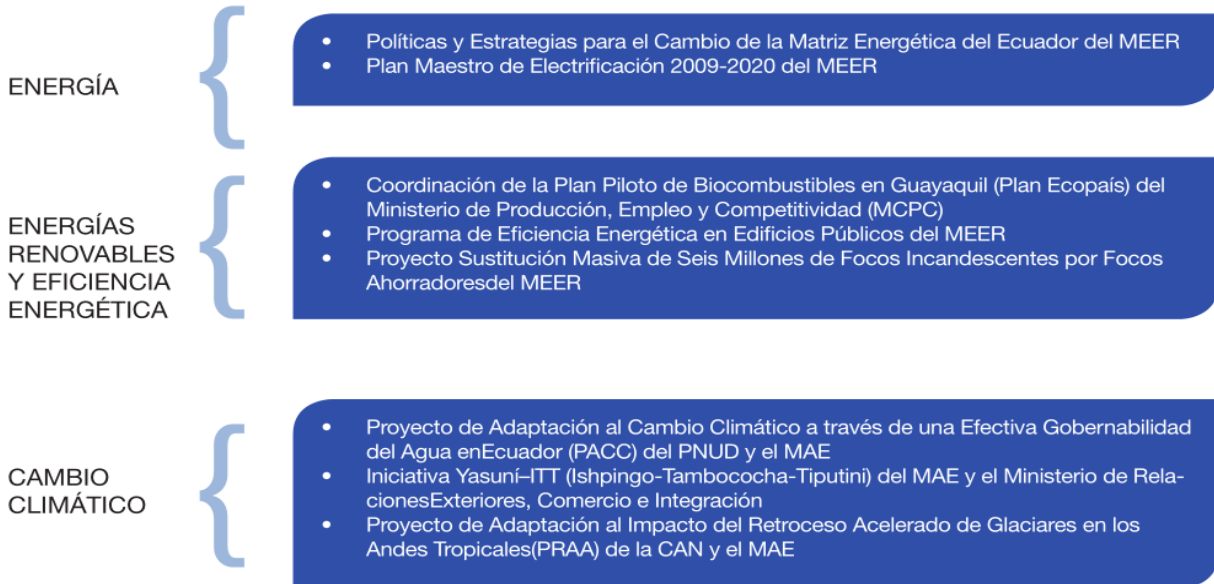


Ilustración 21. Planes y programas relacionados con energía renovable en Ecuador (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2014)

Por esta ventaja, el Gobierno del Ecuador se encuentra suscitando un vuelco importante hacia el cambio de la Matriz Energética y Productiva del país, y motivando a la población a pensar en una sostenibilidad ambiental, global y territorial como lo expresa en el Plan Nacional para el Buen Vivir (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2013).

En los últimos años el Ecuador se ha enfocado hacia la generación de energía por medio del uso de fuentes y recursos tradicionales; las más dominantes son el petróleo, la hidroelectricidad y la biomasa. A medida que el país se ha ido modernizando, los porcentajes entre estas tres fuentes han ido cambiando, y ocasionan la necesidad de renovar la matriz energética del país, mediante nuevas alternativas de generación, como complemento o como fuentes primarias, basadas en recursos renovables y mecanismos de desarrollo limpio, como la generación hídrica, solar y eólica (Castro, 2011).

Esta necesidad de optar por nuevas fuentes de energías en el país se basa en tres factores que son muy importantes para el Gobierno Nacional (Castro, 2011).

- Crecimiento progresivo del consumo de combustibles fósiles generando gases de invernadero y otros contaminantes al medio ambiente.
- Las tasas de producción de petróleo han ido decayendo con el paso del tiempo.
- La seguridad energética y, a su vez, la reducción de costos y riesgos.

Estos factores son los pilares fundamentales para una proyección que busca plantear la promulgación de política, planes y proyectos estratégicos que motiven a la utilización responsable de las energías sustentables que aprovechen los recursos y la gran diversidad climática que tiene el Ecuador, un país con potencial para la explotación de sus recursos de manera eficiente y limpia, lo que contribuye a los esfuerzos globales de mitigación del cambio ambiental (Subsecretaría de Energía Renovable y Eficiencia Energética, 2014).

La ubicación geográfica, la variedad de climas que tiene Ecuador, el avance tecnológico, el crecimiento de la población y viviendas, hace que se convierta en ineludible la explotación de los recursos naturales renovables, con el objetivo de garantizar el abastecimiento de energía a la demanda actual y futura en un corto y largo plazo (Chiliquina & Rosero, 2011).

Debido a esta diversidad, el mercado energético en el país se encuentra regulado por distintas instituciones en función del sector específico. Entre estas: el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER), Ministerio de Recursos Naturales no Renovables (MRNR), Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC), Centro Nacional de Control de Energías (CENACE), Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC), Corporación Nacional de Electricidad. Estas instituciones se encargan del control, la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica a todos los puntos del país.

La participación de las energías renovables en la matriz energética del Ecuador considera los siguientes aspectos. La generación de electricidad, a través del aprovechamiento de recursos naturales en proyectos hidroeléctricos, eólicos, biomasa (con-generación) y solares (fotovoltaicos). La obtención de gas combustible (biogás), utiliza residuos orgánicos producidos por la agroindustria. El uso de biocombustibles para el transporte, a través de la sustitución parcial del consumo de la gasolina extra con etanol (proyecto piloto en la ciudad de Guayaquil). El calentamiento de agua con energía solar, para reemplazar el uso de electricidad o de gas licuado de petróleo (Álvarez y otros, 2016).

La matriz eléctrica ecuatoriana tiene una estructura en la que predomina la energía hidráulica con 2,400.94 MW de capacidad efectiva de generación, lo cual representa el 43.51% de la capacidad nacional de energías renovables, seguida de la energía turbo vapor cuyo combustible es la Biomasa con 136.40 MW con el 2.47% de la capacidad nacional, los recursos de energía eólica con 21.15 MW, con el 0.38% de la producción nacional y la energía fotovoltaica con 26.37 MW que representa el 0.48% de la capacidad nacional (CONELEC, 2015).

Cuando un país como el Ecuador no ha explotado convenientemente sus recursos energéticos, a pesar de tener el potencial para ello, se requiere un replanteamiento de la política energética y una reestructuración o cambio de la denominada matriz energética (eléctrica) (Urgilés, Chávez y Espinoza, 2015).

El punto de partida para la reestructuración energética es la voluntad política para hacerlo, la cual surge de la necesidad de un replanteamiento estratégico del desarrollo del sector energético, en general, y del eléctrico, en particular. Voluntad que se ha materializado con el inicio de la construcción de los proyectos hidroeléctricos

destacados en apartados anteriores; así como, con la declaración de operación comercial del proyecto Paute-Mazar el 30 de diciembre del año 2010.

El Ecuador, a través del Centro Nacional de Control de Energía CENACE y del CONELEC, estudia y analiza de manera permanente la demanda de energía eléctrica en el país y su proyección, con la finalidad de planificar la expansión de la generación. La tendencia de la variación de la demanda dependerá de los requerimientos de la matriz industrial de un país.

El desarrollo de las políticas energéticas que se establezcan para el impulso de las ER depende principalmente de la estructura del sector eléctrico. Así, en forma general se han implementado dos grandes modelos: uno vertical y otro de libre mercado, también conocidos como sistemas regulados y sistemas no regulados (Hernández, 2005; Singh & Sood, 2008).

En el primer caso se tiene un modelo monopólico, en donde el precio de la electricidad es fuertemente supervisado por el Estado. Mientras que, en el segundo caso, el precio está dado por un mercado abierto en competencia (Komor, 2004). El segundo modelo ha sido la tendencia en las últimas dos décadas alrededor del mundo. Ecuador, a partir de 1996, intentó consolidar dicho modelo, separando la generación, transmisión, distribución y comercialización y propiciando un proceso de privatización del sector eléctrico.

A partir del año 2008, cuando se expide la Constitución de la República, y sobre todo, debido a que los objetivos planteados en la adopción de un modelo de mercado no se cumplieron, se regresó a un modelo público de empresas generadoras, distribuidoras y una de transmisión, controladas por un regulador y operador también estatales. El actual modelo en el Ecuador, además, establece a todas las formas de energía como sectores estratégicos, y en el caso de la energía eléctrica, el Estado es responsable de su provisión (Barragán y Espinoza, 2015).

En particular, una política energética es una política sectorial de la política socio-económica, a largo plazo, de un país (CEPAL, OLADE, & GTZ, 2000). El debate para la promoción de las energías renovables se ha centrado en identificar los instrumentos más efectivos que permitan incrementar su penetración y, puesto que los costos asociados a la producción de energía renovable son generalmente más altos que la que proviene de recursos fósiles, sea cual sea el instrumento elegido, “alguien” deberá pagar un costo extra (Longo, Markandya, & Petrucci, 2007). Se puede incluso desarrollar modelos de políticas dependiendo del tipo de tecnología, su etapa de desarrollo (prueba, diseño y penetración), costos, rendimiento u otras características.

La participación de las energías renovables en la matriz energética del Ecuador considera los siguientes aspectos: a) generación de electricidad, a través del aprovechamiento de recursos naturales en proyectos hidroeléctricos, eólicos, biomasa (con-generación) y solares (fotovoltaicos); b) obtención de gas combustible (biogás), utiliza residuos orgánicos producidos por la agroindustria; c) uso de biocombustibles para el transporte, a través de la sustitución parcial del consumo de la gasolina extra con etanol (proyecto piloto en la ciudad de Guayaquil); d) calentamiento de agua con energía solar, para reemplazar el uso de electricidad o de gas licuado de petróleo (ONUDI, 2011).

Sobre el marco institucional, el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) es el responsable de diseñar y ejecutar programas de desarrollo de energías renovables. El Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC) es el encargado de la regulación del sector eléctrico, aprueba las concesiones para el aprovechamiento de los recursos energéticos renovables y establece el precio de estas energías. En el caso de los biocombustibles, el Ministerio de Coordinación de la Producción, Empleo y Competitividad (MCPEC) es la entidad coordinadora de la promoción a nivel productivo mediante el Consejo Nacional de Biocombustibles.

El plan estratégico del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable se constituye en el principal insumo orientador de la gestión institucional y sectorial, al cual se articulan las empresas e instituciones del sector eléctrico en un proceso coordinado, para la realización de estudios, análisis de factibilidad, evaluación de alternativas, ingeniería de detalle, definición del financiamiento y el seguimiento a la construcción de grandes proyectos que permiten reorientar la matriz energética del país, hacia el autoabastecimiento de electricidad, la exportación de energía eléctrica a nivel regional y el cambio de la matriz productiva (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable de Ecuador, 2014).

En el Ecuador se han incorporado varias políticas para fomentar el uso de las energías renovables no convencionales. En la Constitución de la República de 1998, ya se establecía que el Estado promoverá su uso, mientras que, en la Constitución del 2008, se afianza este principio y se incorpora el concepto de eficiencia energética.

“Artículo 15.- El Estado promueve en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto. La soberanía energética no se alcanza en detrimento de la soberanía alimentaria, ni afecta el derecho al agua” (Constitución de la República, 2008).

Los objetivos nacionales en cuanto a las ER han sido establecidos por instituciones públicas, tales como el Ministerio de Electricidad, el CONELEC, o por la Secretaría Nacional de Planificación. El Ministerio de Electricidad, en el año 2008, publicó su informe sobre la Matriz Energética, en el cual se estipuló que para el 2020, el Ecuador, debía contar con un 2 % de tecnologías renovables no convencionales (1 %, solar y/o eólica, 1 % biomasa).

Los objetivos a mediano plazo se han ido modificando en función de lo establecido en los Planes Nacionales de Desarrollo. Por ejemplo, el “Plan Nacional del Buen Vivir 2013–2017” (SENPLADES, 2013). Se prevé que para el año 2030, la oferta de electricidad (básicamente hidroeléctrica a gran escala) se complemente con pequeños proyectos de generación de energía con fuentes renovables como la fotovoltaica, eólica, biomasa y la hidroelectricidad, en zonas cercanas a los consumidores.

1.11. Hitos de los mecanismos de promoción de las energías renovables en el Ecuador

Ley de Régimen del Sector Eléctrico (1996)

Fomenta el desarrollo y uso de los recursos energéticos no convencionales a través de los organismos públicos, las universidades y las instituciones privadas. Se indica la

exoneración del pago de aranceles, demás impuestos adicionales y gravámenes que afecten a la importación de materiales y equipos no producidos en el país para la investigación, producción, fabricación e instalación de sistemas destinados a la utilización de energía solar, eólica, geotérmica, biomasa y otras.

Se estipula la exoneración del pago de impuesto sobre la renta, durante cinco años a partir de su instalación, a las empresas que, con su inversión, instalen y operen centrales de producción de electricidad usando los recursos energéticos no convencionales señalados anteriormente.

Se expide el Reglamento General de la Ley de Régimen del Sector Eléctrico (R.O. No. 182, 4 de diciembre de 1996) que indica que se debe promocionar los recursos energéticos locales, tales como micro y minicentrales hidroeléctricas y nuevas fuentes de energías renovables.

Se modifica totalmente la estructura del Sector Eléctrico Ecuatoriano, de manera que las actividades que antes eran realizadas por el INECEL, se designan a otras entidades.

Constitución de la República R.O. No. 442, 20 de octubre de 1998

Indica que el Estado tomará medidas con el fin de promover, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes.

Reglamento para la administración del Fondo de Electrificación Rural y Urbano Marginal (FERUM) R.O. No. 373, 31 de julio de 1998

Establece las pautas y condiciones para la administración de fondos dirigidos a la construcción de obras nuevas, ampliación y mejoramiento de sistemas de distribución en sectores rurales o urbano-marginales, o para construcción de sistemas de generación que utilicen energías renovables no convencionales.

Ecuador ratifica el Protocolo de Kyoto, enero de 2000

Tiene como objetivo reducir seis gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global. Los proyectos con energías renovables están entre las opciones para cumplir ese objetivo.

Precios de la energía producida con recursos energéticos renovables no convencionales. Regulación No. CONELEC – 008/00, Resolución No. 0161/00.

Establecimiento de precios de la energía eléctrica entregada al Sistema Nacional Interconectado por los generadores que utilizan fuentes renovables no convencionales (energía eólica, energía solar fotovoltaica, energía proveniente de biomasa - biogás y energía geotérmica), además, determina la forma en que serán desechados ese tipo de generadores (2 % de esa energía podrá ser desechada).

Reglamento ambiental para actividades eléctricas (2001). Decreto Ejecutivo No. 1761, R.O. No. 396.

Indica que le compete al CONELEC, diseñar y aplicar, en coordinación con los organismos públicos competentes, incentivos para estimular la protección y manejo sustentable de los recursos naturales que son aprovechados por los proyectos

eléctricos, así como fomentar el desarrollo y uso de tecnologías limpias y el uso de recursos energéticos no convencionales.

Plan Nacional de Electrificación (2002-2011). Resolución No. 0048/02.

Se recomienda mejoras en la operación de los tanques para calentamiento de agua, uso de equipos similares más eficientes y calentadores solares. Se hace referencia a la regulación 008/00 y a la reglamentación para el uso de fondos FERUM en la promoción de energías renovables.

Precios de la energía producida con recursos energéticos renovables no convencionales. Regulación No. CONELEC – 003/02. Resolución No. 0074/02.

Actualización de la Regulación No. CONELEC –008/00. Establecimiento de precios de la energía eléctrica entregada al Sistema Nacional Interconectado por los generadores que utilizan fuentes renovables no convencionales (energía eólica, energía solar fotovoltaica, energía proveniente de biomasa - biogás y energía geotérmica), además, determina la forma en que serán desechados ese tipo de generadores (2 % de esa energía podrá ser desechada)

Plan Nacional de Electrificación (2004-2013). Resolución No. 281/04.

Actualización del Plan Nacional (2002-2011). Se hace referencia a la Regulación 003/02 y a la reglamentación para el uso de fondos FERUM en la promoción de energías renovables

Precios de la energía producida con recursos energéticos renovables no convencionales. Regulación No. CONELEC – 004/04. Resolución No.280/04.

Actualización de la Regulación No. CONELEC –003/02. Establecimiento precios de la energía eléctrica entregada al Sistema Nacional Interconectado por los generadores que utilizan fuentes renovables no convencionales (energía eólica, energía solar fotovoltaica, energía proveniente de biomasa - biogás y energía geotérmica), además, determina la forma en que serán desechados ese tipo de generadores (2 % de esa energía podrá ser desechada)

Plan Nacional de Electrificación (2006-2015). Resolución No. 217-06.

Actualización del Plan Nacional (2004-2020). Se recomienda mejoras en la operación de los tanques para calentamiento de agua, uso de equipos similares más eficientes y calentadores solares. Se hace referencia a la regulación 004/02 y a la reglamentación para el uso de fondos FERUM en la promoción de energías renovables.

Reglamento General de la Ley de Régimen del Sector Eléctrico Decreto Ejecutivo No. 2066 R. O. No. 401.

Actualización del Reglamento General de la Ley de Régimen del Sector Eléctrico (R.O. No. 182 4 de diciembre de 1996). Se indica que los recursos energéticos renovables no convencionales son aquellos provenientes del aprovechamiento de las energías: eólica, biomasa, biogás, fotovoltaica, geotérmica y otras de similares características, y la proveniente de pequeñas centrales hidroeléctricas. Se indica que el Estado fomentará el uso de los recursos energéticos renovables, no convencionales, a través de la

asignación prioritaria de fondos del FERUM, por parte del CONELEC; introducirá esos elementos en el Plan Maestro de Electrificación como un programa definido.

Precios de la energía producida con recursos energéticos renovables no convencionales. Regulación No. CONELEC – 009/06. Resolución No. 292/06.

Actualización de la Regulación No. CONELEC 004/04. Establecimiento de precios de la energía eléctrica entregada al Sistema Nacional Interconectado por los generadores que utilizan fuentes renovables no convencionales (energía eólica, energía solar fotovoltaica, energía proveniente de biomasa-biogás y energía geotérmica), además, determina la forma en que serán desechados ese tipo de generadores (2 % de esa energía podrá ser desechada)

Creación del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable Decreto Ejecutivo No. 475. R. O. No. 132. (2007)

Dentro de su orgánico funcional se tiene la Subsecretaría de Energía Renovable y Eficiencia Energética. Dentro de esa Subsecretaría, se crearon tres Direcciones Nacionales: de Energía Renovable, de Eficiencia Energética, y de Biomasa, cada una con actividades específicas relacionadas a sus áreas.

Plan Maestro de Electrificación (2007–2016)

Actualización del Plan Nacional (2004-2013). Establece como política el desarrollo de las energías renovables como única alternativa energética sostenible en el largo plazo. Se propone a mediano plazo una matriz de generación con un aporte mínimo de 80 % de energías renovables (hidroeléctrica, eólica y biomasa). Se hace referencia a la Regulación 009/06 y a la reglamentación para el uso de fondos FERUM en la promoción de energías renovables. Se indica que las ER, pueden acogerse al MDL.

Constitución de la República (2008)

Se indica que el Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas, renovables, no contaminantes y de bajo impacto. Además, promoverá la eficiencia energética.

Mandato Constituyente N° 15 R.O. No 393, 31 de julio de 2008.

Establece las pautas para el cambio del modelo del sector eléctrico ecuatoriano, en el cual se indica que el Estado es accionista mayoritario del sector eléctrico. Además, estipula que el FERUM se financiará con recursos del Presupuesto General del Estado.

Procedimientos para presentar, calificar y aprobar los proyectos FERUM. Regulación No. CONELEC - 008/08. Resolución No. 121/08.

Establece el procedimiento que permite al CONELEC pre-asignar recursos, calificar y aprobar los proyectos que presenten las empresas eléctricas que presan el servicio de distribución y comercialización, que serán financiados por el FERUM. Indica que los proyectos de generación con energías renovables podrán ser presentados por organismos de desarrollo ante el CONELEC para su aprobación.

Decreto Ejecutivo 1815. (2009)

Declaración de política del Estado para la adaptación y mitigación al cambio climático.

Plan Nacional del Buen Vivir (2009- 2013)

Se define como objetivo: la diversificación de la matriz energética nacional, se promueve la eficiencia y una mayor participación de energías renovables sostenibles.

Plan Maestro de Electrificación (2009-2020)

Se establece como política, propiciar el desarrollo de generación basada en fuentes renovables. Se hace referencia a la regulación 009/06 y a la reglamentación para el uso de fondos FERUM en la promoción de energías renovables. Como Política Ambiental, se propone mitigar el cambio climático, fomentando el desarrollo de proyectos eléctricos con tecnologías alternativas no contaminantes, apalancadas en el MDL.

Código de la Producción R.O. No. 351. (2010)

Se señala que, a los sectores que contribuyan al cambio de la matriz energética, se les reconocerán la exoneración total del impuesto a la renta por cinco años de las inversiones nuevas que se desarrollen en esos sectores. Además, se indica que la depreciación y amortización que corresponda a la adquisición de mecanismos de generación de energía de fuente renovable (solar, eólica o similares) y a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, se deducirán con el 100 % adicional.

Tratamiento para la energía producida con recursos energéticos renovables no convencionales. Regulación No. CONELEC – 004/11, Resolución Nro. 023/11.

Establecimiento de los requisitos, precios, su período de vigencia, y forma de desecho para la energía eléctrica entregada al Sistema Nacional Interconectado y sistemas aislados por los generadores que utilizan fuentes renovables no convencionales (eólica, biomasa, biogás, fotovoltaica, geotermia y centrales hidroeléctricas de hasta 50 MW). Determina la forma en que serán desechados ese tipo de generadores (hasta 6 % del total podrá ser desechada).

Creación del Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (2012). Decreto Ejecutivo No. 1048 R.O. No. 649.

Instituto adscrito al MEER para el estudio, fomento y difusión de la eficiencia energética y la energía renovable.

Plan Maestro de Electrificación (2012-2021), Resolución No. 041/012

Se prevé el ingreso de tres centrales eólicas que suman 46,5 MW, así como dos proyectos geotérmicos de 50 y 30 MW para el 2017 y para el 2019, respectivamente. Se recomienda impulsar el desarrollo efectivo de las energías renovables para promover la sustitución de combustibles fósiles y obtener de ellos certificados de reducción de emisiones, CERS, a través del Mecanismo de Desarrollo Limpio, MDL

Plan Nacional del Buen Vivir (2013-2017). Resolución No. CNP-002-2013.

Se establece como objetivo reestructurar la matriz energética bajo criterios de transformación de la matriz productiva, inclusión, calidad, soberanía energética y sustentabilidad, con incremento de la participación de energía renovable.

Participación de los generadores de energía producida con recursos energéticos no convencionales. Regulación No. CONELEC – 01/13, Resolución No. 010/13.

Establece el procedimiento para la participación de energías renovables no convencionales en el Sector Eléctrico ecuatoriano (generación eólica, termoeléctrica, corrientes marinas, biomasa, biogás, geotérmica, e hidroeléctricas menores a 50 MW). Incluye precios preferentes. Se excluye a la energía solar fotovoltaica. Se establece el desecho preferente a toda la energía producida por ese tipo de centrales, salvo en condiciones de inseguridad del sistema.

Plan Maestro de Electrificación (2013-2022)

Se establece como política general la inserción paulatina del país en tecnologías relativas al manejo de otros recursos renovables. Se establece la generación de energía eléctrica de fuentes renovables como las principales alternativas sostenibles en el largo plazo. Se establecen estrategias para la implementación de ERNC y eficiencia energética.

Codificación de la regulación CONELEC 001/13 para la participación de los generadores de energía eléctrica producida con recursos energéticos renovables no-convencionales. Resolución No. 014/14.

