



**Universidad  
de Holguín**

FACULTAD  
DE INGENIERÍA  
DPTO. INGENIERÍA MECÁNICA

**TEMA: SELECCIÓN DE PROYECTOS EÓLICOS COMO PROPUESTA  
DE LA MATRIZ ENERGÉTICA, MEDIANTE ANÁLISIS JERÁRQUICO  
DE PROCESOS (AHP)**

**TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO  
MECÁNICO**

**AUTOR: RUBÉN RODRÍGUEZ GAINZA**

**TUTORES: MsC. ÁNGEL EUGENIO INFANTES HAYNES**

**Dr.C. ORLANDO BELETTE FUENTES**

**TIPO DE CURSO: CRPE**

**HOLGUÍN, 2021**



## **PENSAMIENTO**

Para empezar un gran proyecto, hace falta valentía. Para terminar un gran proyecto, hace falta perseverancia.

Anónimo



## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, que ilumina mi camino y me da fortaleza para nunca darme por vencido, a pesar de todos los obstáculos.

A mis tutores, MsC. Ángel Eugenio Infantes Haynes y al Dr.C. Orlando Belette Fuentes por todo su apoyo y dedicación

A la MsC. Evelia Cardet Fernández por su ayuda y apoyo incondicional

A mis padres, Rubén y Orfelina, por su amor incondicional, por apoyarme en cada etapa de la vida

A mi amada esposa Anna Esther, por correr conmigo los tramos difíciles de la vida, gracias por tu ayuda y tu sacrificio, gracias por pelear junto a mi esta batalla

A mi pequeña hija Keila por ser el mayor regalo que he obtenido

A mis hermanas Linnet, Liannis y Lianet por comprenderme en cada decisión que he tomado, gracias por su apoyo y confianza

A toda mi familia y amistades por cada aporte realizado para la feliz conclusión de esta tesis

A todos los que estuvieron involucrados en este reto, a todos los que un día me apoyaron, a los que me dieron un consejo, en fin, sé que esto no lo hubiera logrado solo, hay tantos a quienes debo decirles lo agradecido que estoy, que en realidad solo puedo decirles que están en mi corazón y que siempre contarán conmigo.

Hay cosas en la vida que no tienen precio, y una de ellas es el apoyo de las personas que están alrededor de nosotros en los momentos en los que más los necesitamos, sobre todo cuando están a tu lado sin esperar nada a cambio, por eso quiero aprovechar esta oportunidad para decirles

GRACIAS...



## RESUMEN

Las energías renovables son fuentes de energía limpia, inagotables y crecientemente competitivas. Se diferencian de los combustibles fósiles principalmente en su diversidad, abundancia y potencial de aprovechamiento en cualquier parte del planeta, pero sobre todo en que no producen gases de efecto invernadero causantes del cambio climático ni emisiones contaminantes. El presente trabajo tiene como objetivo elaborar una propuesta metodológica para seleccionar mediante métodos multicriterio proyectos eólicos como propuesta de cambio de la matriz energética del SEN de la provincia de Holguín. La investigación realizada permitió, apoyado en la modelación matemática multicriterio, determinar los mejores proyectos eólicos como propuesta de cambio de la matriz energética del SEN en la provincia de Holguín. Al aplicar el método AHP se evidenció que la mejor alternativa respecto a las demás teniendo en cuenta las dimensiones técnicas y económicas es Gibara III seguido por Río Seco, Cabo Lucrecia y Punta de Mula. Se recomienda tener en cuenta la propuesta metodológica elaborada en esta investigación para la selección de nuevos proyectos eólicos.

**Palabras Clave:** energías renovables, gases de efecto invernadero, cambio climático, proyectos eólicos.



## **ABSTRACT:**

Renewable energies are clean, inexhaustible and increasingly competitive sources of energy. They differ from fossil fuels mainly in their diversity, abundance and potential for use in any part of the planet, but above all in that they do not produce greenhouse gases that cause climate change or polluting emissions. The present work aims to elaborate a methodological proposal to select wind energy projects by means of multicriterio methods as a proposal to change the energy matrix of the SEN of the province of Holguín. The research carried out allowed, supported by multi-criteria mathematical modeling, to determine the best wind projects as a proposal to change the energy matrix of the SEN in the province of Holguín. When applying the AHP method it was evidenced that the best alternative compared to the others taking into account the technical and economic dimensions is Gibara III followed by Rio Seco, Cabo Lucrecia and Punta de Mula. It is recommended to take into account the methodological proposal elaborated in this investigation for the selection of new wind projects.

**Key Words:** renewable energies, greenhouse gases, climate change, wind projects



## ÍNDICE

|   |     |
|---|-----|
| INTRODUCCIÓN .....  | 1   |
| CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO-PRÁCTICO REFERENCIAL DE LA INVESTIGACIÓN.....                     | 74  |
| 1.1. Matriz energética. Capacidad mundial .....   | 74  |
| 1.2 Proyectos eólicos futuros en la provincia Holguín.....                                  | 79  |
| 1.2.1 Parque Eólico Río Seco 1 .....  | 79  |
| 1.2.2 Micro Parque Eólico Jagüeyes.....   | 80  |
| 1.2.3 Micro Parque eólico Gibara III .....  | 81  |
| 1.2.4 Parque eólico Cabo Lucrecia.....  | 82  |
| 1.3 Aplicación de la selección multicriterio .....  | 83  |
| 1.3.1 Toma de decisiones .....  | 87  |
| 1.3.2 Proceso de toma de decisiones .....   | 88  |
| 1.3.3 Generación y evaluación de acciones viables .....                                     | 90  |
| 1.3.4 Normalización .....   | 91  |
| 1.3.5 Técnicas estadísticas para la normalización de datos .....                            | 92  |
| 1.3.6 Índice de consistencia y razón de consistencia.....                                   | 95  |
| 1.3.7 Justificación del número de expertos .....  | 96  |
| 1.3.8 Herramientas informáticas para resolver los métodos multicriterios.....               | 97  |
| 1.3.9 Métodos difusos de AHP.....   | 99  |
| 1.3.10 Fundamentación de la Investigación.....  | 100 |
| CAPÍTULO 2. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA RESOLVER EL MODELO .....                            | 101 |
| 2.1. Caracterización del área objeto de investigación .....                                 | 101 |
| 2.2. Modelación de la estructura jerárquica .....   | 108 |
| 2.3 Validación del modelo propuesto: caso de estudio .....                                  | 110 |
| 2.4 Caracterización de las alternativas y los criterios que fueron evaluados .....          | 111 |
| 2.4.1 Alternativas objetos de estudio .....   | 111 |
| 2.5 Dimensiones, criterios y subcriterios a ser evaluados dentro del objeto de estudio..... | 113 |
| CONCLUSIONES .....  | 129 |
| RECOMENDACIONES .....   | 130 |
| REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA .....  | 131 |



## INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica mueve gran parte de la sociedad en moderna, su producción y consumo se ha convertido en sinónimo de crecimiento y bienestar, pero no se debe permitir que también lo sea de contaminación y degradación del entorno natural, se debe mover la mirada para la naturaleza y aprovechar la energía limpia que esta brinda. La generación eléctrica en el mundo y en Cuba presenta serios desafíos a vencer, uno de ellos es la asequibilidad de las tecnología, debido en primer lugar, a los altos costos nivelados de la energía, incluyendo los costos de mantenimiento y de adquisición o gastos de inversiones, otro de los desafíos es la sostenibilidad de estos proyectos, para ellos se deben garantizar bajas emisiones planteándose aquí sustituir las plantas de carbón y petróleo y migrar a tecnologías de baja emisión de carbono y acompañadas de una alta eficiencia, no menos importante debe ser la flexibilidad en la generación, para poder ser inyectada por las fuentes renovables de energías (FRE), y por último todo esto debe garantizar la seguridad energética, cumpliendo el principio de ser fiables en el suministro, por lo que resumiendo, se debe garantizar la asequibilidad, eficiencia, seguridad energética y la sostenibilidad en el tiempo.

Las energías renovables son fuentes de energía limpia, inagotables y crecientemente competitivas. Se diferencian de los combustibles fósiles principalmente en su diversidad, abundancia y potencial de aprovechamiento en cualquier parte del planeta, pero sobre todo en que no producen gases de efecto invernadero causantes del cambio climático ni emisiones contaminantes. Además, sus costos evolucionan a la baja de forma sostenida, mientras que la tendencia general de costos de los combustibles fósiles es la opuesta, al margen de su volatilidad coyuntural.

Por lo que será necesario incrementar la eficiencia en el consumo de todos los clientes que son servidos, mejorar la eficiencia en la generación eléctrica, incrementado la flexibilidad en la generación y no menos importante introducir las FRE garantizando no solo su disponibilidad, sino también su fiabilidad.

El crecimiento de las energías eólica y solar, es bastante vertiginoso, toda vez que los costos de adquisición de estas energías renovables han bajado considerablemente, entre otras cosas debido a los adelantos científico- técnicos, lo

que ha permitido que países en vía de desarrollo puedan acceder a los mercados de producción de estas tecnologías. Caso aparte es la energía eólica por ser objeto de esta investigación, si en el año 2018 y 2020 su incremento fue de un 5 y 6 %, se espera un crecimiento de un 10 % para el 2030 y un 13 % para el 2040.

En Cuba más del 95 % de la generación se realiza con combustibles fósiles, teniendo un papel preponderante el crudo cubano, con el 45 %, la generación con motores fuel el 18 %, en segundo lugar, luego le sigue la generación de fuel térmica y el gas acompañante con una participación del 14 %, el diesel en menos proporción con un 3 % y a partir de ahí vienen las FRE, con solamente 4,5 % de participación, dentro de las cuales están: solar y fotovoltaica, hidráulica, eólica y biomasa.

Dada la limitada disponibilidad de recursos fósiles, la falta de aprovechamiento hidroenergético y de otras alternativas existentes en Cuba, el país ha trazado la estrategia de migrar a las energías alternativas, limpias y renovables. Al triunfo de la Revolución, la capacidad instalada de generación de electricidad ascendía a solo 397 mW y garantizaba el abastecimiento a solo el 56 % de la población.

Como situación problemática del Sistema Electroenergético Nacional (SEN) UNE, 2020 se encuentra la alta dependencia de los combustibles fósiles para la generación de electricidad con más del 95% de la energía generada, así como la dependencia de los combustibles importados con lo cual se genera un porcentaje importante de la energía del país, el alto costo promedio de la energía servida al cliente, la baja eficiencia en la generación con centrales termoeléctricas con un índice de consumo promedio de 275 g/kWh y la alta contaminación ambiental siendo este uno de los más importantes.

Existen leyes, regulaciones y normas que ayudan a la preparación de modelos de funcionamiento y utilización de las energías renovables, tal y como se establece en la “Política para el Desarrollo Perspectivo de las Fuentes Renovables y el Uso Eficiente de la energía 2014 – 2030”, aprobada el 21 de junio del 2014 por el Consejo de Ministros y presentada a la Sesión de la Asamblea Nacional del mes de julio del mismo año. Dicha política como parte de la Agenda de la Nación hasta el 2030 enfatiza que es necesario proteger el planeta contra la degradación, incluso mediante el consumo y la producción sostenibles, la gestión sostenible de sus recursos



naturales y medidas urgentes para hacer frente al cambio climático, de manera que pueda satisfacer las necesidades de las generaciones presentes y futuras.

La provincia de Holguín no ha de quedarse atrás en el cumplimiento de los objetivos de dicha agenda mencionada anteriormente; más bien, dadas las características de este territorio, está llamada a desempeñar un papel importante en la consecución del desarrollo energético sustentado en las FRE. Esta intención conlleva a identificar un conjunto de aspectos que influyen de manera determinante en el cumplimiento de dichos objetivos:

- El consumo energético de la población es elevado, en lo que a los combustibles fósiles se refiere.
- Los elevados costos del combustible fósil en el mercado internacional.
- El recrudecimiento del bloqueo y las diversas manifestaciones de represalia que asume los Estados Unidos contra Cuba y Venezuela.
- El incremento del cambio climático y las elevadas temperaturas que afectan la producción agrícola, la extracción de níquel y la producción de bienes intermedios y finales provenientes de esta industria, al tiempo que aumenta la demanda de servicios fundamentales ante el crecimiento de la oferta turística en el territorio.
- La tendencia al crecimiento demográfico en la provincia.

Lo anteriormente mencionado, unido a la no implementación en el territorio de un modelo de gestión en el ámbito energético que facilite la implementación y explotación de las energías renovables con efectividad y que contribuya a disminuir el consumo energético y potenciar el desarrollo local a través de energías renovables y sostenibles, nos lleva a formular el siguiente **problema científico**: ¿Cómo proponer un cambio de la matriz energética a través de la introducción de proyectos eólicos sustentables y su evaluación multicriterio?

**Objeto de investigación:** Matriz energética del SEN

**Objetivo General:** Elaborar una propuesta metodológica para seleccionar mediante métodos multicriterio proyectos eólicos como propuesta de cambio de la matriz energética del SEN de la provincia de Holguín.

**Campo de acción:** Los métodos multicriterios para la evaluación y selección de proyectos eólicos sustentables

**Hipótesis:** Si se seleccionan mediante la modelación multicriterio los diferentes proyectos eólicos renovables aprobados por el SEN, entonces se podrá proponer un cambio de la matriz energética del SEN en la provincia de Holguín.

El objetivo se logra con las siguientes **tareas científicas:**

1. Caracterizar la evolución del estado del arte en lo relacionado con la matriz energética y los proyectos eólicos
2. Identificación de las variables, dimensiones e indicadores fundamentales que influyen en el desempeño eficiente de la matriz del SEN.
3. Identificación de las dimensiones de sustentabilidad y su relación con el ciclo de vida de los proyectos eólicos en las 5 zonas aprobadas por el Ministerio de la Industria Básica, para instalar en la provincia de Holguín.
4. Diseño y aplicación de encuestas a los expertos para la obtención de los datos que estarán presentes en el caso de estudio a resolver.
5. Realización de la modelación matemática, para elegir el método multicriterio a aplicar en el caso de estudio.
6. Obtención del modelo conceptual y matemático que represente el problema antes descrito.
7. Obtención de los resultados de la resolución del problema antes modelado.
8. Elaboración del informe final de la investigación.

### **Métodos y técnicas de investigación**

Los métodos de investigación que se aplicarán durante la realización de este trabajo serán los siguientes:

#### **Métodos empíricos**

Observación científica: Para llegar al modelo conceptual, y matemático que rija la situación o problema propuesto.

Criterio de expertos: Permite tener en cuenta opiniones, criterios, sugerencias de otros especialistas, para la selección de la dimensión, indicadores y criterios que serán evaluados juntos a las alternativas en cuestión.

Propuesta del Método Análisis Jerárquicos de Procesos sistémicos (AHP), a través del software ExpertChoice.

### **Métodos teóricos**

**Histórico-Lógico:** permite identificar los antecedentes, estado actual y tendencias de la matriz energética, así como las tecnologías o proyectos eólicos renovables aprobado para el norte oriental de Cuba.

**Analítico-sintético:** integrar de manera coherente los diferentes métodos y procedimientos mediante la revisión de la literatura nacional e internacional con el propósito de arribar a conclusiones teóricas-metodológicas del fenómeno.

**El aporte de la investigación:** Identificación mediante la modelación multicriterio, de los mejores proyectos eólicos sustentables a generalizar en Holguín, para proponer un cambio de la matriz energética de la SEN de la provincia.

La memoria escrita se ajusta a las líneas de investigación del Departamento, y responde a un proyecto o programa de investigación.

La bibliografía utilizada sirvió de base para trazar el problema y el objetivo en el contexto actual y conocer en la actualidad lo que otros autores o investigadores han hecho referente a los métodos multicriterio y los resultados alcanzados, por lo antes dicho se consideran pertinentes los datos obtenidos durante la búsqueda bibliográfica realizada.

La tesis está **estructurada** en una introducción, dos capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía

## **CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO-PRÁCTICO REFERENCIAL DE LA INVESTIGACIÓN**

La electricidad está presente en el origen de la luz, del calor, del movimiento y del sonido, junto con ello la humanidad se enfrenta a grandes retos, uno de ellos es disponer de una fuente energética, fiable, de fácil acceso, y más que todo sustentable; fiable para ser segura en el tiempo, accesible en dependencia una adecuada política de precio y la sustentabilidad, deberá estar ligada al cumplimiento de los objetivos del desarrollo sostenible, para con las generaciones futuras.

La generación mundial de energía eléctrica, tan importante para el desarrollo humano, se ha incrementado durante los últimos cincuenta años a un ritmo varias veces superior al del crecimiento de la población. El consumo promedio de electricidad correspondiente a cada habitante del planeta, en todas sus aplicaciones domésticas, industriales y de transporte, ronda hoy los 200 kWh mensuales, aunque su distribución es muy desigual.

Más de 65 % de este consumo lo satisfacen plantas termoeléctricas que queman carbón, gas o petróleo. La demanda creciente de estos combustibles no renovables ha desatado un continuo aumento de los precios que afecta a la economía mundial. Además, la combustión de tales combustibles fósiles produce gases, como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), cuyo efecto invernadero provoca el incremento de la temperatura de la superficie del planeta, lo cual trastorna cada vez más los regímenes de lluvia, acrecienta la ocurrencia de huracanes y provoca el ascenso del nivel de los mares, entre otras consecuencias nefastas a escalas local y global (Marrero Figueredo et al, 2007).

### **1.1. Matriz energética. Capacidad mundial**

Del total de toda las energías renovables que se ha instalado desde el 2008 hasta la fecha en el mundo, 2 799 094 mW, según datos estadístico de IRENA, 2021, 53 685 se genera en el continente Africano, 1286313 mW al continente Asiático, América y el Caribe, adiciona 16344 mW, Eurasia110241 mW, Europa 609499 mW, para la Unión Europea le corresponden la adicción de 528530 mW, para el

Norte de América, le corresponden 421703 mW, para Sur América 233033 mW y finalmente para Oceanía 44051 mW.

Haciendo un desglose por tecnología, tenemos que las hidroeléctrica participa con 1331889 mW, las hidroeléctrica mixtas 1210616 mW, las hidro de bombeo pura, 121273 mW, las energías marina 527 mW, las energías eólicas 733276 mW, de ella las terrestre (Onshore) ocupan la gran mayoría con 733276 mW y las marina (offshore) 34367 mW, llegando a la solar, por si sola es menor aún que la eólica, con una participación de 713970 mW, la solar fotovoltaica 707495 mW, la solar térmica 6475 mW, y luego tenemos la bioenergía con una participación de 126557 mW, sin embargo cuando es utilizado los biocombustibles sólidos y residuos renovables se llega a 102852 mW, el bagazo residuos de las cosechas de la caña, de azúcar, su potencial de generación mundial es de 19908 mW, también teniendo en cuenta los residuales municipales renovables su capacidad de generación es de 15355 mW, si a esto se le suma otros biocombustibles sólidos, los cuales aportan la capacidad mundial renovable 67588 mW, los biocarburantes líquidos también aportan 3555 mW, y no menos importante es el aporte del biogás con 20150 mW y por último la energía geotérmica solo aporta 14 050 mW. De toda esta generación mundial existe fuera de la red, 10 628.314 mW, quiere esto decir que pudiera estar gasificada en comunidades aisladas.

En la naturaleza, la energía solar se transforma en bioquímica, hidráulica, eólica, térmica y eléctrica, las cuales, mediante procesos eficientes, se modifican para aumentar sus rendimientos en beneficios de la humanidad.

