

**ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD DE TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN
ELÉCTRICA A PARTIR DE FUENTES CONVENCIONALES Y NO
CONVENCIONALES DE ENERGÍA EN EL ARCHIPIÉLAGO DE SAN ANDRÉS,
PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA UTILIZANDO EL MÉTODO
MULTICRITERIO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO**

LAURA FERNANDA CAICEDO PABÓN

RODRIGO OSWALDO SUÁREZ BOHÓRQUEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2014

**ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD DE TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN
ELÉCTRICA A PARTIR DE FUENTES CONVENCIONALES Y NO
CONVENCIONALES DE ENERGÍA EN EL ARCHIPIÉLAGO DE SAN ANDRÉS,
PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA UTILIZANDO EL MÉTODO
MULTICRITERIO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO**

LAURA FERNANDA CAICEDO PABÓN

RODRIGO OSWALDO SUÁREZ BOHÓRQUEZ

Trabajo de grado presentado para optar el título de: Ingeniero Químico

Director

Dr. VYATCHESLAV KAFAROV

Ingeniero Químico Dr. Sc

Codirector

ANA MARÍA ROSSO CERÓN

Ingeniera Química

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2014

DEDICATORIA

A Dios por hacer este sueño posible.

A nuestros padres y hermanos por su amor, confianza y apoyo.

Y a todos aquellos que nos ayudaron y guiaron en este proceso.

AGRADECIMIENTOS

En este trabajo se agradece a:

La Universidad Industrial de Santander, la escuela de ingeniería química y sus docentes por la formación brindada durante la carrera profesional.

El centro de investigación CIDES por el apoyo brindado en la realización de este trabajo.

El Dr. Sc. Vyatcheslav Kafarov por la oportunidad de realizar este trabajo de grado.

La ingeniera Ana María Rosso por su guía y apoyo en la realización de este trabajo.

Las empresas SOPESA S.A. E.S.P; EEDAS S.A. E.S.P; CORALINA y SENA San Andrés por su aporte y colaboración en la realización de este trabajo.

Fidelia Caicedo por compartir sus años de experiencia con nosotros.

Nuestros padres por brindarnos la oportunidad de ser profesionales.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	14
1 OBJETIVOS.....	16
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2 MARCO TEÓRICO.....	17
2.1 ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD.....	17
2.2 TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA.....	17
2.2.1 Tecnología diésel.....	18
2.2.2 Tecnología eólica (aerogeneradores <i>on shore</i>).....	20
2.2.3 Tecnología solar fotovoltaica.....	22
2.2.4 Planta de residuos sólidos urbanos (RSU).....	24
2.3 MÉTODO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO (AHP).....	25
3 DISEÑO METODOLÓGICO.....	27
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
5 CONCLUSIONES.....	41
6 RECOMENDACIONES.....	43
CITAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
BIBLIOGRAFÍA.....	48
ANEXOS.....	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Planta de generación eléctrica Punta Evans	19
Figura 2. Arreglo general de un generador eólico.....	20
Figura 3. Esquema general de la tecnología fotovoltaica	23
Figura 4. Mapa jerárquico	29
Figura 5. Esquema general de la metodología de cálculo	30
Figura 6. Factores de peso global correspondientes a los subcriterios	35
Figura 7. Factores de peso de cada tecnología para los subcriterios asociados al criterio ambiental.....	36
Figura 8. Factores de peso de cada tecnología para los subcriterios asociados al criterio económico.....	37
Figura 9. Factores de peso de cada tecnología para los subcriterios asociados al criterio social.....	37
Figura 10. Factores de peso de cada tecnología para los subcriterios asociados al criterio tecnológico	38
Figura 11. Factores de peso globales de las tecnologías en cada criterio.....	38
Figura 12. Frecuencia de uso de los indicadores ambientales	53
Figura 13. Frecuencia de uso de los indicadores económicos	53
Figura 14. Frecuencia de uso de los indicadores sociales.....	54
Figura 15. Frecuencia de uso de los indicadores tecnológicos.....	54