Similar descripción para REGULACIÓN No. CONELEC –01/13, se establecen precios preferenciales para la generación con biomasa, biogás e hidroeléctrica.

Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica (2015)

Dispone como principio fundamental la promoción y ejecución de planes y proyectos con fuentes de energías renovables. Se destaca que el Estado debe desarrollar mecanismos específicos para la promoción de las energías renovables. En ese sentido se establece que el MEER promoverá un sistema eléctrico sostenible, sustentado en los recursos renovables. La electricidad producida contará con condiciones preferentes, así como también se exonerará el pago de aranceles, demás impuestos adicionales y gravámenes que afecten a la importación de materiales y equipos no producidos en el país, para la investigación, producción, fabricación e instalación de sistemas desinados a la utilización de energías solar, eólica, geotérmica, biomasa y otras (Barragán y Espinoza, 2015).

Las condiciones del entorno para que los proyectos innovadores en energías renovables puedan desarrollarse en su fase a escala semicomercial o comercial y a su vez, incidir con mayor impacto sobre el acceso a la energía renovable en los territorios o comunidades, son las siguientes:

- Los compromisos internacionales para la reducción de las emisiones de GEI.
- La estabilidad y continuidad de las políticas energéticas de largo plazo para el desarrollo sustentable de las fuentes renovables de energía.
- La situación económica y social de los países, y en particular, la convergencia decrecimiento económico anual con la demanda futura de los diferentes energéticos.
- La tendencia de desempeño de los precios de los combustibles derivados de fuentes fósiles.

- El portafolio de posibilidades de inversión en función del riesgo país.
- La magnitud de la inversión para la expansión de fuentes renovables de energía.
- Conocimiento sobre tecnologías de conversión energética apropiadas para la región o el territorio.

Capítulo 2. Parques eólicos en Ecuador

La energía eólica es utilizada principalmente para producir electricidad mediante aerogeneradores conectados a las grandes redes de distribución de energía eléctrica. Los parques eólicos suponen una fuente de energía cada vez más barata y competitiva, que favorece a la sociedad y su economía (Aldana y otros, 2018). Un parque eólico es un sistema formado por uno o varios aerogeneradores situados en el mismo emplazamiento (Schallenberg y otros, 2008).

En los parques eólicos interconectados, el propietario del parque es un productor más de electricidad, la compañía eléctrica está obligada por ley a facilitar la conexión de los aerogeneradores a la red eléctrica y a comprar toda su producción de electricidad, sobre la base de un sistema de precios establecidos a nivel nacional en la que priman la energía eólica.

Los parques eólicos con consumos asociados (autoconsumo) se caracterizan porque la electricidad producida por los aerogeneradores se utiliza para el consumo propio; y el excedente de electricidad, si lo hubiera, se inyecta en la red eléctrica, por lo general, este excedente ha de ser como máximo el 50% de la producción o, en otras palabras, la producción máxima, en balance anual, no puede superar el doble de la demanda. Esta modalidad se utiliza, sobre todo, en industrias o en plantas desaladoras, ya que tienen un gran consumo de energía y, de esta forma, producen ellos mismos la electricidad que demandan.

Por su parte los parques eólicos aislados son aquellos que no tienen conexión alguna con la red eléctrica y cuya finalidad es abastecer energéticamente un consumo puntual.

De acuerdo a la ubicación del parque con respecto a la tierra o las costas (*shore*), los parques eólicos son comúnmente clasificados como *offshore*, *onshore* y *nearshore*.

2.1. Parques eólicos offshore

Las tecnologías offshore de generación de energía eléctrica a partir del viento son aquellas que se encuentran ubicadas físicamente, mar adentro, ancladas al fondo marino (ilustración 22). En general, son capaces de producir 50% más de energía que sus pares en tierra logrando obtener en la actualidad hasta 10 MW por generador, por lo que su principal aplicación, es la conexión a la red (Gonzalo, 2013).

Su factor de planta es superior al de las tecnologías onshore, alcanzando entre 31 y 43%, mientras que la eficiencia de conversión es del orden del 30% mayor a sus similares en tierra. Esto gracias a la mayor homogeneidad de los flujos de viento sobre la superficie plana del océano.



Ilustración 22. Parque eólico *offshore*

Las principales barreras para la implementación de estos sistemas están asociadas a sus mayores costos de construcción y mantenimiento, y a la necesidad de construir una red de transmisión submarina para conectarse con el sistema de distribución local. Actualmente, el desarrollo de esta tecnología apunta a la colocación de generadores eólicos en aguas cada vez más profundas, lo que aumenta la perspectiva de crecimiento de estos generadores.

2.2. Parques eólicos onshore

Las instalaciones en tierra de turbinas eólicas en las regiones montañosas, generalmente, se ubican en crestas, casi siempre tres kilómetros o más, tierra adentro desde la costa más cercana. Esto se hace para aprovechar la denominada aceleración topográfica dada cuando el viento acelera sobre una cresta (ilustración 23).



Ilustración 23. Parque eólico *onshore* (Villonaco, Ecuador)

La velocidad del viento adicional obtenida de esta manera, hace una diferencia significativa en la cantidad de energía que se produce. Hay que prestar mucha atención a la posición exacta de las turbinas eólicas (un proceso conocido como micro-ubicación), ya que una diferencia de 30 m a veces puede significar una duplicación de la producción. La tecnología de los aerogeneradores está apuntando a la construcción de parques eólicos a más de 2000 m.s.n.m. (Gonzalo, 2013).

2.3. Parques eólicos nearshore

Las instalaciones de turbinas eólicas *nearshore* (ilustración 24) están en tierra dentro de los tres kilómetros cercanos a una costa o, en el agua dentro de diez kilómetros de la tierra. Estas áreas son buenos sitios para la instalación de las turbinas eólicas, debido al viento producido por convección resultante del calentamiento diferencial de la tierra y el mar cada día. Las velocidades del viento en estas zonas comparten la característica de ambas eólicas: terrestre y marina, en función de la dirección predominante del viento (Gonzalo, 2013).



Ilustración 24. Parque eólico *nearshore* (Gonzalo, 2013)

2.4. Descripción de un aerogenerador

Como precursor de los actuales aerogeneradores es la aeroturbina de Lacourt (1892), máquina de cuatro palas de 25 metros de diámetro, capaz de desarrollar entre 5 y 25 kW. Durante las primeras décadas del siglo XX, el avance de la tecnología aeronáutica establece las bases de los actuales aerogeneradores, aunque es necesario esperar hasta la crisis del petróleo de 1973, para que la energía eólica cobre un vivo impulso como fuente energética para la generación de electricidad (Alonso, 1993).

Actualmente, los aerogeneradores son del tipo de rotor tripala –tres palas– orientada en la dirección que llega el viento. Las potencias nominales que producen comprenden un abanico muy amplio que va, en el caso del fabricante Gamesa, desde los 850 KW hasta los 2 MW, y existen ya prototipos a punto de ser comercializados que superan los 4,5 MW.

Según la tendencia de los últimos años, el tamaño medio de los aerogeneradores ha aumentado cerca de los 2,6 MW de media de potencia unitaria (ilustración 25). Por ejemplo, el diámetro medio del rotor de estos nuevos aerogeneradores terrestres mide 95 metros y el buje se eleva hasta una altura de 117 metros. En el caso de los aerogeneradores ubicados en el mar, el tamaño medio se sitúa en torno a los 5 MW de potencia unitaria, con un diámetro medio de rotor de 126 metros y una altura estimada de 90 metros.

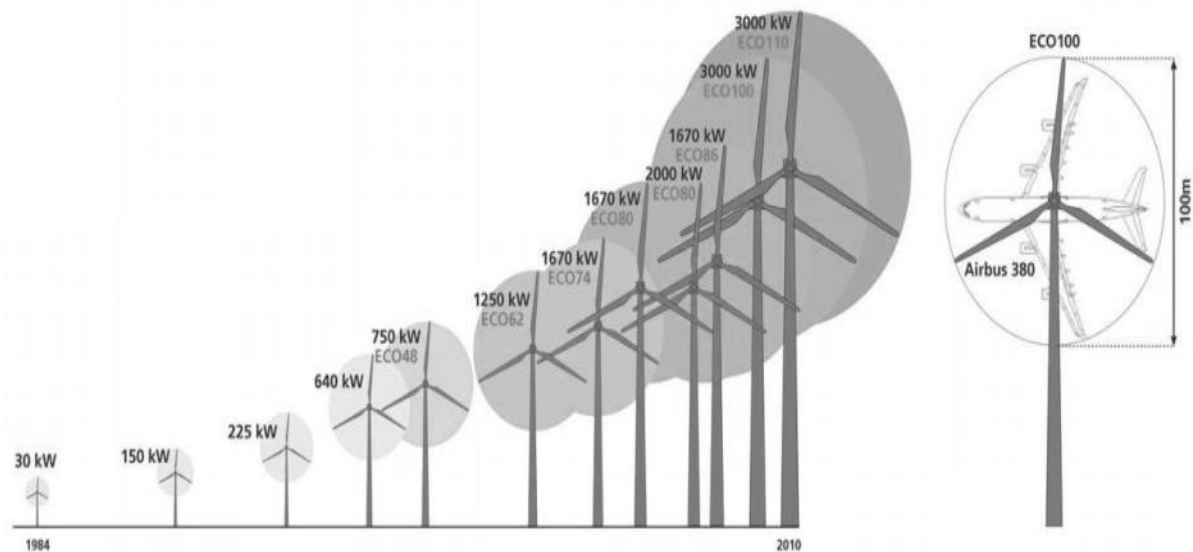


Ilustración 25. Evolución del tamaño constructivo de los aerogeneradores (Gállego y Faulín, 2014)

Entre los aerogeneradores existen diferencias de rendimiento notables que los hacen adecuados para diversos regímenes de viento. Como una primera clasificación se los puede dividir en dos grandes grupos, según sea el eje horizontal o vertical. Dentro de del eje horizontal se pueden distinguir ejes paralelos a la dirección del viento (como los convencionales molinos) y perpendiculares a dicha dirección. Entre los paralelos, caben dos alternativas según el rotor sea dispuesto en la parte anterior del eje (posición a barlovento), o en el posterior (posición a sotavento). Se entiende que el origen lo define el sentido del viento. Estas máquinas están constituidas por una aeroturbina tipo rotor, que acciona un alternador eléctrico. Los principales componentes de un aerogenerador se muestran en la ilustración 26.

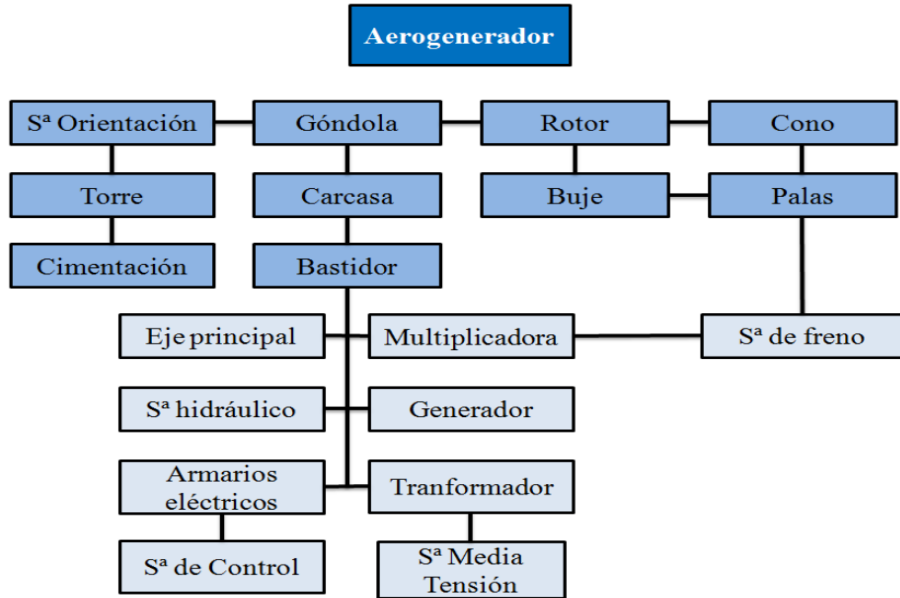


Ilustración 26. Principales sistemas y componentes de un aerogenerador (Gállego y Faulín, 2014)

Los autores Gállego y Faulín (2014) determinaron cómo funciona un aerogenerador. Aspecto que se asume a continuación.

Para iniciar el funcionamiento de estas máquinas, y con él la producción de energía eléctrica, existe un sistema de control en el aerogenerador que analiza los datos de velocidad y dirección del viento. Como es sabido, estos datos son recogidos por el anemómetro y la veleta, situados ambos en la zona trasera del techo de la góndola. De esta manera, el sistema de control envía la señal con los datos a un armario eléctrico situado en el interior de la góndola. Este armario se encargará de activar eléctricamente las motorreductoras del sistema de orientación –sistema Yaw–. Estas motorreductoras están engranadas con los dientes de una corona firmemente unida a la torre en su parte más alta. Al encenderse, hacen girar la góndola posicionándola a barlovento, que es la dirección desde la que llega el viento.

En esta situación, el aire es obligado a fluir por las caras de las palas generando una diferencia de presiones y dando origen a una fuerza resultante que actúa sobre el perfil de las palas. Si descomponemos esta fuerza en dos direcciones, encontramos la fuerza de sustentación, perpendicular al viento, que produce el movimiento rotatorio de las mismas. Esta fuerza de sustentación de las palas está regulada por otro sistema, el de cambio de paso –sistema Pitch–. Hay una particularidad, y es que este sistema puede ser independiente en cada pala y se encarga así de que cada una de ellas gire en torno a su eje longitudinal para ajustar su posición angular.

Las variaciones del ángulo de paso de las palas se consiguen gracias a un sistema hidráulico escondido dentro la góndola, y permite a las palas un abanico de rotación que suele ir, aproximadamente, desde -5° a 90°. Por supuesto, la rotación se realiza a través de un rodamiento que está escondido entre la pala y el buje, es el llamado rodamiento de pala.

Algo importante que hay que tener en cuenta es que las palas también sirven de freno aerodinámico cuando el ángulo de paso se acerca a 90°. Es lo que se denomina la posición de bandera.

Para que un aerogenerador se ponga en marcha es necesario un valor mínimo de velocidad del viento para vencer los rozamientos y comenzar así a producir trabajo útil. A este valor mínimo se le denomina velocidad de conexión –comprendida entre los 3 m/s y 5 m/s–. Sin esta velocidad no es posible arrancar un aerogenerador (Gállego y Faulín, 2014, p.54).

El costo de cada kWh obtenido mediante un sistema eólico depende del coste de la instalación, la cual debe amortizarse a lo largo de la vida, del coste de explotación, y de la energía producida, que depende en gran medida de la velocidad del viento en el emplazamiento. El costo de la instalación depende del coste de los siguientes elementos: aerogeneradores, obra civil (accesos, cimentaciones, edificaciones), sistema eléctrico (líneas eléctricas, transformadores, sistema de control), e ingeniería y dirección. En lo que respecta al costo de los distintos componentes que integran un aerogenerador, puede indicarse una estimación de los porcentajes reflejados en la ilustración 27.

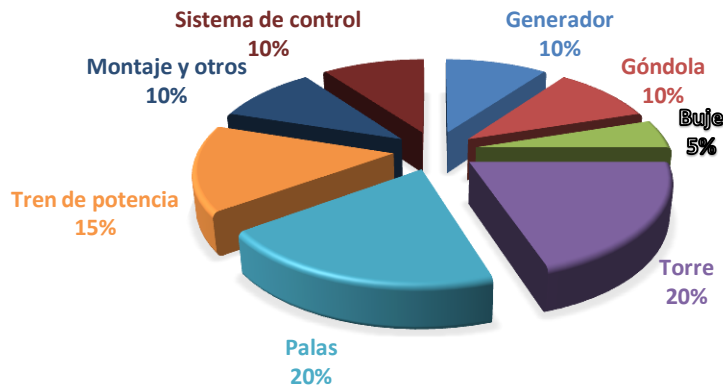


Ilustración 27. Distribución de los costos de los componentes de un aerogenerador (adaptado de Gállego y Faulín, 2014)

La inversión necesaria para llevar a cabo una instalación eólica conectada a la red puede estimarse descompuesta en cuatro grandes partidas, como se aprecia en la ilustración 28.

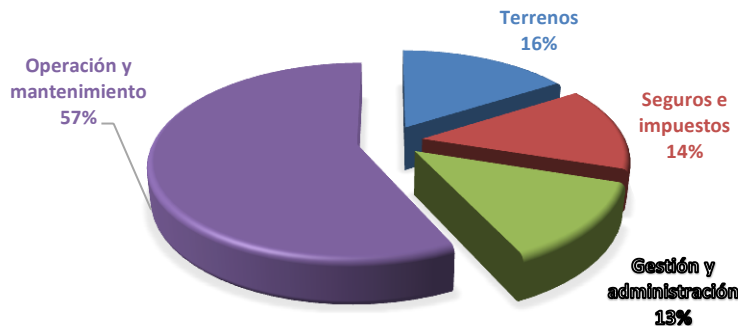


Ilustración 28. Distribución de los costos de inversión (adaptado de Gállego y Faulín, 2014)

Los porcentajes estimados de los costos de explotación se reflejan en la ilustración 29.

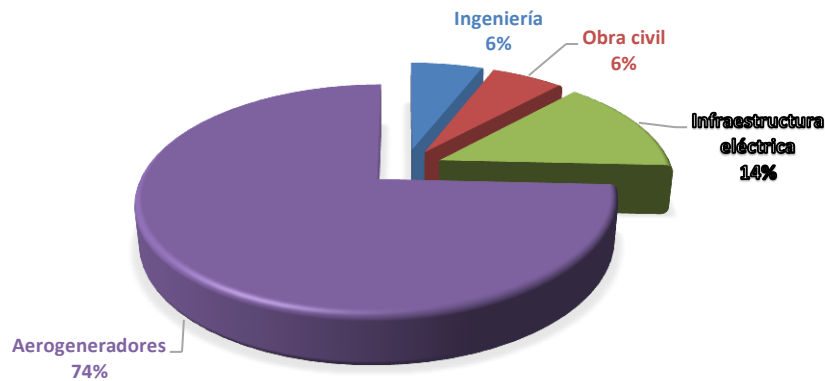


Ilustración 29. Distribución de los costos de explotación (adaptado de Gállego y Faulín, 2014)

Por su parte, la distribución de los costos estimados de instalación y explotación de un parque eólico se muestran en la ilustración 30. Estos costos se desglosan en costos por alquiler de terrenos, costos de operación y mantenimiento (personal, repuesto y consumible), costos de gestión y administración y costos de seguros e impuestos.

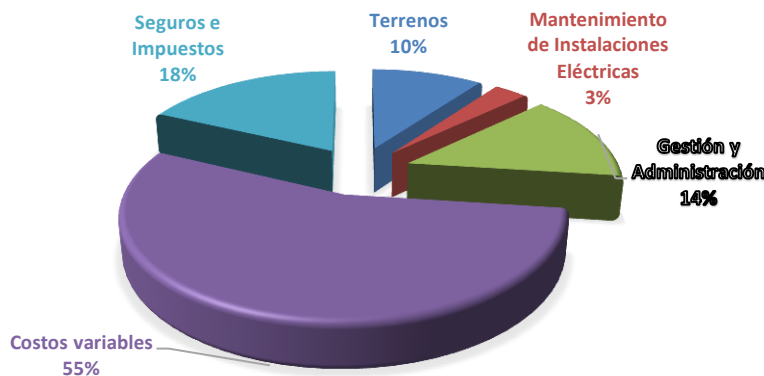


Ilustración 30. Distribución de los costos de instalación y explotación de un parque eólico (adaptado de Gállego y Faulín, 2014)

Según Schallenberg y otros (2008), la eficacia de un aerogenerador se caracteriza por tres parámetros que aludimos a continuación.

- Disponibilidad: indica las horas que la máquina está disponible para producir y suele ser de un 98%.
- Horas equivalentes: miden el rendimiento energético de un aerogenerador en un emplazamiento dado. Las horas equivalentes representan el número de horas al año que la máquina eólica estaría produciendo a su potencia nominal. El número de horas equivalentes será tanto mayor cuanto más elevado sea el potencial eólico del emplazamiento, así como cuanto mejor se adapte el aerogenerador a las condiciones eólicas del emplazamiento.

- Factor de capacidad: representa el porcentaje de energía realmente producida en un año, dividida por la teóricamente producible en el mismo período. El factor de capacidad de una zona media-buena suele oscilar alrededor de un 28%.

Un factor importante que ha de considerarse a la hora de calcular la producción de una máquina eólica es el régimen de vientos: cuanto más constante sea el viento tanto mejor para la producción. Hay que tener en cuenta que un aerogenerador empieza a producir a partir de una velocidad de viento de unos 3 m/s y va incrementando su producción progresivamente a medida que aumenta el viento hasta su velocidad nominal. La velocidad de corte del aerogenerador (velocidad a partir de la cual se detiene para evitar posibles roturas) se sitúa en torno a los 25 m/s. Cuanto más constante sea el viento, dentro del rango en el que produce la máquina, tanto mejor, ya que las fluctuaciones serán menores y la producción aumentará.

2.5. Pasos a seguir en la creación de un parque eólico

Una propuesta de pasos a seguir cuando se va a instalar un nuevo parque eólico, se muestra a continuación.

- Presentación de la propuesta de proyecto para la viabilidad de un parque eólico. En ella deben tenerse en cuenta principalmente dos factores.
 - Estudios de viento: suelen tener una duración de un año, y con estos estudios, se pretende saber qué tipo de viento existe en la zona, lo que permite decidir qué tipo de turbina o aerogenerador es la más adecuada. Los elementos a tener en cuenta son la longitud de pala, el diámetro del rotor, etc.
 - Coste sobre el precio total del parque: se realizará una estimación sobre el precio que va a suponer la creación de dicho parque.
- Realización de la obra civil: se delimitan los caminos junto con las cimentaciones de cada uno de los aerogeneradores que se van a montar y la subestación desde donde se vigilarán las turbinas. La subestación servirá de almacén de repuestos, residuos de grasa que se cambian en los mantenimientos preventivos, además de ser, en la mayoría de los casos, el centro de trabajo del personal de mantenimiento.
- Montaje de los aerogeneradores: tras haber finalizado la obra civil, se comienza a montar las turbinas. Se ensamblarán los distintos tramos que conforman la torre junto con la góndola o cabeza del molino, y además se cablearán todos los elementos internos de la turbina.
- Precomisión: se trata de la verificación del correcto cableado entre la subestación y la turbina. Esto es esencial para que a la hora de energizar el parque no se originen cortocircuitos ni faltas eléctricas.
- Puesta en marcha: una vez energizado el parque, es la hora de realiza un test de chequeo que verifique el buen funcionamiento del aerogenerador. Con esto lo que se persigue es lo siguiente:
 - Que todos los sistemas funcionen correctamente y que no haya nada mal cableado.
 - Comprobar que existe una buena comunicación con, por ejemplo, el Centro de Control de Energías Renovables –CECOER– en el caso de Acciona Energía, en España. En este caso, se tiene que ver la turbina desde el centro de control en

- Pamplona, el cual se encarga de supervisar, y si existe algún tipo de problema, avisa al personal de mantenimiento. En el caso de Gamesa, este también dispone de su centro de control en Pamplona desde donde se vigila el correcto funcionamiento general del parque. Se vigilan las incidencias, se establecen las órdenes de trabajo de los empleados y se avisa de las emergencias al personal lo que permite actuar sobre él de forma inmediata, en caso de que sea necesario. Además, en caso de que la alarma salte, Pamplona puede apagar la máquina e intentar reanudarla antes de avisar al personal de la planta.
- Asimismo, se comprueban las protecciones eléctricas y mecánicas para asegurarse que la turbina es capaz de auto-protegerse en caso de aparición de un problema.
 - Firma del CAP: es el certificado de aceptación provisional, es decir, el período en el que las turbinas tienen que estar funcionando sin que se genere una alarma. Si se supera con éxito esta prueba, el parque entra en garantía y pasa a ser propiedad.
 - Mantenimiento: tras la prueba del CAP el parque entra en garantía, como ya se ha dicho, y es gestionado por el personal de mantenimiento, los cuales se dividirán en tres grupos:
 - Correctivos: se encargan de realizar las labores correctoras en las turbinas.
 - Preventivos: dependiendo de si las turbinas tienen 6, 12 o 24 meses, se realizarán los correspondientes mantenimientos preventivos.
 - Guardias: durante las horas no laborables, se destina una pareja de operarios de mantenimiento que asistirá al parque siempre que aparezca una incidencia.