Históricamente en Cuba se utilizan los molinos de viento como solución de fondo al suministro de agua a la ganadería, igualmente esta energía del viento puede ser utilizada para la producción de electricidad, esta energía puede alcanzar una importante participación en el balance energético nacional. Su empleo en sitios adecuados resolverá a corto y mediano plazo la demanda no solo de las comunidades aislada sino, como parte del entorno urbano de las grandes ciudades, complementando la generación del Sistema Energético.

Por lo que el grupo de Cubasolar conjuntamente con el Ministerio de la Industria Básica, han analizados los datos de 23 zonas, en todo el archipiélago cubano, con estudio de viento a 50 y 100 metros de altura, con muy buenos resultados.

Por todo lo ante expuesto a raíz de aprobarse en el año 2014, la política para el desarrollo prospectivo de las fuentes renovables de energía y la eficiencia energética proyectándose para el año 2030, se propone instalar 2144 mW con FRE para generar 7 316 gW/h al año significando un 24 %, aunque algunos autores (Marrero, 2020), estiman que pudiera ser mucho mayor, dado el potencial solar y de viento en todo el territorio nacional, desglosado de la siguiente forma:

1. 17 bioléctrica con capacidad de generación de 612 mW (14 %),
2. 13 parques eólicos, sumando 648 mW (6 %),
3. Parques solares fotovoltaicos: 700 mW (3 %),
4. Otros (1%).

Importante destacar que de forma estratégica se dejarían de importar 1,75 millones de toneladas de combustible al año, y contribuiría también al cuidado del medio ambiente a dejarse de emitir a la atmosfera 6 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, al año.

De esta proyección, según datos de la UNE, ya se han instalado y está en operación 65 parque solares fotovoltaicos con una potencia instalada de 152,3 mW/p, quiere esto decir que desde el 2013 al 2019, la potencia instalada de esta tecnología ha crecido 15 veces (UNE, 2020), superando la barrera del 1 % del total de la energía generada, estimándose para el cierre del 2019, se hayan generado 241 gW-h con SFV, significando esto el consumo de 107 mil viviendas al año, ahorrándose más de 50 mil t de combustible fósil. La región oriental de Cuba, tendrá una participación de un 52.1 mW/p, y la provincia Holguín participa con 4,4 mW/p.

En cuanto a los parques eólicos, existen 4 parques experimentales con una potencia de 11,5 mW, y en proyecto 13 nuevos parques, como se muestra en la figura 1.1, tres en la provincia de Las Tunas, cuatros en la provincia de Guantánamo y los cinco restantes en la provincia de Holguín, nueve serán financiados a la inversión extranjera y tres de ellos serán inversiones estatales.

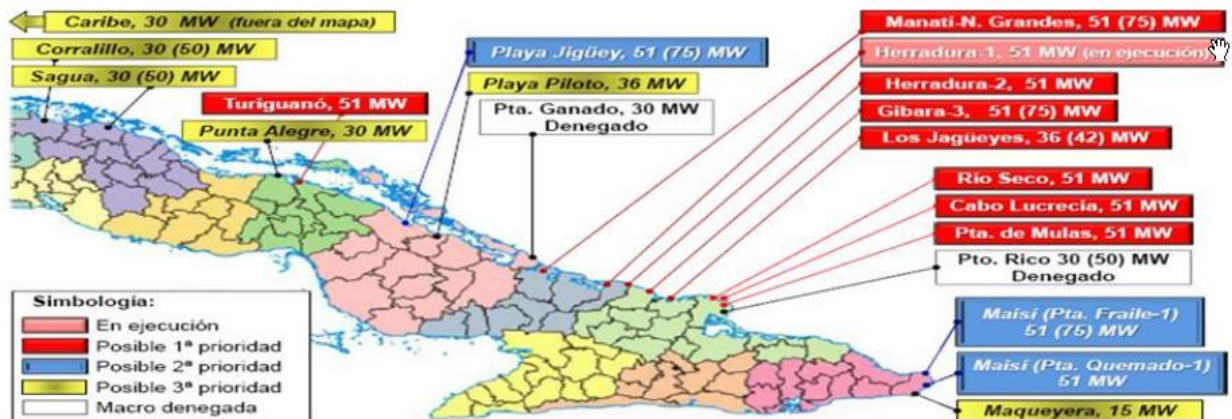


Figura 1.1. Proyección de los Parques eólicos de Cuba.

Toda esta proyección sumará la capacidad ante comentada de 648 mW, generando 1968 gW/año, dejándose de consumir 540 Mt/año, y evitará la emisión de 1,67 MMt de CO<sub>2</sub>/año.

Con el auge de las fuentes renovables de energía, desde hace ya treinta años, los defensores de los sistemas eólicos y solares enfocaron el problema a su modo de ver y conveniencia (Marrero, 2006). Los proveedores de estos sistemas están conscientes de que el uso de los sistemas híbridos es lo más adecuado, es decir, están de acuerdo en el uso de las energías fotovoltaicas y eólicas simultáneamente. Se ha comprobado que estos sistemas híbridos trabajan mejor cuando se acoplan a pequeños grupos electrógenos, y así reducen la cantidad de baterías, que los hacen más costosos y se reducen los costos de operación y mantenimiento. Independientemente que los estudios que se necesitan para la instalación de parques eólicos son mucho más costosos que los que se realizan para los pequeños sistemas.

Existen evidentes diferencias entre los pequeños aerogeneradores instalados como sistemas aislados, y los de mediano y gran tamaño conectados a la red, presentando problemáticas muy diferentes.

Por otro lado, la optimización de los componentes que integran los aerogeneradores y el paso de la fabricación artesanal o pequeñas escalas, a una producción seriada, han permitido una reducción considerable de los costos de

producción, instalación, operación y mantenimiento de estas plantas eólicas, apreciándose igualmente un aumento en las dimensiones desde los 100 kW, hasta turbinas de 10 mW.

Dentro de los retos futuros y perspectivas a nivel mundial se han diseñados seis motores impulsores que tendrán un impacto decisivo a mediano y largo plazos en la energía eólica son:

- El actual debate sobre el cambio climático y el desarrollo de energías limpias en busca de 100 % de suministro con fuentes renovables de energía.
- La reducción de los combustibles fósiles, así como de los recursos nucleares reflejada especialmente en los precios fluctuantes del petróleo y el gas, lo que representa un enorme reto, para los países en desarrollo.
- Un incremento del número de regiones, comunidades locales y países que están probando que el 100 % de suministro con fuentes renovables de energía es posible.
- El incremento de la conciencia con respecto a los riesgos peligrosos y los altos costos relacionados con la utilización de la energía nuclear movidos por los reportes del desastre en Fukushima, junto con los informes recientes acerca de los aumentos de los costos de los proyectos nucleares en Finlandia, Francia y Reino Unido.
- El incremento de la conciencia con respecto a las contribuciones potenciales y reales de la energía eólica y otras fuentes renovables de energía al suministro de energía de forma económica, social y ecológicamente sostenible.
- Los futuros desarrollos de la energía eólica relacionados con las tecnologías, la penetración y las tecnologías de almacenamiento.

Otro de los problemas que se encuentran en la literatura es la selección adecuada de la tecnología eólica a generalizar en determinado territorio, donde se deben tener en cuenta primero que todo las condiciones del entorno, e igualmente las



características culturales de los sectores de la sociedad que habitan en estos lugares, debido a que a muchos son zonas aisladas.

## **1.2 Proyectos eólicos futuros en la provincia Holguín**

### **1.2.1 Parque Eólico Río Seco 1**

El parque eólico, se encuentra en el municipio de Banes en la provincia de Holguín, para la generación de energía eléctrica a partir de la fuerza de los vientos es mediante la utilización de turbinas, 34 en total, las cuales cuentan con una potencia de generación de 1,5 mW cada una para un total de 51 mW, estas máquinas están compuestas por una torre de sustentación tubular de altura igual a 70 m, de acero dividido en tres secciones las cuales se ensamblan a la momento del montaje de la estructura, la máquina de generación y el rotor (hélices y buje). Toda la estructura y partes componentes cuentan con tratamiento adecuado contra los efectos agresivos del medio costero. Los pesos de estos elementos son: Rotor 33t, Nacelle (carcasa donde está instalada a turbina y acoplado el rotor): 55t, Torre: 116t, sus uniones serán atornilladas.

Todo este conjunto se fija a un cimiento de hormigón armado de forma octogonal de 14m por 14m de ancho y una profundidad de 2m, formando el plato de cimentación, luego un pedestal de la misma forma pero de 4,30 m de ancho y 1,30 de altura para un volumen de hormigón  $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$  de 270 a 300 m<sup>3</sup> cada cimiento.

Estas máquinas estarán ubicadas en dos filas aproximadamente paralelas a la costa, separadas entre sí a una distancia no menor de tres diámetros del rotor (70 m), es decir de 210 m a 250 m, de acuerdo a la geología del lugar, dientes de perro, formaciones cavernosas etc., el área restante será reforestada según las exigencias de la licencia ambiental con las especies que se les indique, dentro de esta área estará ubicado un transformador que recibirá la corriente de salida de las máquinas y las enviará a una centro de control donde se encuentran las celdas totalizadoras para el envío de la corriente a la red nacional, este transformador estará protegido por una caseta de mampostería, piso de cemento y baldosas y techo de placa de hormigón armado, el mismo estará apoyado en una base de hormigón levantado del nivel de piso como mínimo de 2 m, su puntal libre de piso

a techo será de 6 m como mínimo, contará con puertas y ventanas tropicalizadas para el funcionamiento adecuado del transformador. Serán enlazadas a un vial interior de 6 m de ancho el cual será a base de material de mejoramiento rocoso o estéril de cantera imprescindible para su explotación y facilidad temporal durante los trabajos de construcción y montaje. Paralelo a este se ejecutará una línea eléctrica de 33 KV (o de 110Kv u otra) soterrada a 1 m de profundidad separada a 2 m de dicho vial que evacuará la energía generada hasta el centro de control.

### **1.2.2 Micro Parque Eólico Jagüeyes**

Este parque eólico se ubica en el municipio de Rafael Freyre igualmente en la provincia de Holguín, la generación de energía es mediante la utilización de turbinas, 14 en total, las cuales cuentan con una potencia de generación de 2,5 MW cada una para un total de 35mW, estas máquinas están compuestas por una torre de sustentación tubular de altura igual a 70 m, de acero dividido en tres secciones las cuales se ensamblan a la momento del montaje de la estructura, la máquina de generación y el rotor (hélices y buje). Toda la estructura y partes componentes cuentan con tratamiento adecuado contra los efectos agresivos del medio costero. Los pesos de estos elementos son: Rotor 33t, Nacelle (carcasa donde está instalada a turbina y acoplado el rotor): 55t, Torre: 116t, sus uniones serán atornilladas. Todo este conjunto se fija a un cimiento de hormigón armado de forma octogonal de 14m por 14m de ancho y una profundidad de 2m, formando el plato de cimentación, luego un pedestal de la misma forma pero de 4,30 m de ancho y 1,30 de altura para un volumen de hormigón fck = 30 MPa de 270 a 300 m<sup>3</sup> cada cimiento.

Estas máquinas estarán ubicadas en dos filas aproximadamente paralelas a la costa, separadas entre sí a una distancia no menor de tres diámetros del rotor (70 m), es decir de 210 m a 250 m, de acuerdo a la geología del lugar, dientes de perro, formaciones cavernosas etc., el área restante será reforestada según las exigencias de la licencia ambiental con las especies que se les indique, dentro de esta área estará ubicado un transformador que recibirá la corriente de salida de las máquinas y las enviará a una centro de control donde se encuentran las celdas totalizadoras para el envío de la corriente a la red nacional, este transformador

estará protegido por una caseta de mampostería, piso de cemento y baldosas y techo de placa de hormigón armado, el mismo estará apoyado en una base de hormigón levantado del nivel de piso como mínimo de 2 m, su puntal libre de piso a techo será de 6 m como mínimo, contará con puertas y ventanas tropicalizadas para el funcionamiento adecuado del transformador. Serán enlazadas a un vial interior de 6 m de ancho el cual será a base de material de mejoramiento rocoso o estéril de cantera imprescindible para su explotación y facilidad temporal durante los trabajos de construcción y montaje. Paralelo a este se ejecutará una línea eléctrica de 33 KV soterrada a 1 m de profundidad separada a 2 m de dicho vial que evacuará la energía generada hasta el centro de control.

### **1.2.3 Micro Parque eólico Gibara III**

Este parque se ubica en el municipio de Gibara en la provincia Holguín, la generación de la energía es mediante la utilización de turbinas, 34 en total, las cuales cuentan con una potencia de generación de 1,5 mW cada una para un total de 51 mW, estas máquinas están compuestas por una torre de sustentación tubular de altura igual a 70 m, de acero dividido en tres secciones las cuales se ensamblan a la momento del montaje de la estructura, la máquina de generación y el rotor (hélices y buje). Toda la estructura y partes componentes cuentan con tratamiento adecuado contra los efectos agresivos del medio costero. Los pesos de estos elementos son: Rotor 33t, Nacelle (carcasa donde está instalada a turbina y acoplado el rotor): 55t, Torre: 116t, sus uniones serán atornilladas. Estas máquinas estarán ubicadas en dos filas aproximadamente paralelas a la costa, separadas entre sí a una distancia no menor de tres diámetros del rotor (70 m), es decir de 210 m a 250 m, de acuerdo a la geología del lugar, dientes de perro, formaciones cavernosas etc., el área restante será reforestada según las exigencias de la licencia ambiental con las especies que se les indique, dentro de esta área estará ubicado un transformador que recibirá la corriente de salida de las máquinas y las enviará a una centro de control donde se encuentran las celdas totalizadoras para el envío de la corriente a la red nacional, este transformador estará protegido por una caseta de mampostería, piso de cemento y baldosas y techo de placa de hormigón armado, el mismo estará apoyado en una base de

hormigón levantado del nivel de piso como mínimo de 2 m, su puntal libre de piso a techo será de 6 m como mínimo, contará con puertas y ventanas tropicalizadas para el funcionamiento adecuado del transformador.

Serán enlazadas a un vial interior de 10 m de ancho el cual será a base de material de mejoramiento rocoso o estéril de cantera imprescindible para su explotación y facilidad temporal durante los trabajos de construcción y montaje. Paralelo a este se ejecutará una línea eléctrica de 110 KV soterrada a 1 m de profundidad separada a 2 m de dicho vial que sacará la electricidad generada hasta el centro de control y del centro de control se enviará la energía hacia una sub estación eléctrica de 110 KV a construir que enlazará el sistema electro energético nacional con el parque eólico.

También se ejecutará aledaña al área del centro de control, en un área de 100 m por 100 m con su cerca perimetral de columnas y paños de rejas metálicas a una altura de 2.30m, calles interiores de hormigón armado, cimiento del transformador de 110 kv de hormigón armado, drenaje pluvial, trampas de grasas para los residuales oleosos y sistemas para su tratamiento, así como dos patios de 110kv y 33kv respectivamente donde estarán emplazados los equipos de entrada y salida de corriente, contará además con piso tecnológico de gravilla espesor 100mm.

#### **1.2.4 Parque eólico Cabo Lucrecia**

Se construirá un parque eólico para la generación de energía eléctrica a partir de la fuerza de los vientos, mediante la utilización de turbinas, 34 en total, las cuales cuentan con una potencia de generación de 1,5 MW cada una para un total de 50 MW, estas máquinas están compuestas por una torre de sustentación tubular de altura igual a 70 m, de acero dividido en tres secciones las cuales se ensamblan a la momento del montaje de la estructura, la máquina de generación y el rotor (hélices y buje). Toda la estructura y partes componentes cuentan con tratamiento adecuado contra los efectos agresivos del medio costero. Los pesos de estos elementos son: Rotor 33t, Nacelle (carcasa donde está instalada a turbina y acoplado el rotor): 55t, Torre: 116t, sus uniones serán atornilladas. Todo este conjunto se fija a un cimiento de hormigón armado de forma octogonal de 14m por 14m de ancho y una profundidad de 2m, formando el plato de cimentación, luego

un pedestal de la misma forma pero de 4,30 m de ancho y 1,30 de altura para un volumen de hormigón  $f_{ck} = 30$  MPa de 270 a 300 m<sup>3</sup> cada cimiento.

Estas máquinas estarán ubicadas en dos filas aproximadamente paralelas a la costa, separadas entre sí a una distancia no menor de tres diámetros del rotor (70 m), es decir de 210 m a 250 m, de acuerdo a la geología del lugar, dientes de perro, formaciones cavernosas etc., el área restante será reforestada según las exigencias de la licencia ambiental con las especies que se les indique, dentro de esta área estará ubicado un transformador que recibirá la corriente de salida de las máquinas y las enviará a una centro de control donde se encuentran las celdas totalizadoras para el envío de la corriente a la red nacional, este transformador estará protegido por una caseta de mampostería, piso de cemento y baldosas y techo de placa de hormigón armado, el mismo estará apoyado en una base de hormigón levantado del nivel de piso como mínimo de 2 m, su puntal libre de piso a techo será de 6 m como mínimo, contará con puertas y ventanas tropicalizadas para el funcionamiento adecuado del transformador. Serán enlazadas a un vial interior de 6 m de ancho el cual será a base de material de mejoramiento rocoso o estéril de cantera imprescindible para su explotación y facilidad temporal durante los trabajos de construcción y montaje. Paralelo a este se ejecutará una línea eléctrica de 34,5 KV soterrada a 1 m de profundidad separada a 2 m de dicho vial que evacuará la energía generada hasta el centro de control.

Se edificará la subestación eléctrica de 110/34,5 kV en un área de 100 x 100m con viales interiores, la base para el transformador de 110 /34,5 kV, redes de evacuación de residuales y los patios de 110 kV y 34,5 Kv. El Centro de Control será común con el de operación del parque y dispondrá de un cercado perimetral propio unido al del centro de control. Además se prevé la instalación de un mástil o torre de medición de 100 metros de altura para el monitoreo de las variables del viento.

### **1.3 Aplicación de la selección multicriterio**

Los métodos multicriterio son una herramienta útil para determinar el impacto de acciones de desarrollo sobre la sostenibilidad. Estos métodos permiten incorporar

los conflictos que existen entre objetivos económicos, ambientales y sociales y entre distintos niveles de decisión.

Para la selección de las mejores opciones de decisiones, los métodos más sencillos y rápidos son aquellos que involucran solamente una opinión subjetiva, sin expresar la previsión en fórmulas matemáticas. De los posibles métodos subjetivos, se consideran cuatro, cada uno utiliza una fuente diferente para la opinión subjetiva, tales como el método de *Delphi*, campo de fuerza, y los juicios de los ejecutivos. Numerosos problemas de selección surgido en diversos ámbitos se han resueltos mediante la aplicación de metodologías multicriterio, independientemente que otros plantean que la selección de un método multicriterio, es igualmente un problema de toma de decisión multicriterio.

Algunos autores recomiendan métodos más avanzados para la selección de alternativa, teniendo en cuenta criterios múltiples, por ello se plantea la modelación multicriterio, ya que es necesaria una metodología que logre combinar las distintas dimensiones, ya sean técnica o económica, o ambas con los diferentes objetivos, actores y escalas que se hallan envueltos en el proceso de toma de decisiones, sin sacrificar la calidad, confiabilidad y consenso en los resultados.

Una de las características principales de las metodologías multicriterio es la diversidad de factores que se logran integrar en el proceso de evaluación. La particularidad de cada metodología multicriterio está en la forma de transformar las mediciones y percepciones en una escala única, de modo de poder comparar los elementos y establecer ordenes de prioridad.