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Aspectos generales de las plantas de generación de energía en el archipiélago.....	19
Tabla 2. Aspectos generales del parque eólico.	21
Tabla 3. Aspectos generales del proyecto de generación con sistemas fotovoltaicos.....	23
Tabla 4. Escala de evaluación de nueve puntos de Saaty.....	26
Tabla 5. Indicadores seleccionados para cada criterio	27
Tabla 6. Analistas expertos del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.....	29
Tabla 7. Matriz de comparación por parejas de los cuatro subcriterios por el evaluador 1	30
Tabla 8. Matriz de comparación por parejas de los cuatro subcriterios por el evaluador 2.....	30
Tabla 9. Matriz de comparación por parejas de los cuatro subcriterios por el evaluador 3.....	31
Tabla 10. Matriz de comparación por parejas de los cuatro subcriterios por el evaluador 4.....	31
Tabla 11. Matriz integrada de puntuación para la alternativa tecnológica diésel y el criterio social.....	32
Tabla 12. Vector de peso de la ISM para la tecnología diésel en el criterio social	32
Tabla 13. Factor de peso promedio del subcriterio tierra requerida.....	34
Tabla 14. Matrices integradas de puntuación para el caso A	64
Tabla 15. Factores de peso globales para los subcriterios.....	66
Tabla 16. Matrices integradas de puntuación para el caso B	68

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Resultado de la revisión bibliográfica de los indicadores para los ámbitos ambiental, económico, social y tecnológico.	52
Anexo 2. Valores de los indicadores para cada tecnología.	55
Anexo 3. Encuesta 1: Plantas de generación de energía eléctrica para el Archipiélago de San Andrés.	59
Anexo 4. Encuesta 2: Planta de generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos (RSU) en el Archipiélago de San Andrés.	62
Anexo 5. Programa en MATLAB versión 7.0.4.365: <i>Factores de peso AHP</i>	63
Anexo 6. Resultados matrices integradas de puntuación caso A.	64
Anexo 7. Resultados matrices integradas de puntuación caso B.	68

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD DE TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE FUENTES CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA EN EL ARCHIPIÉLAGO DE SAN ANDRÉS, PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA UTILIZANDO EL MÉTODO MULTICRITERIO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO.*

AUTORES: LAURA FERNANDA CAICEDO PABÓN
RODRIGO OSWALDO SUÁREZ BOHÓRQUEZ**

PALABRAS CLAVE: Análisis de sostenibilidad; Método multicriterio de análisis jerárquico AHP; Generación eléctrica; Energía renovable.

DESCRIPCIÓN: En la actualidad la generación eléctrica en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina proviene de combustibles fósiles (diésel), y los residuos generados en las islas no son tratados adecuadamente desaprovechando el potencial energético de los mismos; estos aspectos desfavorecen el desarrollo sostenible de la región, principalmente en los ámbitos económico y ambiental. Sin embargo gracias a su ubicación geográfica el archipiélago posee gran disponibilidad de recursos naturales aprovechables, como radiación solar y corrientes de viento; por lo que en este trabajo se estudiará la potencial aplicación de las tecnologías solar fotovoltaica, eólica *on shore*, incineración de residuos sólidos urbanos (RSU) y la tecnología diésel, implementada en la actualidad, con el objeto de encontrar la alternativa tecnológica más sostenible para el archipiélago. Lo anterior se realizará mediante un análisis de sostenibilidad en el que se implementa el método multicriterio de análisis jerárquico (AHP) que evalúa dichas alternativas, considerando los criterios (ambiental, social, económico y tecnológico) y los subcriterios asociados a cada una de éstas. A partir de la literatura se formularon los indicadores de sostenibilidad (subcriterios) donde parte de la información asociada a éstos se obtuvo a través de encuestas realizadas sobre analistas expertos de las islas, y el restante a partir de reportes e informes de las principales entidades energéticas, ambientales y educativas de la región. Como resultado de este estudio se determinó que la alternativa más sostenible es la tecnología eólica, destacándose en los criterios ambiental y económico, seguida de las tecnologías solar, diésel y RSU.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química.