2.6. Parques eólicos en Ecuador

La mayor cantidad de recursos eólicos en Ecuador se encuentra en la región de los Andes, debido a las alturas de esta cordillera y su geografía que poseen considerables flujos de aire. Se calcula que existe un potencial bruto de 1.670 MW a una altura de 3.500 m.s.n.m. con corrientes de aire mayores a los 7 m/s. También se estima que en el perfil costanero se puede obtener 900 MW, con factores de planta entre un 20 % y 35 %.

Por el momento, Ecuador cuenta con tres parques eólicos en funcionamiento: San Cristóbal–Región Insular (Galápagos), un sistema aislado con una capacidad de 2,4 MW; Baltra–Región Insular (Galápagos), también sistema aislado con una capacidad de 2,25 MW; y Villonaco–Región Interandina (Loja) con una capacidad de 16,5 MW. Este último parque cuenta con una segunda y tercera fase para ampliar su capacidad de generación eléctrica que se encuentra, por el momento, en busca de financiamiento para su ejecución. Estos parques eólicos en el año 2016 aportaron con el 0,31 % de la energía eléctrica del país (Parra, 2018).

A través de la información del mapa eólico el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) se estimó un potencial de generación eléctrica a partir de parques eólicos instalados en las zonas con mejor recurso de viento. Se elaboraron los siguientes dos escenarios: el Potencial Bruto Total y el Potencial Factible a Corto Plazo.

El primero considera todos los sitios bajo 3500 msnm., con velocidades mayores a 7m/s. El segundo, además de estas restricciones, considera los sitios que están a una

distancia menor o igual a 10 km de la red eléctrica y carreteras. El Potencial Disponible Bruto Total se estimó en el orden de 1.670 MW y el Potencial Factible a Corto Plazo en unos 900 MW, con factores de planta en un rango de 20% a 35%.

| POTENCIAL FACTIBLE A CORTO PLAZO | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| PROVINCIA | POTENCIAL INSTALABLE | | | | | INTEGRACIÓN ACUMULADA | | | |
| | RANGO VELOCIDAD m/s | ÁREA [km ²] | POTENCIA INSTALABLE [MW] | FACTOR DE CAPACIDAD | ENERGÍA ANUAL [GWh/año] | WIENTO [m/s] | ÁREA [km ²] | POTENCIA INSTALABLE [MW] | ENERGÍA ANUAL [GWh/año] |
| Carchi | 7,0 - 7,5 | 1,24 | 3,72 | 0,20 | 6,39 | > 7 | 4,60 | 13,80 | 23,69 |
| | 7,5 - 8,0 | 1,56 | 4,68 | 0,25 | 10,04 | > 7,5 | 3,36 | 10,08 | 21,63 |
| | 8,0 - 8,5 | 0,96 | 2,88 | 0,30 | 7,42 | > 8 | 1,80 | 5,40 | 13,91 |
| Imbabura | > 8,5 | 0,84 | 2,52 | 0,35 | 7,57 | > 8,5 | 0,84 | 2,52 | 7,57 |
| | 7,0 - 7,5 | 1,08 | 3,24 | 0,20 | 5,56 | > 7 | 3,68 | 11,04 | 18,96 |
| | 7,5 - 8,0 | 1,00 | 3,00 | 0,25 | 6,44 | > 7,5 | 2,60 | 7,80 | 16,74 |
| Pichincha | 8,0 - 8,5 | 1,04 | 3,12 | 0,30 | 8,04 | > 8 | 1,60 | 4,80 | 12,36 |
| | > 8,5 | 0,56 | 1,68 | 0,35 | 5,05 | > 8,5 | 0,56 | 1,68 | 5,05 |
| | 7,0 - 7,5 | 21,25 | 63,76 | 0,25 | 109,48 | > 7 | 40,81 | 122,42 | 210,18 |
| Bolívar | 7,5 - 8,0 | 12,01 | 36,02 | 0,30 | 77,31 | > 7,5 | 19,55 | 58,65 | 125,88 |
| | 8,0 - 8,5 | 5,08 | 15,23 | 0,35 | 39,23 | > 8 | 7,54 | 22,63 | 58,29 |
| | > 8,5 | 2,47 | 7,40 | 0,20 | 22,23 | > 8,5 | 2,47 | 7,40 | 22,23 |
| Chimborazo | 7,0 - 7,5 | 1,02 | 3,05 | 0,20 | 5,23 | > 7 | 2,42 | 7,27 | 12,49 |
| | 7,5 - 8,0 | 0,48 | 1,44 | 0,25 | 3,09 | > 7,5 | 1,41 | 4,22 | 9,07 |
| | 8,0 - 8,5 | 0,48 | 1,44 | 0,30 | 3,71 | > 8 | 0,93 | 2,78 | 7,17 |
| Cañar | > 8,5 | 0,45 | 1,34 | 0,35 | 4,04 | > 8,5 | 0,45 | 1,34 | 4,04 |
| | 7,0 - 7,5 | 7,31 | 21,93 | 0,20 | 37,66 | > 7 | 11,87 | 35,61 | 61,14 |
| | 7,5 - 8,0 | 3,25 | 9,76 | 0,25 | 20,94 | > 7,5 | 4,56 | 13,67 | 29,35 |
| Azuay | 8,0 - 8,5 | 1,19 | 3,56 | 0,30 | 9,16 | > 8 | 1,31 | 3,92 | 10,08 |
| | > 8,5 | 0,12 | 0,36 | 0,35 | 1,08 | > 8,5 | 0,12 | 0,36 | 1,08 |
| | 7,0 - 7,5 | 11,50 | 34,49 | 0,20 | 59,21 | > 7 | 23,95 | 71,85 | 123,36 |
| Loja | 7,5 - 8,0 | 7,09 | 21,26 | 0,25 | 45,62 | > 7,5 | 12,45 | 37,36 | 80,19 |
| | 8,0 - 8,5 | 3,16 | 9,47 | 0,30 | 24,39 | > 8 | 5,37 | 16,11 | 41,48 |
| | > 8,5 | 2,21 | 6,64 | 0,35 | 19,94 | > 8,5 | 2,21 | 6,64 | 19,94 |
| TOTAL ESTIMADO PARA EL ECUADOR [MW] | 7,0 - 7,5 | 21,38 | 64,14 | 0,20 | 110,13 | > 7 | 33,92 | 101,77 | 174,74 |
| | 7,5 - 8,0 | 8,29 | 24,86 | 0,25 | 53,34 | > 7,5 | 12,54 | 37,63 | 80,77 |
| | 8,0 - 8,5 | 2,90 | 8,70 | 0,30 | 22,40 | > 8 | 4,26 | 12,78 | 32,91 |
| TOTAL ESTIMADO PARA EL ECUADOR [MW] | > 8,5 | 1,36 | 4,08 | 0,35 | 12,26 | > 8,5 | 1,36 | 4,08 | 12,26 |
| | > 7 | 294,74 | 894,22 | | 1518,17 | | | | |
| | > 7,5 | 158,50 | 475,51 | | 1020,54 | | | | |
| | > 8 | 82,64 | 247,91 | | 638,47 | | | | |
| | > 8,5 | 45,35 | 136,06 | | 408,81 | | | | |

Ilustración 31. Potencial factible a corto plazo para aprovechamiento de la energía eólica en Ecuador

Por otra parte, los prospectos con potencial eólico viables para generación eléctrica, impulsados por el gobierno nacional, suman actualmente 200 MW (tabla 1).

| PROYECTO | POTENCIA EFECTIVA [MW] |
|----------------------|------------------------|
| ISLAS GALÁPAGOS | 60 |
| VILLONACO II | 50 |
| EL AROMO | 65 |
| SALINAS II | 15-40 |
| MINAS DE HUASCACHACA | 50 |

Tabla 1. Proyectos eólicos en desarrollo en Ecuador (CONELEC, Plan Maestro de Electrificación 2012-2021)

En la provincia de Imbabura existe un proyecto para instalar un parque eólico en la parroquia Salinas, con el respaldo de la Empresa Eléctrica Regional Norte y la Empresa Operadora Electro Viento, quienes ya cuentan con los estudios de viabilidad, conexión eléctrica e impacto ambiental definitivo. El proyecto supone una inversión de 22 millones de dólares y tendrá una potencia eólica inicial de 10 MW. El objetivo del gobierno es alcanzar los 200 MW en el país, en plazo de 5 años.

El primer parque eólico del país se inauguró en octubre del 2007 en la isla San Cristóbal del Archipiélago de Galápagos (ilustración 32), con una potencia instalada de 2,4 MW. Dada la relevancia medioambiental del Archipiélago de Galápagos, el MEER se ha establecido como meta satisfacer toda la demanda eléctrica con energías renovables.



Ilustración 32. Ubicación geográfica del proyecto en la Isla San Cristóbal (Ergal, 2010)

El Proyecto Eólico San Cristóbal (ilustración 33) es parte del programa de 'Energía Renovable para la Generación de Electricidad en las Islas Galápagos, programa marco del Gobierno Ecuatoriano, auspiciado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Este programa involucra a donantes públicos, privados, locales e internacionales para re-electrificar las cuatro islas pobladas del archipiélago de Galápagos. El Gobierno del Ecuador ha contribuido con aproximadamente \$ 3.3 millones de dólares americanos (Ergal, 2010).

El Proyecto Eólico San Cristóbal es una asociación entre el Gobierno del Ecuador, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), y el Fideicomiso Mercantil Proyecto Eólico San Cristóbal. Los constituyentes del Fideicomiso son las compañías miembros de la organización "e8" (*American Electric Power-AEP, RWE*), las cuales, por medio de sus expertos, con amplio conocimiento y experiencia internacional en el campo del desarrollo de la energía renovable, brindan asistencia técnica al proyecto. La

Empresa Eléctrica Provincial Galápagos-Elecgolápagos S.A. es adherente y beneficiario único del Fideicomiso (Curbelo, 2010).



Ilustración 33. Vista frontal del parque eólico San Cristóbal (Rosero y Chiliqinga, 2011)

El proyecto está diseñado para reemplazar la energía generada por la combustión de diésel en las islas San Cristóbal y Santa Cruz, por una fuente de energía limpia basada en aerogeneradores, con el doble objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y minimizar los riesgos ambientales asociados al actual sistema de generación de energía.

El proyecto eólico San Cristóbal de 2,4 MW, funcionado de manera híbrida con las unidades generadoras a diésel, suministrará aproximadamente el 50% de la demanda anual de electricidad de la isla San Cristóbal (Ergal, 2010; Rosero y Chiliqinga, 2011).

La ciudad de Loja, nuevamente la pionera en continente con la central Villonaco (ilustración 34), situada en un lugar con una velocidad promedio del viento de 12 m/s, con 16,5 MW de capacidad instalada, ubicada en el cerro del mismo nombre, funciona sin novedades con su aporte al Sistema Nacional Interconectado (SIN) (Párraga y otros, 2019). La puesta en marcha de los once aerogeneradores en el parque eólico Villonaco y la generación de energías renovables integran la primera etapa del megaproyecto de entregar energía a la comunidad, a través de energía eólica.

El parque eólico de Villonaco dispone de 11 aerogeneradores Goldwind con una potencia nominal de 1.5 MW c/u y, de acuerdo con el estudio de factibilidad, debía contribuir con 59.57 millones de kWh/año al Sistema Interconectado Nacional. Los parámetros de operación de la planta han superado los datos previstos en el análisis de viabilidad, con resultados sorprendentes. Por ejemplo, en su tercer año de existencia, en 2015, la capacidad de producción de energía eólica de este parque se situó en 90.92 GWh/año, lo que supone que Villonaco produjo un 52% más de lo esperado a partir de los datos obtenidos en el estudio de factibilidad.



Ilustración 34. Parque eólico Villonaco (Lozano, 2016)

El parque eólico Baltra, ubicado en las Islas Galápagos, es un parque eólico de 2.25 MW con 3 aerogeneradores Unison tipo convertidor de 750 kW de potencia con los que se utiliza el recurso eólico de la isla de Baltra para proveer de energía eléctrica a sus habitantes, y a los de Puerto Ayora, en la isla de Santa Cruz (ilustración 35).



Ilustración 35 Parque eólico Baltra (Lozano, 2016)

Para la transmisión y distribución de la energía eléctrica generada en el parque eólico de Baltra, se levantó un sistema de interconexión eléctrica conformado por la subestación eléctrica de la Isla Baltra y la extensión de la subestación eléctrica de Puerto Ayora. Adicionalmente, se instaló una línea de transmisión de 50 km a 34.5 KV,

con el objetivo de minimizar el impacto ambiental del cableado de este tipo en su totalidad. De este modo, esta línea incluye tramos aéreos, subterráneos y submarinos

El proyecto más ambicioso de generación eólica en la actualidad en el país es el proyecto eólico Minas de Huascachaca (ilustración 36).



Ilustración 36. Proyecto eólico Minas de Huascachaca, Ecuador (Lozano, 2016)

Según un artículo del Diario Mundo Eléctrico publicado el 13 septiembre de 2020, una zona semidesértica en los límites de Loja y Azuay, constituida por mesetas, con caminos de tierra y escasa población asentada, es el lugar donde en los próximos meses se emplazarán 16 aerogeneradores que aprovecharán la fuerza del viento para producir energía eólica.

Ese conjunto de aerogeneradores, cada uno con alturas que llegarán a los 167 metros, conforma la infraestructura básica de lo que será el parque eólico más grande del Ecuador, Minas de Huascachaca. El complejo, del que se espera su arranque de operaciones en 2021, se localiza al pie del río Jubones, en la parroquia San Sebastián de Yuluc, territorio del cantón Saraguro, en el límite cantonal con Santa Isabel, en Azuay. Está concebido para generar 50 megavatios (MW) de energía eólica, lo suficiente para dotar de electricidad a 90.000 viviendas.

Minas de Huascachaca demanda una inversión de \$ 101 millones. La construcción de la obra empezó en 2017, pero su concepción se remonta más de una década atrás. El primero, que era para la construcción y adecuación de vías, se adjudicó en 2017 a un consorcio integrado por las empresas Sinohydro, de China, y Cobra, de España. Elecaastro condicionó la contratación para la segunda fase, estimada en \$ 93'474.445, a un financiamiento que debía gestionar la misma sociedad chino-española hasta fines de ese año. Pero las compañías no cumplieron y la adjudicación quedó sin efecto.

Con un consorcio formado por la empresa pública Hidroequinoccio (de propiedad de la Prefectura de Pichincha) y la firma inmobiliaria Carlos Reyes & Asociados, se acordó ejecutar la segunda fase del proyecto, en dos componentes: el primero, por \$ 10,7 millones, y el segundo condicionado a un financiamiento de \$ 78 millones. Pero en

enero de 2019 la adjudicación del contrato se tuvo que dar baja porque el consorcio contratista tampoco pudo conseguir el crédito.

La obra energética tiene actualmente un avance del 55 %, según sus constructores (ilustración 37). Ya están comprometidos \$ 59 millones para las tareas de ingeniería civil y eléctrica. Los primeros trabajos consistieron en el mejoramiento del acceso hacia las parroquias cercanas Uchucay y Sumaypamba, y la construcción de un puente de 50 metros. En ejecución está la construcción de subestaciones y sus vías conectoras y el tendido de una línea de transmisión eléctrica a 138 kilovoltios.



Ilustración 37. Avance constructivo del Proyecto eólico Minas de Huascachaca, septiembre de 2020

Resta por hacer las plataformas y la cimentación para el emplazamiento de las torres de aerogeneración. Cada una de ellas, con las astas en alto, alcanzará los 167 metros desde el suelo, de acuerdo con los constructores; es decir, serán mucho más altas que el edificio *The Point* (137 metros) o La Previsora (135 metros), en Guayaquil.

Se espera que en octubre del año 2021 los primeros cuatro generadores estén entregando energía al país, y en enero de 2022, se esté en plena producción comercial.

Capítulo 3. Métodos multicriterios neutrosóficos para la localización de un parque eólico

3.1. Localización de un parque eólico

La selección de dónde emplazar un parque eólico es a menudo, muy difícil. Esta decisión debe ser fundamentada teniendo en cuenta los factores locacionales, que son aquellos recursos naturales, socioeconómicos e infraestructurales a través de cuya utilización se materializan las relaciones entre el objeto y el territorio (Castellanos, s/f). Por ello, deben ser establecidos criterios que tengan en cuenta la viabilidad técnica, la presencia de infraestructura eléctrica existente y el medio ambiente.

El conocimiento de los aspectos físico-ambientales, tecnológicos y económicos resultan determinantes para alcanzar un impacto positivo de estas tecnologías en el desarrollo de una región o país. El empleo de estos criterios resultará en la elección de un emplazamiento que aprovechará de manera óptima el recurso eólico disponible, empleará aerogeneradores de última tecnología, transportará la energía eléctrica generada de manera eficiente y será respetuoso en la mayor medida posible con su entorno y el medio ambiente (Foweather, 2015).

A continuación, se definen los criterios que se proponen en la presente investigación para la localización de un parque eólico.

Potencial eólico

La velocidad del viento en el lugar de estudio es el criterio más importante a la hora de proyectar un parque eólico, ya que de él depende la eficiencia del parque y, por tanto, de la inversión. Cuanto mayor es la velocidad del viento más energía va a producir el aerogenerador.

Para su determinación, una herramienta muy útil puede ser el Atlas eólico de Ecuador del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. Los mapas de recurso eólico desarrollados tienen una fiabilidad suficiente para permitir una primera evaluación del potencial eólico disponible. En el Atlas existen mapas de todo el país para velocidades de aire, tanto estacionales como anuales, a 80m con precisión de 2,5km o de 100m.

Según Quezada (2015), para el análisis de un emplazamiento eólico en el Ecuador, se ha optado por trabajar con la simulación del viento mediante Modelos Meteorológicos de Predicción Numérica (MMPN) y pronósticos de clima WRF (Weather Research and Forecasting) (Santos y otros, 2013). Esta simulación abarca un período de un año, con una resolución temporal de 10 minutos con velocidades y dirección del viento a 80 metros de altura (datos hasta el año 2010). En la ilustración 38 se presenta la velocidad del viento anual mediante MMPN.

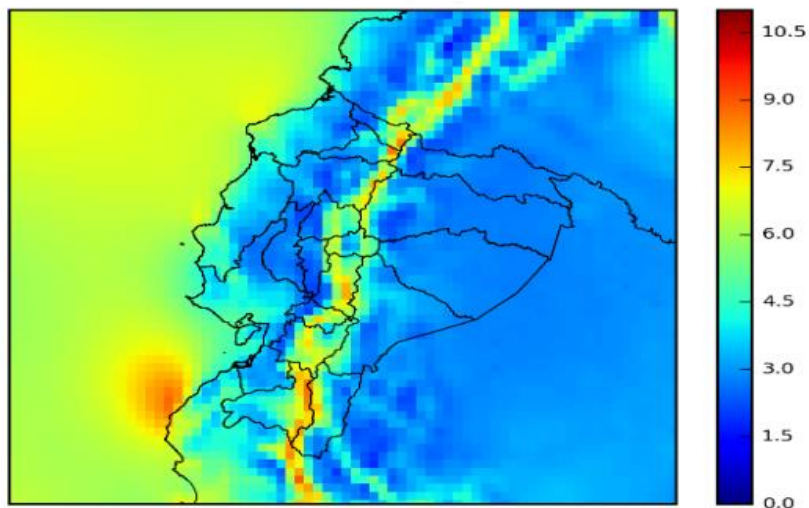


Ilustración 38. Simulación con MMPN: velocidades de viento m/s (Quezada, 2015)

Para caracterizar el viento se analizan aspectos como La rosa de los vientos, variabilidad del viento e intensidad de turbulencias. La rosa de los vientos, es una

herramienta para entender las tendencias de las direcciones del viento, es decir su procedencia y su posible turbulencia. La variabilidad del viento, consiste en visualizar el comportamiento del viento durante el tiempo de estudio. La intensidad de turbulencia es un indicador comúnmente utilizado para medir la turbulencia del viento, la cual provoca la reducción de la producción de electricidad, y esencialmente, produce daños y desgastes al aerogenerador pues disminuye su vida útil.

De la velocidad del viento depende la producción anual que va a suministrar a la red eléctrica el parque eólico diseñado, por lo que en ella también se encuentra el éxito o el fracaso de la inversión. Por tanto, es primordial el estudio exhaustivo del recurso eólico disponible con tal de promocionar un emplazamiento económicamente rentable.

Condiciones naturales para el emplazamiento

Debe buscarse el emplazamiento con condiciones naturales que favorecen la asimilación de toda la intensidad del viento, tales como poca rugosidad, no existencia de obstáculos como ciudades, aeropuertos, etcétera. Se requiere para la localización zonas altas no inundables, con potenciales para su crecimiento y de condiciones topográficas favorables para el acceso al sitio.

En este criterio se tendrán en cuenta también factores como riesgos de huracanes, rayos y descargas eléctricas, alta corrosión, conciliación con el desarrollo turístico y con otros intereses socioeconómicos, protección de yacimientos minerales y de zonas urbanizables, etcétera.

Geotecnia y resistencia de suelos para la cimentación

Los aerogeneradores tienen estructuras muy esbeltas y de gran peso, por lo que se requiere de suelos con gran resistencia como mínimo de 35-40 kg/cm². Para aerogeneradores de 55 m de altura del buje y con rotor de 52 m de diámetro, las cimentaciones son en balsa de 100 m² de área y unos 2 m de altura del plato.

Condiciones de forma y tamaño del área de terreno

Es necesario evaluar el potencial del territorio en cuanto a forma y tamaño del área propuesta para el emplazamiento del parque eólico. Para evitar turbulencias que se crean por la densidad de aerogeneradores del parque, se plantea que ellos deben estar separados entre 3-5 diámetros de rotor en dirección perpendicular del viento predominante y entre 5-9 diámetros en dirección del viento dominante.

Se tendrá presente, además que, para evitar efectos contraproducentes hacia los aerogeneradores, el terreno seleccionado debe contar con posibilidades para crearle un cordón de protección alrededor del parque, cuyas dimensiones dependen de factores físico-geográficos de la región.

Accesibilidad automotor

Existe una tendencia mundial al incremento de la capacidad de generación de la altura de las torres y del tamaño de las palas. Las torres vienen desarmadas en tres secciones y las palas enteras. Se necesitan equipos especiales para la descarga en el puerto y para la transportación hasta el sitio de emplazamiento. Para el montaje de un aerogenerador se emplean grandes grúas que demandan de viales y plataformas especiales para su funcionamiento en el momento del izaje.