Las primeras aportaciones formales sobre métodos de toma de decisión se engloban en problemas en que los procesos de decisión incurren en votaciones en ámbitos sociales, pertenecientes a áreas políticas y matemáticas. Pues se trata de conocer las reglas mediante las cuales los votantes expresan sus deseos y como de esta forma pretenden materializar la meta o fin último.

Se destaca por su popularidad, la elección social, sin embargo, de igual forma comienza la aplicación de estas metodologías a la resolución de problemas complejos. En este caso, las figuras más importantes, fueron: Ramón Llull, Nicolas

Cusaneos, el Marqués de Caritat de Condorcet y el Caballero Jean-Charles de Borda. A continuación, se comentan brevemente las aportaciones realizadas por cada uno al ámbito de la Toma de Decisión.

La idea de comparación binaria para resolver el problema de agregación de preferencias individuales nace de la mano de **Ramón LLull (1232-1316)**. Esta comparación se basa en entrelazar valores de pares de alternativas estableciendo relaciones entre ellos **(Fernández Barberis y Escribano Ródenas)**.

**Nicolas Cusanus (1401-1464)** promovió el método de puntuaciones o *Scoringmethod*, mediante el cual se halla la respuesta al problema de agregaciones individuales. También introdujo el cálculo unitario que consigue derivar la función de utilidad total en la sociedad desde los intereses personales de un grupo de interesados, gracias a la inspiración de **Bentham (Fernández Barberis y Escribano Ródenas, 1997)**. Como aclaración, la función de utilidad valora mediante una expresión matemática, la relación existente entre pares de variables, como pueden ser la cantidad de servicios o los bienes consumidos por un individuo y el grado de satisfacción alcanzado por el consumidor.

La teoría de la utilidad abarca el análisis del comportamiento de los agentes económicos, según las necesidades a satisfacer. Conocido como el economista utilitario, **Francis Ysidro Edgeworth (1845-1926)** orientó sus estudios en busca de la maximización de la utilidad de los diversos agentes competidores en la economía. Para ello propuso la creación en cada agente implicado, de las curvas de la indiferencia o líneas de igualdad de utilidad, desde las que posteriormente se obtiene el conjunto óptimo de Pareto por derivación.

Otra de las vertientes que se apoya en las metodologías multiatributo es la conocida como teoría del bienestar, rama del pensamiento económico que propone aumentar el bienestar social, por medio de la maximización de la eficiencia económica, pero manteniendo la cantidad de recursos disponibles. También encuentra su base en el diagrama de Pareto.

**Tjalling Koopmans (1910-1985)**, propuso el concepto de vector eficiente en 1951 reemplazando al óptimo desarrollado por Pareto, en su artículo "*Analysis of production as an efficient combination of activities*". En su propuesta define un

vector *input-output* que será eficiente únicamente, en el caso de que se cumplan las siguientes condiciones:

- Fijando los *inputs*, el aumento de un *output* solo es posible con la disminución de algún otro *output*. (Eficiencia con orientación *output*).
- Fijando los *outputs*, el aumento de un *input* solo es posible con la disminución de algún otro *input* (eficiencia con orientación *input*).

Otra nueva vertiente que aborda el problema de toma de decisión multicriterio es la basada en el empleo de programación lineal. Está fue desarrollada por Harold William Kuhn (1925) y Albert William Tucker, mediante el concepto de vector máximo, que permitió a la optimización multiatributo convertirse en una disciplina propia (Barba-Romero y Pomerol 1997).

La primera reunión científica dedicada explícitamente a la metodología multiatributo, tuvo lugar durante la celebración del VIII Congreso de Programación Matemática, en el La Haya en 1970. En esta convención resultaron como triunfadoras las propuestas llevadas a cabo por Bernard Roy, así como los métodos multicriterio interactivos desarrollados por Benayoun, Tergny y Geoffrion (Barba Romero&Pomerol 1997).

En 1972 en la Universidad de Columbia, Cochrane y Zeleny organizaron la “*First International Conference on Multiple Criteria Decision Making*”, una nueva convención sobre las metodologías de Toma de Decisión Multiatributo. A esta asistieron en torno a 200 delegados y fueron presentados más de 70 trabajos sobre este ámbito. Los ponentes fueron variados, pues se reunieron desde incipientes figuras que presentaban sus tesis doctorales, entre los que se encontraban Dyer, Ignizio, Ijiri, Keeney, Yu y Zeleny; hasta consagrados científicos como Churchman, Evans, Fishburn, Roy y Zadeh. Gracias a este congreso, los estudios sobre la problemática de métodos multiatributo se constituyeron como ciencia expresamente, hecho que queda expuesto mediante la publicación de las actas del congreso en 1973, por Cochrane y Zeleny. Es durante esta serie de conferencias cuando se acuerda la formación del “*Special Interest Group on Multiple Criteria Decision Making*”. (Barba-Romero & Pomerol 1997).



### 1.3.1 Toma de decisiones

Keeny definía, en 1982, la toma de decisiones como “una formalización del sentido común para aquellos problemas demasiado complejos en que este no puede ser utilizado de modo informal”. Es decir, podemos definir decisión como la elección entre varias alternativas posibles, teniendo en cuenta la limitación de recursos y las necesidades del agente que plantea el problema.

Puesto que se debe tomar una decisión seleccionado la alternativa que mejor cumpla con los requisitos evaluados, se necesita información sobre cada una de las alternativas y sus consecuencias en el problema, si se analizan los resultados obtenidos con la opción elegida y se integran con la información ya evaluada, se tendrá la base de una nueva decisión a implementar, pudiendo establecer así un proceso continuo de mejora o retroalimentación.

Los métodos de ayuda a la toma de decisión no buscan la solución óptima de un problema, pues en la realidad es común que no exista una alternativa ideal (White, 1990). Por ello se trata de buscar, según los dos grandes grupos de metodologías, la solución que mejor respuesta proporcione al problema planteado.

La toma de decisión multiatributo (MADM) se enfoca a problemas en los cuales el número de alternativas se encuentra fijado, con lo cual el decisor únicamente debe seleccionar, clasificar u ordenar las diferentes alternativas. En esta categoría se pueden encontrar los métodos con solución a priori y los métodos interactivos.

La toma de decisión multiobjetivo (MODM), es una variante de los procesos de toma de decisión en la que las alternativas no están definidas al inicio del proceso, con lo que el decisor busca obtener o diseñar la “mejor” alternativa dentro de las limitaciones con los recursos disponibles.

#### Agentes en el proceso de decisión

Según (Roy, 1985), se establecen los tres agentes principales, en un problema de toma de decisión, de la siguiente forma:

- Decisor, individuo o grupo de individuos que como indica su nombre, tiene como función tomar la decisión, es decir, a la vista de las observaciones recibidas deberá seleccionar la alternativa final que será implementada para la resolución del problema.

- Analista, cuando existe, realiza la función de apoyo al Decisor aconsejándole por medio del estudio pormenorizado de la formulación y el problema plantado.
- Público o stakeholders, grupo social que sin participar activamente en el proceso de toma de decisión recibirá los impactos, ya sean positivos, negativos o neutros de la alternativa elegida como solución al problema plantado.

### 1.3.2 Proceso de toma de decisiones

La problemática relacionada con la toma de decisiones ha sido abordada a lo largo de la historia con una perspectiva mono-atributo, sin embargo, este planeamiento ha ido perdiendo protagonismo frente a la metodología multiatributo, por las ventajas que este último presenta.

Según Masud y Ravi en 2008, para poder aplicar metodologías multiatributo se debe contar con un problema formado por al menos dos criterios de decisión o atributos, pudiendo estos estar enfrentados, y al menos dos alternativas que puedan ser valoradas por los atributos impuestos:

- Alternativas: posibles soluciones al problema de decisión, entre las cuales el decisor puede elegir.
- Atributos o Criterios: características, rasgos, cualidades, o parámetros que describen cada una de las alternativas. El número de atributos que describe las alternativas será elegido por el decisor o grupo de decisión. Estos pueden ser valorados de dos formas: cuantitativamente, si tenemos evaluaciones numéricas y cualitativamente, sino existe unidad de medida, siendo la medida subjetiva.
- Pesos: parámetros que permiten reflejar las preferencias del decisor entre atributos.
- Objetivo o Meta: delimita el deseo que se quiere satisfacer, indicando las direcciones de mejora según las preferencias del conjunto decisor. La alternativa resultante del proceso cumplirá los atributos establecidos.

Proceso de toma de decisión según Robbins 1994 (fig. 1 2).

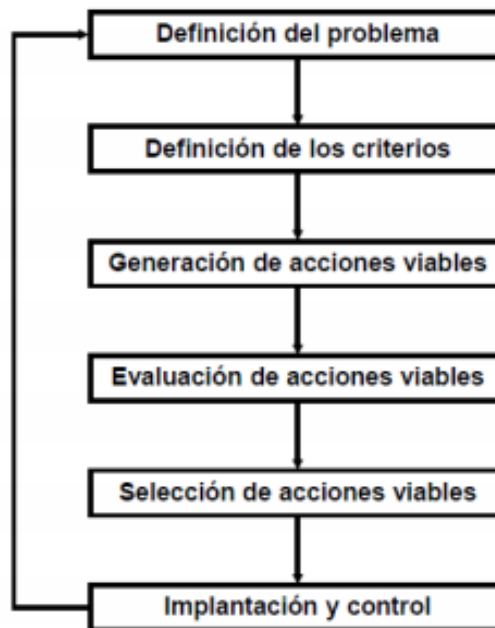


Figura 1.2. Proceso de toma de decisión

### **Definición del problema**

El punto de partida para alcanzar la solución de un problema pasa por identificarlo adecuadamente. Para ello se debe aclarar el concepto de problema en el caso de la toma de decisión, entenderemos por tal, la discrepancia entre un estado actual de un escenario concreto y el estado al cual deseamos llegar.

Ahora bien, antes de emprender un proceso de toma de decisión, debe reunirse el decisor o usuario junto con el analista para discernir las discrepancias, estudiando los recursos necesarios y las acciones a tomar. De esta forma, ambos serán conscientes de la problemática de la situación actual, y se pueda avanzar de manera racional en la secuencia de decisiones.

### **Definición de los criterios**

En este paso se señalan las pautas o los juicios que resultarán clave para alcanzar la solución al problema planteado en el paso anterior. Dentro de este abanico de criterios planteados para llegar hasta la meta es necesario conocer cuáles han de ser tenidos en cuenta y cuales podrán ser omitidos, por resultar irrelevantes a la hora de tomar la decisión final.

El conjunto de criterios que permite realizar el análisis del problema para plantearle una solución al decisor deber tener las siguientes propiedades:

- **Completitud:** cuando un problema o planteamiento se encuentra completamente representado o descrito en todos los aspectos y posibilidades gracias a los atributos que el decisor ha seccionado.
- **Operatividad:** el decisor debe ser capaz de entender las implicaciones de las alternativas y que estos criterios resulten útiles para ayudar al decisor a encontrar la mejor alternativa.
- **Descomponibilidad:** los criterios deben atender a un apartado diferente del problema global de forma independiente.
- **No redundancia:** los criterios no deben representar las mismas características, con el fin de no ocasionar problemas de duplicidad en el método.
- **Minimalidad:** de este modo podemos limitar al mínimo el número de criterios a emplear para lograr la descripción de un problema. Debemos excluir aquellos criterios que no aporten ninguna información al sistema.

### 1.3.3 Generación y evaluación de acciones viables

Ahora el analista y el decisor reunidos deben ser capaces de obtener y presentar todas las alternativas factibles, es decir, que cumplan los criterios planteados en las fases anteriores y que puedan resolver el problema con éxito.

Las alternativas propuestas deben ser estudiadas minuciosamente, analizando las fortalezas y debilidades de forma clara para cada uno de los criterios seleccionados en las fases anteriores.

El conjunto final de alternativas especificadas quedará definido como  $A=\{A1..... A_m\}$ , donde  $m$  es conocida y se cumplen las siguientes características:

- **Sin repeticiones**, cada alternativa debe ser sustancialmente diferenciable del resto del conjunto  $A$  definido.
- **Excluyente**, las alternativas del conjunto  $A$  no pueden combinarse en la elección final.
- **Exhaustivo**, el conjunto de alternativas  $A$ , representa el universo de todas las posibles soluciones al problema planteado.

Cada alternativa A1 será evaluada sobre los criterios establecidos, definiendo en ellos el nivel en el cual dan respuesta a ese atributo.

### **Selección de acciones viables**

En el momento en el cual las alternativas han sido establecidas, presentadas y evaluadas por el decisor, que ha de tomar la decisión según los criterios establecidos y jerarquizados, se pasa a elegir una única alternativa como solución al problema.

Esta alternativa supondrá el alcance de la meta del problema planteado, y representará la mejor de las propuestas planteadas según los criterios y el método multiatributo seleccionado para el procedimiento establecido.

### **Implantación y control**

Aunque el proceso de elección referente a las alternativas ha sido completado en la fase anterior, la decisión debe llevarse a cabo con el fin de obtener el resultado esperado por el decisor.

Para poner fin al proceso completo y una vez se ha realizado la implantación de la alternativa mejor valorada a lo largo del mismo, ésta debe ser evaluada. Mediante la evaluación de la solución adoptada comprobaremos si se ha logrado corregir el problema planteado.

Si como resultado se tiene que el problema persiste, se debe estudiar en qué momento del problema se desvía del enfoque deseado, y afrontar una nueva decisión sobre la decisión inicial: desestimar el problema planteado por completo, comenzando de nuevo el proceso; o retomar la fase a partir de la cual se obtuvo el resultado esperado.

### **1.3.4 Normalización**

Antes de comenzar con la aplicación de los métodos de toma de decisión que se han implementado en este trabajo, en algunos casos, se debe realizar la normalización de los datos introducidos por el decisor.

Para problemas cuyo objetivo es la toma de decisión, es necesario disponer de una herramienta que permita transformar los valores de los diferentes criterios en

unidades homogéneas con el objetivo de convertirlos en valores comparables y operables aritméticamente entre sí.

**La normalización de la matriz presentará las siguientes ventajas:**

- Permite la selección de la alternativa más adecuada, pues dado que los criterios se expresan en diferentes magnitudes se ve complicada esta elección si no se incurre en este proceso.
- Al emplear una escala fija y acotada se puede definir niveles de referencia que faciliten la toma de decisión, así la comparación de alternativas es inmediata

**El proceso de normalización puede realizarse según tres modalidades:**

- Sin cambio de magnitud, como por ejemplo el caso de mediciones de temperaturas realizadas en diversas escalas termométricas y posteriormente representadas en una común.
- Con cambio de magnitud a escala libre, estaríamos ante este caso si realizamos la transformación de datos de producción expresados en toneladas a una escala de valores de mercado, como son euros.
- Con cambio de magnitud a escala fija, si transformamos, por ejemplo, datos de consumo de energía eléctrica en una escala adimensional acotada entre unos valores fijos.

**1.3.5 Técnicas estadísticas para la normalización de datos**

Con este procedimiento se obtiene una normalización lineal pura. Para la aplicación del mismo, se debe realizar la división de cada valoración de las alternativas para un atributo entre el valor de la alternativa mejor puntuada para ese criterio. Si se expresa matemáticamente se tendrá para cada valor normalizado lo siguiente (1.1):

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\text{Max } x_{ij}} \quad (1.1)$$

Los valores homogeneizados para este tipo se encontrarán dentro del intervalo [0,1] conservando la proporcionalidad, y observaremos cierta tendencia a la concentración de valores.

### **Según porcentaje del total**

Al igual que para el método anterior, este caso se corresponde con una linealización pura, la forma de normalizar los datos, se realiza mediante la división de cada valoración para las alternativas de estudio, entre la suma de todas las valoraciones de un criterio, es decir (1.2):

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum x_{ij}} \quad (1.2)$$

Los datos conservarán la proporcionalidad dentro del intervalo [0,1], y aumenta la tendencia a la concentración de valores respecto al caso anterior.

### **Según porcentaje del rango**

A diferencia que el primer y segundo método, en este se producirá la normalización mediante una linealización con ordenada en el origen. Ahora se debe realizar fracción entre la diferencia de la valoración de cada alternativa para un criterio menos el valor mínimo alcanzado por las valoraciones en ese criterio, entre la máxima diferencia entre todas las estimaciones dadas. Matemáticamente se muestra (1.3):

$$n_{ij} = \frac{x_{ij} - \text{Min}x_{ij}}{\text{Max}x_{ij} - \text{Min}x_{ij}} \quad (1.3)$$

La normalización en este caso no conserva la proporcionalidad, pues los datos se adaptan a la concentración media de los valores. Los datos se siguen manteniendo en el intervalo [0,1].

### **Según Vector Unitario**

El último de los posibles tipos de normalización desarrollados en la presente investigación, realiza la homogeneización mediante una linealización pura. Este se aplica dividiendo cada dato de la matriz entre el módulo generado por todas las valoraciones dadas para un criterio. El módulo de dicho vector se calcula mediante

la raíz de la suma de los cuadrados de cada término. Expresado matemáticamente se tiene que:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum x_{ij}^2}} \quad (1.4)$$

Al igual que los anteriores, los valores obtenidos se encuentran en un rango [0,1] y conservan la proporcionalidad, aunque también muestran alta tendencia a la concentración de valores.

Una de las metodologías multicriterio más utilizadas, con fundamentos matemáticos, es el Proceso Analítico Jerárquico (*Analytic Hierarchy Process: AHP*). Los métodos de evaluación multicriterio provienen fundamentalmente del área de Investigación de Operaciones (I.O.). La “teoría de evaluación multicriterio” comprende en realidad un conjunto de teorías, modelos y herramientas de apoyo a la toma de decisiones, aplicable no sólo al análisis de inversiones sino a una amplia gama de problemas en la gestión tanto privada como pública tales como: análisis de posicionamiento de marcas en el mercado, medición de percepciones de clientes y selección de tecnologías.

En esta aproximación, el decisor (experto) mediante jerarquías logra elaborar una matriz en la que se da mayor peso a las alternativas con la mayor influencia en el problema.

Es necesario tener en cuenta que las decisiones, resultado de recurrir a expertos para evaluar alternativas de solución a problemas ambientales, pueden estar sesgadas. Los sesgos se deben en la mayoría de los casos a la incorrecta selección de los paneles de expertos o por intereses emocionales o particulares en el tema de estudio.

Al enfrentarse al análisis de cualquier tipo de evaluación apoyada del uso de paneles de expertos, la calidad de los procesos de decisión depende en gran medida de la calidad de los juicios del panel de apoyo.

El AHP (Saaty, 1990) es una herramienta para la toma de decisiones de tipo multicriterio, con la cual se tiene un medio efectivo para enfrentarse a decisiones complejas que involucran múltiples objetivos. Una de sus principales



características es que permite a los decisores dar peso a los criterios de evaluación o alternativas mediante una comparación sistemática por pares de cada una de las alternativas en evaluación (Liu, et al., 2011).

En el AHP las comparaciones de las  $n$  alternativas forman una matriz  $A$ , cuadrada y de orden  $n$ , donde  $a_{ij}$  representa la preferencia de la alternativa  $i$  con respecto a la alternativa  $j$  y, debido a que la matriz que se forma es una matriz recíproca, la preferencia de  $j$  sobre  $i$  es definida como  $a_{ji} = 1/a_{ij}$ . El objetivo es obtener, a partir de la matriz de comparaciones  $A$ , un vector de pesos o preferencias relativas,  $w = (w_1, \dots, w_n)^T$ , también llamado vector de prioridades.