Director: Vyatcheslav Kafarov, Ingeniero Químico Dr. Sc. Co-directora: Ana María Rosso

ABSTRACT

TITLE: SUSTAINABILITY ANALYSIS OF ELECTRICITY GENERATION'S TECHNOLOGIES FROM CONVENTIONAL AND UNCONVENTIONAL SOURCES OF ENERGY IN THE ARCHIPELAGO OF SAN ANDRÉS, PROVIDENCIA AND SANTA CATALINA USING THE MULTI-CRITERIA METHOD ANALYTIC HIERARCHY PROCESS.*

AUTHORS: LAURA FERNANDA CAICEDO PABÓN
RODRIGO OSWALDO SUÁREZ BOHÓRQUEZ**

KEYWORDS: Sustainability analysis; Multi-criteria method Analytic Hierarchy Process; Electric power supply; Renewable energy

DESCRIPTION: Currently electric power supply of the Archipelago of San Andrés, Providencia and Santa Catalina comes from fossil fuels (diesel), and the waste generated in the islands are not treated properly, wasting their energetic potential; these aspects are a disadvantage for sustainable development of the region, mainly in the economic and environmental field. However, thanks to its geographical location, the archipelago has great availability of exploitable natural resources, such as solar radiation and wind currents; so this document will study the potential application of solar photovoltaic power, onshore wind power, incineration of municipal solid waste (MSW) and diesel technology, currently implemented, in order to find the most sustainable technological alternative for the archipelago. This will be done through a sustainability analysis in which multi-criteria method analytic hierarchy process (AHP) will be implemented to evaluate these alternatives, considering criteria (environmental, social, economic and technological) and sub-criteria associated with each of these. Sustainability indicators (sub-criteria) were formulated from the literature; part of the information associated with them was obtained through surveys to expert analysts from islands and the remaining from reports of institutions of energy, environment and education in the region. As a result of this study it was determined that the most sustainable alternative is wind power technology, protruding in the environmental and economic criteria, followed by solar, diesel and MSW technologies.

* Degree Project.

** Physical-Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering.

School Advisor: Dr. Sc. Vyatcheslav Kafarov. Co-advisor: Ana María Rosso

INTRODUCCIÓN

El Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina está localizado en el mar caribe y es el único departamento insular de Colombia. Este mismo cuenta con dos municipios dentro de los cuales se encuentra la isla de San Andrés, que es la capital departamental, y la isla de Providencia y Santa Catalina. El área superficial del archipiélago es de 52,5 km², y posee una densidad poblacional de 1.443,8 habitantes/km² [1] entre un grupo de islas y cayos [2] .

Dentro del departamento se encuentra la reserva de biósfera Seaflower, la cual se integró a la red mundial de reservas de la biósfera en el año 2.000 [3] , esta cuenta con un área de 30.000 hectáreas, donde se encuentra una de las más largas barreras de coral de América con 32 km de largo y un área de 255 km², además se identifica como una zona de corales que posee una amplia diversidad de peces [4] .

El Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina es una zona no interconectada (ZNI) dado que no se encuentra conectada eléctricamente al sistema interconectado nacional (SIN) [5] . Por lo general el servicio de energía eléctrica en las ZNI es suministrado por plantas de generación que operan con combustibles fósiles líquidos [6] . Las islas cuentan con un servicio domiciliario de energía eléctrica óptimo ya que tienen cobertura del 99 % de la población y una disponibilidad eléctrica de 24 horas al día [7] .

El sistema de generación de energía del archipiélago se encuentra distribuido en dos plantas basadas en la tecnología diésel, una situada en San Andrés y la otra en Providencia. La demanda de energía en San Andrés es alta comparada con el tamaño de la isla, 158 GWh por año [8] , esto es debido a la alta densidad poblacional dentro de la misma, 2.718 habitantes/km² [1] . Por el contrario,

Providencia tiene una baja densidad poblacional, 284 habitantes/km² [1] , y por lo tanto una demanda baja de energía, 7,9 GWh por año [8] .

Este sistema se ha convertido en un problema de sostenibilidad para el estado, tanto en lo económico como en lo ambiental, ya que presenta altos costos de generación de energía, altas emisiones de gases al medio ambiente y una amenaza constante a los ecosistemas.

El gobierno nacional subsidia el suministro de energía eléctrica en el archipiélago debido a que existe una diferencia significativa entre la capacidad de pago de los usuarios y el costo real del servicio. Este desequilibrio económico está fuertemente influenciado por el costo del combustible (diésel) ya que este representa el 60 % del costo final del servicio, el 80 % del costo de generación y aproximadamente el 99 % de los subsidios requeridos. Así mismo, debido a la volatilidad del precio del petróleo se espera que la brecha entre la capacidad de pago de los usuarios y el costo real del servicio aumente cada vez más [7] .