Cercanía de la zona de consumo de la energía producida

Es conveniente considerar emplazamientos en o cerca de las comunidades autónomas de mayor consumo para la distribución de la energía generada en el parque eólico a causa de la demanda de energía eléctrica.

Existencia de zonas protegidas

Es primordial a la hora de realizar la proyección de un parque eólico considerar el medio ambiente, y por tanto, los espacios naturales que se encuentran en el territorio. Las colosales estructuras que forman el parque tienen un impacto medioambiental importante que se debe tratar de minimizar en la mayor medida posible. Es necesario respetar los espacios naturales a la hora de proyectar la infraestructura, se evitarán las zonas protegidas y de interés especial del territorio.

La mayor afectación al medio ambiente natural que se menciona en la literatura científica contra los parques eólicos el lugar donde. Estos se ubican, preferiblemente en zonas costeras, y suele coincidir con las rutas de las aves migratorias, lo que provoca muertes de la avifauna de esos lugares por el choque con las palas de los aerogeneradores.

Proximidad de subestaciones

Este criterio se centra en el aspecto económico, al igual que el del recurso eólico. Para el transporte de energía eléctrica se necesita construir líneas de alta tensión desde la zona de generación de la energía hasta una subestación de distribución para su consumo. Cuanto más cerca esté el emplazamiento de una subestación de distribución o una línea de alta tensión, menos infraestructura nueva se debe construir para conectar el parque con la red eléctrica.

Además, durante el proceso de transporte de energía eléctrica por líneas de alta tensión se producen pérdidas de energía, debido principalmente a su calentamiento. Por cuanto, se producirán menos pérdidas cuanto más cerca esté el emplazamiento de una infraestructura de distribución de la red eléctrica. Mediante este criterio se quiere reflejar la preferencia de situar el parque eólico en las proximidades de una subestación de distribución, o en su falta, a la menor distancia posible de alguna.

Presencia de emplazamientos existentes

Al proyectar la localización de un parque eólico, este debe emplazarse en donde no existe un emplazamiento ya en funcionamiento o en proyección.

Visibilidad de los aerogeneradores

Debe analizarse si la ubicación es propicia o no, para la exposición pública de los aerogeneradores y su influencia en el paisaje turístico y urbano de la región. Este factor también se ha identificado como uno de los problemas que se aducen en contra de los parques eólicos. El módulo de ZIV (zona de impacto visual) del WindPro facilita la evaluación y prevención de este impacto.

Son múltiples los factores o criterios a tener en cuenta para la determinación de la localización de un parque eólico, cuando se tienen diversas alternativas. Hasta el momento, se han utilizado múltiples técnicas y procedimientos para el logro de la mejor

decisión. En el presente libro se propone el uso de métodos multicriterio neutrosóficos, los cuales serán detallados a continuación.

3.2. Métodos multicriterio para la toma de decisiones

En proyectos de ingeniería la toma de decisión es una actividad intelectual esencial, sin la cual el proyecto no puede progresar. Durante el desarrollo de un proyecto se toman decisiones complejas. Dicha complejidad viene marcada por la trascendencia que muchas de estas decisiones tienen para el proyecto, por las responsabilidades que ello implica para los directores o encargados, por los agentes implicados o afectados por la decisión adoptada; y por los diferentes criterios o puntos de vista que hay que tener en cuenta y, que a menudo están en conflicto (García Cascales, 2009).

La evaluación multicriterio está orientada a la toma de decisiones espaciales. Es un conjunto de técnicas multidimensionales utilizadas para la evaluación de una serie de alternativas que satisfacen uno o varios objetivos a la luz de varios criterios (Gómez y Delgado, 2008).

De acuerdo con Yajure y Guzmán (2017), el análisis multicriterio es un enfoque que permite determinar las preferencias del decisor entre un conjunto de opciones o alternativas. El análisis de decisión multicriterio es tanto un enfoque como un conjunto de técnicas cuya meta es proporcionar un orden global a un grupo de opciones desde la opción más preferida hasta la opción menos preferida. Las metodologías de apoyo para la toma de decisiones se aplican con el objetivo de alcanzar la eficiencia y la productividad y contribuyen a la exploración de escenarios donde intervienen múltiples criterios y alternativas de decisión.

La toma de decisiones y su estudio se han caracterizado a lo largo del tiempo por el predominio de algunos enfoques. Actualmente, varios de estos enfoques se han integrado en modelos que tratan de entender y mejorar el proceso para obtener resultados más satisfactorios para el decisor (Maldonado, 2010).

El proceso de toma de decisiones comprende las fases de cualquier proceso de resolución de problemas, el cual está compuesto por 7 etapas: definición del problema, identificación de las alternativas, determinación de los criterios, evaluación de las alternativas, elección de una opción, implementación de la decisión y evaluación de los resultados (Pérez, 2013).

Llevar a cabo un proceso de toma de decisión efectivo presupone proceder de un modo sistemático y preciso en el que se contemplen y evalúen, tanto los cursos de acción alternativos, como las consecuencias que puedan derivarse de cada acción. La mayoría de los autores que tratan la Teoría de la Decisión concuerdan que son 5 los elementos básicos que están presentes en una situación de decisión. Estos elementos son:

- La existencia de un conjunto de decisiones alternativas (acciones, cursos de acción, estrategias).
- Un conjunto de acciones externas que enfrenta el que toma la decisión, que se denominan estados de la naturaleza, y que constituyen el ambiente o contexto estructural en el que se presenta el problema.

- Los resultados que se obtienen por el uso de una alternativa determinada para los posibles estados de la naturaleza.
- La existencia de un decisor a quien corresponde proponer los criterios de selección y aplicarlos.
- El grado de conocimiento que se tiene sobre el comportamiento de los estados de la naturaleza.

De estos elementos, los tres primeros constituyen los elementos intrínsecos o esenciales de una decisión, mientras los dos restantes tienen más bien un carácter metodológico. Con respecto a estos elementos conviene destacar lo que sigue.

Decisiones alternativas: son las alternativas, cursos de acción o estrategias, que debe elegir el que toma la decisión. Deben expresarse en términos mutuamente excluyentes.

Estados de la naturaleza: son las circunstancias o acciones externas que afectan el resultado de una decisión, pero que están fuera del control del decisor. Se les denomina también eventos, y deben expresarse en términos mutuamente excluyentes y ser colectivamente exhaustivos.

Resultados: pueden expresarse en términos económicos (ganancia, costo, etc.) o en términos de alguna medida no monetaria como preferencias o escalas de valoración.

Ambiente que afecta al conjunto de los estados de la naturaleza: este ambiente puede concretarse, convencionalmente en 3 modalidades fundamentales.

- **Ambiente de certeza o certidumbre:** decimos que se presenta cuando el decisor conoce con precisión, y a priori, el estado de la naturaleza que va a presentarse.
- **Ambiente de riesgo:** decimos que se presenta cuando el conjunto de los estados de la naturaleza es de carácter aleatorio, conociéndose la probabilidad de ocurrencia de cada uno de ellos.
- **Ambiente de incertidumbre:** se presenta cuando el conjunto de los estados de la naturaleza es aleatorio, pero no se conoce o no puede establecerse la probabilidad de ocurrencia de cada uno de ellos.

Hay autores que incluyen un cuarto ambiente que denominan “de conflicto” suponiendo que en lugar de estados de la naturaleza hay un oponente “racional” cuyo objetivo es vencer. Esta situación es objeto de estudio de la llamada Teoría de Juegos.

Lo anterior significa que la teoría de la decisión proporciona una manera útil de clasificar los tipos de situaciones en que puede tomar una decisión, en función del “ambiente” de la decisión, esto es, según sea el conocimiento que se tenga sobre el conjunto de los estados de la naturaleza.

De acuerdo con esto se tienen cuatro situaciones de toma de decisiones las cuales dan lugar a una manera de clasificar los modelos para la toma de decisiones. De ahí que se hable de modelos para la toma de decisiones en condiciones (ambiente) de certeza, riesgo, incertidumbre y conflicto.

Debe además destacarse que, como toda técnica de solución de problemas formales, la teoría de la decisión puede ser aplicable solo a problemas que poseen determinadas características.

Los problemas que trata la teoría de la decisión de un criterio son fundamentalmente problemas de toma de decisiones en riesgo e incertidumbre en los cuales se requiere que el decisor:

- conozca todas las acciones potenciales que puede adoptar, de las cuales debe escoger solo una, antes de que se conozca qué evento ocurrirá,
- conozca todos los posibles eventos o estados de la naturaleza que pueden presentarse y,
- para cada par decisión-evento, sea capaz de asignar una valoración que represente la consecuencia, en términos monetarios o no, de escoger esa acción y que ese evento ocurra.

Al tomar una decisión deben tenerse en cuenta todos los factores que pueden influir en el objeto analizado, establecer comparaciones entre las distintas alternativas que se presentan, y plantear los posibles escenarios que se pueden dar, para de esta forma, tener una previsión de los efectos que la decisión que se va a tomar, ocasionará en el futuro.

El planteamiento clásico de los problemas de toma de decisiones se fundamenta en la consideración de un único criterio de decisión. Este planteamiento se formula mediante una única función, llamada función objetivo y una serie de restricciones que representan los recursos que son limitados y que influyen en la decisión. Para obtener la solución al problema de decisión planteado, la función objetivo se optimiza mediante técnicas matemáticas (maximizar, minimizar), respetando las limitaciones establecidas por las restricciones y se obtiene la mejor solución posible (solución óptima) (Pérez, 2013).

La toma de decisiones y su estudio se han caracterizado a lo largo del tiempo por el predominio de algunos enfoques. Actualmente, varios de estos enfoques se han integrado en modelos que tratan de entender y mejorar el proceso para obtener resultados satisfactorios para el decisor (Maldonado, 2010). Al analizar la evolución del proceso de toma de decisiones en el ámbito empresarial, puede observarse que las técnicas a emplear han ido ofreciendo la posibilidad de la ampliación del campo de utilización de esta rama de las ciencias (ilustración 39).



Ilustración 39. Esquema de evolución de los métodos de decisión

Cuando aún no se tenían herramientas matemáticas que permitieran formalizar un análisis, los hombres recurrían al oráculo, consultaban a los demás hombres, a las estrellas o buscaban señales en la naturaleza que interpretaban como respuestas o pistas respecto a cuándo y qué decisiones tomar. Los primeros pasos hacia el establecimiento de un proceso de toma de decisiones incluyeron el razonamiento acerca de los hechos implicados y las consecuencias de decisiones tomadas en el pasado.

Con el surgimiento de las matemáticas se tuvieron los medios para expresar las variables, relaciones, supuestos, deducciones y derivaciones implicados en los procesos de decisión. Los avances logrados en el estudio de situaciones no determinísticas para las que su análisis y tratamiento requería del concepto de probabilidad, aportaron un nuevo elemento de estudio en la toma de decisiones: el riesgo.

Posteriormente, se perfeccionaron las decisiones en el ámbito económico, al agregar el concepto de utilidad al estudio de la toma de decisiones, entendido como el grado de satisfacción que se obtiene ante cierto resultado.

Con el desarrollo de los “árboles de decisión” se incluye al análisis, el aspecto visual. En él las opciones o alternativas se representan gráficamente en una estructura arbórea que incluye probabilidades, riesgos y costos.

La naturaleza crecientemente compleja de las organizaciones hizo necesario involucrar el enfoque sistémico en la toma de decisiones, y se obtuvo como resultado múltiples técnicas que buscan determinar el mejor curso de acción entre varias alternativas sometidas al escrutinio de diversos criterios en conflicto.

La aplicación de la lógica difusa se deriva de la necesidad de analizar ambientes de decisión en los que los objetivos, las alternativas, los criterios o parámetros no están claramente definidos, son inciertos o están vinculados a interpretaciones cualitativas de carácter subjetivo.

Finalmente, la neutrosofía, ha servido para tratar además las posiciones neutras o indeterminadas, al generalizar el conjunto difuso (especialmente el conjunto difuso e intuicionista), el conjunto para-consistente, el conjunto intuitivo, etc.

Durante mucho tiempo, los problemas de toma de decisiones fueron abordados desde la perspectiva mono-criterio (un único criterio de decisión), pero este planteamiento poco a poco ha ido perdiendo protagonismo en beneficio de la perspectiva multicriterio (diversos criterios, a menudo en conflicto).

Los métodos de toma de decisiones multicriterio han desarrollado una terminología propia y común, que incluye conceptos tales como criterios de decisión.

Criterios de decisión: son los parámetros que permiten reflejar las preferencias del decisor respecto a un atributo. Los criterios $C_j = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, donde $(j = 1, 2, \dots, n)$ siendo n el número de criterios, pueden presentarse de dos formas, criterios cuantitativos (evaluaciones numéricas) y cualitativos (no existe una unidad de medida, la medida es subjetiva). En la mayoría de problemas de decisión multicriterio resulta complicado establecer los criterios, no obstante, su determinación resulta un paso

esencial en el proceso y deben cumplir una serie de requisitos para ser adecuados (Jiménez, 2009).

El concepto de criterio a su vez, engloba los conceptos de objetivo, atributo y meta. Dichos conceptos se aluden a continuación.

Objetivos: delimitan los deseos que se quieren satisfacer, e indican las direcciones de mejora según las preferencias del conjunto decisor. Pueden considerarse como ideales inalcanzables.

Atributos: son las características que definen a las alternativas y miden el grado de alcance o cumplimiento de un objetivo. Para cada alternativa se definen unos atributos que permiten precisar la consecuencia de la decisión en relación con el sistema de preferencias del decisor. Los atributos siempre dan unos valores del decisor respecto a una realidad objetiva y se pueden expresar mediante una función matemática de variables de decisión, de tal forma que cada alternativa se puede caracterizar mediante un conjunto de medidas relacionadas con los objetivos del decisor.

Metas: reflejan los ideales alcanzables. La alternativa que recogerá los atributos establecidos y pueda satisfacer los criterios, al acercarse al máximo a los objetivos establecidos.

Pesos o ponderaciones

Son las medidas de la importancia relativa que los criterios tienen para el decisor. Asociado a los criterios, se asigna un vector de pesos, $w_j = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$, donde ($j = 1, 2, \dots, n$) siendo n el número de criterios a considerar. En los problemas de toma de decisión multicriterio es muy frecuente que los criterios tengan distinta relevancia para el decisor, aunque esto no significa que los criterios menos importantes no deban ser considerados. Estas diferencias justifican la existencia de los pesos asociados a los criterios.

Alternativas

Las alternativas son las decisiones, soluciones o caminos posibles que pueden ser implantados como respuesta a una situación, y se caracterizan por estar dotadas de ventajas o inconvenientes con respecto a los criterios con los cuales son evaluadas. Una alternativa es una opción factible, caracterizada por su desempeño con respecto a los criterios establecidos. El conjunto de las alternativas está definido como, $A_i = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, donde ($i = 1, 2, \dots, m$) siendo m el total de las alternativas posibles.

Cada conjunto de alternativas A contiene alternativas diferentes, excluyentes y exhaustivas. La identificación de alternativas es una parte esencial en la toma de decisiones. La decisión final no podrá alcanzar mejores resultados que lo que le permita la mejor alternativa del conjunto evaluado (Vitoriano, 2007).

Matriz de valoración o decisión

Una vez establecidos los criterios y sus pesos asociados, el decisor es capaz de dar, para cada uno de los criterios considerados y para cada alternativa del conjunto de elección, un valor numérico o simbólico a ij que expresa una evaluación o juicio de la alternativa A_i respecto al criterio C_j .

Esta evaluación puede ser numérica o verbal y se puede representar en forma de matriz; matriz de valoración o de decisión (ilustración 40). Cada fila de la matriz expresa cualidades de la alternativa A_i respecto a los n criterios considerados. Cada columna de la matriz recoge las evaluaciones o juicios emitidos por el decisor de todas las alternativas respecto al criterio C_j .

| | | Criterios y pesos asociados | | | | | |
|--------------|-------|-----------------------------|----------|--------------|----------|-----|----------|
| | | C_1 | C_2 | ... | C_j | ... | C_n |
| | | W_1 | W_2 | ... | W_j | ... | W_n |
| Alternativas | A_1 | a_{11} | a_{12} | ... | a_{1j} | ... | a_{1n} |
| | A_2 | a_{21} | a_{22} | ... | a_{2j} | ... | a_{2n} |
| | ... | ... | ... | Valoraciones | ... | ... | ... |
| | A_i | a_{i1} | a_{i2} | ... | a_{ij} | ... | a_{in} |
| | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| | A_m | a_{m1} | a_{m2} | ... | a_{mj} | ... | a_{nm} |

Ilustración 40. Matriz de decisión

Solución eficiente

Un conjunto de solución es eficiente cuando está formado por soluciones factibles, tales que no existe otra solución factible que proporcione una mejora en un atributo sin producir un empeoramiento en al menos otro de los atributos. Algunos autores denominan a esta solución Pareto Eficiente en honor al economista italiano Vilfredo Pareto.

Los métodos de decisión multicriterio, lejos de ser considerados elementos infalibles y certeros, cuya utilización permite encontrar una solución óptima y definitiva, son una base sustentada en elementos científicos, que aporta mejoras distintivas para asumir una decisión (Berumen y Llamazares, 2007). Según Hammond, Keeney y Raiffa (2001), en todo caso se trata de decisiones basadas en componentes cuantificables que permiten ponderar el riesgo y, en virtud de ello, son capaces de elegir la decisión que, en el mejor de los casos, resulta ser la más satisfactoria, y en el peor, la menos satisfactoria.

¿De dónde provienen los principales aportes a esta rama de las ciencias?

En la evolución histórica de los métodos de decisión multicriterio, se reconocen dos escuelas de pensamiento, la escuela norteamericana y la escuela francesa o europea. La primera incluye los métodos basados en la teoría de utilidad, mientras que la escuela europea incluye los métodos de sobre-clasificación. Sin embargo, existen otros métodos fuera de estas escuelas de pensamiento (Yajure y Guzmán, 2017).

Dentro de la escuela norteamericana sobresalen el Proceso Jerárquico Analítico (AHP por sus siglas en inglés), Ponderación Aditiva Simple (SAW por sus siglas en inglés), Técnica de Ponderación Multiatributo Simple (SMART por sus siglas en inglés), entre otras. Mientras que, por la escuela europea, se distinguen los métodos PROMETHEE y ELECTRE. Fuera de estas escuelas han surgido otros métodos entre los que destaca la Técnica para orden de preferencias por similitud con soluciones ideales (TOPSIS) y VIKOR (*Vlsekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje*).

A continuación, se detallan los métodos multicriterio que se proponen utilizar para la determinación de la localización de los parques eólicos. Primeramente, se expondrán los métodos tradicionales y luego, su variante desde la neutrosofía.

3.2.1. Método AHP

El método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) se considera como una herramienta con grandes potencialidades dentro de los diversos métodos de decisión multicriterio, a la hora de identificar y resolver los problemas, así como para determinar las acciones cuyos resultados serán los procesos de diseño, implementación, validación, control y evaluación enfrentados cotidianamente por las empresas del sector industrial.

Fue desarrollado por Thomas Saaty en 1980 y consiste, esencialmente, en formalizar nuestra comprensión intuitiva de problemas complejos al utilizar una estructura jerárquica. Tiene tres conceptos fundamentales: la estructuración del problema de decisión complejo como una jerarquía de objetivo, criterios y alternativas, comparaciones por pares de elementos del mismo nivel de la jerarquía con respecto a cada criterio del nivel superior, y finalmente de manera vertical, se sintetizan los juicios sobre los diferentes niveles de la jerarquía (Avendaño, 2017).

En su apéndice matemático, Saaty (1998) especifica que el AHP se presenta en cinco axiomas.

Axioma 1. referente a la condición de juicios recíprocos: la intensidad de preferencia de A_i/A_j es inversa a la preferencia de A_j/A_i .

Axioma 2. referente a la condición de homogeneidad de los elementos: los elementos que se comparan son del mismo orden de magnitud.

Axioma 3. referente a la condición de estructura jerárquica o estructura dependiente de reaprovechamiento: dependencia en los elementos de dos niveles consecutivos en la jerarquía y dentro de un mismo nivel.

Axioma 4 referente a condición de expectativas de orden de rango: las expectativas deben estar representadas en la estructura en términos de criterios y alternativas.

La aplicación del método AHP se soporta en la estructuración de la jerarquía del problema de forma visual (ilustración 41), donde se construye una jerarquía de atributos que contiene el propósito u objetivo del problema, los distintos criterios de decisión y las alternativas.

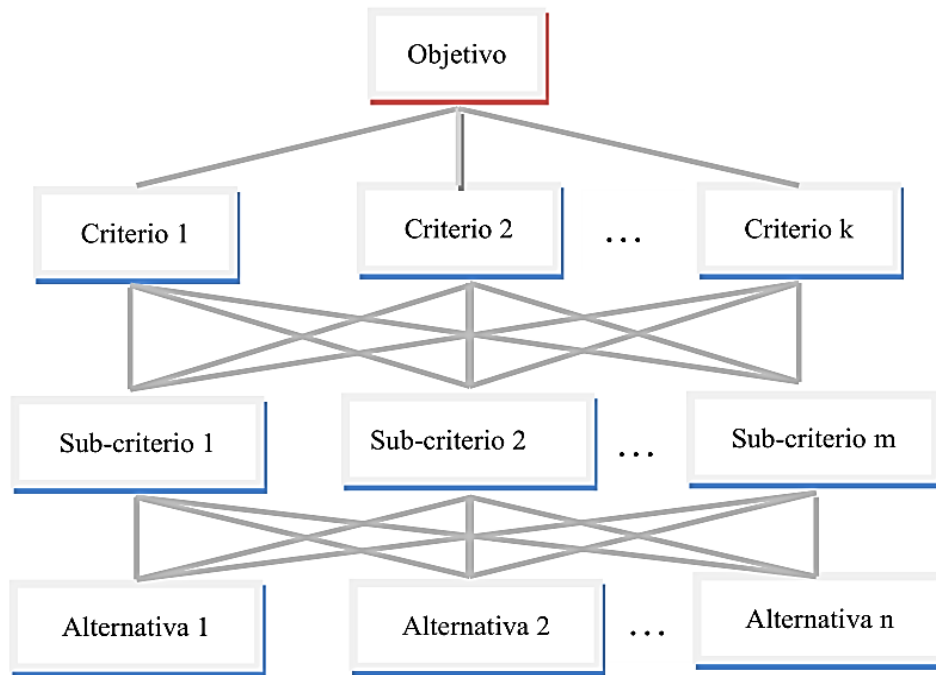


Ilustración 41. Esquema, en forma de árbol, sobre los elementos necesarios para aplicar el método AHP (Comas, Campaña y Beltrán, 2020)

Para su aplicación se propone ejecutar los siguientes pasos

- Definir el problema y los criterios de decisión en forma de objetivos jerárquicos

La jerarquización se estructura en diferentes niveles, se inicia en el tope con la definición del objetivo principal del proceso de jerarquización, luego, se definen los niveles intermedios (criterios y sub-criterios a evaluar), y finalmente, en el nivel más bajo, se describen las alternativas a ser comparadas.

- Evaluar (pesar) los diferentes criterios, sub-criterios y alternativas en función de su importancia correspondiente en cada nivel

Criterios cualitativos y cuantitativos pueden ser comparados usando juicios informales para obtener los pesos y las prioridades. Para criterios cualitativos, la técnica AHP utiliza simples comparaciones (pareadas-pairwise) para determinar los pesos y evaluarlos. De esta forma, el analista puede concentrarse en solo dos criterios al mismo tiempo e indicar cuántas veces es más importante un elemento sobre otro elemento con respecto al criterio o propiedad con el cual están siendo comparados.