La consistencia está definida como la coherencia entre las partículas de un conjunto. En la toma de decisiones, se puede interpretar como la coherencia entre decisiones consecutivas o decisiones relacionadas entre sí. Para el AHP la consistencia es una medida estadística de qué tan cercano está un decisor de tomar decisiones lógicamente relacionadas o escogidas de forma aleatoria.

### 1.3.6 Índice de consistencia y razón de consistencia

Saaty (1977) propuso el índice de consistencia (CI) basado en la solución por vectores propios al problema; para cualquiera matriz positiva  $A$  se tiene un valor propio  $\lambda_{max}$  que es real y positivo. El problema de vectores propios correspondiente  $Ax = \lambda_{max}x$  tiene una solución  $x$  con  $x_i > 0$  para todo  $i$ . Para cualquier matriz recíproca, sea o no consistente, el vector propio  $x$  sirve como estimador del vector real de pesos o prioridades  $w$ . El valor propio  $\lambda_{max}$  siempre satisface que  $\lambda_{max} \geq n$  con  $\lambda_{max} = n$  si y solo si la matriz es consistente.

El índice de consistencia CI propuesto por Saaty (1980) está dado por  $(\lambda_{max} - n)/(n-1)$ . Cuando la matriz de comparación por pares es consistente, se cumple que  $\lambda_{max} = n$  y por tanto el CI es igual a cero; en otros casos el valor de CI es positivo.

Para superar el problema de la dependencia del índice al orden de la matriz, Saaty propuso una medida normalizada denominada razón de consistencia:  $CR = CI/RI(n)$ , donde  $RI(n)$  es un índice aleatorio para matrices de orden  $n$ , definido como el valor esperado del CI asociado a las matrices de orden  $n$  y es estimado mediante simulaciones de matrices aleatorias de orden  $n$ , donde las entradas de

dichas matrices fueron llenadas usando elementos aleatorios del conjunto de valores  $\{1, 2, \dots, 9, 1/2, 1/3, \dots, 1/9\}$ .

Los valores de CR están en el rango entre cero y uno, donde  $CR = 0$  indica una matriz totalmente consistente y  $CR = 1$  indica una matriz completamente aleatoria. El criterio de Saaty para aceptar una matriz como consistente es  $CR \leq 0,1$ .

### 1.3.7 Justificación del número de expertos

Los paneles de expertos se presentan a la comunidad científica como un mecanismo para lograr un acercamiento eficiente a la toma de decisiones “informada”, principalmente cuando hay incertidumbre debido a la falta de información o su calidad (Geneletti, 2007).

Si bien la experiencia es indispensable para proporcionar información relevante, los expertos no pueden ser vistos como un estándar insesgado para la evaluación, y hay consenso en la literatura sobre la necesidad de la transparencia en la presentación de evaluaciones científicas apoyadas por expertos (Kontic, 2000; Noble, 2004). En este caso se utilizará el número de Miller,  $7 \pm 2$  quien expresó cuando el número de elementos para los que se efectúan las comparaciones relativas supera  $(7 \pm 2)$ , número mágico de Miller (1956), el modelo AHP recurre a las medidas absolutas (*ratings*) esta restricción es posible de eliminar si se hace una separación del total de alternativas en grupos de elementos con un cardinal menor que el número de Miller. La toma de decisiones multiatributo (*multiple attribute decision making*) trabaja con un número finito (que generalmente es pequeño) de alternativas determinadas,  $A = \{A_1, A_2 \dots A_m\}$ , del cual se conoce además su evaluación sobre cada uno de los atributos,  $X_1, X_2, \dots X_n$ , de carácter cuantitativo o cualitativo y que se representa a través de la denominada matriz de decisión.

Luego de una revisión bibliográfica, se concluye que el número óptimo de expertos a responder las encuestas, según Rand Corporation, un mínimo de 7 expertos, aludiendo que el error disminuye notablemente por cada experto añadido, hasta llegar a los siete expertos, pero a partir de esa cantidad, la disminución del error por cada experto añadido, no es más significativa, no siendo aconsejable llegar a más de 30 expertos, caso parecido plantea el Observatorio de Prospectiva

Tecnológica Industrial (OPTI), utilizando grupo de experto no superiores a 15, incluso con hasta nueve expertos. Delbecq et al., (1975) proponen que el panel o grupo de experto debe oscilar entre 5 y 9 personas. Murry and Hammons (1995), sugiere que, si se utiliza un método modificado Delphi, debe contarse con la opinión de un grupo de experto de 10 a 30. Che-Wei, Chang et al., (2007) aplican el Proceso Analítico Jerárquico para selección de máquinas de corte, con un número de experto igual a 13. Vicent S. Lai et al., (2002) aplican el AHP para la selección de software, y obtiene la información con entrevista a 6 expertos.

### 1.3.8 Herramientas informáticas para resolver los métodos multicriterios

Para facilitar estos cálculos y obtener con mayor rapidez los resultados, se han creado diferentes paquetes estadísticos computarizados como son: SPSS, WINQSB, *Statgraphics*, *Statistica*, *Microsoft Office Excel*. Aunque el Excel solo lo hace para regresión simple. El usuario solo necesita saber cómo usar estos paquetes estadísticos e interpretar los resultados obtenidos para dar los pronósticos. El *Stagraphics* además de la función de regresión puede ser utilizado para la Serie de Tiempo. En este caso de estudio se utilizará el *Expertchoice* analizar los datos u obtener los resultados de cada uno de los proyectos objeto de estudio, esta herramienta trabaja de la siguiente manera:

1. Primero se realiza la comparación pareada de los criterios.
2. Luego el resultado de esta matriz se normaliza por cada columna, Saaty propone que este proceso se haga por la suma.
3. El resultado de la suma normalizada por fila, se le busca el promedio.
4. Este promedio es el vector columna para el cálculo del valor propio  $\lambda_{max}$ .
5. Posteriormente se calcula el índice de consistencia  $CI = \lambda_{max} - n / n - 1$ , cuando la matriz es consistente  $\lambda_{max} = n$  y por tanto el  $CI$  es igual a cero, en dependencia del tamaño de la matriz.
6. Para superar el problema de la dependencia del índice al orden de la matriz, Saaty propuso una medida normalizada denominada razón de consistencia:  $CR = CI / RI(n)$ , donde  $RI(n)$  es un índice aleatorio para matrices de orden  $n$ , definido como el valor esperado del  $CI$  asociado a las matrices de orden  $n$  y es estimado mediante simulaciones de matrices aleatorias de orden  $n$ .

7. El criterio de Saaty para aceptar una matriz como consistente es  **$CR \leq 0,1$** .

La metodología antes descrita será la que se va a aplicar, dada la facilidad, fiabilidad y alta precisión, además de ser la más aconsejable dada las características del problema que se plantea.

Otros autores utilizan los métodos híbridos para validar o contactar un método simple multicriterio, de ellos se hará una breve explicación de su estado del arte.

Se han propuesto muchos métodos clásicos y heurísticos para resolver un problema de ubicación, como programación lineal, no lineal, algoritmo simplex, métodos de ramificación y corte, ramificación y encuadernación (Liu, Wang y Jin, 2016c ), red neuronal (Wan, Huang y Li, 2007 ), algoritmos genéricos, sistemas expertos, múltiples sistemas de agentes, algoritmos híbridos (Han, Li, Wang y Shi, 2016 ; Xu, Law, Chen y Tang, 2016a ; Zare et al., 2013) y así sucesivamente.

Existen diferentes estudios asociados con las decisiones de selección de ubicación que han se ha llevado a cabo comúnmente utilizando técnicas MCDM, como centros de distribución selección con el sistema de calificación ponderada del factor difuso (Ou&Chou, 2009; Xu, Dong, Zhang &Xu, 2016b; Zhang, Xie& Wang, 2016), problema de ubicación con fuzzy-AHP (Petrovic&Kankaraš, 2018), problema de ubicación con los métodos MOORA y COPRAS ods (Kracka, Brauers&Zavadskas, 2010 ; Rezaeiniya, Zolfani&Zavadskas, 2012), decisión de ubicación del centro de carga intermodal con modelo de evaluación multiobjetivo (Sirikijpanichkul& Ferreira, 2006; Yang, Sun, Deng, Zhang &Liao, 2016), selección de la ubicación de LC con TOPSIS difuso basado en el peso de la entropía (Chen&Liu, 2006), ubicación de puertos en aguas profundas con AHP y métodos de evaluación de relación difusa (Zavadskas, Turskis&Bagocius, 2015), selección del sitio de construcción con AHP difuso y ponderado método de evaluación de producto de suma agregada (Turskis, Zavadskas, Antucheviciene&Kosareva, 2015), selección de la ubicación de las instalaciones con AHP y ELECTRE (Yang & Lee, 1997), selección de puerto con AHP y PROMETHEE (Zecevic, 2006), logística inversa selección de ubicación con MOORA (Kannan, NooralHaq&Sasikumar, 2008) y seleccionar un sitio para un centro logístico sobre factores y métodos (Chen&Liu, 2006). La investigación enumerada anteriormente

destaca a Moora, Copras, Topsis, Electre y Promethee como se usa con más frecuencia en el proceso de selección de ubicación de centro logístico

### **1.3.9 Métodos difusos de AHP**

Se propone inicialmente el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) por Saaty como un enfoque estructurado utilizado para toma de decisiones en problemas complejos. AHP organiza los criterios de toma de decisiones como jerarquía y objetivos a cuantificar las prioridades relativas para un conjunto dado de alternativas basadas en los pares de tomadores de decisiones juicios. AHP también enfatiza la consistencia de la comparación de alternativas y tiene la capacidad de detectar e incorporar inconsistencias inherentes a la decisión proceso de fabricación.

En el método original, las evaluaciones de los tomadores de decisiones son representadas como números nítidos. Sin embargo, en los casos en que los tomadores de decisiones no pueden expresar las evaluaciones con números, se puede utilizar lógica difusa que proporciona una fuerza matemática para capturar las incertidumbres asociado con el proceso cognitivo humano. Allí son varias propuestas de extensión difusa de AHP en la literatura ( **Laarhoven&Pedrycz 126**) proponen el primer algoritmo en AHP difuso mediante el uso de difuso triangular funciones de membresía. **Buckley (127)** extiende AHP con números difusos trapezoidales y utilizó el método de la media geométrica para derivar pesos y rendimiento difusos. **Chang (128)** sugiere utilizar el análisis de extensión método para los valores de extensión sintética del par comparaciones utilizando números difusos triangulares. En uno de los estudios recientes de **Zeng et al., (129)**, proponer usando el método de promedio aritmético para obtener rendimiento de los pesos y ampliar el método con diferentes escalas con números triangulares, trapezoidales y nítido.

### **Aplicación del problema en una empresa TIC**

El tercer grupo combina diferentes técnicas y desarrolla métodos híbridos. **Jakhar&Barua (138)** se centran en el rendimiento de la cadena de suministro. Los autores integran el modelado de ecuaciones estructurales y el AHP difuso proponer una herramienta de evaluación integral y modelo de decisión para medir

el desempeño de la cadena de suministro y guía para futuras mejoras. En la propuesta el modelo SEM se utiliza para determinar los pesos de cinco criterios y 19 subcriterios del desempeño sistema de evaluación, y el AHP difuso se utiliza para determinar los pesos relativos de los niveles de toma de decisiones. con respecto a cada criterio y subcriterios.

### **1.3.10 Fundamentación de la Investigación**

La investigación se realiza para solucionar el problema científico que presenta la Empresa Eléctrica de proponer un cambio de la matriz energética a través de la introducción de proyectos eólicos sustentables y su evaluación multicriterio.

Se considera que se han encontrado tendencias que indican la posibilidad de resolver el problema planteado al nivel establecido en los objetivos. La solución del problema conllevará a la una respuesta viable práctica y teórica de la investigación.

## CAPÍTULO 2. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA RESOLVER EL MODELO

### 2.1. Caracterización del área objeto de investigación

Dentro del estado actual de la tecnología de los aerogeneradores que se producen hoy en el mundo están:

**Europa:** Comercialmente: Aerogeneradores de 2-6 MW (80-140 m de diámetro del rotor). Prototipos: Aerogeneradores de 6-10 MW. Diámetro del rotor: 140-180 m.

**Estados unidos:** Comercialmente: Aerogeneradores de 2-3 MW (80-100 m de diámetro del rotor). Prototipos: Aerogeneradores de 2,5 MW.

**Asia:** Comercialmente: Aerogeneradores de 2-3 MW (80-100 m de diámetro del rotor). Prototipos: Aerogeneradores de 5-6 MW.

Para que siga aumentando la capacidad instalada de energía eólica a nivel mundial, deben resolverse las barreras existentes: la garantía de suministro, la reciclabilidad, el impacto ambiental-visual, la percepción social y la logística. De aquí que los retos de la energía eólica sean:

1. Reducción del costo de la energía (aumento del tamaño).
2. Garantía de suministro (herramientas de predicción más precisas y soluciones de almacenamiento masivo de energía).
3. Reciclabilidad (nuevos materiales).
4. Reducción del impacto (aerogeneradores de mayor potencia y evitar su instalación en zonas de alto valor paisajístico).
5. Reducción de los problemas logísticos (infraestructuras de evacuación de la electricidad y soluciones de menor peso y tamaño específico).

En Cuba, gracias al trabajo de especialistas del Instituto de Meteorología y de otras instituciones nacionales y locales, ya se ha completado la primera edición del mapa eólico de Cuba, basado en los datos de 68 estaciones meteorológicas, recopilados durante décadas y procesados con el reconocido software europeo WAsP. A partir del mapa eólico se han obtenido estimados técnicamente fundamentados de la capacidad instalable, de la potencia media anual de generación y de la producción anual de energía. Con ayuda del mapa eólico de Cuba recientemente concluido y del mapa de evidencias ecológicas, resultado del trabajo de especialistas que recopilaron e interpretaron un gran número de

evidencias geológicas y ecológicas del viento, se han elegido varias decenas de sitios promisorios para la instalación de parques eólicos, donde se están instalando torres anemométricas de hasta 100 m de altura para caracterizar en detalle el potencial eólico de tales sitios, con vistas a la ubicación definitiva de parques eólicos en un futuro no lejano. Se debe destacar que estos datos luego fueron constatados por la empresa española *Siemen-Gameza*. El mapa eólico se elabora para determinar, a grandes rasgos, cuál es la distribución geográfica y la magnitud del potencial eólico de un país o región. La información de entrada sobre la cual se basa el mapa eólico está constituida por los datos de la velocidad y dirección de los vientos registrados a lo largo de años por las estaciones meteorológicas.

Luego de conocer el potencial eólico de la zona se pudiera establecer la evaluación preliminar y la caracterización energética del territorio, en los términos siguientes:

- La velocidad media del viento, en m/s, a determinada altura sobre el nivel del suelo en períodos mensual, estacional y anual.
- La densidad de potencia media del viento, en W/m<sup>2</sup>, a determinada altura sobre el nivel del suelo, en períodos mensual, estacional y anual.
- Los patrones diarios de distribución de velocidades del viento, de la frecuencia de sus rumbos y de la ocurrencia de calmas.

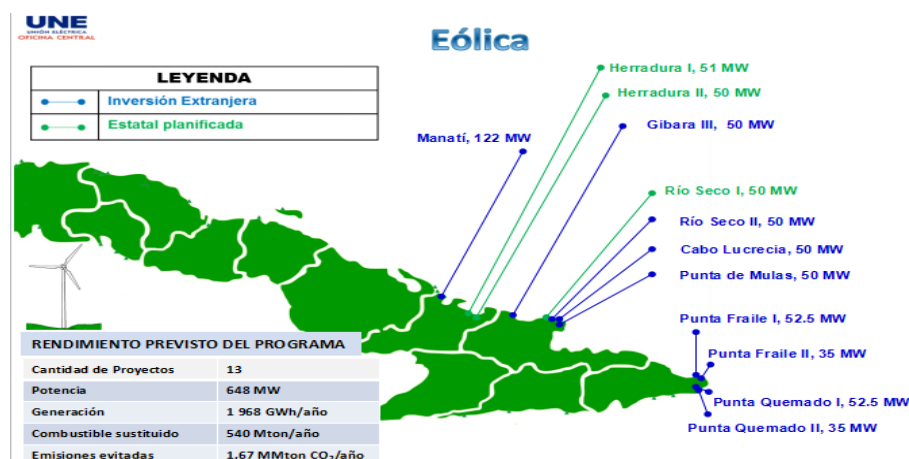



Figura 2.1. Proyectos eólicos de Cuba



El programa contempla la puesta en marcha de 14 parques eólicos en 2030 con una potencia total instalada de 656 mW. Se estima que la generación de electricidad alcanzará 1968 GWh/año, lo que representará 6 % de la demanda eléctrica de ese año. Esta generación evitará el consumo de 540 millones de toneladas de combustible y evitará 1,67 MMt CO<sub>2</sub> por año.



| Parques Eólicos      | Capacidad Estimada | Provincia  | Municipio      | Zona    | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 |
|----------------------|--------------------|------------|----------------|---------|------|------|------|------|------|------|------|
| Herradura I          | 51                 | Las Tunas  | Jesús Menéndez | Oriente |      | 51   |      |      |      |      |      |
| Herradura II         | 50                 | Las Tunas  | Jesús Menéndez | Oriente |      | 50   |      |      |      |      |      |
| Río Seco I           | 50                 | Holguín    | Banes          | Oriente |      |      | 50   |      |      |      |      |
| Gibara III           | 50                 | Holguín    | Gibara         | Oriente |      |      |      | 50   |      |      |      |
| Cabo Lucrecia        | 50                 | Holguín    | Banes          | Oriente |      |      |      | 50   |      |      |      |
| Punta de Mulas       | 50                 | Holguín    | Banes          | Oriente |      |      |      | 50   |      |      |      |
| Punta de Fraile I    | 52.5               | Guantánamo | Maisí          | Oriente |      |      |      |      | 52.5 |      |      |
| Punta de Fraile II   | 35                 | Guantánamo | Maisí          | Oriente |      |      |      |      | 35   |      |      |
| Punta de Quemado I   | 52.5               | Guantánamo | Maisí          | Oriente |      |      |      |      | 52.5 |      |      |
| Punta de Quemado II  | 35                 | Guantánamo | Maisí          | Oriente |      |      |      |      | 35   |      |      |
| Los Jagüeyes         | 35                 | Holguín    | Rafael Freyre  | Oriente |      |      |      |      |      |      |      |
| Manatí               | 122.4              | Las Tunas  | Manatí         | Oriente |      |      |      |      |      | 122  |      |
| Río Seco II          | 50                 | Holguín    | Banes          | Oriente |      |      |      |      |      |      | 50   |
| Acumulados Cen - Occ |                    |            |                |         | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Acumulados Oriente   |                    |            |                |         | 0    | 101  | 151  | 301  | 476  | 598  | 648  |
| Total Acumulados     |                    |            |                |         | 0    | 101  | 151  | 301  | 476  | 598  | 648  |

Figura 2.2. Parques eólicos proyectados en Cuba.

Un ejemplo del empleo de la información de estos modelos lo constituyó la elaboración del Atlas eólico de Cuba con la colaboración de *Environment Canadá* y con el financiamiento de la Agencia para el Desarrollo Internacional de ese país. Así, fue posible adquirir un nuevo modelo (*Wind Energy Simulation Toolkit*) para estimar el recurso eólico de una región o un país, a partir del empleo de datos meteorológicos de reanálisis y mediante un enfoque de reducción de escala dinámico-estadístico. Los resultados fueron después mejorados a partir de la interpolación de valores reales medidos mediante el uso del método objetivo de Cressman, muy empleado en la meteorología. Estos datos medidos provinieron de los mástiles anemométricos instalados en el país durante la fase de prospección eólica, el mapa elaborado para el recurso eólico del país en el nivel de 100 m. Los mapas para los niveles de

10, 30 y 50 m pueden encontrarse en el sitio web del [Insmet, www.insmet.cu](http://www.insmet.cu). Estos mapas fueron presentados durante la XII Conferencia Mundial de Energía Eólica celebrada en La Habana en 2013 (fig. 2.3).