Por otro lado, el impacto ambiental es un factor crítico debido a que sólo la generación de energía eléctrica emite aproximadamente 130.000 toneladas de CO₂ al año, lo cual no es propio de una reserva de biosfera. Además del peligro constante a los ecosistemas marinos ocasionado por el transporte del combustible en buques cisterna a las islas [7] .

En consecuencia, se vio la necesidad de buscar alternativas que reduzcan la dependencia de la generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles, aprovechando los recursos propios del archipiélago.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar por medio de un análisis de sostenibilidad, utilizando el método multicriterio de análisis jerárquico, la opción más favorable para la generación de electricidad a partir de fuentes de energía solar, eólica, residuos sólidos y diésel, en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ◆ Seleccionar indicadores ambientales, económicos, tecnológicos y sociales a partir de fuentes bibliográficas para realizar el análisis de sostenibilidad de tecnologías de generación de electricidad.
- ◆ Evaluar las diferentes variables de sostenibilidad que influyen en el análisis de cada una de las formas de generación de electricidad mediante el método multicriterio de análisis jerárquico.
- ◆ Analizar factores ambientales, económicos, tecnológicos y sociales para la generación de electricidad y establecer la alternativa más sostenible para el Archipiélago.
- ◆ Elaborar recomendaciones sobre la implementación futura de tecnologías emergentes a partir de fuentes renovables de energía.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD

La comisión mundial de las Naciones Unidas para el medio ambiente y el desarrollo adoptó el concepto de desarrollo sostenible como el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias [9] .

De esta manera, es necesario que el desarrollo tecnológico de una región se base en el principio de sostenibilidad, siendo importante cuestionarse si las tecnologías propuestas para instalarse en el futuro sobre esa región son sostenibles. Esto es porque un desarrollo sostenible implica que las cuatro dimensiones que lo componen, económica, social, ambiental y tecnológica, deben estar en equilibrio, ya que un cierto nivel de desarrollo con respecto a una dimensión podría poner en peligro en el futuro el desarrollo de otras dimensiones [10] .

La realización de un análisis de sostenibilidad para las diferentes opciones de generación eléctrica en el Archipiélago de San Andrés es fundamental, ya que proporciona una guía sobre la mejor alternativa a implementar que permita alcanzar el desarrollo sostenible de la región. Este desarrollo implica la instalación de tecnologías de generación eléctrica que sean amigables con el medio ambiente, económicamente competitivas, que procuren el no agotamiento de combustibles fósiles, que generen crecimiento económico, que mejore la calidad de vida de la población y permita a su vez el aprovechamiento de sus recursos naturales.

2.2 TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

El uso de los recursos naturales inherentes de la región es el eje sobre el cual el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina busca avanzar en el desarrollo del sector energético, desvinculándose progresivamente de las prácticas de generación de energía convencionales, que por lo general son

altamente contaminantes. Por su ubicación geográfica el archipiélago cuenta con características sobresalientes en cuanto al aprovechamiento de recursos como radiación solar y corrientes de viento, por lo cual se tuvieron en cuenta para este estudio las tecnologías no convencionales solar fotovoltaica y eólica con aerogeneradores *on shore* (ubicado en tierra firme).

De igual manera la disposición final y el tratamiento de los residuos generados en la isla son aspectos relevantes por analizar, así como los perjuicios que acarrea darle continuidad al sistema de generación de energía actual. Debido a esto se analizaron los sistemas de generación de energía; planta de residuos sólidos urbanos (RSU) y planta de generación eléctrica basada en la tecnología convencional diésel.

Es posible analizar otras alternativas tecnológicas en la isla, tales como; producción de biodiésel a partir de la nuez de coco y a partir de aceite de cocina usado, generación de energía termosolar, tecnología eólica *off shore* (ubicado en el mar) y sistemas de generación eléctrica mareomotriz; las cuales no se tuvieron en cuenta debido a la falta de información técnica y experimental confiable.