De hecho, la técnica AHP está basada en la suposición de que el analista (decisor) puede de forma más fácil elegir un valor de comparación que un valor absoluto. Los juicios verbales son trasladados a una escala de puntuación propuesta por Saaty (2008) (ilustración 42).

Después de haber determinado los valores de las comparaciones para cada nivel, estos se consignan en una denominada Matriz de comparación por pares (Gómez, Zuluaga y Vázquez, 2015).

| Intensidad de Importancia | Definición |
|---------------------------|---|
| 1 | Igual Importancia |
| 3 | Importancia moderada |
| 5 | Fuerte Importancia |
| 7 | Muy fuerte o importancia demostrada |
| 9 | Importancia extrema |
| 2,4,6,8 | |
| Valores Recíprocos | Si la actividad i tiene uno de los números diferente de cero ya nombrados, cuando se compara con la actividad j , entonces la actividad j tiene el valor recíproco correspondiente cuando se compara con la actividad i . |

Ilustración 42. Escala de comparación del método AHP (Yajure y Guzmán, 2017)

- Determinar las ponderaciones de cada sub-criterio con respecto al criterio anterior

Para calcularlas se normalizan las columnas de las Matrices de comparación por pares dividiendo cada número de una columna por su suma total, y a partir de estos valores se obtiene el valor promedio de los valores de cada fila, los cuales corresponden a los valores del vector principal que reporta las ponderaciones de prioridad de los p criterios o subcriterios.

Saaty (1990), demostró matemáticamente que el autovector normalizado calculado a partir de la matriz es la mejor aproximación de evaluación de los criterios analizados. En el caso de criterios cuantitativos, es necesario diseñar un método de priorización que permita cuantificar de forma consistente el peso de cada criterio a ser analizado (Taoufikallah, s/f).

El método AHP permite al analista evaluar la congruencia de los juicios con el radio de inconsistencia (RI). Antes de determinar una inconsistencia, es necesario estimar el índice de consistencia (IC) de una $n \times n$ matriz de juicios, donde IC viene definido por:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

Donde λ_{max} es el máximo autovalor de la matriz.

De esta forma RI es definido por:

$$RI = \frac{IC}{R_i} \quad (2)$$

Donde R_i es un valor aleatorio promedio de CI para una matriz $n \times n$. Los valores de R_i son mostrados en la Tabla 2.

| N | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------|---|---|------|------|------|------|------|
| R_i | 0 | 0 | 0,52 | 0,89 | 1,11 | 1,25 | 1,35 |

Tabla 2. Valores de R_i para matrices de diferentes órdenes propuesta por Saaty (Taoufikallah, s/f)

Los juicios pueden ser considerados aceptables si RI es inferior o igual 0,1. En casos de inconsistencia, el proceso de evaluación para la matriz evaluada es inmediatamente repetido. Inconsistencias superiores a 0,1 o más, justifican una mayor investigación de los criterios evaluados.

- Construir matriz de pagos de alternativas

En esta matriz, para cada criterio de último nivel se hace una valoración de las consecuencias de las alternativas. Se tienen dos opciones (Gómez, Zuluaga y Vázquez, 2015).

Si se tienen los datos de las alternativas vs criterios (matriz de pagos), se emplea la ecuación 3 donde se normalizan los valores Z_i a valores A_i para cada criterio i .

$$\sum_{i=1}^n A_i = 1 \quad (3)$$

Si no se cuenta con la matriz de pagos, el decisor realiza comparaciones para formar una matriz $n \times n$ de importancia relativa entre alternativas, semejante a la de los criterios.

- Determinar evaluaciones totales de las alternativas

La evaluación definitiva de cada alternativa se obtiene al emplear la ecuación 4 para cada criterio j de último nivel.

$$V_j(A_k) = \sum_{i=1}^q p_i \times a_{ki} \quad (4)$$

Donde:

V_j : es la evaluación de la alternativa A_k

A_k : es la alternativa k , ($k = 1, 2, \dots, n$)

p_i : es la ponderación de prioridad del criterio o subcriterio i , ($i = 1, 2, \dots, q$)

a_{ki} : corresponde al valor de la alternativa A_k evaluada con respecto al criterio Z_i .

Debe realizarse este cálculo para cada criterio de otros niveles, hasta llegar al nodo de jerarquía principal.

El éxito de la implantación de las metodologías de jerarquización, dependerá fundamentalmente del recurso humano involucrado, motivo por el cual, hay que tener un especial cuidado en el proceso de inducción y en la formación del personal que participará en este proceso. El proceso de inducción y formación deberá ser capaz de motivar al personal y de generar en este, el compromiso necesario, para implantar las metodologías de jerarquización de forma eficiente. El AHP está diseñado como herramienta de modelización flexible y adaptable a las necesidades específicas de cualquier organización y permite, no solo medir el grado de consistencia del decisor al realizar comparaciones sino también, conocer la estructura del problema por medio de una jerarquía representativa (Taoufikallah, s/f).

3.2.2. Método TOPSIS

El método TOPSIS (Técnica para orden de preferencias por similitud con soluciones ideales) o también llamado Programación por Compromiso, es una técnica de programación matemática utilizada originalmente en contextos continuos y que ha sido modificada para el análisis de problemas multicriterio de tipo discretos. Es utilizada para identificar soluciones que se encuentran lo más cerca posible a una solución ideal, aplicando para ello alguna medida de distancia. Las soluciones así identificadas se denominan soluciones compromiso y constituyen el conjunto de compromiso.

El método TOPSIS se debe a Hwang y Yoon (1981), y afronta el problema de establecer un orden en las alternativas utilizando la idea de distancia a la alternativa ideal y a la alternativa anti-ideal.

Sean las alternativas $A_i = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, con $(i = 1, 2, \dots, m)$ siendo m el total de las alternativas posibles, $C_j = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, con $(j = 1, 2, \dots, n)$ siendo n el número de criterios, $w_j = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$, con $(j = 1, 2, \dots, n)$ los pesos de los criterios y una matriz de decisión con $x_{ij} = U_j(A_i), \forall i, j$ donde U es la función utilidad del decisor, operando sobre la base de que todos los criterios sean a maximizar/minimizar según se estén considerando ganancias o costos, respectivamente: se denomina punto ideal positivo en \mathfrak{R}_n al punto A^+ , que es la mejor opción posible, y A^- la solución ideal negativa en \mathfrak{R}_n , la peor opción posible.

Un decisor racional siempre elegiría A^+ , y si este valor no se correspondiera con alguna de las alternativas, elegiría aquella que estuviera más cercana a ella.

El algoritmo para la aplicación del método TOPSIS sigue los siguientes pasos (Ceballos y otros, 2013)

- Construcción de la matriz de decisión

Partiendo de m alternativas $A_i = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ que serán evaluadas a partir de los criterios $C_j = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ se obtiene la matriz de decisión de la ilustración 43, donde x_{ij} representa la valoración de la alternativa A_i con respecto al criterio C_j y $w_j = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ es el vector de pesos asociado a los criterios.

| | | | | |
|-------|----------|----------|-----|----------|
| | w_1 | w_2 | ... | w_n |
| | C_1 | C_2 | ... | C_n |
| A_1 | x_{11} | x_{12} | ... | x_{1n} |
| A_2 | x_{21} | x_{22} | ... | x_{2n} |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| A_m | x_{m1} | x_{m2} | ... | x_{mn} |

Ilustración 43. Matriz de decisión inicial del método TOPSIS

- Normalización de la matriz de decisión

Los elementos de la matriz de decisión pueden no estar definidos en el mismo dominio, y por ello han de ser normalizados. La norma que se usa estará dada por la ecuación 5:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ij})^2}}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

- Construcción de la matriz de decisión normalizada ponderada

Los elementos de la matriz de decisión normalizada ponderada V se calcularán con la expresión 6:

$$v_{ij} = w_j \times n_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

- Obtención de la solución ideal positiva (PIS) y la solución ideal negativa (NIS)

Los valores ideales positivos y negativos (A^+ y A^-) se determinan mediante las expresiones 7 y 8, respectivamente, donde J está asociado con los criterios de beneficio y J' está asociado a criterios de costo.

$$A^+ = \{v_1^+, \dots, v_n^+\} = \{(\max_i v_{ij}, j \in J)(\min_i v_{ij}, j \in J')\} \quad (7)$$

$$A^- = \{v_1^-, \dots, v_n^-\} = \{(\min_i v_{ij}, j \in J)(\max_i v_{ij}, j \in J')\} \quad (8)$$

- Cálculo de las medidas de distancia

La distancia de cada alternativa a la solución ideal positiva, d^+ , y a la solución ideal negativa, d^- , se calculan mediante las ecuaciones 9 y 10:

$$d^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

$$d^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

- Cálculo de la proximidad relativa a la solución ideal

La proximidad relativa R_i a la solución ideal positiva se calculará mediante la expresión 11. De forma que, cuanto más próximo es el valor de R a la unidad 1, más cerca estará la alternativa i –ésima a la solución ideal.

$$R_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

- Ordenación de preferencias

Las alternativas se ordenarán en sentido decreciente, comenzando con aquella que más se aproxime a la solución ideal (mayor proximidad relativa).

Las soluciones PIS y NIS representan los valores extremos del espacio n -dimensional asociado a la matriz normalizada y ponderada. Estas pueden diferir para un mismo problema según A^+ y A^- se calculan teniendo en cuenta los valores de la matriz de

decisión o bien se tenga en cuenta esa matriz más dos nuevas alternativas cuyos valores serán los extremos superior e inferior del rango de cada uno de los criterios, respectivamente.

El modelo tradicional descrito por Hwang y Yoon (1981) recomienda el uso de variables numéricas. Algunos trabajos como Cables, García-Cascales y Lamata (2012) describen un modelo difuso para el método TOPSIS que puede utilizar variables lingüísticas o categóricas según un criterio determinado. Posiblemente la aplicación de variables categóricas también puede ser posible mediante el uso de otras métricas para medir distancias.

También hay problemas para establecer ponderaciones para cada criterio de evaluación. Una alternativa presentada por Li, Wang, Liu, Xin, Yan Gao (2011) es el uso del modelo de Entropía de la Información para establecer los pesos w_j . Así pues, el modelo de análisis de rendimiento TOPSIS prioriza la comparación de una alternativa con escenarios de ideas hipotéticas. Esta comparación puede generar inestabilidad en los procesos más dinámicos, que se denominan problemas de inversión de orden (Kreuzberg, 2017).

Por el contrario, el método VIKOR, que se presentará en el próximo epígrafe, trata de asegurar una mayor estabilidad a la clasificación formada, al considerar tanto el rendimiento en comparación con el mejor escenario, como el rendimiento en el criterio de mayor potencial de la alternativa.

3.2.3. Método VIKOR

El método ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR) fue presentado por Opricovic (1998), quien basó su idea en los problemas de la Programación de Compromiso de Yu (1973) y Zeleny (1982). La idea inicial del modelo es establecer una clasificación según las distancias en relación con un escenario ideal.

La principal diferencia estructural de este método con la TOPSIS está relacionada con su vínculo con las funciones de compromiso. Opricovic y Tzeng (2004) examinan las diferencias entre el método TOPSIS y el método VIKOR. Según los autores, el método VIKOR es superior al método TOPSIS, en cuanto a sopesar la importancia de las distancias en relación con los escenarios ideales y tiene un mejor rendimiento en un criterio potencial de la alternativa analizada. Aun así, según los autores, esta comparación establece el método VIKOR como un método en el que la clasificación formada es más estable que el método TOPSIS.

El método se basa en la función del Método de Programación de Compromisos descrito por Yu (1973) y Zeleny (1982). Al asumir como notación el conjunto de alternativas A definidas como n 1, donde para la alternativa i , el valor normalizado de su evaluación en el criterio j viene dado por f_{ij} . Así pues, la función de compromiso puede definirse como la expresión 12, donde $1 \leq p \leq \infty$ y $i = 1, 2, \dots, n$ asumiendo que j denota al criterio específico y que m es el número de criterios usados en el modelo. También, f_j^* es el mejor resultado obtenido para el criterio j y f_j^- es el peor resultado obtenido para el criterio j .

$$L_{p,i} = \left\{ \sum_{j=1}^m \left[\frac{w_j(f_j^* - f_{ij})}{(f_j^* - f_j^-)} \right]^p \right\}^{\frac{1}{p}} \quad (12)$$

Inicialmente el método VIKOR construye dos puntuaciones utilizadas para la clasificación, S y R . La construcción de estas puntuaciones está ligada a la función de compromiso, donde se supone que $p = 1$ para S y $p = \infty$ para R . Para ello deben seguirse los siguientes pasos.

- Construcción de la matriz de decisión

Partiendo de m alternativas $A_i = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ que serán evaluadas a partir de los criterios $C_j = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ se obtiene la matriz de decisión (ilustración 43)

- Normalización de la matriz de decisión

Son normalizados los elementos de la matriz de decisión, si no están definidos en el mismo dominio. La norma que se usa estará dada por la ecuación 5.

- Determinación de los ideales positivo y negativo

Se determinan los mejores, f_j^* y los peores f_j^- valores de cada criterio, de la forma siguiente.

$$f_j^* = \max_i f_{ij} \quad f_j^- = \min_i f_{ij} \text{ si la función } i \text{ representa un beneficio}$$

$$f_j^* = \min_i f_{ij} \quad f_j^- = \max_i f_{ij} \text{ si la función } i \text{ representa un costo}$$

- Cálculo de los valores de S , R y Q

Se calculan S_i y R_i para cada una de las alternativas, a través de las ecuaciones 13 y 14, respectivamente, donde w_i denota los respectivos pesos de los criterios sobre su relativa importancia.

$$S_i = \sum_{j=1}^m \frac{w_j(f_j^* - f_{ij})}{(f_j^* - f_j^-)} \quad (13)$$

$$R_i = \max_j \left[\frac{w_j(f_j^* - f_{ij})}{(f_j^* - f_j^-)} \right] \quad (14)$$

Entonces, se calculan los valores Q_j para $j = 1, 2, \dots, m$ aplicando la ecuación 15:

$$Q_i = v \left(\frac{S_j - S^+}{S^- - S^+} \right) + \frac{(1-v)(R_j - R^+)}{(R^- - R^+)} \quad (15)$$

Donde:

$$S^+ = \min_j S_j, \quad S^- = \max_j S_j$$

$$R^+ = \min_j R_j, \quad R^- = \max_j R_j$$

y v es introducido como un peso de la estrategia de decisión de la máxima utilidad grupal y $1 - v$ el peso de la oposición individual. Usualmente, v es fijado como 0,5.

- Selección de la solución de compromiso

Por último, después de realizar la clasificación de las alternativas ordenando cada uno de los valores de S , R y Q en orden decreciente, se selecciona la alternativa A_{j_1} correspondiente a $Q_{[1]}$ (el valor mínimo entre los Q_j) como solución de compromiso, si se cumplen las siguientes condiciones:

Condición 1. Ventaja aceptable

La alternativa A_{j_1} tiene una ventaja aceptable en el caso, si $Q_{[2]} - Q_{[1]} \geq DQ$, donde $DQ = \frac{1}{(m-1)}$ y m es el número de las alternativas.

Condición 2. Estabilidad aceptable en el proceso de decisión

La alternativa es estable en el marco de la toma de decisiones, si esta alternativa tiene la mejor clasificación en S y/o R .

En el caso de que una de estas condiciones no se cumpla, se crea un conjunto de soluciones de compromiso. Este conjunto consta de:

- Alternativas A_{j_1} y A_{j_2} , donde $A_{j_2} = Q_{[2]}$, cuando la condición 2 no se satisface.
- Alternativas $A_{j_1}, A_{j_2}, \dots, A_{j_k}$ cuando no se cumple la condición 1 y $A_{j_k} = Q_{[k]}$ con el valor máximo, que aún satisface la ecuación $Q_{[k]} - Q_{[1]} \geq DQ$.

El método VIKOR es una herramienta eficaz como método de decisión multicriterio en aquellos casos en los cuales el decisor no es capaz, o no sabe, expresar sus preferencias al inicio del proceso de diseño. La solución de compromiso obtenida puede ser aceptada por el decisor, ya que proporciona la máxima utilidad de grupo a la mayoría, representado por el mínimo "S" y una oposición mínima individual representada por el mínimo "R" (Opricovic y Tzeng, 2007).

3.3. Fundamentos básicos sobre neutrosofía

La neutrosofía fue propuesta por Smarandache (2002) para el tratamiento de las neutralidades. Esta ha formado las bases para una serie de teorías matemáticas como la lógica neutrosófica, los conjuntos neutrosóficos, la probabilidad neutrosófica y la estadística neutrosófica, así como múltiples aplicaciones prácticas.

La lógica neutrosófica es una generalización de la lógica difusa de Zadeh (1965), y especialmente, de la lógica difusa intuitiva de Atanassov (1986), unida a otras lógicas multivaluadas (ilustración 44). La lógica neutrosófica proporciona un mecanismo de inferencia que permite simular los procedimientos de razonamiento humano en sistemas basados en el conocimiento. La teoría de la lógica neutrosófica proporciona un marco matemático que permite modelar la incertidumbre de los procesos cognitivos humanos de forma que pueda ser tratable por las computadoras.

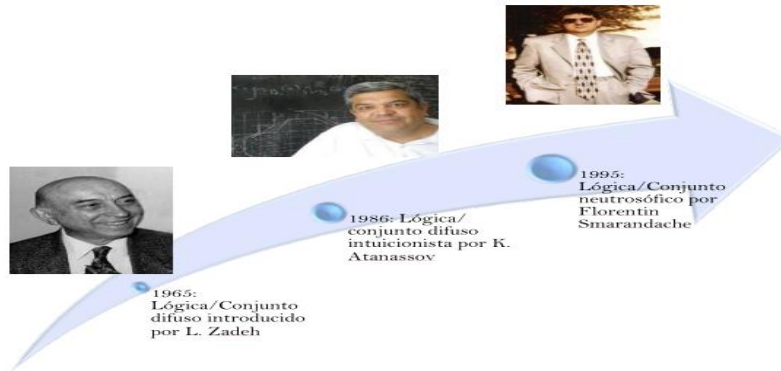


Ilustración 44. Antecedentes de la lógica neutrosófica (Ceballos y otros, 2018)

El valor de verdad en el conjunto neutrosófico es el siguiente (Smarandache, 1998): Sea N un conjunto definido como: $N = \{(T, I, F): T, I, F \subseteq [0,1]\}$, una valoración neutrosófica n es un mapeo del conjunto de fórmulas proposicionales, es decir que para cada sentencia p tenemos $v(p) = (T, I, F)$.

Con la idea de aplicar los conjuntos neutrosóficos con fines prácticos surgieron los conjuntos neutrosóficos de valor único (SVNS, por sus siglas en inglés) con el objetivo de facilitar las aplicaciones en el mundo real de los conjuntos de neutrosóficos y los operadores de conjuntos teóricos.

Un conjunto neutrosófico de valor único (SVNS) se define de la siguiente manera:

Sea X un universo de discurso, un SVNS A sobre X tiene la forma siguiente:

$$A = \{(x, u_a(x), r_a(x), v_a(x)): x \in X\}d \quad (16)$$

Donde:

$$u_a(x): X \rightarrow [0,1], r_a(x): X \rightarrow [0,1] \text{ y } v_a(x): X \rightarrow [0,1]$$

Con

$$0 \leq u_a(x), r_a(x), v_a(x) \leq 3, \quad \forall x \in X$$

Por cuestiones de conveniencia un número neutrosófico de valor único (SVNS) será expresado como $A = (a, b, c)$, donde $a, b, c \in [0,1]$ y satisface $0 \leq a + b + c \leq 3$.

Algunas operaciones entre SVNS se expresan a continuación:

- Dados $A_1 = (a_1, b_1, c_1)$ y $A_2 = (a_2, b_2, c_2)$ dos SVNS, se tiene que la suma entre A_1 y A_2 se define como:

$$A_1 \oplus A_2 = (a_1 + a_2 - a_1a_2, b_1b_2, c_1c_2) \quad (17)$$

- Dados $A_1 = (a_1, b_1, c_1)$ y $A_2 = (a_2, b_2, c_2)$ dos SVNS se tiene que la multiplicación entre A_1 y A_2 se define como:

$$A_1 \otimes A_2 = (a_1a_2, b_1 + b_2 - b_1b_2, c_1 + c_2 - c_1c_2) \quad (18)$$

- El producto por un escalar $\lambda \in \mathfrak{R}$ positivo con un SVNS, $A = (a, b, c)$ se define por:

$$\lambda A = (1 - (1 - a)^\lambda, b^\lambda, c^\lambda) \quad (19)$$

- Sea $\{A_1, A_2, \dots, A_n\} \in \text{SVNS}(x)$, donde $A_j = (a_j, b_j, c_j)$ ($j = 1, 2, \dots, n$), el Operador de la media ponderada neutrosófica de valor único (SVNWA) propuesto por Ye (2014) está definido de la siguiente forma:

$$P_w(A_1, A_2, \dots, A_n) = \langle 1 - \prod_{j=1}^n (1 - T_{A_j}(x))^{w_j}, \prod_{j=1}^n (I_{A_j}(x))^{w_j}, \prod_{j=1}^n (F_{A_j}(x))^{w_j} \rangle \quad (20)$$

Donde:

$w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ is vector of A_j ($j = 1, 2, \dots, n$) such that $w_n \in [0,1]$ y $\sum w_j = 1$.

- Sea $A = (a, b, c)$ un número neutrosófico de valor único, la función de puntuación S , basada en el grado de pertenencia de verdad, indeterminación o falsedad, propuesta por Deli (2015) está definida por:

$$S(A_j) = 2 + T_j - F_j - I_j \quad (21)$$

Adicionalmente se define la función de precisión como:

$$T(A_j) = T_j - F_j \quad (22)$$

Y entonces:

- Si $S(A_j) < S(A_i)$, entonces $A_j < A_i$.
- Si $S(A_j) = S(A_i)$ y $T(A_j) < T(A_i)$ entonces $A_j < A_i$
- Si $S(A_j) = S(A_i)$ y $T(A_j) = T(A_i)$ entonces $A_j = A_i$

Otra opción es usar la función de puntuación propuesta por Ye (2014):

$$S(A) = \frac{1+a-2b-c}{2} \quad (23)$$

Donde:

$$S(A) \in [-1,1]$$

- Sea $A^* = (A_1^*, A_2^*, \dots, A_n^*)$ un vector SVNS tal que $A_j^* = (a_j^*, b_j^*, c_j^*)$ ($j = 1, 2, \dots, n$) y $B_i = (B_{i1}, B_{i2}, \dots, B_{im})$ ($i = 1, 2, \dots, m$) y sean m vectores tal que $B_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, \dots, c_{ij})$ ($i = 1, 2, \dots, m$) ($j = 1, 2, \dots, n$), entonces la distancia entre B_i y A^* puede ser calculada con:

$$s_i = \left(\frac{1}{3} \sum_{j=1}^n \left\{ (a_{ij} - a_j^*)^2 + (b_{ij} - b_j^*)^2 + (c_{ij} - c_j^*)^2 \right\} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

La aplicación más frecuente de las operaciones con SVNS es su asociación con variables lingüísticas para la evaluación cualitativa, clasificación, o de manera general,

recogida de información con naturaleza imprecisa, indeterminada o subjetiva. Ello se debe a que, por lo general, los expertos se sienten más cómodos proporcionando su conocimiento utilizando términos cercanos a la forma en que los seres humanos usan por medio de las variables lingüísticas (Cabezas y otros 2017). Una variable lingüística es una variable cuyos valores son palabras o frases en un lenguaje natural o artificial (Romero y otros, 2020).