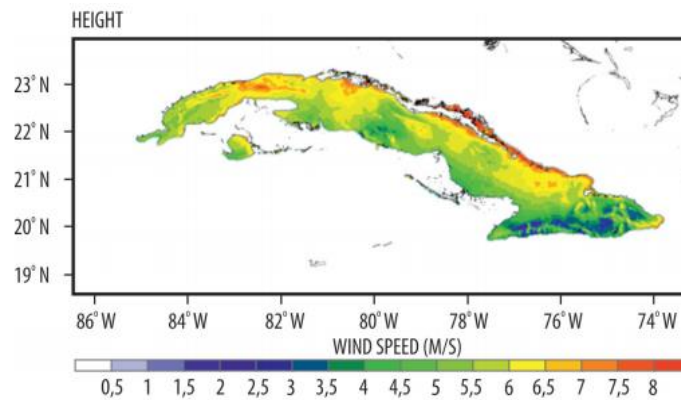


Figura 2.3. Atlas eólicos de Cuba.

Si tenemos en cuenta solo la región oriental, según los datos aportados por la UNE, se tiene la fig. 2.3.

También se hicieron mediciones de los vientos en software o herramientas online (figs 2.4 y 2.5).

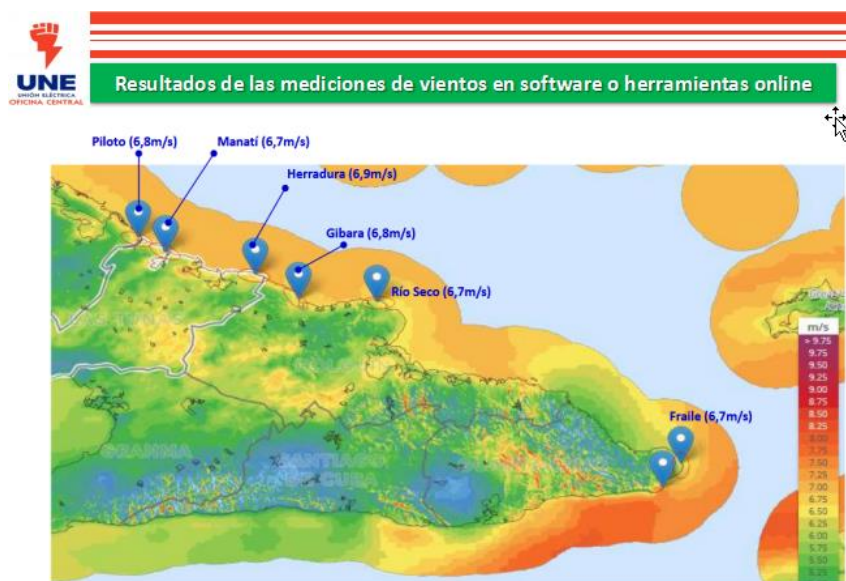


Figura 2.4. Mediciones de vientos en software.

En la fig. 2.4, se muestran los datos de vientos de dos de los parques objetos de estudio, resultado de mediciones igualmente de *SIEMENS-GAMESA*.

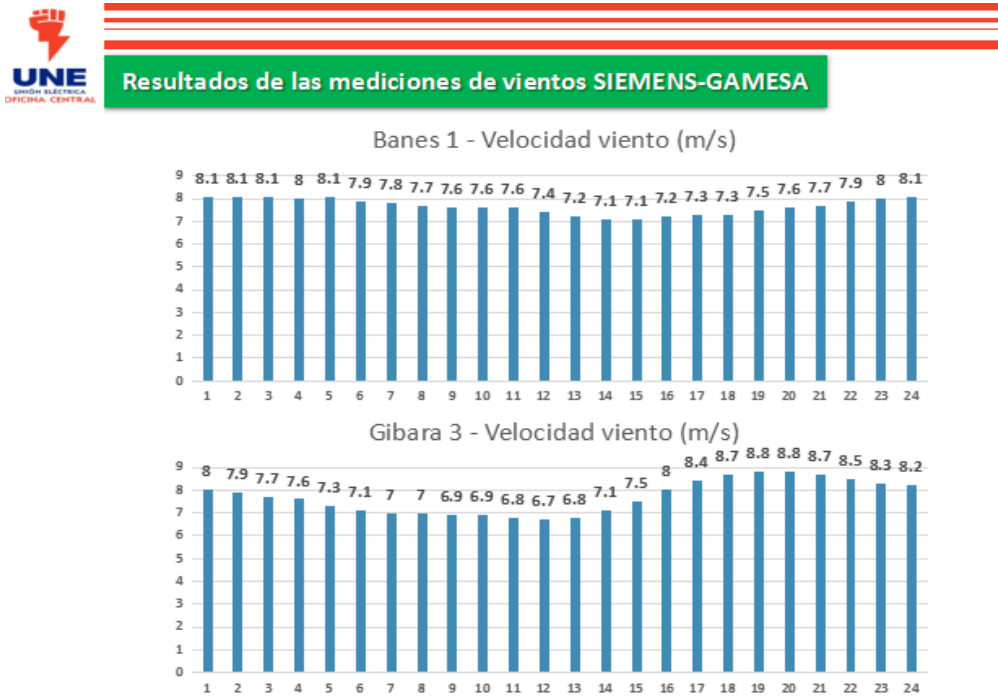


Figura 2.5. Mediciones de vientos Siemens- Gamesa.

Así como imagen satelitales recogidas de Gibara III y Rio Seco, donde se recogen la velocidad de viento promedio, el factor de capacidad esperado obtener en los sitios, la generación eólica a recibir y su distribución en planta de la posible configuración de cada turbina dentro del parque.

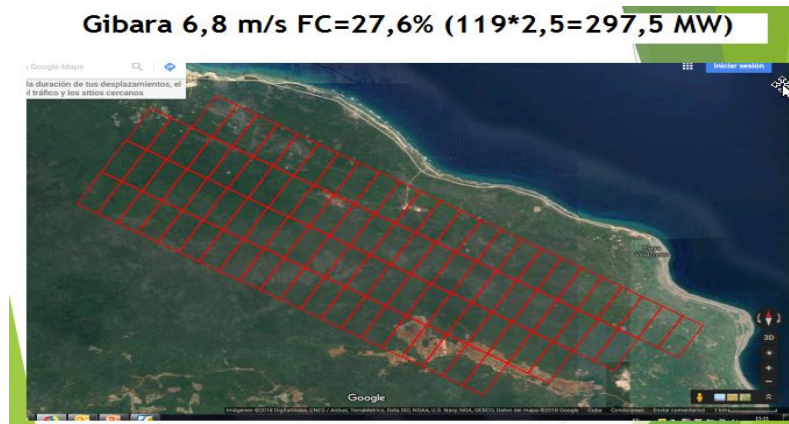


Figura 2.6. imagen satelital recogida de Gibara III.

Río Seco 6,7 m/s FC=27% (63\*2,5=157,5 MW)



Figura 2.7. Imagen satelital recogida de Río Seco.

En la fig. 2.8 se recoge un estimado de la generación hasta el 2026, donde se puede apreciar el despegue desde el año 2024, de la energía, al 2025 de la energía solar en amarillo, así como la energía eólica con un ligero crecimiento desde al año 2025, manteniéndose casi constante hasta el año 2026.

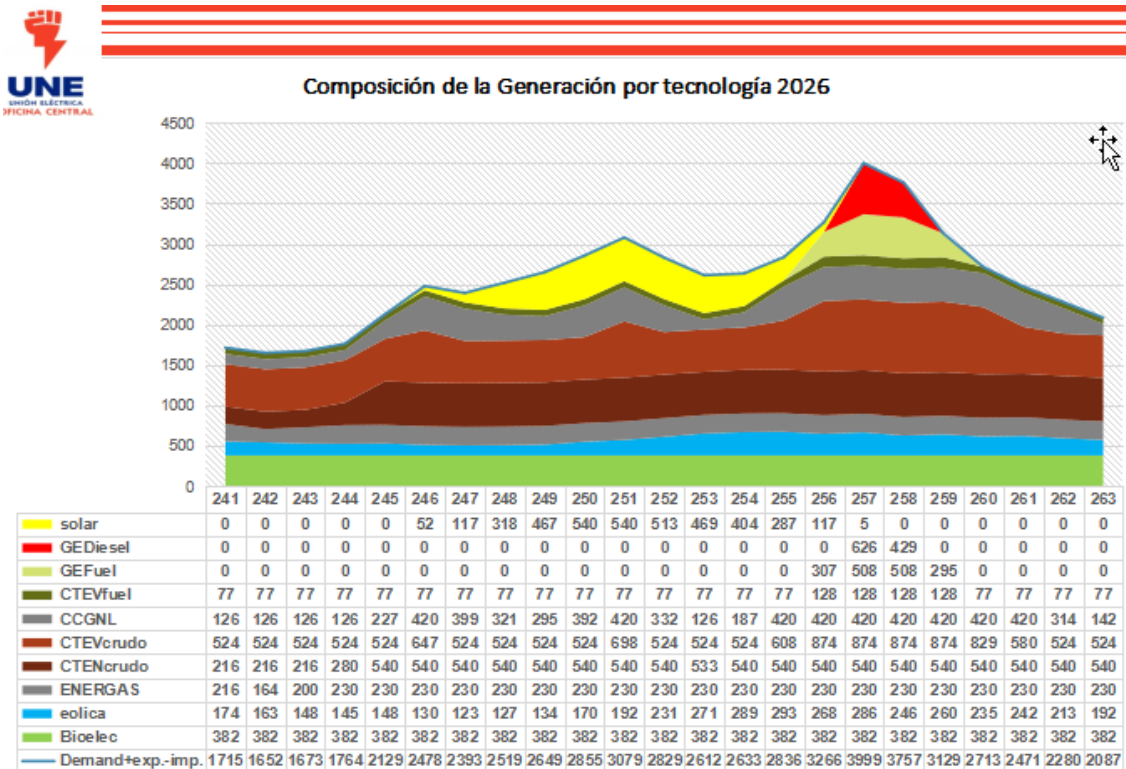


Figura 2.8. Estimado de la generación hasta el 2026.

De las 23 zonas con posibilidades de desarrollo de parques eólicos, se estima una potencia de 6900 mW, de ellas 7 coinciden con el Programa Eólico aprobado, donde se instalaría 688 mW, y donde según los expertos hay potencialidades para mucha más potencia, solo bastaría estudios de factibilidad, en cuanto al uso del terreno (UNE), además de los estudios de factibilidad, no solo técnica económica, sino teniendo en cuenta otras dimensiones, tales como las ambientales, sociales estratégica y de riesgo.

Finalmente se presentan los proyectos objetos de esta investigación, ellos son (tabla 2.1).

Tabla 2.1. Proyectos de investigación.

| No | Zonas            | Velocidad media anual 100 m (m/s) | FC % | No Turbinas | Potencia Instalada mW | Potencia media | GWh/año |
|----|------------------|-----------------------------------|------|-------------|-----------------------|----------------|---------|
| 1  | Gibara III       | 6,8                               | 27,6 | 119         | 297,5                 | 104,1          | 719,0   |
| 2  | Cabo de Lucrecia | 6,7                               | 27   | 114         | 285,0                 | 91,2           | 673,0   |
| 3  | Rio Seco I       | 6,7                               | 27   | 63          | 157,5                 | 50,4           | 372,0   |
| 5  | Punta de Mulas   |                                   |      |             |                       |                |         |

Primeramente, se aplicará la metodología AHP propuesta por Saaty (1994), y una herramienta informática de amplias prestaciones conocida como *ExpertChoice*, muy robusta y de plena confiabilidad. Además luego de los pasos a seguir, García-Cascales & Jiménez (2009) propone etapas conceptuales que hay que ejecutar, como por ejemplo modelización, en esta etapa, donde se construye un modelo, donde se enuncian todos los aspectos relevantes del proceso, siendo esta la etapa

más importante, cuando se aplica este método, otra de la etapa es la valoración, es aquí donde se tiene presente las preferencias de las decisiones, mediante los juicios en los denominadas matrices de comparación pareadas, priorización y síntesis en esta etapa se generan prioridades para la resolución de problema, en la que los decisores podrán comparar, aspectos tangibles e intangibles y finalmente la última etapa se nombra análisis de sensibilidad, se realiza para examinar la sensibilidad del resultado obtenido en una decisión.

Luego de las etapas, se muestra a continuación los pasos para la implementación del método.

## 2.2. Modelación de la estructura jerárquica

**Paso 1. Modelación de la estructura jerárquica, adoptando la siguiente forma (fig. 2.9)**

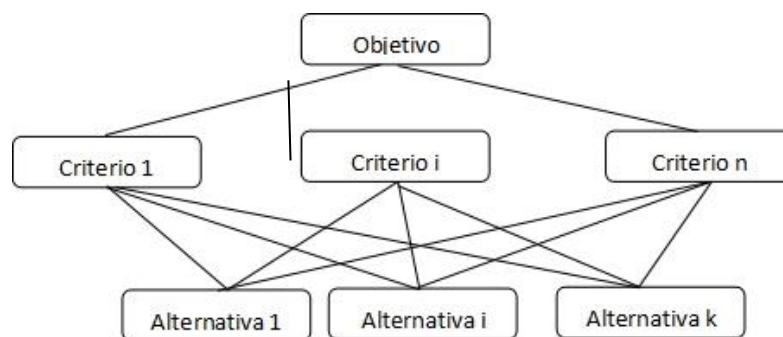


Figura 2.9. Modelación de la estructura jerárquica.

En el nivel superior como se muestra en la gráfica se encuentra el objetivo o las metas a ser alcanzado para la resolución del problema, un nivel más abajo se encuentra los criterios que primeramente serán evaluados entre sí, y más tarde respecto a las alternativas, estos criterios también pueden ser disgregados en subcriterios, en el último nivel se encontrarán las alternativas que serán seleccionada por nivel de prioridad, y por el resultado de la ponderación que serán fruto cada criterio.

### **Paso 2. Establecimiento de las prioridades entre los criterios**

En este paso se construye un vector prioridad para la evaluación de la importancia que entrega cada experto a cada criterio, este valor numérico debe ser lo más

ajustado posible, mediante la asignación directa, a través de una escala (escala Saaty), ver tabla 2.2.

Tabla 2.2. Establecimiento de las prioridades entre los criterios.

| 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 intermedios entre dos juicios adyacentes                                 |
| Valores Recíprocos | Sera el inverso cuando el criterio a comparar es mejor que el criterio comparado |

Las comparaciones entre pares determinaran los pesos de cada criterio y se presentaran como una matriz cuadradas, donde cada elemento se compara entre sí.

Uno de los inconvenientes de este método es que no siempre existe coherencia entre los juicios emitido, por el decisor por lo que se hace necesario medir la consistencia de los juicios, llamado razón de consistencia (CR), porque para esto primero se calcula el índice de consistencia (CI), como se muestra en la ecuación (2.1).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2.1)$$

Y donde para la mejora de la consistencia de los juicios se compara el índice de consistencia aleatorio (RI), con el tamaño de la matriz  $n$ , como se puede apreciar en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Índice de consistencia aleatorio.

| <b>Índice de consistencia aleatorio (RI) en función de la dimensión de la matriz (n).</b> |          |           |           |           |           |           |           |           |
|---|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>n</b>  | <b>1</b> | <b>2</b>  | <b>3</b>  | <b>4</b>  | <b>5</b>  | <b>6</b>  | <b>7</b>  | <b>8</b>  |
| RI  | 0        | 0         | 0,525     | 0,882     | 1,115     | 1,252     | 1,841     | 1,404     |
| <b>n</b>  | <b>9</b> | <b>10</b> | <b>11</b> | <b>12</b> | <b>13</b> | <b>14</b> | <b>15</b> | <b>16</b> |
| RI  | 1,452    | 1,484     | 1,518     | 1,535     | 1,555     | 1,570     | 1,588     | 1,595     |

Finalmente se calcula la razón de consistencia (CR), por la siguiente ecuación (2.2).

$$RC = \frac{CI}{RI} \quad (2.2)$$

Este término debe ser menor que 0,10 para que los resultados sean confiables y sean reconocidos como aceptables (García- Cascales&Jiménes, 2016; Parodi, 2013). Luego de análisis de la consistencia si se cumple la condición se procede con el método, evaluando de forma pareada cada criterio, y llegando a una ponderación que nos da el grado de importancia de un criterio sobre otro, realmente lo que hace el software *Expertchoice*, es luego de la obtención de la puntuación de los experto normaliza por la suma las columnas, dividiendo luego cada elemento  $x_{ij}$ , sobre la suma, de esta forma queda cada criterio en una solo rango para poder operar cada criterio, luego de esto se suman los valores normalizados de cada criterio, convirtiéndose en la ponderación del mismo, de igual forma, se suman los valores normalizados de cada columna, obteniéndose el peso de cada alternativa, finalmente se opera cada alternativa por los pesos de cada criterio, y la alternativa que mayor valor tenga, será la mejor.

### 2.3 Validación del modelo propuesto: caso de estudio

Como caso de estudio para la aplicación de los métodos, se tomó una data obtenida de varias presentaciones presentadas en la Conferencia Internacional de Energía Renovable por la Unión Nacional Eléctrica (UNE, 2020), donde se brindan una data con indicadores y alternativa para la instalación y explotación de proyectos eólicos y teniendo en cuenta lo planteado por Reyes Tamayo, J. R., &



Rodríguez Córdova, R. (2018), para un análisis multidisciplinario de esta problemática en la actualidad desde la perspectiva de los estudios sociales de la ciencia y la tecnología, no solo debe valorarse el aspecto económico, sino además tener en cuenta las consecuencias sociales y los daños medioambientales que provocan.

## **2.4 Caracterización de las alternativas y los criterios que fueron evaluados**

Para la planificación de la infraestructura eléctrica de la energía producida por los Parques Eólicos (PE) en Cuba, se tiene como propuesta la construcción de 8 PEs, de los cuales este estudio se centra en la infraestructura de los tres PE “*Río Seco - Punta Caleta Honda*”, “Cabo Lucrecia - Punta de Mulas”, “Punta de Mulas – Playa Puerto Rico”, en la región Oriental, en el municipio de Banes y Gibara III en el municipio de Gibara de la provincia Holguín. La configuración de la infraestructura de los cuatro PEs, cada uno con potencia de 51 MW; con 34 Aero-Generadores (AG) con potencia unitaria de 1,5 a 2 mW y altura de buje de 70 m o más. La zona se ha dividido en 3 regiones para la construcción de los PEs, que comprende una media luna desde Río Seco al Este y casi en la latitud de Cabo Lucrecia, hasta Punta Caleta Honda al Noroeste, desde 200 m de la costa y hasta 2 km en profundidad, con una longitud estimada en 6 km y una extensión superficial aproximada de 13 km<sup>2</sup>, denominadas:

- *Río Seco - Punta Caleta Honda*.
- Cabo Lucrecia - Punta de Mulas.
- Punta de Mulas - Playa Puerto Rico.