2.2.1 Tecnología diésel

La energía eléctrica producida por esta tecnología proviene del funcionamiento de grupos generadores o centrales eléctricas, constituidas por motores diésel que transforman la energía química, contenida en el combustible, en energía mecánica mediante su combustión, seguidamente esta energía se transforma en energía eléctrica aprovechable [11] .

El Archipiélago de San Andrés cuenta con dos plantas de generación eléctrica, ubicadas en las islas de San Andrés y Providencia, ver Tabla 1 .

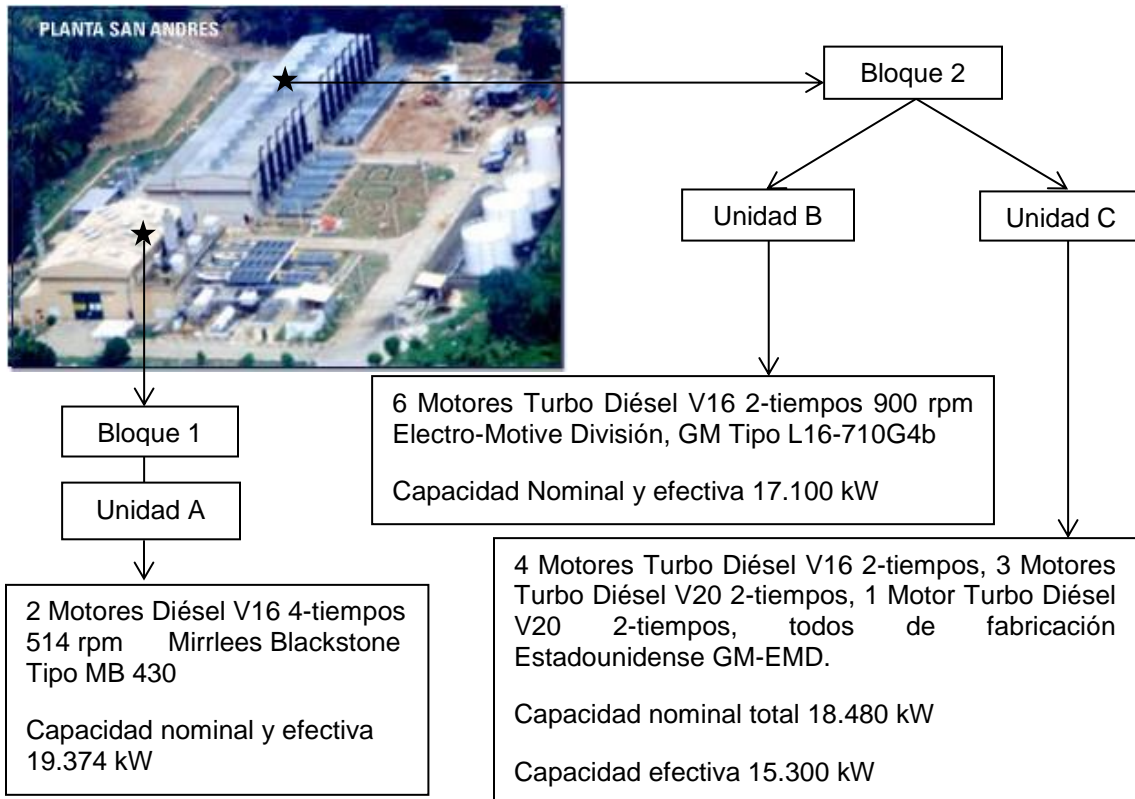
Tabla 1. Aspectos generales de las plantas de generación de energía en el archipiélago.

	San Andrés	Providencia
Demanda de Energía	158 GWh	7,9 GWh
Capacidad Eléctrica	55 MW	3,1 MW
Consumo Combustible	12,8 millones de galones	764 mil galones

Fuente: [8]

La planta de generación que suministra energía eléctrica a la isla de San Andrés es la central eléctrica de Punta Evans, ubicada en el costado occidental de la isla, en sus instalaciones se encuentran 2 bloques que contienen 16 generadores [8] los cuales producen la energía eléctrica, ver Figura 1. Este sistema genera constantes descargas de gases efecto invernadero, y además el transporte de combustibles hacia la isla de San Andrés trae consigo un riesgo para los ecosistemas marinos.