3.3.1. Método AHP neutrosófico

El AHP neutrosófico tiene varias ventajas con respecto al AHP clásico, por ejemplo, presenta al usuario con un marco de estructura más rico que el AHP clásico, el AHP difuso y el AHP difuso intuicionista. Describe los valores de juicio del experto manejando de manera eficiente la vaguedad y la incertidumbre sobre el AHP difuso y el AHP difuso intuicionista, porque considera tres grados diferentes: grado de membrecía, grado de indeterminación y grado de no membrecía. Otra ventaja es que se calcula a partir de términos lingüísticos, lo que permite una comunicación más natural con los expertos (Basset, Mohamed y Smarandachem, 2018) (Comas, Campaña y Beltrán, 2020).

El AHP neutrosófico consiste en aplicar los pasos siguientes.

- Definir el problema y los criterios de decisión en forma de objetivos jerárquicos

Este paso se cumple igual que en el método AHP clásico. Los expertos deben diseñar un árbol AHP como el que se mostró en la ilustración 41. Esto implica que debe especificarse los criterios, sub-criterios y las alternativas para realizar la evaluación.

- Evaluar (pesar) los diferentes criterios, sub-criterios y alternativas en función de su importancia correspondiente en cada nivel

Para crear las matrices por cada nivel del árbol AHP para los criterios, sub-criterios y alternativas, según las evaluaciones de los expertos expresados en forma de escalas de SVNS, se adapta la escala numérica de Saaty original a una escala lingüística como se puede apreciar en la tabla 3.

| ESCALA DE SAATY | DEFINICIÓN | SVNS |
|-----------------|-------------------------------------|--------------------|
| 1 | Igual importancia | (0.50, 0.50, 0.50) |
| 3 | Importancia moderada | (0.30, 0.75, 0.70) |
| 5 | Fuerte importancia | (0.80, 0.15, 0.20) |
| 7 | Muy fuerte o importancia demostrada | (0.90, 0.10, 0.10) |
| 9 | Importancia extrema | (1, 0, 0) |

| | | |
|---|---|--------------------|
| 2 | | (0.40, 0.65, 0.60) |
| 4 | Valores esporádicos entre dos escalas cercanas entre las anteriores | (0.60, 0.35, 0.40) |
| 6 | | (0.70, 0.25, 0.30) |
| 8 | | (0.85, 0.10, 0.15) |

Tabla 3. Escala numérica de Saaty adaptada a una escala neutrosófica

- Determinar las ponderaciones de cada sub-criterio con respecto al criterio anterior

Se verifica la consistencia de las evaluaciones por cada matriz. Para ello, se convierte la matriz D de SVNS en una matriz de números *crisp* a través de las funciones de puntuación definidas en las ecuaciones 21 y 22, para luego aplicar los métodos usados en el AHP original.

3.3.2. Método TOPSIS neutrosófico

El método TOPSIS para SVNS consiste en que, suponiendo que $A = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m\}$ es un conjunto de alternativas y $B = \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n\}$ es un conjunto de criterios, se llevarán a cabo los pasos siguientes.

- Determinar el peso de los expertos

Para determinar el peso de los expertos, los especialistas seleccionados autoevalúan su nivel de conocimiento en el tema a analizar según una escala lingüística asociada a valores SVNS. En la tabla 4 se ofrece un ejemplo de escalas lingüística con su SVNS asociados.

| TÉRMINO LINGÜÍSTICO | EVALUCIÓN | SVN NUMBERS |
|---------------------|-----------|--------------------|
| EXTREMADAMENTE ALTO | EA | (1; 0; 0) |
| MUY MUY ALTO | MMA | (0.9, 0.1, 0.1) |
| MUY ALTO | MA | (0,8; 0,15; 0,20) |
| ALTO | A | (0.70,0.25,0.30) |
| POCO ALTO | PA | (0,60; 0,35; 0,40) |
| MEDIO | M | (0,50; 0,50; 0,50) |
| ENTRE BAJO Y MEDIO | BM | (0,40; 0,65; 0,60) |
| BAJO | B | (0.30,0.75,0.70) |

| | | |
|---------------------|-----|--------------------|
| MUY BAJO | MB | (0,20; 0,85; 0,80) |
| MUY MUY BAJO | MMB | (0.10,0.90,0.90) |
| EXTREMADAMENTE BAJO | EB | (0; 1; 1) |

Tabla 4. Escala de términos lingüísticos

Si se tiene que $A_t = (a_t, b_t, c_t)$ es el SVNS correspondiente al t-ésimo decisor ($t = 1, 2, \dots, k$), el peso de cada experto se calcula por la fórmula siguiente:

$$\lambda_t = \frac{a_t + b_t \left(\frac{a_t}{a_t + c_t} \right)}{\sum_{t=1}^k a_t + b_t \left(\frac{a_t}{a_t + c_t} \right)} \quad (25)$$

Donde:

$$\lambda_t \geq 0 \text{ y } \sum_{t=1}^k \lambda_t = 1$$

- Construcción de la matriz de decisión neutrosófica de valores únicos agregados

Esta matriz se define por $D = \sum_{t=1}^k \lambda_t d_{ij}$, donde $d_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$ y se utiliza para agregar todas las evaluaciones individuales.

Las evaluaciones de los expertos, a cada decisión según cada criterio, también se hacen sobre la base de una escala de términos lingüísticos asociados a SVNS. En la tabla 5 se ofrece un ejemplo de escala para utilizar en este caso.

| TÉRMINO LINGÜÍSTICO | EVALUCIÓN | SVN NUMBERS |
|---------------------------|-----------|--------------------|
| EXTREMADAMENTE IMPORTANTE | EI | (1; 0; 0) |
| MUY MUY IMPORTANTE | MMI | (0,9, 0,1, 0,1) |
| MUY IMPORTANTE | MI | (0,8; 0,15; 0,20) |
| IMPORTANTE | I | (0,75,0,25,0,2) |
| MEDIO | M | (0,50; 0,50; 0,50) |
| POCO IMPORTANTE | PM | (0,40; 0,65; 0,70) |
| CASI NADA IMPORTANTE | CNI | (0,25,0,75,0,80) |
| NADA IMPORTANTE | NI | (0; 1; 1) |

Tabla 5. Escala de términos lingüísticos

Una vez obtenidas las evaluaciones ofrecidas por los expertos se calcula d_{ij} como la agregación de las evaluaciones dadas por cada experto $(a_{ij}^t, b_{ij}^t, c_{ij}^t)$, utilizando los pesos de cada uno con ayuda de la ecuación 25.

De esta manera se obtiene una matriz $D = (d_{ij})_{ij}$, donde cada d_{ij} es un SVNS ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$).

- Determinación del peso de los criterios

Supóngase que el peso de cada criterio está dado por $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$, donde w_j denota la importancia relativa al criterio δ_j . Si $w_j^t = a_j^t, b_j^t, c_j^t$ es la evaluación del criterio δ_j por el t -ésimo experto.

Entonces se utiliza la función de agregación de la ecuación 20, para agregar los w_j^t con los pesos λ_t .

- Construcción de la matriz de decisión neutrosófica de la media ponderada de valores únicos con respecto a los criterios

$$D^* = D \otimes W, \text{ donde } d_{ij}^* = W_j \otimes d_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}) \quad (26)$$

- Cálculo de las soluciones ideales SVNS positiva y negativa

Los criterios pueden ser clasificados como de tipo costo o tipo beneficio. Sea Δ_1 el conjunto de criterios tipo beneficios y Δ_2 los criterios tipo costo. Las alternativas ideales se definirán de la siguiente forma:

$$\gamma^+ = (a_{\gamma^+w}(\delta_j), b_{\gamma^+w}(\delta_j), c_{\gamma^+w}(\delta_j)) \quad (27)$$

Denota la solución ideal positiva, correspondiente a G_1 .

$$\gamma^- = (a_{\gamma^-w}(\delta_j), b_{\gamma^-w}(\delta_j), c_{\gamma^-w}(\delta_j)) \quad (28)$$

Denota la solución ideal negativa, correspondiente a G_2 .

Donde:

$$a_{\gamma^+w}(\delta_j) = \begin{cases} \max_i a_{\gamma_i w}(\delta_j), & \text{si } j \in \Delta_1 \\ \min_i a_{\gamma_i w}(\delta_j), & \text{si } j \in \Delta_2 \end{cases} \quad (29)$$

$$b_{\gamma^+w}(\delta_j) = \begin{cases} \min_i b_{\gamma_i w}(\delta_j), & \text{si } j \in \Delta_1 \\ \max_i b_{\gamma_i w}(\delta_j), & \text{si } j \in \Delta_2 \end{cases} \quad (30)$$

$$c_{\gamma^+w}(\delta_j) = \begin{cases} \min_i c_{\gamma_i w}(\delta_j), & \text{si } j \in \Delta_1 \\ \max_i c_{\gamma_i w}(\delta_j), & \text{si } j \in \Delta_2 \end{cases} \quad (31)$$

y

$$a_{\gamma^-w}(\delta_j) = \begin{cases} \min_i a_{\gamma_i w}(\delta_j), & \text{si } j \in \Delta_1 \\ \max_i a_{\gamma_i w}(\delta_j), & \text{si } j \in \Delta_2 \end{cases} \quad (32)$$

$$b_{\gamma^-w}(\delta_j) = \begin{cases} \max_i b_{\gamma_i w}(\delta_j), & \text{si } j \in \Delta_1 \\ \min_i b_{\gamma_i w}(\delta_j), & \text{si } j \in \Delta_2 \end{cases} \quad (33)$$

$$c_{\gamma^-w}(\delta_j) = \begin{cases} \max_i c_{\gamma_i w}(\delta_j), & \text{si } j \in \Delta_1 \\ \min_i c_{\gamma_i w}(\delta_j), & \text{si } j \in \Delta_2 \end{cases} \quad (34)$$

- Cálculo de las distancias a las soluciones ideales SVNS positiva y negativa

Se calculan las distancias a las soluciones ideales SVNS positiva y negativa con ayuda de la ecuación 24, y quedan las expresiones siguientes:

$$s_i^+ = \left(\frac{1}{3} \sum_{j=1}^n \left\{ (a_{ij} - a_j^+)^2 + (b_{ij} - b_j^+)^2 + (c_{ij} - c_j^+)^2 \right\} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (35)$$

$$s_i^- = \left(\frac{1}{3} \sum_{j=1}^n \left\{ (a_{ij} - a_j^-)^2 + (b_{ij} - b_j^-)^2 + (c_{ij} - c_j^-)^2 \right\} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (36)$$

- Cálculo del coeficiente de proximidad (CP)

Se calcula el CP de cada alternativa respecto a las soluciones ideales positiva y negativa.

$$\tilde{\rho}_j = \frac{s^-}{s^+ + s^-} \quad (37)$$

Donde:

$$0 \leq \tilde{\rho}_j \leq 1$$

- Determinación del orden de las alternativas

Al igual que en método clásico, se ordenan las alternativas en sentido decreciente, comenzando con aquella que más se aproxime a la solución ideal (mayor proximidad relativa).

3.3. Método VIKOR neutrosófico

El método VIKOR con SVNS puede ser aplicado siguiendo los pasos que se ofrecen a continuación.

- Determinación del peso de los expertos

Al igual que el TOPSIS, el VIKOR con SVNS comienza con la determinación del peso de los expertos. Los especialistas seleccionados autoevalúan su nivel de conocimiento en el tema a analizar según una escala lingüística asociada a valores SVNS (tabla 3).

- Construcción de la matriz de decisión neutrosófica de valores únicos agregados

Esta matriz se define por $D = \sum_{t=1}^k \lambda_t d_{ij}$, donde $d_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$ y se utiliza para agregar todas las evaluaciones individuales.

Las evaluaciones de los expertos a cada decisión según cada criterio, también se hacen sobre la base de una escala de términos lingüísticos asociados a SVNS. En la tabla 4 se ofreció un ejemplo de escala para utilizar en este caso.

- Determinación del peso de los criterios

Si el peso de cada criterio está dado por $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$, donde w_j denota la importancia relativa al criterio δ_j . Si $w_j^t = a_j^t, b_j^t, c_j^t$ es la evaluación del criterio δ_j por el t-ésimo experto.

En este método no se agregan los pesos con los de los w_j^t con los pesos λ_t , ni se construye la matriz de decisión neutrosófica de la media ponderada de valores únicos con respecto a los criterios, sino que se determinan directamente los valores ideales positivos y negativos.

- Cálculo de las soluciones ideales SVNS positiva y negativa

Los criterios pueden ser clasificados como de tipo costo o tipo beneficio. Sea Δ_1 el conjunto de criterios tipo beneficios y Δ_2 los criterios tipo costo. Las alternativas ideales se definirán de la siguiente forma:

$$\gamma^+ = (a_{\gamma^+w}(\delta_j), b_{\gamma^+w}(\delta_j), c_{\gamma^+w}(\delta_j)) \quad (38)$$

Denota la solución ideal positiva, correspondiente a G_1 .

$$\gamma^- = (a_{\gamma^-w}(\delta_j), b_{\gamma^-w}(\delta_j), c_{\gamma^-w}(\delta_j)) \quad (39)$$

Denota la solución ideal negativa, correspondiente a G_2 .

Donde:

$$a_{\gamma^+w}(\delta_j) = \begin{cases} \max_i a_{\gamma_i w}(\delta_j), & \text{si } j \in \Delta_1 \\ \min_i a_{\gamma_i w}(\delta_j), & \text{si } j \in \Delta_2 \end{cases} \quad (40)$$

$$b_{\gamma^+w}(\delta_j) = \begin{cases} \min_i b_{\gamma_i w}(\delta_j), & \text{si } j \in \Delta_1 \\ \max_i b_{\gamma_i w}(\delta_j), & \text{si } j \in \Delta_2 \end{cases} \quad (41)$$

$$c_{\gamma^+w}(\delta_j) = \begin{cases} \min_i c_{\gamma_i w}(\delta_j), & \text{si } j \in \Delta_1 \\ \max_i c_{\gamma_i w}(\delta_j), & \text{si } j \in \Delta_2 \end{cases} \quad (42)$$

y

$$a_{\gamma^-w}(\delta_j) = \begin{cases} \min_i a_{\gamma_i w}(\delta_j), & \text{si } j \in \Delta_1 \\ \max_i a_{\gamma_i w}(\delta_j), & \text{si } j \in \Delta_2 \end{cases} \quad (43)$$

$$b_{\gamma^-w}(\delta_j) = \begin{cases} \max_i b_{\gamma_i w}(\delta_j), & \text{si } j \in \Delta_1 \\ \min_i b_{\gamma_i w}(\delta_j), & \text{si } j \in \Delta_2 \end{cases} \quad (44)$$

$$c_{\gamma-w}(\delta_j) = \begin{cases} \max_i c_{\gamma_i w}(\delta_j), & \text{si } j \in \Delta_1 \\ \min_i c_{\gamma_i w}(\delta_j), & \text{si } j \in \Delta_2 \end{cases} \quad (45)$$

- Desneutrosificación de la matriz y de las soluciones ideales SVNS positiva y negativa

Se convierten los valores SVNS en números duros (tradicionales) a través de una de las funciones de puntuación ofrecidas en las ecuaciones 21 y 23.

- Cálculo de los valores de S , R y Q

Se calculan S_i y R_i para cada una de las alternativas, a través de las ecuaciones 46 y 47, respectivamente.

$$S_i = \sum_{j=1}^m \frac{w_j(f_j^* - f_{ij})}{(f_j^* - f_j^-)} \quad (46)$$

$$R_i = \max_j \left[\frac{w_j(f_j^* - f_{ij})}{(f_j^* - f_j^-)} \right] \quad (47)$$

Donde w_i denota los respectivos pesos de los criterios sobre su relativa importancia.

Entonces, se calculan los valores Q_j para $j = 1, 2, \dots, m$ aplicando la ecuación 48.

$$Q_i = v \left(\frac{S_j - S^+}{S^- - S^+} \right) + \frac{(1-v)(R_j - R^+)}{(R^- - R^+)} \quad (48)$$

Donde:

$$S^+ = \min_j S_j, \quad S^- = \max_j S_j$$

$$R^+ = \min_j R_j, \quad R^- = \max_j R_j$$

Y v es introducido como un peso de la estrategia de decisión de la máxima utilidad grupal y $1 - v$ el peso de la oposición individual. Usualmente, v es fijado como 0,5.

- Selección de la solución de compromiso

Por último, después de realizar la clasificación de las alternativas ordenando cada uno de los valores de S , R y Q en orden decreciente, se selecciona la alternativa A_{j_1} correspondiente a $Q_{[1]}$ (el valor mínimo entre los Q_j) como solución de compromiso, si se cumplen las siguientes condiciones:

Condición 1. Ventaja aceptable

La alternativa A_{j_1} tiene una ventaja aceptable en el caso, si $Q_{[2]} - Q_{[1]} \geq DQ$, donde $DQ = \frac{1}{(m-1)}$ y m es el número de las alternativas.

Condición 2. Estabilidad aceptable en el proceso de decisión

La alternativa es estable en el marco de la toma de decisiones, si esta alternativa tiene la mejor clasificación en S y/o R .

En el caso de que una de estas condiciones no se cumpla, se crea un conjunto de soluciones de compromiso. Este conjunto consta de:

- Alternativas A_{j_1} y A_{j_2} , donde $A_{j_2} = Q_{[2]}$, cuando la condición 2 no se satisface.
- Alternativas $A_{j_1}, A_{j_2}, \dots, A_{j_k}$ cuando no se cumple la condición 1 y $A_{j_k} = Q_{[k]}$ con el valor máximo, que aún satisface la ecuación $Q_{[k]} - Q_{[1]} \geq DQ$.

3.4. Aplicación de los métodos AHP, TOPSIS y VIKOR neutrosóficos para la elección de la localización de un parque eólico

La elección de la localización es una tarea difícil, por cuanto deben tenerse en cuenta múltiples factores que condicionan la decisión a tomar. En el presente caso de estudio se requiere adoptar una decisión sobre el posible emplazamiento de un parque eólico en el país, por lo que deben valorarse las cuatro alternativas propuestas como más adecuadas, por el Ministerio de Energía y Energía Renovable. Esta propuesta parte de los estudios preliminares que se realizaron los primeros meses de los años 2014-2015, sobre la factibilidad del emplazamiento de parque eólicos en zonas la Provincia de Chimborazo (Enriquez, 2015).

Las propuestas son San José de Igualata, Loma de Rasutambo, Aña Muyocancha y Páramo de Navag- Rumignokiana. En ilustración 45 se indican los lugares donde se realizarían los emplazamientos eólicos.

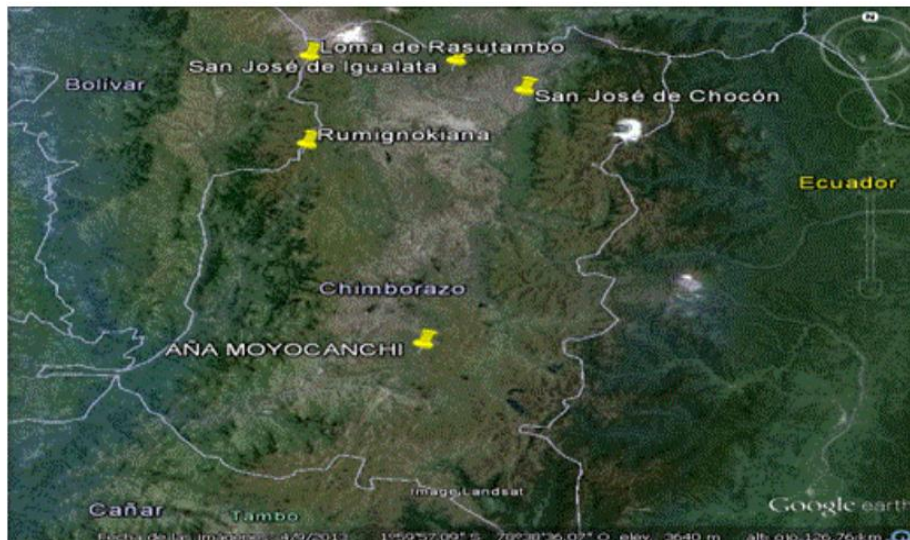


Ilustración 45. Propuestas para el emplazamiento del parque eólico (Enriquez, 2015)

En dicha investigación se realizó el estudio del potencial energético eólico correspondiente, para lo cual se utilizaron los datos de viento aportados por cinco estaciones localizadas en los cantones de la Provincia de Chimborazo, los cuales son considerados fiables, ya que provienen de anemómetros ubicados a una altura de alrededor de 10 m que es la altura estándar de un anemómetro fiable, según la Organización Meteorológica Mundial (Rohatgi, 2004).

En este análisis de campo existen diferentes instrumentos de medición los cuales se utilizan para dimensionar, predecir o pronosticar la velocidad y la potencia del viento, que son variables muy importantes para la obtención de potencial eólico. Estas

variables dependen directamente de tres factores principales: el área por donde pasa el viento, la densidad del aire y la velocidad del viento (Cuji, 2018).

A continuación, se hace una descripción de las características de cada una de las zonas propuestas y se consideran aspectos tales como el recurso eólico y la cantidad de energía que se obtendría en cada zona, según los resultados del estudio de Enriquez (2015).

Parroquia Rumignokiana-Cañí

Este lugar pertenece al Cantón, Guamote en la provincia de Chimborazo y ocupa un área de más de 500 km². Se encuentra situado a la altitud de 4.328 m.s.n.m, tiene una temperatura media de 8°C a 10°C. Geográficamente se encuentra en los paralelos latitud: 1 0 43"53,29" S y longitud: 78 0 52"45,41" O. Rumignokiana es una gran extensión de terreno abierta sin obstáculos al viento, con una longitud de rugosidad de 0,03.

A partir de la observación efectuada en el sitio fue posible caracterizar la rugosidad del terreno y observar que el viento incide entre el rumbo Este. Condición importante para la ubicación de los aerogeneradores. En este caso la evaluación del potencial eólico se efectuó sobre la base de las mediciones que se realizan en la estación meteorológica de Rumignokiana-Cañí.

Loma de Rasutambo-Zona Pinanquil

Loma de Rasutambo se encuentra en el Cantón Riobamba, cerca del nevado Chimborazo y ocupa un área aproximada de 1.000 km², y se encuentra situado a la altitud de 4302 m.s.n.m. Tiene una temperatura media de 7,1°C. Geográficamente se encuentra en los paralelos latitud: 1 0 32"0,43" S y longitud: 78 0 52"40,27" O. Rasutambo es una extensión de terreno abierto sin obstáculos al viento, con una longitud de rugosidad de 0,03.

Parroquia San José de Igualata-Parroquia Llapo

Este lugar se encuentra en el Cantón Guano, en la provincia de Chimborazo y ocupa un área de más de 250 km², y se encuentra situado a la altitud de 3.599 m.s.n.m. Tiene una temperatura media de 8 0 C-10 0 C. Geográficamente se encuentra en los paralelos latitud: 1 0 32"44,73" S y longitud: 78 0 36"3,65" O. San José de Igualata es una extensión de terreno abierto con poca vegetación, sin obstáculos al viento, con una longitud de rugosidad de 0,03.