### **2.4.1 Alternativas objetos de estudio**

Se presentan a continuación las siguientes alternativas objeto de estudio:

1. Planta Eólica Gibara III: Situada en el municipio Gibara, se encuentran situado a 40 km al noreste de la provincia de Holguín, se espera la generación de 51 mW y su puesta en marcha está planificada para el año 2022, según dos estadísticos de la UNE

2. Planta Eólica Cabo de Lucrecia: Situada en punta de mula, municipio Banes, provincia Holguín, comprende una media luna desde Cabo Lucrecia casi en la latitud de Cabo Lucrecia, hasta Punta de Mula al Noroeste, desde 200 m de la costa y hasta 2 km en profundidad, con una longitud estimada en 6 km y una extensión superficial aproximada de 13 km<sup>2</sup>, representativa del litoral holguinero posee vientos sostenidos durante todo el día, condición que diferencia a este territorio del litoral Sur, por cuanto, la llegada de los vientos Alisios no se ve afectada por las montañas y además, durante el periodo diurno coincide la dirección del viento con la brisa marina, lo que contribuye a que se incremente la velocidad del viento, resultados obtenidos a partir de la base de datos estudiada, los vientos medios en Cabo Lucrecia son de 17 km/h (4.7 m/s), condición favorable para obtener energía eléctrica a partir del viento utilizando máquinas de baja (inferiores a 100 Kw) y moderada potencia (100-500 Kw), un sector económico de esta zona gran consumidor de electricidad es el Turismo, partiendo del análisis anterior puede observarse que coincide el periodo de máximo aprovechamiento con el periodo de máxima demanda por encontrarse el Turismo enfrascado en su temporada alta, elemento de singular importancia como solución estratégica para reducir la carga de “los picos eléctricos” y además, como el turismo que nos visita posee frecuentemente mucho interés por el Medio Ambiente y su protección, pues constituye un atractivo saber que su consumo eléctrico está generado por una fuente renovable de energía.
3. Planta Eólica Punta de Mula: Situada en la playa Puerto Rico Libre, municipio Banes, provincia Holguín
4. Planta Eólica Río Seco I: Situada en Punta Caleta Honda, municipio Banes, provincia Holguín, el Parque Eólico Río Seco tendrá una potencia de 51 MW y tendrá 34 AGs de 1,5 a 2 mW, con una configuración en 2 filas casi paralelas a la costa y a no menos de 300 m de ésta, con sus AGs en las posiciones más ventajosas para eludir condiciones geotécnicas desfavorables, dar cumplimiento al Decreto Ley N o 212 Gestión de la Zona Costera, minimizar el

impacto de la marea de tormenta provocada por eventos meteorológicos peligrosos (huracanes, etc.)

## 2.5 Dimensiones, criterios y subcriterios a ser evaluados dentro del objeto de estudio

### ➤ Dimensión Técnica:

**1. Factor de capacidad:** Los aerogeneradores están preparados para girar todo el tiempo, sin embargo en la práctica, necesitan reparación e inspecciones una vez cada 6 meses para asegurar que siguen siendo seguros, además las averías de componentes y accidentes (fallos de suministro eléctrico, pueden inutilizar los mismos, las estadísticas muestran que los fabricantes alcanzan, factores de disponibilidad del alrededor del 98 por ciento, por lo que la afectación de la producción de energía se ve afectada, en menos de un 2 %, dado que no siempre estarán funcionando cuando existen fuertes vientos o velocidades inferiores a la velocidad de arranques.

Aunque generalmente se prefiere un gran factor de carga, puede no ser siempre ventajoso, desde el punto de vista económico, no siendo así para tecnologías convencionales, donde existe muchos vientos puede ser ventajosos, utilizar un generador más grande con el mismo diámetro de rotor, o diámetro de rotor más pequeño, para un determinado tamaño de generador, todo depende de la velocidad de viento, a una altura determinada.

$$\text{Max} \sum \frac{E_{gj}}{C_{apj} \cdot H_{gj}} y_j, \quad (2.3)$$

Donde:

$E_{gj}$  Energía generadas de las alternativa  $j \quad j = (1 \dots s)$ .

$C_{pj}$ : capacidad de generación de la planta  $j \quad j = (1 \dots s)$

$H_{gj}$ : Horas al año que genera la planta  $j$ , ( 8760 horas al años)  $j = (1 \dots s)$ .

**2. Generación bruta:** La energía anual generada o producida por el aerogenerador es la función de la curva de potencia del aerogenerador, la que es suministrada por el fabricante medida para las condiciones de atmósfera normal de 15 grado centígrado y 1,013 mbar, a lo que corresponde una

densidad de  $1,225 \text{ kg/m}^3$  y de la distribución anual de velocidad del viento a la altura del buje del rotor que puede obtenerse sobre la base de una data histórica de medidas o de la distribución de Weibull, correspondiente a las mediciones del viento hechas a la altura del buje del aerogenerador.

Donde:

8760: Periodo analizado  $j = (1 \dots s)$ .

$P_{ij}$ : Potencia del aerogenerador tomada de la curva de potencia  $j = (1 \dots s)$ .

$P(V_i)\Delta V_{ij}$ : Probabilidad de velocidad, depende parametros weibull  $k$  y  $c$

$j = (1 \dots s)$ .

➤ **Dimensión económica:**

**3. Monto de la inversión:** El costo unitario que se puede alcanzar como promedio es de 1811.32 CUC/kW instalado en divisas y 2114.35 Pesos/kW instalado en moneda total. Una oferta recientemente recibida situó estos indicadores en 1474,45 CUC/kW instalado y 1766,51 Pesos/kW instalado respectivamente, o sea, en el 81.4 % y 83.5 % de los valores promedios. Los costos de inversiones varían, en dependencias del parque a construir, debido a los costos de carretera y de la cimentación, dependiendo de las condiciones del suelos, teniendo en cuenta que estas vía deben ser capaces de soportar cargas de camiones de 30 toneladas, otro factor es las distancia a las carreteras ordinarias principales, los costos de llevar una, o varias grúas móviles, hasta el sitio de emplazamiento, las distancias a las líneas de altas tensión, capaz de manejar la producción de energía máxima de la turbina, independientemente que no todos los parques están conectados a las red telefónicas y control remotos, por no ser una necesidad, pero a menudo es bastante barato, por lo que resulta económico incluirlo en la inversión de los parques, los coste de transporte de las turbinas, pueden entrar en los cálculos, si el emplazamiento es muy remoto, casi siempre, donde existen condiciones de vientos, son zonas aisladas, aunque estos costo no serán superiores a los 15000 USD (Association, 2011).

Como se ha señalado, los aspectos claves que influyen en los costos de los proyectos de parques eólicos son los costos de las turbinas eólicas o aerogeneradores, las cimentaciones, la conexión a la red, la instalación y los gastos de planificación y gestión. En el mundo se les presta mucha atención a los costos de la turbina eólica en sus diferentes componentes: torre, palas o aspas, caja multiplicadora y otras componentes, tales como generador, sistemas de control, transformador y convertidor (Marrero Figueredo,2019).

$$\text{Min } \sum Cca + Cci + Cli + Ct yj, \quad (2.4)$$

Donde:

*Cca*: costo de las carreteras; *Cci*: costos cimentación; *Ct*: costo de transportación;

*Clj*: costo de las líneas; más otros gastos de operaciones de las alternativas  $j = (1 \dots s)$ .

Con los porcentajes proporcionados por el PER 2011-2020 realizaremos una aproximación de los costes iniciales, según el documento *Future of Wind* de IRENA el coste inicial total de la instalación es de 1.296,97 euros por KW. A continuación, en la tabla 3.1 se puede ver el desglose de los costes de cada una de las partes del proyecto.

Tabla 2.4 Desglose de los costes de cada una de las partes del proyecto.

| Partes del proyecto                     | Costos (€) |
|---|------------|
| Aerogeneradores (75 %)                  | 38 909100  |
| Obra civil e Ingeniería (8 %)           | 4 150304   |
| Instalación eléctrica (5 %)             | 2 593940   |
| Subestación y conexión eléctrica (10 %) | 5 187880   |
| Promoción (2 %)                         | 1 037576   |
| Total                                   | 51 878800  |

**4. Costo de O&M:** Los modernos aerogeneradores están diseñados para trabajar alrededor de 120000 horas de operación a lo largo de su tiempo de vida de diseño de 20 años, esto supone mucho más que un motor de un automóvil, que dura generalmente alrededor de 4000 a 6000 horas, las experiencias muestran que los costos de mantenimiento son generalmente muy bajos cuando

las turbinas, son completamente nuevas , pero que aumentan algo conforme la turbina va envejeciendo, estudios en Dinamarca, llevados a cabo en 500 aerogeneradores, demuestran que las nuevas generación de turbinas, tienen menos costo de reparación y mantenimiento, que las generación antiguas, sus coto de mantenimiento y reparación son alrededor de una media del 3 % de sus costos iniciales, para las máquinas más nuevas los rangos estimados son de 1,5 al 2 % al año de la inversión inicial de la turbina. La mayoría de los costos, son una cantidad fija, por kW producido, normalmente alrededor de 0,01 USD/kW, todo esto se soporta en el simple hecho, que el desgaste y las roturas en las turbinas generalmente aumenta con el aumento de la producción de electricidad. (Association, 2004, 2011; Karnøe, 1990; Krohn, 2002).

Durante mucho tiempo la determinación de los costos de O&M de los parques eólicos se hacía sin una base científica, solamente basados en las experiencias de los parques eólicos de California durante los años ochenta y en datos aportados por la industria eólica danesa. Esto se ha perfeccionado y es menos empírico, pero aún persiste cierta incertidumbre y el rango de costo de mantenimiento es amplio; además, depende de varios factores, entre ellos, del tamaño y potencia del parque eólico (2019)-(2029).

$$\text{Min} \sum C_f + C_v y_j, \quad (2.5)$$

*Donde:*

*Cv: Costo variables de las alternativa j j = (1 ... s).*

*Cf: Son los costos fijos de las alternativa j j = (1 ... s), estos costos son los demás pesos dentro de los costos totales.*

Según IRENA los costos de explotación y el PER 2011-2020 los costes de explotación son los asociados a la mano de obra, transporte y repuestos derivados del mantenimiento de los aerogeneradores, y estos costes ascienden según el citado documento a 45.000 €/MW.

5. **Costo de kW de generación:** Los valores promedios del Costo Nivelado de la Energía y del Costo País para el conjunto de los parques eólicos son respectivamente de 156,56 CUC/MWh y 97.74 CUC/MWh. Para la variante

más ventajosa del Parque de 50 MW en Playa Herradura el Costo Nivelado de la Energía es de 137.84 CUC/MWh u 88% del valor promedio, y el Costo País es de sólo 62.54 CUC/MWhó 61% del valor promedio. De acuerdo con diferentes estudios realizados en 2010, los costos de generación de la electricidad en parques eólicos están por debajo de 0,07 USD/kWh como promedio en la mayoría de los proyectos en zonas con viento favorable calculados para 20 años de vida útil, y la recuperación de la inversión no rebasa los siete años de acuerdo con los altos precios del petróleo. Estos costos del kWh son comparables con los costos promedio estimados de producción de electricidad con carbón (0,067 USD/kWh), o con gas (0,056 USD/kWh), siendo más favorable esta comparación cuando se trata de costos de producción con petróleo, (IRENA, 2018).

Según estudio (Hohmeyer Ottinger & Rennings, 2012) realizado con el software Training on Modelling a 100 % *renewables power supply for island systems*, de la Universidad de *Flensburg*, en posgrado impartido, en la Universidad de Moa, Holguín, los costos nivelados deben tener en cuenta, los costos de inversión en un periodo de 10 años, los costos fijos por años, la eficiencia de la planta, la capacidad de generación del parque eólico, así como los costos fijos, y la producción de energías, como se muestra en la figura en la parte de abajo del escrito (fig. 2.10).

| Case 1 - baseline |                  |  |                      |
|-------------------|------------------|--|----------------------|
| Gibara I          |                  |  | Gibara II            |
| \$                | 95.013.000       | investment (payback over 10 years)     | \$ 117.630.000       |
| \$                | 367.200          | fixed costs per year                   | \$ 292.500           |
|                   |                  | (fuel) gas price per kWh               | \$ -                 |
|                   | 82%              | power plant efficiency                 | 89%                  |
|                   | 7.183            | fullload hours                         | 7.796                |
|                   | 5                | capacity (MW)                          | 5                    |
| \$                | <b>9.868.500</b> | <b>fixed cost</b>                      | \$ <b>12.055.500</b> |
| \$                | -                | <b>variable cost</b>                   | \$ -                 |
| \$                | <b>9.868.500</b> | <b>total cost CUC/a</b>                | \$ <b>12.055.500</b> |
|                   | 36.633.300       | produced energy kWh                    | 35.082.000           |
| \$                | <b>0,269</b>     | <b>electricity costos (production)</b> | \$ <b>0,344</b>      |

Figura 2.10. Cálculo de los costos nivelados de energía.

Cuando se habla del costo del kWh, se debe hablar del costo promedio de la energía producida en dinero (\$) por kWh, en cualquier moneda durante el tiempo de vida útil de la instalación. O sea, se habla del costo medio de producción de cada kWh producido considerando todos los costos asociados a la instalación durante su tiempo de vida útil, teniendo presente el valor del dinero en cada momento. De esta manera se pueden comparar en el plano económico diferentes plantas con la misma producción de energía, aunque las tecnologías sean distintas (Figueredo, 2019).

Para calcular el costo del kWh producido se deben conocer:

- Costos de inversión en USD/kW, incluyendo todas las componentes auxiliares necesarias para la instalación y la infraestructura en el año.
- Operación y mantenimiento (O&M) como costo fijo en USD/kW o variable en USD/kWh en el año.
- Producción de electricidad en kWh en el año.
- Tasa de descuento expresada en tanto por ciento.
- Vida útil de la planta en años, n (comúnmente n =20 años).

La fórmula más elemental para calcular el LEC está dada por la suma de los costos anuales nivelados (inversión y operación y mantenimiento) con una tasa de descuento a lo largo de su vida útil divididos por la producción anual de energía, todo esto expresado en (USD/kWh).

$$\text{Min} \sum \frac{\sum(\text{Costos anuales})}{\sum \text{Producción anual electricidad}} y_j, \quad (2.6)$$

Donde:

*Costos anuales: Tiene en cuenta los costos de inversión y operación y mantenimiento de la alternativa  $j = (1 \dots s)$ .*

*Producción anual de electricidad: Tiene en cuenta los costos de inversión y operación y mantenimiento de las alternativas  $j = (1 \dots s)$ .*

#### ➤ Dimensión Ambiental

**6. No emisión de CO<sub>2</sub>:** El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es uno de los gases que contribuyen en mayor proporción con el efecto invernadero. El gas se produce



fundamentalmente en la combustión de carbón, gas, petróleo y sus derivados en el sector transporte o para la producción de energía eléctrica; y en la producción de calor para las industrias, comercios y hogares (Parodi de Camargo, 2013). En Cuba, alrededor de 90 % de la generación de electricidad en los últimos años se realiza a partir de combustibles fósiles, lo cual tiene efectos determinantes en las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y los óxidos de nitrógeno (NOX). Las emisiones de CO<sub>2</sub> representan más de 90 % del total de gases de efecto invernadero provenientes de la generación de electricidad. Nuestro país presenta una de las más altas tasas de emisión de CO<sub>2</sub> en la región, 0,75 t/MWh, por la mayoritaria utilización de combustibles fósiles para la producción de electricidad (Vieira, Poveda & Zak, 1996); (Arias, 2017; Poveda, 2007). Los beneficios sociales asociados a las energías renovables no se reducen a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, sino que, en determinadas condiciones, se convierten en la única alternativa viable económicamente para ciertos territorios como consecuencia de la alta disponibilidad de estas fuentes, la lejanía de las redes eléctricas nacionales, etc (Ribeiro Muhongo et al., 2018).

$$\text{Min} \sum 0,765 * E_{g \ yj} , \quad (2.7)$$

*Donde:*

*0,765: Índices de conversión, según la OLADE.*

*E<sub>g</sub>: Energías generada del proyecto de la alternativa  $j \ j = (1 \dots s)$ .*

**7. Uso de la tierra:** El efecto sobre la flora, la fauna y el ecosistema en general, que tiene la instalación y operación de un proyecto para la obtención, transporte y/o transformación de energía; así como la afectación visual y acústica que el mismo produce, son aspectos importantes que deben incorporarse a la evaluación del proyecto (Parodi de Camargo, 2013). El uso del suelo es otro aspecto medioambiental que se debe considerar a la hora de instalar un parque eólico. La geometría de los parques eólicos y el espaciamiento entre aerogeneradores está en función de su tipo y tamaño, de las características del viento y de la orografía del terreno. En un parque eólico

las turbinas eólicas se ubican con una separación de 3-5 diámetros del rotor en la dirección perpendicular del viento predominante, y entre 5-9 diámetros en la dirección del viento dominante. De aquí se llega a la conclusión que se necesita de 50 a 150 m<sup>2</sup>/kW instalado, es decir, que pueden instalarse de 6 a 20 MW/km<sup>2</sup>. El valor adoptado con frecuencia es 125 m<sup>2</sup>/kW, o lo que constituye lo mismo, 8 MW/km<sup>2</sup>, quiero esto decir, que si queremos conocer cuántos terrenos se necesitan por MW de generación tenemos: Terreno utilizado = 8/capacidad generación, todo esto se expresa en kilometro por MW de generación.

$$Min \sum \frac{8}{CapacidadInstalada} y j km^2 MW \quad (2.8)$$

Donde:

*Cap: Capacidad instalada del proyecto de la alternativa j j = (1 ... s)*

#### ➤ **Dimensión social**

#### **8. Calidad de Vida:**

- **Creación de empleo.** Las actividades relacionadas con la obtención, transformación y distribución de energía hasta el usuario final generan toda clase de ocupaciones. Entre otras muchas, se encuentran las labores relacionadas con el diseño, la construcción y puesta en marcha de las instalaciones, la operación y el mantenimiento de las mismas, el transporte y almacenamiento de los recursos energéticos y de los productos finales, el manejo de las redes de distribución, las operaciones comerciales, administrativas y logísticas relacionadas, y finalmente, el desmantelamiento de las instalaciones. Además, deben añadirse todas las actividades de investigación, comerciales, de transporte y de apoyo dirigidas a suplir, por una parte, los recursos energéticos, tecnologías, equipos y servicios. Según la Agencia Europea de Energía Eólica (EWEA), la instalación de 1 MW eólico supone la creación de 6 puestos de trabajo directos en la industria de fabricación e instalación de aerogeneradores. La creación de empleo depende en la capacidad del parque, dado por la cantidad de turbinas eólicas, dado que existe un personal para las labores de mantenimiento y operación del mismo,

más el personal administrativo, para lo cual se plantea que la creación de empleo quedaría como sigue: Creación empleo = Capacidad del Parque\*Personal Mto + Personal Operación + Personal administrativos

$$Max \sum Capacidad Instalada * Personal y_j, \quad (2.9)$$

Donde:

*Capacidad Instalada: Capacidad instalada en proyecto j j = (1..s)*

*Personal: Personal Mto, Operación y Administrativos en proyecto j j = (1..s).*

Para un parque de 50 mW se deben emplear 300 trabajadores, teniendo en cuenta las etapas de instalación, operación y mantenimiento.