Figura 1. Planta de generación eléctrica Punta Evans



Fuente: [8]

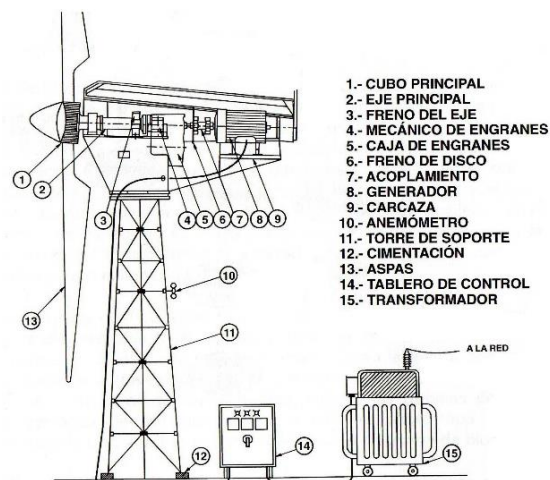
Por otra parte el uso de esta tecnología implica para el estado colombiano una carga económica significativa ya que esta entidad subsidia el 40% del valor total del combustible que consume la isla [8] , además de la dependencia de las importaciones del combustible y la sujeción a la variación de los precios, razones importantes para plantear nuevas alternativas tecnológicas que permitan a la isla desarrollarse sosteniblemente.

2.2.2 Tecnología eólica (aerogeneradores *on shore*)

La tecnología eólica es un sistema de producción de energía eléctrica a partir de la energía del viento, siendo este el resultado del desplazamiento de masas de aire causado por gradientes térmicos y de presión. A través de aerogeneradores este sistema de conversión transforma la energía del viento en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica [12] .

Los componentes principales de un aerogenerador son: el rotor, que puede ser horizontal o vertical; el sistema de orientación, constituido por aletas estabilizadoras; el sistema de regulación, el sistema de transmisión de la energía y el sistema de generación que puede ser un dinamo o un alterador asíncrono o síncrono, ver Figura 2, [12] .

Figura 2. Arreglo general de un generador eólico



Fuente: [12]

La operación exitosa de un sistema eólico y la cantidad de energía eléctrica que éste puede producir depende en gran medida del terreno, de las condiciones locales de viento, fundamentalmente de la densidad de potencia del viento que varía de 10 a 41.000 w/m² y de la velocidad del viento que oscila entre 2,5 y 25 m/s, por ultimo depende de la eficiencia global de conversión relacionada con el diseño apropiado de los aerogeneradores [12] .

La energía producida mediante esta tecnología se puede usar de distintas formas, desde el bombeo de agua y molinos de granos hasta el suministro de potencia eléctrica a hogares y pequeñas comunidades, incluso, es posible aprovecharla inyectándola directamente a la red eléctrica [12] .

El proyecto de energía eólica en San Andrés tiene como objeto la utilización del recurso eólico como alternativa para la generación energética y a su vez la reducción del consumo de combustibles fósiles. Las especificaciones para la posible instalación de parques eólicos con aerogeneradores *on shore* se describen en la Tabla 2.

Tabla 2. Aspectos generales del parque eólico.

Velocidad promedio del viento	4 - 7 m/s	
Altura óptima	62 metros	
Parques Eólicos	A	B
Numero de generadores	9	4
Potencia generada por unidad	850 [kW]	2 [MW]
Energía generada anual [MWh/Año]	7.659	9.853
Pérdidas [GWh/Año]	0.492	
Total Generado [GWh/Año]	9.36	

Fuente: [7]

Con la implementación de esta alternativa se supliría el 5,6 % de la demanda energética actual en el Archipiélago de San Andrés y se lograría reducir las emisiones de CO₂ en 7.700 toneladas al año [7] .

2.2.3 Tecnología solar fotovoltaica

La tecnología fotovoltaica es aquella que aprovecha directamente la radiación solar para producir energía eléctrica, su fundamento reside en la capacidad de cierto tipo de materiales semiconductores para generar electricidad cuando sobre ellos incide radiación solar [13] .