Parroquia Aña Moyocancha

Este lugar se encuentra en el Cantón Riobamba, situado en la hacienda que corresponde a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOH). Ocupa un área de 300 km², y se encuentra situado a la altitud de 3.822 m.s.n.m. Tiene una temperatura media de 10 0 C-12 0 C. Geográficamente se encuentra en los paralelos latitud: 2 0 10"0,7" S y longitud: 78 0 42"41,94" O. Moyocancha es una extensión de terreno abierto con pocos obstáculos al viento, con una longitud de rugosidad de 0,03.

En la tabla 6 se presentan las velocidades promedio del viento y la potencia disponible calculada para las cuatro zonas objeto de estudio de la provincia de Chimborazo.

| | | VELOCIDAD DEL VIENTO (M/S) | POTENCIA DIPONIBLE (W/M ²) |
|---|----------------------|-------------------------------|---|
| 1 | Rumignokiana-Cañí | 10,95 | 638,0 |
| 2 | Loma de Rasutambo | 10,60 | 790,88 |
| 3 | Aña Moyocancha | 11,82 | 944,93 |
| 4 | San José de Iqualata | 7,25 | 540,93 |

Tabla 6. Velocidad promedio del viento y potencia disponible de cada zona (Enriquez, 2015)

Para la realización del presente estudio se utilizaron los criterios abordados al inicio de este capítulo y se muestran en la tabla 7.

| CRITERIOS | DEFINICIÓN |
|-----------|--|
| C 1 | Potencial eólico |
| C 2 | Condiciones naturales para el emplazamiento |
| C 3 | Geotecnia y resistencia de suelos para la cimentación |
| C 4 | Condiciones de forma y tamaño del área de terreno |
| C 5 | Accesibilidad automotor |
| C 6 | Cercanía de la zona de consumo de la energía producida |
| C 7 | Existencia de zonas protegidas |
| C 8 | Proximidad de subestaciones |
| C 9 | Presencia de emplazamientos existentes |
| C 10 | Visibilidad de los aerogeneradores |

Tabla 7. Criterios para la localización de parques eólicos

3.5. Aplicación del método AHP Neutrosófico

Para la aplicación de este método, se consultó el criterio de 14 especialistas para la evaluación de cada uno de los criterios, así como de las alternativas respecto a cada criterio de manera individual. Para obtener los coeficientes de ponderación de cada especialista se aplicó:

$$\lambda_t = \frac{a_t + b_t \left(\frac{a_t}{a_t + c_t} \right)}{\sum_{t=1}^k a_t + b_t \left(\frac{a_t}{a_t + c_t} \right)}$$

Cada especialista emitió una evaluación comparativa entre los criterios propuestos, asignando un término lingüístico acorde con la Escala Saaty neutrosófica que se mostró en la tabla 1 Para agregar la información recopilada se aplicó la función de agregación SVNWA:

$$P_w(A_1, A_2, \dots, A_n) = \left\langle 1 - \prod_{j=1}^n \left(1 - T_{A_j}(x) \right)^{w_j}, \prod_{j=1}^n \left(I_{A_j}(x) \right)^{w_j}, \prod_{j=1}^n \left(F_{A_j}(x) \right)^{w_j} \right\rangle$$

En este caso se utilizó la evaluación de cada especialista como coeficiente de ponderación para el cálculo de SVNWA. Para evaluarlos se utilizó la escala que se mostró en la tabla 3 y como función de puntuación:

$$S(A_j) = (2 + T_j - F_j - I_j)/2$$

Fue necesario asignar previamente los SVNS correspondientes a cada término lingüístico y luego desneutrosificar mediante la función de puntuación anterior. Los resultados de la comparación pareada agregada, se muestran en la tabla 8.

| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C1 | 1.000 | 1.768 | 1.778 | 1.634 | 1.651 | 1.640 | 1.885 | 1.867 | 1.743 | 1.861 |
| C2 | 0.566 | 1.000 | 1.622 | 1.620 | 1.600 | 1.599 | 1.621 | 1.621 | 1.601 | 1.612 |
| C3 | 0.566 | 0.616 | 1.000 | 1.585 | 1.568 | 1.555 | 1.546 | 1.551 | 1.584 | 1.584 |
| C4 | 0.612 | 0.617 | 0.631 | 1.000 | 1.409 | 1.452 | 1.475 | 1.434 | 1.439 | 1.402 |
| C5 | 0.606 | 0.625 | 0.638 | 0.710 | 1.000 | 1.325 | 1.324 | 1.384 | 1.248 | 1.324 |
| C6 | 0.610 | 0.626 | 0.643 | 0.689 | 0.755 | 1.000 | 1.244 | 1.243 | 1.243 | 1.243 |

| | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| C 7 | 0.531 | 0.617 | 0.647 | 0.678 | 0.755 | 0.804 | 1.000 | 1.217 | 1.181 | 1.187 |
| C 8 | 0.536 | 0.617 | 0.645 | 0.698 | 0.722 | 0.805 | 0.821 | 1.000 | 1.167 | 1.159 |
| C 9 | 0.574 | 0.625 | 0.631 | 0.695 | 0.801 | 0.804 | 0.847 | 0.857 | 1.000 | 1.147 |
| C 10 | 0.537 | 0.620 | 0.632 | 0.755 | 0.755 | 0.805 | 0.842 | 0.863 | 0.872 | 1.000 |
| TOTAL | 6.136 | 7.731 | 8.866 | 10.063 | 11.017 | 11.789 | 12.604 | 13.038 | 13.079 | 13.517 |

Tabla 8. Comparación pareada entre criterios

Siguiendo los pasos descritos para el método, se obtuvo la matriz normalizada mediante:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^m x_{ij}}$$

Con el objetivo de obtener los pesos o ponderaciones para cada criterio como se aprecia en la tabla 9.

| | C 1 | C 2 | C 3 | C 4 | C 5 | C 6 | C 7 | C 8 | C 9 | C 10 | VECTOR DE PESOS |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|
| C 1 | 0.16 | 0.23 | 0.20 | 0.16 | 0.15 | 0.14 | 0.15 | 0.14 | 0.13 | 0.14 | 0.16 |
| C 2 | 0.09 | 0.13 | 0.18 | 0.16 | 0.15 | 0.14 | 0.13 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.13 |
| C 3 | 0.09 | 0.08 | 0.11 | 0.16 | 0.14 | 0.13 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 |
| C 4 | 0.10 | 0.08 | 0.07 | 0.10 | 0.13 | 0.12 | 0.12 | 0.11 | 0.11 | 0.10 | 0.10 |
| C 5 | 0.10 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.09 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.10 | 0.10 | 0.09 |
| C 6 | 0.10 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.08 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.09 | 0.09 |
| C 7 | 0.09 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.08 |
| C 8 | 0.09 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.08 |
| C 9 | 0.09 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.08 | 0.08 | 0.07 |
| C 10 | 0.09 | 0.08 | 0.07 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 |

Tabla 9. Matriz normalizada de la comparación pareada de los criterios

Como puede apreciarse, los valores decrecientes de los pesos permiten percatarse de que los criterios están organizados en orden decreciente del valor de este vector. Estos pesos se pueden interpretar como una medida de la importancia que le confieren los especialistas a cada uno de los criterios. Se puede plantear entonces que la tabla 8 nos muestra el ranking estimado de los criterios a partir de la evaluación que recibieron. Por cuanto, la fuerza de los vientos constituye el criterio más relevante a la hora de

seleccionar una ubicación para un parque eólico, seguida por las condiciones naturales para el emplazamiento.

Antes de proseguir con el método es preciso calcular la consistencia de los pesos asignados, aplicando:

$$PC = \frac{IC}{R_i}$$

Se obtuvo una consistencia $PC = 0.008$ la cual resulta muy inferior a la restricción de 0.10 propuesta en la bibliografía.

Siguiendo los pasos realizados para la construcción de la matriz agregada de comparación pareada de los criterios, los resultados de las evaluaciones de las alternativas por criterio, aportadas por cada uno de los especialistas, se agregaron y desneutrosificaron. Esto con el objetivo de construir las matrices de importancia relativa de las alternativas de decisión según cada uno de los 10 criterios utilizados y calcular el vector promedio de estos. A partir de la tabla 10, y hasta la tabla 19, se muestran los resultados obtenidos con estos cálculos.

| Alternativas | Matriz puntuación agregada | | | | Matriz normalizada | | | | Vector promedio |
|--------------|----------------------------|-------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------|-----------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| 1 | 1.000 | 2.185 | 0.449 | 2.193 | 0.242 | 0.379 | 0.188 | 0.290 | 0.275 |
| 2 | 0.458 | 1.000 | 0.467 | 2.279 | 0.111 | 0.173 | 0.195 | 0.301 | 0.195 |
| 3 | 2.225 | 2.142 | 1.000 | 2.088 | 0.538 | 0.371 | 0.418 | 0.276 | 0.401 |
| 4 | 0.456 | 0.439 | 0.479 | 1.000 | 0.110 | 0.076 | 0.200 | 0.132 | 0.130 |
| TOTAL | 4.139 | 5.766 | 2.395 | 7.560 | | | | | |

Tabla 10. Matriz de importancia relativa y vector promedio para el criterio 1. Velocidad del viento

| Alternativas | Matriz puntuación agregada | | | | Matriz normalizada | | | | Vector promedio |
|--------------|----------------------------|-------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------|-----------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| 1 | 1.000 | 2.124 | 0.461 | 2.132 | 0.242 | 0.368 | 0.192 | 0.282 | 0.271 |
| 2 | 0.471 | 1.000 | 0.452 | 2.214 | 0.114 | 0.173 | 0.189 | 0.293 | 0.192 |
| 3 | 2.171 | 2.215 | 1.000 | 2.175 | 0.524 | 0.384 | 0.418 | 0.288 | 0.403 |
| 4 | 0.469 | 0.452 | 0.460 | 1.000 | 0.113 | 0.078 | 0.192 | 0.132 | 0.129 |
| TOTAL | 4.110 | 5.790 | 2.372 | 7.521 | | | | | |

Tabla 11. Matriz de importancia relativa y vector promedio para el criterio 2. Condiciones naturales para el emplazamiento

| Alternativas | Matriz puntuación agregada | | | | Matriz normalizada | | | | Vector promedio |
|--------------|----------------------------|-------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------|-----------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| 1 | 1.000 | 1.694 | 0.496 | 1.670 | 0.242 | 0.294 | 0.207 | 0.221 | 0.241 |
| 2 | 0.590 | 1.000 | 0.470 | 2.063 | 0.143 | 0.173 | 0.196 | 0.273 | 0.196 |
| 3 | 2.015 | 2.126 | 1.000 | 2.181 | 0.487 | 0.369 | 0.418 | 0.288 | 0.390 |
| 4 | 0.599 | 0.485 | 0.459 | 1.000 | 0.145 | 0.084 | 0.191 | 0.132 | 0.138 |
| TOTAL | 4.204 | 5.305 | 2.425 | 6.914 | | | | | |

Tabla 12. Matriz de Importancia relativa y vector promedio para el criterio 3. Geotecnia y resistencia de suelos para la cimentación

| Alternativas | Matriz puntuación agregada | | | | Matriz normalizada | | | | Vector promedio |
|--------------|----------------------------|-------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------|-----------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| 1 | 1.000 | 1.786 | 2.067 | 1.702 | 0.242 | 0.310 | 0.863 | 0.225 | 0.410 |
| 2 | 0.560 | 1.000 | 0.461 | 2.365 | 0.135 | 0.173 | 0.192 | 0.313 | 0.204 |
| 3 | 0.484 | 2.169 | 1.000 | 1.862 | 0.117 | 0.376 | 0.418 | 0.246 | 0.289 |
| 4 | 0.588 | 0.423 | 0.537 | 1.000 | 0.142 | 0.073 | 0.224 | 0.132 | 0.143 |
| TOTAL | 2.631 | 5.377 | 4.065 | 6.928 | | | | | |

Tabla 13. Matriz de importancia relativa y vector promedio para el criterio 4. Condiciones de forma tamaño del área del terreno

| Alternativas | Matriz puntuación agregada | | | | Matriz normalizada | | | | Vector promedio |
|--------------|----------------------------|-------|-------|--------|--------------------|-------|-------|-------|-----------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| 1 | 1.000 | 2.402 | 0.509 | 7.910 | 0.242 | 0.417 | 0.213 | 1.046 | 0.479 |
| 2 | 0.416 | 1.000 | 0.568 | 6.910 | 0.101 | 0.173 | 0.237 | 0.914 | 0.356 |
| 3 | 1.963 | 1.761 | 1.000 | 1.135 | 0.474 | 0.305 | 0.418 | 0.150 | 0.337 |
| 4 | 0.126 | 0.145 | 0.881 | 1.000 | 0.031 | 0.025 | 0.368 | 0.132 | 0.139 |
| TOTAL | 3.506 | 5.308 | 2.958 | 16.955 | | | | | |

Tabla 14. Matriz de importancia relativa y vector promedio para el criterio 5. Accesibilidad automotor

| Alternativas | Matriz puntuación agregada | | | | Matriz normalizada | | | | Vector promedio |
|--------------|----------------------------|-------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------|-----------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| 1 | 1.000 | 1.841 | 0.545 | 1.706 | 0.242 | 0.319 | 0.228 | 0.226 | 0.254 |
| 2 | 0.543 | 1.000 | 0.541 | 1.457 | 0.131 | 0.173 | 0.226 | 0.193 | 0.181 |
| 3 | 1.835 | 1.847 | 1.000 | 1.991 | 0.443 | 0.320 | 0.418 | 0.263 | 0.361 |
| 4 | 0.586 | 0.687 | 0.502 | 1.000 | 0.142 | 0.119 | 0.210 | 0.132 | 0.151 |
| TOTAL | 3.964 | 5.374 | 2.589 | 6.154 | | | | | |

Tabla 15. Matriz de importancia relativa y vector promedio para el criterio 6. Cercanía de la zona de consumo de la energía producida

| Alternativas | Matriz puntuación agregada | | | | Matriz normalizada | | | | Vector promedio |
|--------------|----------------------------|-------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------|-----------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| 1 | 1.000 | 1.909 | 0.321 | 0.662 | 0.242 | 0.331 | 0.134 | 0.088 | 0.199 |
| 2 | 0.524 | 1.000 | 3.575 | 2.598 | 0.127 | 0.173 | 1.493 | 0.344 | 0.534 |
| 3 | 3.118 | 0.280 | 1.000 | 1.072 | 0.753 | 0.049 | 0.418 | 0.142 | 0.340 |
| 4 | 1.511 | 0.471 | 0.933 | 1.000 | 0.365 | 0.082 | 0.389 | 0.132 | 0.242 |
| TOTAL | 6.153 | 3.660 | 5.829 | 5.332 | | | | | |

Tabla 16. Matriz de importancia relativa y vector promedio para el criterio 7. Existencia de zonas protegidas

| Alternativas | Matriz puntuación agregada | | | | Matriz normalizada | | | | Vector promedio |
|--------------|----------------------------|-------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------|-----------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| 1 | 1.000 | 1.439 | 0.555 | 1.846 | 0.242 | 0.250 | 0.232 | 0.244 | 0.242 |
| 2 | 0.695 | 1.000 | 0.681 | 1.760 | 0.168 | 0.173 | 0.284 | 0.233 | 0.215 |
| 3 | 1.801 | 1.469 | 1.000 | 2.115 | 0.435 | 0.255 | 0.418 | 0.280 | 0.347 |
| 4 | 0.542 | 0.568 | 0.473 | 1.000 | 0.131 | 0.099 | 0.197 | 0.132 | 0.140 |
| TOTAL | 4.038 | 4.477 | 2.709 | 6.721 | | | | | |

Tabla 17. Matriz de importancia relativa y vector promedio para el criterio 8. Proximidad de subestaciones

| Alternativas | Matriz puntuación agregada | | | | Matriz normalizada | | | | Vector promedio |
|--------------|----------------------------|-------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------|-----------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| 1 | 1.000 | 2.325 | 0.291 | 2.371 | 0.242 | 0.403 | 0.121 | 0.314 | 0.270 |
| 2 | 0.430 | 1.000 | 0.406 | 2.875 | 0.104 | 0.173 | 0.169 | 0.380 | 0.207 |
| 3 | 3.441 | 2.466 | 1.000 | 3.228 | 0.831 | 0.428 | 0.418 | 0.427 | 0.526 |
| 4 | 0.422 | 0.348 | 0.310 | 1.000 | 0.102 | 0.060 | 0.129 | 0.132 | 0.106 |
| TOTAL | 5.293 | 6.139 | 2.006 | 9.474 | | | | | |

Tabla 18. Matriz de importancia relativa y vector promedio para el criterio 9. Presencia de emplazamientos existentes

| Alternativas | Matriz puntuación agregada | | | | Matriz normalizada | | | | Vector promedio |
|--------------|----------------------------|-------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------|-----------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| 1 | 1.000 | 0.859 | 0.855 | 1.179 | 0.242 | 0.149 | 0.357 | 0.156 | 0.226 |
| 2 | 1.165 | 1.000 | 0.508 | 0.927 | 0.281 | 0.173 | 0.212 | 0.123 | 0.197 |
| 3 | 1.170 | 1.970 | 1.000 | 1.948 | 0.283 | 0.342 | 0.418 | 0.258 | 0.325 |
| 4 | 0.848 | 1.079 | 0.513 | 1.000 | 0.205 | 0.187 | 0.214 | 0.132 | 0.185 |
| TOTAL | 4.182 | 4.908 | 2.876 | 5.055 | | | | | |

Tabla 19. Matriz de importancia relativa y vector promedio para el criterio 10. Visibilidad de los aerogeneradores

Hasta este punto se observa una superioridad evidente de la alternativa 3 según la mayoría de los criterios, excepto para:

- Condiciones de forma y tamaño del área de terreno
- Accesibilidad automotor

Según los cuales la alternativa número 1 es la más recomendable. Y según el criterio Existencia de zonas protegidas

La alternativa 2 tiene un mayor valor en su componente del vector promedio, lo cual indica que sería la mejor opción si el análisis se redujera solamente al criterio antes citado.

Para arribar a un resultado general, se construyó la matriz de decisión (tabla 20) a partir de los vectores promedios y el coeficiente de ponderación de cada criterio. Una vez construida se pudo calcular el coeficiente de priorización de cada alternativa para tomar la decisión sobre la localización del parque eólico, a partir del análisis multicriterio propuesto.

| Alternativas | C 1 | C 2 | C 3 | C 4 | C 5 | C 6 | C 7 | C 8 | C 9 | C 10 | Priorización |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------|
| 1 | 0.27 | 0.27 | 0.24 | 0.41 | 0.48 | 0.25 | 0.20 | 0.24 | 0.27 | 0.23 | 0.29 |
| 2 | 0.20 | 0.19 | 0.20 | 0.20 | 0.36 | 0.18 | 0.53 | 0.21 | 0.21 | 0.20 | 0.24 |
| 3 | 0.40 | 0.40 | 0.39 | 0.29 | 0.34 | 0.36 | 0.34 | 0.35 | 0.53 | 0.32 | 0.37 |
| 4 | 0.13 | 0.13 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.15 | 0.24 | 0.14 | 0.11 | 0.18 | 0.15 |
| PESO | 0.16 | 0.13 | 0.12 | 0.10 | 0.09 | 0.09 | 0.08 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | |

Tabla 20. Matriz de decisión y vector de priorización

Como se puede apreciar, acorde con utilización del método AHP, el mejor lugar para construir el parque eólico es la alternativa número 3, Aña Moyocancha, localización que obtuvo un índice de priorización de 0.37.

El ordenamiento jerárquico resultante es:

- Aña Moyocancha
- Rumignokiana-Cañí
- Loma de Rasutambo
- San José de Igualata

Con el objetivo de confirmar el resultado obtenido, a continuación, se procede a aplicar otros dos métodos multicriterios para la toma de decisión respecto a la ubicación del parque eólico.

3.6. Aplicación del método TOPSIS Neutrosófico

Para la aplicación de este método fue necesario realizar una nueva evaluación de los criterios. Esta vez los especialistas asignaron de manera directa un término lingüístico a cada criterio, pues el enfoque aplicado no estuvo dirigido a la comparación pareada. El método TOPSIS se basa en el cálculo de distancias a soluciones ideales y no se basa en el análisis comparativo por pares como en el caso del método AHP.

Se utilizó la evaluación de cada especialista como coeficiente de ponderación para la agregación de la información, y se utilizó la escala de términos lingüísticos y SVNS que se mostraron en la tabla 4. Igualmente repite la función de agregación SNWA, pero no se hará uso de ninguna función de puntuación, ya que el método se aplicó íntegramente utilizando los SVNS. En la ilustración 46 se muestra la gráfica de frecuencias relativas de cada uno de los términos lingüísticos que los especialistas asignaron a cada criterio según la escala de evaluación que apareció en la tabla 21.

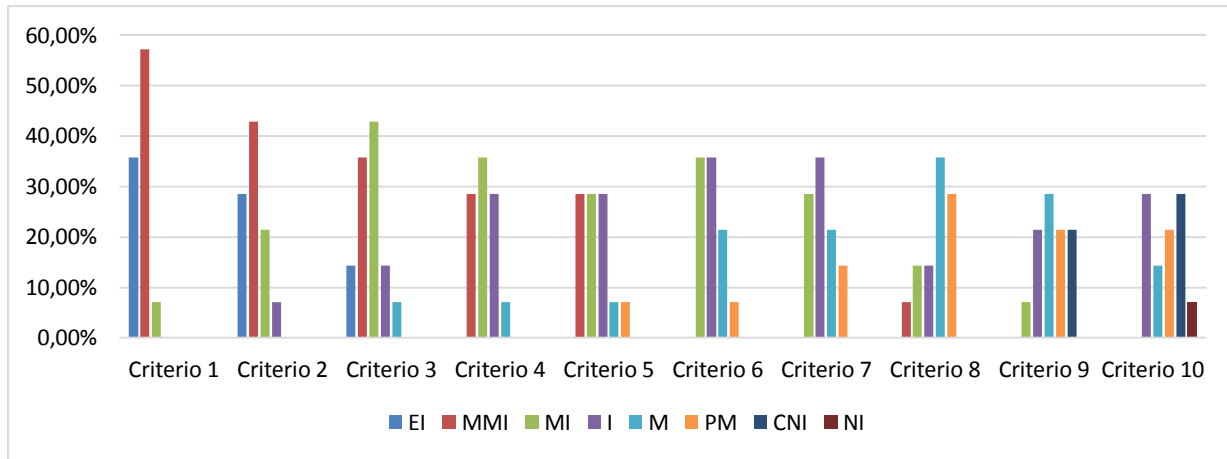


Ilustración 46. Frecuencias relativas de las evaluaciones de los expertos por criterio

En el histograma se observa cómo decrecen los términos positivos a medida que se avanza en el eje de los criterios. Esto sugiere una ordenación de los criterios por orden de prioridad. En tabla 21 se muestran los valores agregados de la ponderación de los criterios, expresados en SVNS. Aplicando:

$$P_w(A_1, A_2, \dots, A_n) = \langle 1 - \prod_{j=1}^n (1 - T_{A_j}(x))^{w_j}, \prod_{j=1}^n (I_{A_j}(x))^{w_j}, \prod_{j=1}^n (F_{A_j}(x))^{w_j} \rangle$$

Se obtuvo:

| CRITERIOS | PESO (SVNS) |
|-----------|-------------------------|
| 1 | (0.962 ; 0.058 ; 0.042) |
| 2 | (0.87 ; 0.223 ; 0.202) |
| 3 | (0.845 ; 0.236 ; 0.212) |
| 4 | (0.739 ; 0.261 ; 0.242) |
| 5 | (0.693 ; 0.307 ; 0.3) |
| 6 | (0.636 ; 0.4 ; 0.37) |
| 7 | (0.629 ; 0.396 ; 0.372) |
| 8 | (0.606 ; 0.432 ; 0.417) |
| 9 | (0.596 ; 0.432 ; 0.43) |
| 10 | (0.565 ; 0.448 ; 0.413) |

Tabla 21. Coeficiente de ponderación de cada criterio.