- **Viviendas electrificadas.** Según la ONE, el consumo promedio de electricidad en una vivienda cubana durante el año 2003, fue de 140 kWh por mes, o lo que es lo mismo 1,68 MWh en el año, por lo que se puede calcular el número de casa promedio a las que el proyecto eólicos les pudieras suministrar electricidad, la ecuación quedaría de la siguiente forma: Viviendas electrificadas= Eg/1,68 MWh.

$$Max \sum \frac{Eg}{1,68} y_j, \quad (2.10)$$

Donde:

*Eg: Energías generadas del proyecto o alternativa j j = (1 ...s).*

#### ➤ Dimensión estratégica-organizativa

9. **Combustible sustituido.** Una de las ventajas del uso de las energías renovables, es precisamente la sustitución de combustibles fósiles, los cuales además de contaminar el medioambiente han tenido precios significativamente elevados durante las últimas décadas, pero hoy día la tendencia es al alza.

$$Max \sum = \frac{Eg * consumo específico}{1000} y_j, \quad (2.11)$$

Donde:

*Eg: Energía generadas por el proyecto j j = (1 ...s)*

*consumo específico: El consumo para la puesta en marcha en operación por el proyecto j j = (1 ...s).*

Igualmente, el carácter de múltiples criterios, está dado por la existencia de varios criterios (10), donde se quiere llegar a un compromiso entre todos ellos para la

selección del mejor proyecto eólico para su prioridad a la hora de su puesta en marchas para direccionar los recursos humanos, técnicos y financieros.

Luego de tener cada indicador cualitativo dada la evaluación de los expertos, será validado por el propio método, sin dejar de mencionar que este primer método igualmente tendrá su validación con la implementación del método AHP.

Es bueno destacar que además del grupo de encuestas elaboradas por los expertos, será utilizada una herramienta informática conocida como *ExpertChoice*, robusta y de alta prestaciones, para ello nos apoyaremos en el modelo conceptual mostrado en la fig. 2.11, donde se da a conocer los diferente niveles jerárquico, donde en el nivel más arriba se encuentran las dimensiones, en el próximo nivel los criterios, más abajo los subcriterios y finalmente las alternativas o proyectos que serán evaluadas (fig. 2.11).

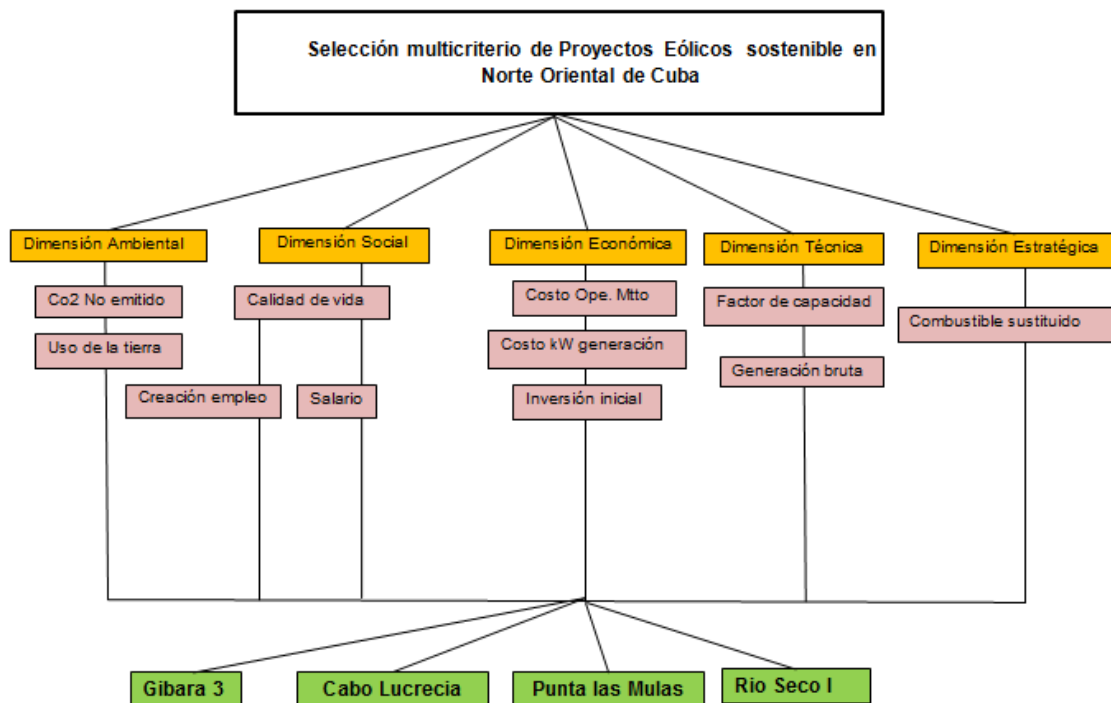


Figura 2.11. Selección multicriterio de proyectos eólicos sostenibles en el norte oriental de Cuba.

Antes de llegar a introducir los datos al software *Expertchoice*, se procederá a la búsqueda de la consistencia evaluada por cada experto, para una mejor comprensión de lo ante dicho, utilizando un mini *Expertchoice*, se analizan cada

encuesta o valoración dada por cada experto, si el índice de consistencia, es menor que 0.10, existe consistencia de la evaluación de los expertos, si es mayor, se debe convocar nuevamente al evaluador para un nuevo juicio.

La figura 2.12 muestra los criterios evaluados 10, en nuestro caso, y la escala Saaty a aplicar.

| Analytic Hierarchy Template: n= 10 Criteria |          |
|---|----------|
| <b>Fundamental Scale (Row v Column)</b>     |          |
| Extremely less important                    | 1/9      |
|   | 1/8      |
| Very strongly less important                | 1/7      |
|   | 1/6      |
| Strongly less important                     | 1/5      |
|   | 1/4      |
| Moderately less important                   | 1/3      |
|   | 1/2      |
| <b>Equal Importance</b>                     | <b>1</b> |
|   | <b>2</b> |
| Moderately more important                   | 3        |
|   | 4        |
| Strongly more important                     | 5        |
|   | 6        |
| Very strongly more important                | 7        |
|   | 8        |
| Extremely more important                    | 9        |

Figura 2.12 Criterios evaluados.

En la figura 2.13 se muestra la evaluación dada por el experto 1, como se había declarado en nuestro caso, serán 7 los expertos evaluadores.

| Comprobación Índice Consistencia Criterios y Alternativas Experto 1 |                   |           |                |                  |                 |                |                  |                 |                 |                  |
|---|-------------------|-----------|----------------|------------------|-----------------|----------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Pairwise Comparison Matrix  | Monto de Inversió | Costo O&M | Costo kW Gener | Factor de Capaci | Generación Brut | No emisión CO2 | Uso de la Tierra | Calidad_Vida_En | Calidad_Vida_Vi | Combustibles Sus |
| Monto de inversión  | 1                 | 7         | 1/7            | 1/7              | 1/5             | 5              | 1/5              | 5               | 5               | 3                |
| Costo O&M   | 1/7               | 1         | 1/7            | 1/7              | 1/5             | 5              | 1/3              | 5               | 5               | 3                |
| Costo kW Generación   | 7                 | 7         | 1              | 3                | 3               | 3              | 3                | 3               | 3               | 7                |
| Factor de Capacidad   | 7                 | 7         | 1/3            | 1                | 5               | 3              | 1/3              | 7               | 5               | 5                |
| Generación Bruta  | 5                 | 5         | 1/3            | 1/5              | 1               | 3              | 1/3              | 5               | 5               | 5                |
| No emisión CO <sub>2</sub>  | 1/5               | 1/5       | 1/3            | 1/3              | 1/3             | 1              | 1/5              | 5               | 7               | 5                |
| Uso de la Tierra  | 5                 | 3         | 1/3            | 3                | 3               | 5              | 1                | 3               | 5               | 7                |
| Calidad_Vida_Empleos  | 1/5               | 1/5       | 1/3            | 1/7              | 1/5             | 1/5            | 1/3              | 1               | 5               | 5                |
| Calidad_Vida_Viviendas Elec.  | 1/5               | 1/5       | 1/3            | 1/5              | 1/5             | 1/7            | 1/5              | 1/5             | 1               | 5                |
| Combustibles Sustituido   | 1/3               | 1/3       | 1/7            | 1/5              | 1/5             | 1/5            | 1/7              | 1/5             | 1/5             | 1                |
|   | 1←                | 1←        | 1←             | 1←               | 1←              | 1←             | 1←               | 1←              | 1←              | 1←               |

Figura 2.13 Evaluación dada por los expertos.

Luego se muestra la normalización por la suma de cada criterio (fig. 2.14).

|                        | 26.0762     | 30.9333     | 3.4286      | 8.3619      | 13.3333 | 25.5429     | 6.0762      | 34.4000     | 41.2000     | 46.0000     |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Cw (Normalised)</b> |             |             |             |             |         |             |             |             |             |             |
| 1                      | 0.03834916  | 0.226293103 | 0.041666667 | 0.017084282 | 0.015   | 0.195749441 | 0.032915361 | 0.145348837 | 0.121359223 | 0.065217391 |
| 2                      | 0.005478451 | 0.032327586 | 0.041666667 | 0.017084282 | 0.015   | 0.195749441 | 0.054858934 | 0.145348837 | 0.121359223 | 0.065217391 |
| 3                      | 0.26844412  | 0.226293103 | 0.291666667 | 0.358769932 | 0.225   | 0.117449664 | 0.493730408 | 0.087209302 | 0.072815534 | 0.152173913 |
| 4                      | 0.26844412  | 0.226293103 | 0.097222222 | 0.119589977 | 0.375   | 0.117449664 | 0.054858934 | 0.203488372 | 0.121359223 | 0.108695652 |
| 5                      | 0.1917458   | 0.161637931 | 0.097222222 | 0.023917995 | 0.075   | 0.117449664 | 0.054858934 | 0.145348837 | 0.121359223 | 0.108695652 |
| 6                      | 0.007669832 | 0.006465517 | 0.097222222 | 0.039863326 | 0.025   | 0.039149888 | 0.032915361 | 0.145348837 | 0.169902913 | 0.108695652 |
| 7                      | 0.1917458   | 0.096982759 | 0.097222222 | 0.358769932 | 0.225   | 0.195749441 | 0.164576803 | 0.087209302 | 0.121359223 | 0.152173913 |
| 8                      | 0.007669832 | 0.006465517 | 0.097222222 | 0.017084282 | 0.015   | 0.007829978 | 0.054858934 | 0.029069767 | 0.121359223 | 0.108695652 |
| 9                      | 0.007669832 | 0.006465517 | 0.097222222 | 0.023917995 | 0.015   | 0.005592841 | 0.032915361 | 0.005813953 | 0.024271845 | 0.108695652 |
| 10                     | 0.012783053 | 0.010775862 | 0.041666667 | 0.023917995 | 0.015   | 0.007829978 | 0.023510972 | 0.005813953 | 0.004854369 | 0.02173913  |

Figura 2.14 Normalización por la suma de cada criterio.

Luego se obtienen la ponderación de cada criterio, donde se puede apreciar que el criterio 3, es el más robusto por tener mayor peso, aunque también se muestra que se debe chequear la consistencia debido a que es de un 34 %.

|    | AHP   |       | Consistency check         |
|----|-------|-------|---------------------------|
| 1  | 0.090 | 9.0%  | Check your results<br>34% |
| 2  | 0.069 | 6.9%  |                           |
| 3  | 0.229 | 22.9% |                           |
| 4  | 0.169 | 16.9% |                           |
| 5  | 0.110 | 11.0% |                           |
| 6  | 0.067 | 6.7%  |                           |
| 7  | 0.169 | 16.9% |                           |
| 8  | 0.047 | 4.7%  |                           |
| 9  | 0.033 | 3.3%  |                           |
| 10 | 0.017 | 1.7%  |                           |

Figura 2.15 Ponderación de cada criterio.

Finalmente se obtiene el índice de consistencia para el caso de estudio (2.16).

| AHP-1 | CA      | Lambda      | CI                   | CI/RI      |
|-------|---------|-------------|----------------------|------------|
| 0.090 | 2.34421 | 14.62255587 | 0.5136173            | 0.34014392 |
| 0.069 | 2.14705 |             | Randomness Index, RI |            |
| 0.229 | 0.78636 |             | 3                    | 0.58       |
| 0.169 | 1.41517 |             | 4                    | 0.9        |
| 0.110 | 1.46298 |             | 5                    | 1.12       |
| 0.067 | 1.71708 |             | 6                    | 1.24       |
| 0.169 | 1.02736 |             | 7                    | 1.32       |
| 0.047 | 1.60048 |             | 8                    | 1.41       |
| 0.033 | 1.34957 |             | 9                    | 1.45       |
| 0.017 | 0.7723  |             | 10                   | 1.51       |

Figura 2.16. Índice de consistencia para el caso de estudio.

## RESULTADOS

Luego de haber aplicado el mini AHP, introduciremos los datos al software *ExpertChoice* y se obtienen los siguientes resultados (fig. 2.17), primero el esquema jerárquico que asume el software y en la figura 2.18 se puede apreciar el estado de los criterios con sus pesos resultantes.



Figura 2.17 Modelo Jerárquico de estudio.

Posteriormente para conocer la ponderación de cada dimensión, se presenta la figura 2.18 donde se puede apreciar que la dimensión económica fue la más ponderada, seguida de la ambiental y estratégica, lo que demuestra que los expertos se inclinan más por la sostenibilidad ambiental, el nivel de consistencia fue de 0.15, ligeramente mayor que 0.10, lo que demuestra que no hubo consistencia entre los expertos.



Figura 2.18 Ponderación de cada dimensión.

Finalmente se resuelve el modelo jerárquico, donde es seleccionada la mejor alternativa, como se muestra en la figura 2.19, y se evidencia que la mejor alternativa es Gibara III, muy seguida de cerca por Rio Seco I.

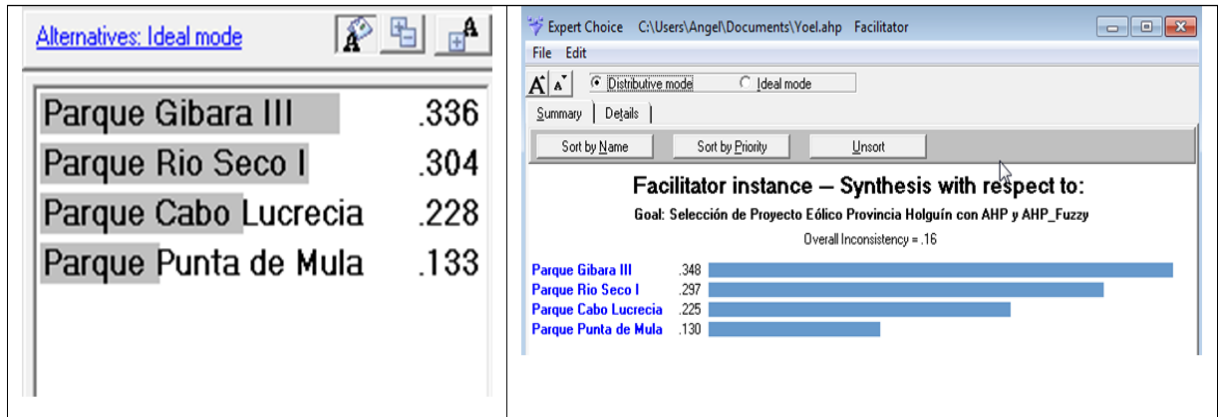
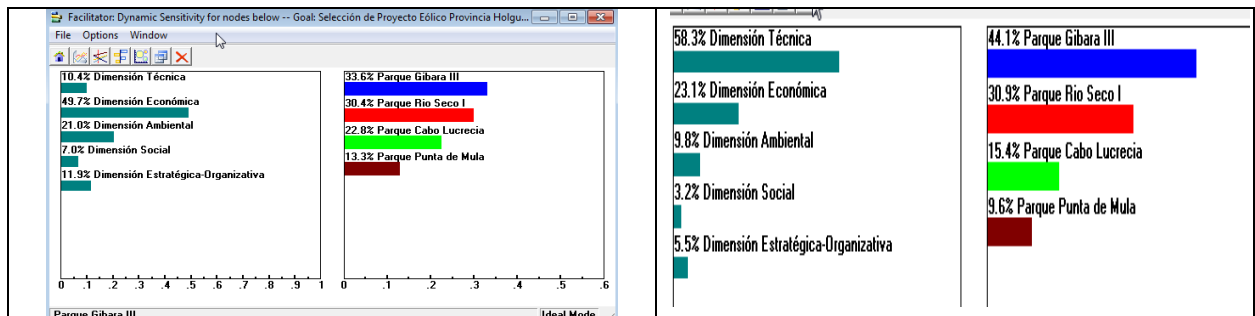


Figura 2.19. Ponderación final de las alternativas

Al realizar un análisis de sensibilidad para conocer qué tan buena es la alternativa seleccionada, y se es capaz de modificarse, ante cualquier variación de las dimensiones se obtiene la siguiente respuesta (fig. 2.20) donde se puede apreciar cómo influyen en el resultado final, quiere decir por ejemplo, que si se aumenta o mejora la dimensión técnica y económica el resultado sigue siendo el mismo (cuando mejora la dimensión ambiental), entonces el Parque Cabo Lucrecia pasa a ser la mejor alternativa, igualmente si se mejora la dimensión social, entonces la planta eólica Rio Seco I pasará al mejor puesto.





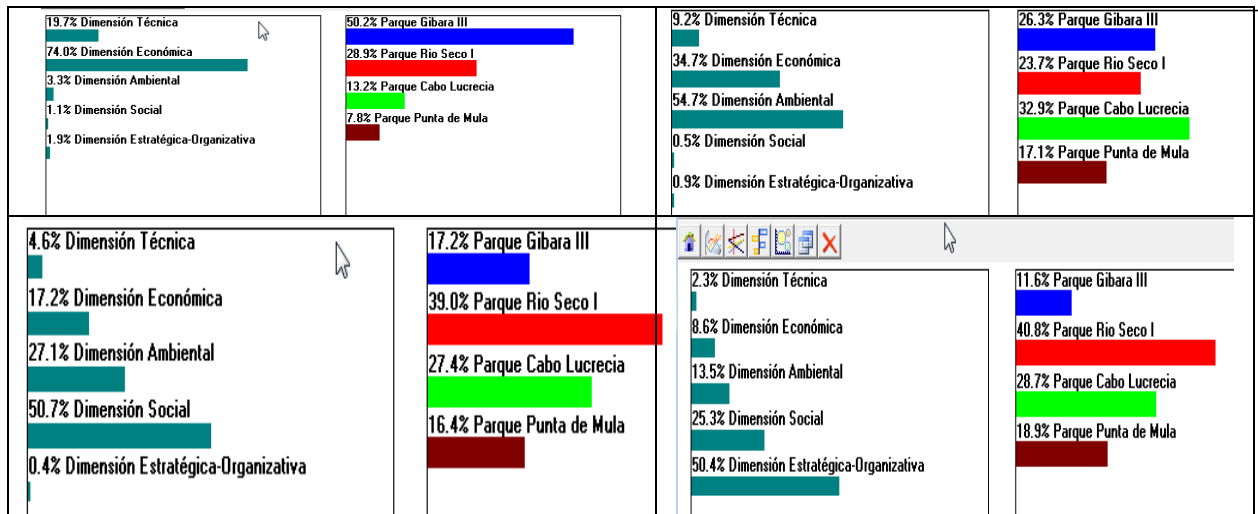


Figura 2.20. Variabilidad de los criterios, dentro de las dimensiones respecto a las alternativas

Cuando se observa la mejor alternativa respecto a las demás en evaluación puede ver como poder mejorar los criterios dentro de las dimensiones y su porcentaje de mejora (fig. 2.21), quiere decir que las dimensiones técnica y económica son las que definieron que Gibara III esté por delante de Rio Seco, Cabo Lucrecia y Punta de Mula.