Los coeficientes de ponderación expresados como conjuntos neutrosóficos, representan de forma sintetizada la información recogida en el gráfico anterior. Obsérvese que a medida que se desciende en la tabla, disminuye el valor de T mientras que crecen los componentes de indeterminación y falsedad.

Los encuestados evaluaron cada alternativa según cada uno de los criterios. La información se agregó aplicando nuevamente SNWA.

| Alternativas | Criterio 1 | Criterio 2 | Criterio 3 | Criterio 4 | Criterio 5 |
|--------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | (0.751 ; 0.289 ; 0.262) | (0.728 ; 0.272 ; 0.256) | (0.566 ; 0.52 ; 0.519) | (0.75 ; 0.311 ; 0.304) | (0.676 ; 0.419 ; 0.386) |
| 2 | (0.719 ; 0.293 ; 0.272) | (0.687 ; 0.313 ; 0.297) | (0.698 ; 0.34 ; 0.33) | (0.525 ; 0.545 ; 0.508) | (0.866 ; 0.208 ; 0.182) |
| 3 | (0.869 ; 0.293 ; 0.272) | (0.874 ; 0.313 ; 0.297) | (0.839 ; 0.261 ; 0.252) | (0.872 ; 0.195 ; 0.191) | (0.996 ; 0.091 ; 0.071) |
| 4 | (0.704 ; 0.32 ; 0.308) | (0.715 ; 0.285 ; 0.272) | (0.523 ; 0.072 ; 0.507) | (0.499 ; 0.598 ; 0.596) | (0.596 ; 0.463 ; 0.428) |

Tabla 22. Evaluación agregada por criterio

| Alternativas | Criterio 6 | Criterio 7 | Criterio 8 | Criterio 9 | Criterio 10 |
|--------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 1 | (0.772 ; 0.314 ; 0.285) | (0.417 ; 0.711 ; 0.677) | (0.85 ; 0.284 ; 0.249) | (0.468 ; 0.623 ; 0.586) | (0.63 ; 0.431 ; 0.417) |
| 2 | (0.474 ; 0.546 ; 0.538) | (0.908 ; 0.166 ; 0.16) | (0.485 ; 0.547 ; 0.521) | (0.947 ; 0.17 ; 0.142) | (0.305 ; 0.769 ; 0.753) |
| 3 | (0.788 ; 0.309 ; 0.308) | (1.285 ; -0.179 ; -0.188) | (0.809 ; 0.288 ; 0.259) | (1.344 ; -0.325 ; -0.333) | (0.751 ; 0.268 ; 0.266) |
| 4 | (0.411 ; 0.657 ; 0.648) | (0.717 ; 0.366 ; 0.331) | (0.501 ; 0.594 ; 0.577) | (0.727 ; 0.39 ; 0.363) | (0.333 ; 0.766 ; 0.744) |

Tabla 22. Evaluación agregada por criterio

Seguidamente se ponderaron los valores agregados de la evaluación aplicando los pesos de los criterios mediante la fórmula (26).

| Alternativas | Criterio 1 | Criterio 2 | Criterio 3 | Criterio 4 | Criterio 5 |
|--------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | (0.723 ; 0.33 ; 0.292) | (0.634 ; 0.435 ; 0.407) | (0.478 ; 0.633 ; 0.621) | (0.554 ; 0.49 ; 0.472) | (0.571 ; 0.556 ; 0.516) |
| 2 | (0.691 ; 0.334 ; 0.302) | (0.598 ; 0.466 ; 0.439) | (0.59 ; 0.496 ; 0.472) | (0.388 ; 0.663 ; 0.627) | (0.732 ; 0.395 ; 0.356) |
| 3 | (0.836 ; 0.334 ; 0.302) | (0.761 ; 0.466 ; 0.439) | (0.709 ; 0.435 ; 0.411) | (0.645 ; 0.405 ; 0.387) | (0.842 ; 0.306 ; 0.268) |
| 4 | (0.678 ; 0.359 ; 0.337) | (0.623 ; 0.444 ; 0.419) | (0.442 ; 0.291 ; 0.612) | (0.369 ; 0.702 ; 0.694) | (0.504 ; 0.59 ; 0.55) |

Tabla 23. Evaluación ponderada por criterio

| Alternativas | Criterio 6 | Criterio 7 | Criterio 8 | Criterio 9 | Criterio 10 |
|--------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | (0.571 ; 0.493 ; 0.458) | (0.262 ; 0.826 ; 0.798) | (0.515 ; 0.593 ; 0.562) | (0.279 ; 0.786 ; 0.764) | (0.356 ; 0.686 ; 0.658) |
| 2 | (0.351 ; 0.665 ; 0.65) | (0.572 ; 0.497 ; 0.473) | (0.294 ; 0.743 ; 0.721) | (0.564 ; 0.529 ; 0.51) | (0.172 ; 0.872 ; 0.855) |
| 3 | (0.582 ; 0.489 ; 0.476) | (0.809 ; 0.288 ; 0.254) | (0.49 ; 0.596 ; 0.568) | (0.801 ; 0.248 ; 0.24) | (0.424 ; 0.596 ; 0.569) |
| 4 | (0.304 ; 0.747 ; 0.733) | (0.451 ; 0.617 ; 0.58) | (0.304 ; 0.769 ; 0.753) | (0.433 ; 0.654 ; 0.637) | (0.188 ; 0.871 ; 0.85) |

Tabla 24. Evaluación ponderada por criterio

A partir de los resultados ponderados, se calcularon los valores ideales positivo y negativo (tabla 25) para cada criterio mediante:

$$\rho^+ = (a_{\rho^+w}(\beta_j), b_{\rho^+w}(\beta_j), c_{\rho^+w}(\beta_j))$$

$$\rho^- = (a_{\rho^-w}(\beta_j), b_{\rho^-w}(\beta_j), c_{\rho^-w}(\beta_j))$$

| CRITERIO | VALOR IDEAL POSITIVO | VALOR IDEAL NEGATIVO |
|----------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | (0.836 ; 0.33 ; 0.292) | (0.678 ; 0.359 ; 0.337) |
| 2 | (0.761 ; 0.435 ; 0.407) | (0.598 ; 0.466 ; 0.439) |
| 3 | (0.709 ; 0.291 ; 0.411) | (0.442 ; 0.633 ; 0.621) |
| 4 | (0.645 ; 0.405 ; 0.387) | (0.369 ; 0.702 ; 0.694) |
| 5 | (0.842 ; 0.306 ; 0.268) | (0.504 ; 0.59 ; 0.55) |
| 6 | (0.582 ; 0.489 ; 0.458) | (0.304 ; 0.747 ; 0.733) |
| 7 | (0.809 ; 0.288 ; 0.254) | (0.262 ; 0.826 ; 0.798) |
| 8 | (0.515 ; 0.593 ; 0.562) | (0.294 ; 0.769 ; 0.753) |
| 9 | (0.801 ; 0.248 ; 0.24) | (0.279 ; 0.786 ; 0.764) |
| 10 | (0.424 ; 0.872 ; 0.855) | (0.172 ; 0.596 ; 0.569) |

Tabla 25. Valores ideales para cada criterio

Por último, se calcularon las distancias de cada alternativa a los ideales positivo y negativo, mediante:

$$s_i^+ = \left(\frac{1}{3} \sum_{j=1}^n \{ (a_{ij} - a_j^+)^2 + (b_{ij} - b_j^+)^2 + (c_{ij} - c_j^+)^2 \} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$s_i^- = \left(\frac{1}{3} \sum_{j=1}^n \{ (a_{ij} - a_j^-)^2 + (b_{ij} - b_j^-)^2 + (c_{ij} - c_j^-)^2 \} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Para obtener el coeficiente de proximidad se usó la ecuación siguiente, el cual se utilizó como medida para determinar la mejor solución al problema planteado:

$$CP = \frac{s^-}{s^+ + s^-}$$

| ALTERNATIVAS | S^+ | S^- | CP | ORDEN |
|--------------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0.868 | 0.417 | 0.675 | 4 |
| 2 | 0.567 | 0.547 | 0.509 | 2 |
| 3 | 0.246 | 0.973 | 0.202 | 1 |
| 4 | 0.792 | 0.390 | 0.670 | 3 |

Tabla 26 Cálculo del coeficiente de proximidad

Con la aplicación del método TOPSIS se arribó a la misma conclusión que con la aplicación del método AHP. Es una vez más Aña Moyocancha (alternativa 3) la mejor opción para la ubicación del parque eólico pues presenta un coeficiente de proximidad mínimo de 0.202. El ranking en este caso queda:

- Aña Moyocancha
- Loma de Rasutambo
- San José de Igualata
- Rumignokiana-Cañí

3.7. Aplicación del método VIKOR Neutrosófico

Para culminar con la aplicación de los métodos propuestos, se procedió a implementar el método VIKOR Neutrosófico para la determinación de la mejor localización del parque eólico. Para aplicar este método se reutilizaron algunos cálculos desarrollados en el método anterior que le son comunes, pues ambos pertenecen al grupo de métodos multicriterios basados en el cálculo de distancias.

Ejemplo de esto lo constituyen la evaluación o ponderación de los especialistas, la matriz de pesos por criterios, con la salvedad de que para este método se incluye el uso de la función de puntuación, así como otros elementos que los diferencian respecto al uso de las ponderaciones.

| CRITERIOS | PESO | PUNTUACIÓN |
|-----------|-------------------------|------------|
| 1 | (0.962 ; 0.058 ; 0.042) | 0.954 |
| 2 | (0.87 ; 0.223 ; 0.202) | 0.815 |
| 3 | (0.845 ; 0.236 ; 0.212) | 0.799 |
| 4 | (0.739 ; 0.261 ; 0.242) | 0.746 |
| 5 | (0.693 ; 0.307 ; 0.3) | 0.695 |
| 6 | (0.636 ; 0.4 ; 0.37) | 0.622 |
| 7 | (0.629 ; 0.396 ; 0.372) | 0.620 |
| 8 | (0.606 ; 0.432 ; 0.417) | 0.586 |
| 9 | (0.596 ; 0.432 ; 0.43) | 0.578 |
| 10 | (0.565 ; 0.448 ; 0.413) | 0.568 |

Tabla 27. Puntuación de los pesos agregados

Igualmente se utiliza la matriz de valores agregados, solo que en este método no se ponderarán, sino que se extraerán de esta los valores máximos positivo y negativo, como se muestra en la siguiente tabla.

| CRITERIO | VALOR IDEAL POSITIVO | VALOR IDEAL NEGATIVO |
|----------|---------------------------|-------------------------|
| 1 | (0.869 ; 0.289 ; 0.262) | (0.704 ; 0.32 ; 0.308) |
| 2 | (0.874 ; 0.272 ; 0.256) | (0.687 ; 0.313 ; 0.297) |
| 3 | (0.839 ; 0.072 ; 0.252) | (0.523 ; 0.52 ; 0.519) |
| 4 | (0.872 ; 0.195 ; 0.191) | (0.499 ; 0.598 ; 0.596) |
| 5 | (0.996 ; 0.091 ; 0.071) | (0.596 ; 0.463 ; 0.428) |
| 6 | (0.788 ; 0.309 ; 0.285) | (0.411 ; 0.657 ; 0.648) |
| 7 | (1.285 ; -0.179 ; -0.188) | (0.417 ; 0.711 ; 0.677) |
| 8 | (0.85 ; 0.284 ; 0.249) | (0.485 ; 0.594 ; 0.577) |
| 9 | (1.344 ; -0.325 ; -0.333) | (0.468 ; 0.623 ; 0.586) |
| 10 | (0.751 ; 0.769 ; 0.753) | (0.305 ; 0.268 ; 0.266) |

Tabla 28. Valores ideales no ponderados para cada criterio

Para finalizar, se utilizaron las ecuaciones siguientes para calcular los valores de S, R y Q de cada alternativa, respectivamente. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 29.

$$S_i = \sum_{j=1}^m \frac{w_j (f_j^* - f_{ij})}{(f_j^* - f_j^-)}$$

$$R_i = \max_j \left[\frac{w_j (f_j^* - f_{ij})}{(f_j^* - f_j^-)} \right]$$

$$Q_i = v \left(\frac{S_j - S^+}{S^- - S^+} \right) + \frac{(1 - v)(R_j - R^+)}{(R^- - R^+)}$$

| ALTERNATIVAS | S | R | Q |
|--------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | 5.252983418 | 0.765765631 | 0.277923859 |
| 2 | 8.056139791 | 1.826579619 | 0.796118602 |
| 3 | 3.499035033 | 0.248207746 | 0 |
| 4 | 11.19376398 | 1.777037005 | 0.984305786 |

Tabla 29 Medidas de proximidad a los valores ideales

En este caso, al no cumplirse la condición de ventaja aceptable, se determina que, aunque la alternativa 3 presenta el mínimo Q , no está lo suficientemente alejada del resultado que muestra la alternativa 2. Esto es:

$Q_{[2]} - Q_{[1]} < DQ$, donde $DQ = \frac{1}{(m-1)}$ y m es el número de las alternativas.

Por lo que se incluye la alternativa 2 (Loma de Rasutambo) como una solución de compromiso, o lo que es lo mismo, se toma como una posible solución al problema junto con la alternativa 3. Aña Moyocancha.

Sin embargo, teniendo en cuenta los resultados de la aplicación de los métodos anteriores, se puede concluir que, es la alternativa 3 la mejor solución para la localización del parque eólico. Con los nuevos resultados se ordenan las localidades de la siguiente forma:

- Aña Moyocancha
- Loma de Rasutambo
- San José de Igualata
- Rumignokiana-Cañí

Con la aplicación de los tres métodos de decisión multicriterio propuestos para la localización de un parque eólico en la provincia de Chimborazo, se arribaron a conclusiones similares, lo que facilita la toma de decisiones en este caso.

Por cuanto, se demostró la efectividad del uso de estos métodos con enfoque neutrosófico para la captación de las valoraciones subjetivas de los expertos, la autovaloración sobre el nivel de conocimiento en el tema, y la ponderación de los criterios a considerar.

Referencias

- Abdel, M., Mohamed, M. & Smarandache, F. (2018). *An Extension of Neutrosophic AHP–SWOT Analysis for Strategic Planning and Decision-Making*, *Symmetry*, 10, 116-134.
- Avendaño, E. (2017). *Implementación de métodos para la toma de decisiones multicriterio en diviz para evaluar el uso de herramientas en el Eva Moodle*. Ingeniero en Sistemas Informáticos, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Berumen, S. & Llamazares, F. (2007). *La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente*. *Cuadernos de Administración*, 20 (34): 65-87.
- Caballero, C. (2011). *Estudio de plantas de producción de energías renovables con aprovechamiento de la energía del mar*. Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Eléctrica. Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III, Leganés.
- Cabezas, R., Ruiz, J. G. y Leyva, M. (2017). *A Knowledge-based Recommendation Framework using SVN, Neutrosophic Sets and Systems*, 16, 24-27.
- Ceballos, B., Lamata, M. T., Pelta, D. & Sanchez, J. M. (2013). *El método TOPSIS Relativo vs. Absoluto*. *Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*. Rect@ V. 14. 181 - 192.
- Cevallos, L., Zambrano J. Ortiz, W. Leyva, M.; La O, Y. & Smarandache, F. (2018). *Enfoque Didáctico de la Teoría de Conjuntos y Probabilidades*. Bruxelles: Pons Publishing House.
- Chile, Gobierno de Centro de Energías Renovables. Ministerio de Energía (2013). Recuperado de <http://cer.gob.cl/tecnologias/eolica/off-shore/>.
- Comas, R., Campaña, L. & Beltrán, J.M. (2020). *Evaluación de la empresa sobre el control interno aplicando AHP neutrosófico* *Revista Investigación Operacional*, Vol. 41(5), 680-688.
- CONELEC. (2015). *Balance Nacional de Energía Eléctrica Información estadística*. Junio 2014. Recuperado de: <http://www.conelec.gob.ec/contenido.php?cd=10261&l=1>
- Confederación de Empresarios de Pontevedra (2004). *Guía de Ahorro energético en las PYME*.
- CUJI C. C. (2018). *Óptima ubicación de aerogeneradores basado en el atlas eólico para maximizar la potencia generada*. Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico. Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito.
- Deli, I. (2015). *Linear weighted averaging method on SVN-sets and its sensitivity analysis based on multi-attribute decision making problems*.
- Díaz, M., Pita, M. F., Fernández, A., & Limones, N. (2017). *Energía eólica y territorio en Andalucía: diseño y aplicación de un modelo de potencialidad para la*

- implantación de parques eólicos.* E. C. S.A, "ATLAS Bioenergético del Ecuador," Atlas bioenergético del Ecuador, vol. Primera Ed, pp. 1–150, 2014.
- Espejo, C. (2006). *Las energías renovables en la producción de electricidad en España.* Murcia: Caja Rural Regional.
- Espinoza, J. & León, J. (2012). *Regulación para incentivar las energías renovables en Ecuador.* Tesina previa a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico. Universidad de Cuenca.
- Expreso.ec (2020). Proyecto eólico Minas de Huascachaca con 55% de avance. Mundo eléctrico. *Revista Especializada en Electrotecnia.* Recuperado de: <http://www.mundoelectrico.com>
- Gállego, J. & Faulín, J. (2014). *Optimización del mantenimiento preventivo de un aerogenerador mediante el diseño de tareas de su fuerza de trabajo.* Titulación: Ingeniero Industrial. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación. Universidad de Navarra.
- García, M. (2009). *Métodos para la comparación de alternativas mediante un Sistema de Ayuda a la Decisión (S.A.D.) y "soft Computing".* Tesis doctoral. Cartagena.
- Gómez, M., Cano, B., & Ignaciocoaut, J. (2006). Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio (No. 910.285 G65).
- Gómez, R.; Zuluaga, A. y Vázquez, G. (2015). Método AHP utilizado para mejorar la recepción en el centro de distribución de una empresa de alimentos. Ing. USBMed, Vol. 6, No. 2, julio-diciembre 2015, 5-14.
- Gómez V. A. (2017). *Manual de laboratorio para la capacitación, el diseño y evaluación de sistemas fotovoltaicos.* Material impreso. Facultad de ingeniería eléctrica, Universidad Pontificia Bolivariana.
- Grupo Interagencial de Desarrollo Rural IICA, BID, CEPAL, FIDA, GTZ, Banco Mundial, USAID. (2003). *Más que alimentos en la mesa: La Real Contribución de la Agricultura a la Economía.* Recuperado de: <http://www.territorioscentroamericanos.org/>.
- Guamán, J., Espinoza, J.L. & Ribeiro, L. (2017). *Energía del mar para su integración en la matriz energética del Ecuador.* Congreso I+D+ingeniería, Maskana - Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 313-318.
- Hernández, M. y Carpio, A. (2015) *Energías renovables, tendencia en Ecuador.*
- Instituto Nacional de Preinversión, INP (2013). *Estudio de la energía de las olas, corrientes y energía cinética de ríos en el Ecuador.*
- Kreuzberg, F. (2017). *Métodos TOPSIS e VIKOR na verificação da resource advantage theory em empresas têxteis brasileiras.* *Contabilidade y Negocios* (12) 23, 96-110 Recuperado de: <https://doi.org/10.18800/contabilidade.201701.007>
- Lozano, W. E. (2016). *Tránsito hacia las energías renovables en el Ecuador: centrales hidráulicas.* Trabajo de titulación especial para la obtención del grado de Magíster en Impactos Ambientales. Universidad de Guayaquil.

- Maldonado, I. (2010). *Pautas para la selección de las técnicas AHP, PROMETHEE y Ábaco de Régnier modificado*. Tesis de Maestría en Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México.
- Maya, K. (2015). *Plan de líneas de investigación para el desarrollo de la geotermia*.
- Ministerio de Energía (2013). *ATLAS EÓLICO ECUADOR*.
- Muñoz, B. & Romana, M. (2017). Aplicación de métodos multicriterio discretos al análisis de alternativas en estudios informativos de infraestructura de transporte. *Revista Pensamiento Matemático*, VI (2), 27-45.
- ONU (2012). *El futuro que queremos*. Resolución aprobada por la Asamblea General de las Naciones Unidas. A/RES/66/288. 123ª Sesión Plenaria del 27 de julio de 2012. Recuperado de: <http://www.un.org/es/comun/docs/?symbol=A/RES/66/288>.
- Ordoñez, I. (2019). *Estudio preliminar de un parque eólico complementario en Ecuador: caso Pimo provincia del Azuay*. Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico Universidad de Cuenca.
- Plan Maestro de Electrificación 2012-2021*.
- Peláez, M.R. y Espinoza, J.L. (2015). *Energías renovables en el Ecuador Situación actual, tendencias y perspectivas*. Universidad de Cuenca.
- Pérez, A. C. (2013). *La decisión multicriterio; aplicación en la selección de ofertas competitivas en edificación*. Universidad Politécnica Valencia, Gestión REDONDO, S. A.
- Rodríguez, R. y Chimbo, M. (2017). Aprovechamiento de la energía undimotriz en el Ecuador. *Revista Ingenius*. N. ° 17, (Enero-Junio). pp. 23-28. ISSN: 1390-650X.
- Romero, A., Meléndez, R. & Andino, A. (2020). Números neutrosóficos de valor único y proceso analítico jerárquico para la discriminación de proyectos. *Revista Investigación Operacional*, 41 (5), 751-760.
- Romero, C. (1996). *Análisis de las decisiones multicriterio*. Madrid: ISDEFE Ingeniería de Sistemas.
- Rosero, E. & Chiliquinga, B. (2011). *Caso Ecuador Informe Final Componente 1: Línea Base de las Tecnologías Energéticas Componente 2: Estado del Arte de las Energías Renovables*. Observatorio de Energías Renovables en América Latina y el Caribe.
- Rohatgi, J. S. y Nelson, V. (2004). Wind characteristics; an analysis for the generation of wind power. USA. *Revista Alternative Energy Institute West Texas A&M University*. ISBN 0-8087-1478-3.
- Santos, F.J., Pozo, D., Ruiz, J.A., Lara, V. & Tovar, J. (2013). Analysis of WRF model wind estimate sensitivity to physics parameterization choice and terrain representation in Andalusia (Southern Spain), *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 52 (7), pp. 1592-1609.

- Sigüenza, O. (2017). *Aplicación de métodos de optimización para electrificación en zonas rurales de Ecuador*. Tesis de Maestría en Ingeniería de Energías y Ambiente, Escuela Superior de Tecnología de Gestión
- Smarandache, F. (2002). Neutrosophy, a new Branch of Philosophy. *Multiple-Valued Logic /An International Journal*, 8, 297-384.
- Taoufikallah, A. (s/f). *El método AHP*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla. Universidad de Sevilla.
- Vaca, F. (2018). *Análisis y determinación de las zonas óptimas para la instalación de un proyecto eólico en Ecuador a través de métodos de toma de decisión multicriterio*. Tesis de Maestría en Energías Renovables. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Yajure, C. A. & Guzmán, Y. A. (2017). Estudio comparativo de técnicas de toma de decisiones multicriterio para la jerarquización de tecnologías de energías renovables a utilizar en la producción de electricidad. *Journal Scientia Et Technica*, vol. 22, núm. 3, 273-280.
- Ye, J. A. Multicriteria decision-making method using aggregation operators for simplified neutrosophic sets. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2014. 26(5): p. 2459-2466