La valoración de los pesos de los parques seleccionados se muestra en (fig. 2.21)

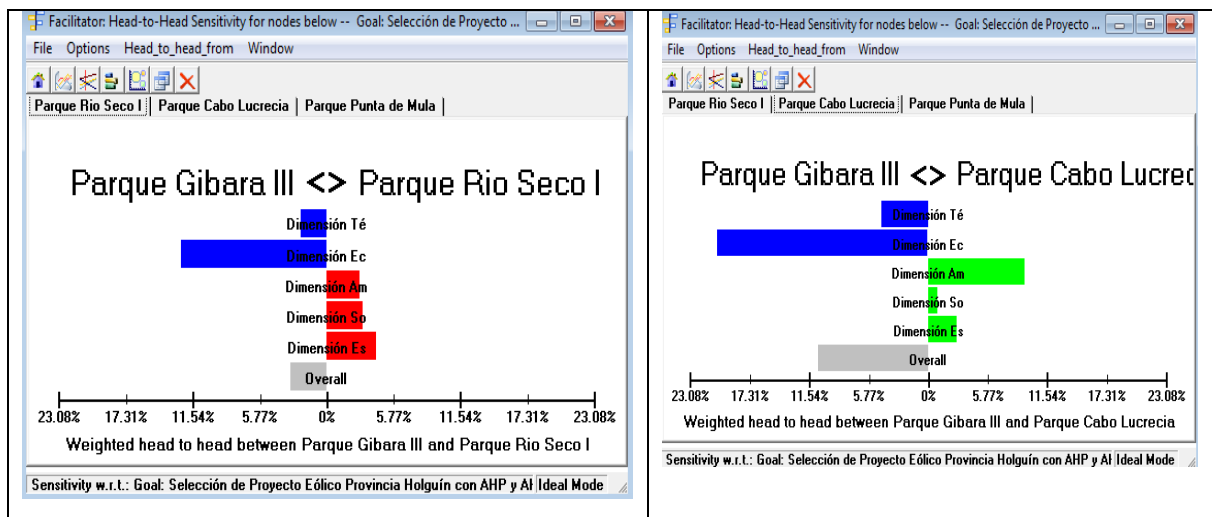


Figura 2.21 Mejoramiento de los criterios dentro de las dimensiones y su porcentaje de mejora

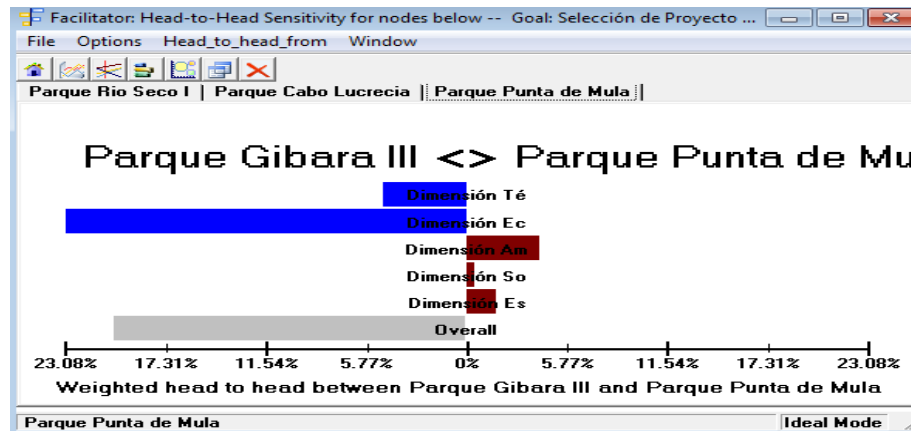


Figura 2.22 Valoración de los pesos de los parques seleccionados.

## DISCUSIÓN

El presente trabajo de investigación analizó los aspectos que permiten el desarrollo socioeconómico en el territorio de Holguín. Por lo cual se exploró la problemática del desarrollo sostenible en relación a los proyectos de energía eólica, la cual juega un papel importante dentro de las fuentes de energía renovable ya que es una fuente de generación de electricidad clave para el cambio del modelo energético, más limpio y sostenible, redujo los costos de generación en la región del emplazamiento disminuyendo la dependencia de importar combustibles fósiles y la contaminación atmosférica por su quema, y en general en el SEN, además los proyectos constituyen una fuente de empleos desde su construcción hasta la puesta en explotación.

Como se muestra en la investigación realizada, los resultados obtenidos difieren de los expresados por otros autores que han aplicado los mismos métodos de investigación en otros parques eólicos, pero que no los han combinado, como es el caso del método AHP para elegir la mejor alternativa.

## CONCLUSIONES

El cumplimiento del objetivo general y los objetivos específicos correspondientes, de la presente investigación permite arribar a las conclusiones siguientes:

1. La investigación realizada permitió, apoyado en la modelación matemática multicriterio, determinar los mejores proyectos eólicos como propuesta de cambio de la matriz energética del SEN en la provincia de Holguín.
2. El método AHP apoyado en la modelación matemática multicriterio, permitió seleccionar la variante óptima de proyectos con Inteligencia artificial: donde se demostró que, aunque existe coincidencia en la ponderación encontrada de los criterios, y la demostrada robustez de este método, no hay coincidencia en la elección: para el AHP, la mejor alternativa es Gibara III.
3. Se demostró que el método Jerárquico de Proceso AHP es un método que combina variables cualitativas y cuantitativas con buena precisión, además pondera todos los criterios de los expertos a través de la media geométrica, independientemente que en algunas ocasiones introduzca incertidumbre en determinados juicios.

## RECOMENDACIONES

- Generalizar los resultados obtenidos en la matriz energética del SEN en otra provincia del país.
- Tener en cuenta la propuesta metodológica elaborada en esta investigación para la selección de nuevos proyectos eólicos.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Arruda, L. C. M., Lorenzi, J. C. C., Sousa, A., Zanette, D. L., Palma, P. V. B., Panepucci, R. A., . . . Simões, B. P. (2015). Autologous hematopoietic SCT normalizes miR-16,-155 and-142-3p expression in multiple sclerosis patients. *Bone marrow transplantation*, 50(3), 380-389.
- Bentes, A. V., Carneiro, J., da Silva, J. F., & Kimura, H. (2012). Multidimensional assessment of organizational performance: Integrating BSC and AHP. *Journal of business research*, 65(12), 1790-1799.
- Berumen, S. A., Llamazares Redondo, F., & Vázquez Vicente, G. (2014). Evaluación de los Objetivos de la Estrategia de Lisboa en Europa en Empresas Intensivas en Mano de Obra. *Economía Industrial*, 393, 129-139.
- Büyükoçkan, G., Kahraman, C., & Ruan, D. (2004). A fuzzy multi-criteria decision approach for software development strategy selection. *International Journal of General Systems*, 33(2-3), 259-280.
- Campo Ríos, G., & Sánchez Daza, G. (2006). La vinculación universitaria y sus interpretaciones. *Ingenierías*, 9(30), 18-25.
- Cascales, M. d. S. G., & del Socorro, M. (2009). Métodos para la comparación de alternativas mediante un Sistema de Ayuda a la Decisión (SAD) y "Soft Computing". *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA, Cartagena, Tesis Doctoral*.
- Celik, I., Klein, M., & Janicka, J. (2009). Assessment measures for engineering LES applications. *Journal of fluids engineering*, 131(3).
- Cesar, F., & Marle, F. (2019). *A Network-based Contract Management Framework for Prioritizing Contractual Performance Progress Axis*. Paper presented at the 21st INTERNATIONAL DEPENDENCY AND STRUCTURE MODELING CONFERENCE, DSM 2019.
- Chou, C.-H., Shrestha, S., Yang, C.-D., Chang, N.-W., Lin, Y.-L., Liao, K.-W., . . . Lee, W.-H. (2018). miRTarBase update 2018: a resource for experimentally validated microRNA-target interactions. *Nucleic acids research*, 46(D1), D296-D302.
- Dong, X., Chen, J., Ma, Y., Wang, J., Chan-Park, M. B., Liu, X., . . . Chen, P. (2012). Superhydrophobic and superoleophilic hybrid foam of graphene and carbon nanotube for selective removal of oils or organic solvents from the surface of water. *Chemical communications*, 48(86), 10660-10662.
- Dooley, K. E., & Chaisson, R. E. (2009). Tuberculosis and diabetes mellitus: convergence of two epidemics. *The Lancet infectious diseases*, 9(12), 737-746.
- Dou, Y., Zhu, L., & Wang, H. S. (2012). Solving the fuzzy shortest path problem using multi-criteria decision method based on vague similarity measure. *Applied Soft Computing*, 12(6), 1621-1631.
- Fernández, R., Hernández, C., & Baptista, P. (2007). Fundamentos de metodología de la investigación. *Editorial MC Graw-Hill Interamericana, México*.
- Font, N. (2000). *Local y sostenible: la Agenda 21 Local en España* (Vol. 3): Icaria editorial.
- Franco, L. A., & Montibeller, G. (2010). Problem structuring for multicriteria decision analysis interventions. *Wiley encyclopedia of operations research and management science*.
- Funtowicz, S., Ravetz, J., & O'Connor, M. (1998). Challenges in the use of science for sustainable development. *International Journal of Sustainable Development*, 1(1), 99-107.
- García Cascales, M. S. (2009). Métodos para la comparación de alternativas mediante un Sistema de Ayuda a la Decisión SAD y "Soft Computing".

- García de la Figal Costales, A. E., Valdés Lima, Y., & Vargas Hidalgo, J. (2012). Evaluación de los gastos de explotación, económicos y energéticos en la labor de cultivo del frijol, tomate y papa comparando el tractor YUMZ-6M con yunta de bueyes. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(3), 62-68.
- Garmendia, E., & Gamboa, G. (2012). Weighting social preferences in participatory multi-criteria evaluations: A case study on sustainable natural resource management. *Ecological Economics*, 84, 110-120.
- Gianotti, L., Munda, R., Alexander, J. W., Tchervenkov, J. I., & Babcock, G. F. (1993). Bacterial translocation: a potential source for infection in acute pancreatitis. *Pancreas*, 8(5), 551-558.
- Gomes, C. F. S., Nunes, K. R., Xavier, L. H., Cardoso, R., & Valle, R. (2008). Multicriteria decision making applied to waste recycling in Brazil. *Omega*, 36(3), 395-404.
- Gomes, L. F. A. M., & Andrade, R. M. d. (2012). Performance evaluation in assets management with the AHP. *Pesquisa Operacional*, 32(1), 31-54.
- Grajales-Quintero, A., Serrano-Moya, E. D., & HAHN VON-H, C. M. (2013). Los métodos y procesos multicriterio para la evaluación. *Luna Azul*(36), 285-306.
- Hajkowicz, S. (2007). A comparison of multiple criteria analysis and unaided approaches to environmental decision making. *Environmental science & policy*, 10(3), 177-184.
- Hajkowicz, S., & Collins, K. (2007). A review of multiple criteria analysis for water resource planning and management. *Water resources management*, 21(9), 1553-1566.
- Hajkowicz, S., Higgins, A., Williams, K., Faith, D. P., & Burton, M. (2007). Optimisation and the selection of conservation contracts. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 51(1), 39-56.
- Hsu, C.-C., & Sandford, B. A. (2012). The Delphi technique: Use, considerations, and applications in the conventional, policy, and on-line environments *Online research methods in urban and planning studies: Design and outcomes* (pp. 173-192): IGI Global.
- Jadhav, A. S., & Sonar, R. M. (2009). Evaluating and selecting software packages: A review. *Information and software technology*, 51(3), 555-563.
- Javanbarg, M. B., Scawthorn, C., Kiyono, J., & Shahbodaghkhan, B. (2012). Fuzzy AHP-based multicriteria decision making systems using particle swarm optimization. *Expert Systems with Applications*, 39(1), 960-966.

- Kim, J. K., Jeon, H. K., & Lee, J. S. (2007). Wall temperature measurement and heat transfer correlation of turbulent supercritical carbon dioxide flow in vertical circular/non-circular tubes. *Nuclear Engineering and Design*, 237(15-17), 1795-1802.
- Landeta, J. (2002). El método Delphi. Una técnica de previsión del futuro. Barcelona. *Ariel*, 31-35.
- León, Y. O. L., Pravia, M. C. P., & Delgado, F. M. (2016). Procedimiento para la selección de la Comunidad de Expertos con técnicas multicriterio. *Ciencias Holguín*, 22(1), 34-49.
- Linstone, H. A., & Turoff, M. (1975). *The delphi method*: Addison-Wesley Reading, MA.
- Marquès, P. (2001). Plantilla para la catalogación y evaluación multimedia. *Consultado el*, 8(09), 2012.
- Martínez, A., & Ríos, F. (2006). Los conceptos de conocimiento, epistemología y paradigma, como base diferencial en la orientación metodológica del trabajo de grado. *Cinta de Moebio. Revista de Epistemología de Ciencias Sociales*(25).
- Miller, L. (2006). *Determining what could/should be: The Delphi technique and its application*. Paper presented at the meeting of the 2006 annual meeting of the Mid-Western Educational Research Association, Columbus, Ohio.
- Montibeller, G., & Franco, A. (2010). Multi-criteria decision analysis for strategic decision making *Handbook of multicriteria analysis* (pp. 25-48): Springer.
- Montibeller, G., & Franco, L. A. (2011). Raising the bar: strategic multi-criteria decision analysis. *Journal of the Operational research Society*, 62(5), 855-867.
- Mora-Vicarioli, F. (2013). EL MOBILE LEARNING Y ALGUNOS DE SUS BENEFICIOS. THE MOBILE LEARNING AND SOME OF ITS BENEFITS. *Revista Electrónica Calidad en la Educación Superior*, 4(1), 47-67.
- Muduli, K., Govindan, K., Barve, A., Kannan, D., & Geng, Y. (2013). Role of behavioural factors in green supply chain management implementation in Indian mining industries. *Resources, conservation and recycling*, 76, 50-60.
- Munda, I. M. (1993). Changes and degradation of seaweed stands in the Northern Adriatic. *Hydrobiologia*, 260(1), 239-253.
- Munier, N., Hontoria, E., & Jiménez-Sáez, F. (2019). Linear programming fundamentals *Strategic Approach in Multi-Criteria Decision Making* (pp. 101-116): Springer.
- Nava, R. I. E. Sobre el número mágico siete y sus fronteras: Miller y la memoria a corto plazo.
- Navarro, J. M., Botía, P., & Pérez-Pérez, J. G. (2015). Influence of deficit irrigation timing on the fruit quality of grapefruit (*Citrus paradisi* Mac.). *Food chemistry*, 175, 329-336.
- Nijkamp, P., Van den Bergh, C., & Soeteman, F. J. (1990). Regional sustainable development and natural resource use. *The World Bank Economic Review*, 4(suppl\_1), 153-188.
- Okoli, C., & Pawlowski, S. D. (2004). The Delphi method as a research tool: an example, design considerations and applications. *Information & Management*, 42(1), 15-29.
- Organization, I. S. (1991). *ISO/IEC 9126: Information Technology-Software Product Evaluation-Quality Characteristics and Guidelines for Their Use*.
- Parodi de Camargo, V. d. R. (2013). *Propuesta metodológica para la evaluación integral de proyectos en el sector energético*. Universitat Politècnica de València.

- Pearce, D. W., & Turner, P. (1995). *Economía de los recursos naturales y del medioambiente*: Celeste ediciones.
- Rojas-Zerpa, J. C., & Yusta, J. M. (2014). Methodologies, technologies and applications for electric supply planning in rural remote areas. *Energy for Sustainable Development*, 20, 66-76.
- Romero, C., Bellés, J. M., Vayá, J. L., Serrano, R., & Culiáñez-Macià, F. A. (1997). Expression of the yeast trehalose-6-phosphate synthase gene in transgenic tobacco plants: pleiotropic phenotypes include drought tolerance. *Planta*, 201(3), 293-297.
- Romero, C., & Salicetti, A. (2011). *Elaboración y validación de un cuestionario para la aplicación de diferentes estrategias metodológicas en estudiantes universitarios*. Paper presented at the Congreso internacional de investigación educativa. Universidad de Costa Rica.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, 1(1), 83-98.
- Saaty, T. L. (2013). The modern science of multicriteria decision making and its practical applications: The AHP/ANP approach. *Operations Research*, 61(5), 1101-1118.
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2006). *Decision making with the analytic network process* (Vol. 282): Springer.
- Salgado Lévano, A. C. (2007). Investigación cualitativa: diseños, evaluación del rigor metodológico y retos. *Liberabit*, 13(13), 71-78.
- Samiy, E., & Zadeh, F. A. (1965). Cranial and intracranial hydatidosis: With special reference to roentgen-ray diagnosis. *Journal of neurosurgery*, 22(5), 425-433.
- Sánchez-Lozano, J. M., García-Cascales, M. S., Lamata Jiménez, M., Roca González, L., & Meseguer-Valdenebro, J. L. (2014). ANALISIS MEDIANTE SIG PARA SELECCIONAR EMPLAZAMIENTOS OPTIMOS DE HUERTOS SOLARES FOTOVOLTAICOS, CASO DE ESTUDIO: NOROESTE DE LA REGIÓN DE MURCIA.
- Shannon, H. S., & Norman, G. R. (2009). Deriving the factor structure of safety climate scales. *Safety science*, 47(3), 327-329.
- Sicardi, I. (2004). Análisis de la utilización del software educativo como material de aprendizaje. *Revista de Informática Educativa y Medios Audiovisuales*, 1(3), 1-20.
- Sierra, G. I. L., & Gonzalez, N. V. Y. (2014). Estudio Descriptivo Mediante Análisis Multicriterio de la Cadena Agroalimentaria de La Panela. *Publicaciones e Investigación*, 8, 161-183.
- Tapia, M., Méndez, M., Seguel, W., Robles, C., Hurtado, S., Ávila, R., . . . Tejos, R. (2020). Prevención en la transmisión de Coronavirus-19: ¿qué tan preparado está el personal de salud en Chile? *Revista médica de Chile*, 148(11), 1589-1597.
- Tarantilis, C. D. (2005). Recent Advances in Transportation and Logistics. *Recent Advances in Transportation and Logistics*.
- Toledo, R., Engler, A., & Ahumada, V. (2011). Evaluation of risk factors in agriculture: an application of the Analytical Hierarchical Process (AHP) methodology.



- Van Der Vleuten, C. P., & Schuwirth, L. W. (2005). Assessing professional competence: from methods to programmes. *Medical education*, 39(3), 309-317.
- van Mook, W. N., van Luijk, S. J., O'Sullivan, H., Wass, V., Zwaveling, J. H., Schuwirth, L. W., & van der Vleuten, C. P. (2009). The concepts of professionalism and professional behaviour: Conflicts in both definition and learning outcomes. *European Journal of Internal Medicine*, 20(4), e85-e89.
- Vargas Marcos, F. (2005). La contaminación ambiental como factor determinante de la salud: SciELO Public Health.
- Yépes, N. V. (2012). Estrategias para la gestión de la innovación: Pasado, Presente y Futuro. *INGE@UAN-Tendencias en la Ingeniería*, 3(5).
- Yilmaz, M., & Atak, M. (2010). Decomposition analysis of sectoral energy consumption in Turkey. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 5(2), 224-231.
- Zadeh, L. A. (1965). Electrical engineering at the crossroads. *IEEE Transactions on Education*, 8(2), 30-33.
- Zopounidis, C., & Pardalos, P. M. (2010). *Handbook of multicriteria analysis* (Vol. 103): Springer Science & Business Media.