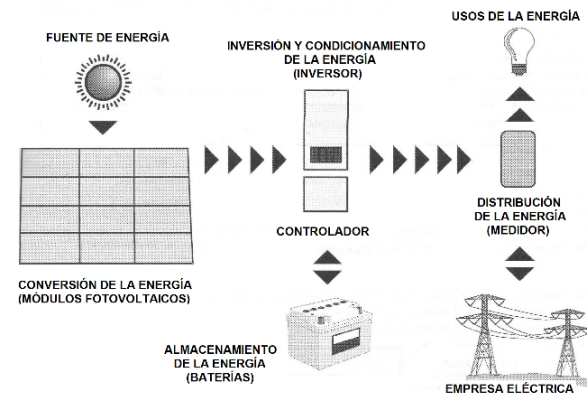
El efecto fotovoltaico se basa en la generación de una fuerza electromotriz (f.e.m) como resultado de la absorción de la radiación ionizante, en una celda de este tipo un transductor convierte la energía radiante del sol en electricidad y lo hace básicamente a través de un diodo semiconductor que tiene la capacidad de desarrollar un voltaje entre 0,5 y 1 voltio, también de generar una densidad de corriente de 20 a 40 $\frac{mA}{cm^2}$, dependiendo del material usado y las condiciones de luz solar [13] .

Los dispositivos utilizados en los sistemas fotovoltaicos se conocen como celdas fotovoltaicas y están hechas de materiales semiconductores como el silicio. Cuando éstas se agrupan interconectadas y montadas entre dos láminas de vidrio conforman un panel solar fotovoltaico [13] .

Por lo general estos sistemas fotovoltaicos se usan como sistemas aislados, cuya energía puede ser almacenada en baterías, sin embargo su uso es cada vez más común en sistemas generadores de respaldo auxiliar de otras tecnologías, diésel, gas y petróleo, y en otros casos como sistemas interconectados a la red eléctrica, Figura 3, [13] .

El archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina se encuentra ubicado sobre una zona con alta radiación solar, con un promedio de radiación solar de 4 a 5 horas por día y una producción media de 250 W/m², lo que sugiere un potencial explotable comercialmente [7] .

Figura 3. Esquema general de la tecnología fotovoltaica



Fuente: [13]

La limitante más importante en la implementación del sistema fotovoltaico, es el terreno requerido o área disponible. Por lo tanto se propone como alternativa, aprovechar de forma combinada los espacios como la zona del relleno sanitario Magic Garden, ubicado en el predio adyacente a la central eléctrica Punta Evans, las cubiertas de los coliseos deportivos, edificios institucionales y edificios con área de cubierta superior a 200 m² que puedan soportar el peso y la infraestructura asociada para tal fin [7].

Los aspectos generales del proyecto de generación eléctrica a partir de sistemas fotovoltaicos propuesto para implementar en el Archipiélago de San Andrés se describen en la Tabla 3.

Tabla 3. Aspectos generales del proyecto de generación con sistemas fotovoltaicos

	San Andrés Isla	Providencia y Santa Catalina
Área Total (Aprox.) [Ha]	2.700	1.800
Área aprovechable [Ha]	1.700	600
Capacidad del Sistema Fotovoltaico	10 MW	2 MW
Área requerida de instalación		12 Ha
Total Energía Entregada		15,2 GWh/Año
Emisiones de CO ₂ reducidas		10.262 Ton/Año
Factor de planta medio		30 %
Eficiencia		30 %

Fuente: [7]

Con el funcionamiento de esta tecnología se supliría el 9,2 % de la demanda energética actual en el Archipiélago de San Andrés y se lograría reducir las emisiones de CO₂ en 10.262 toneladas por año [7] .

2.2.4 Planta de residuos sólidos urbanos (RSU)

Además del problema de sostenibilidad en el sistema de generación eléctrica, la región posee un problema ambiental en el manejo de los residuos urbanos. Los cuales son dispuestos sin tratamiento alguno en el relleno sanitario Magic Garden que cuenta con una superficie aproximada de 10 hectáreas [8] .

Actualmente existen diversas formas para aprovechar la capacidad energética de estos residuos urbanos en la producción de energía eléctrica, una de éstas es la tecnología de incineración de los residuos, la cual reduce el volumen y el peso en un 90 y 70 % respectivamente [14] , permitiendo el aprovechamiento energético de los gases de combustión; esta tecnología actualmente se encuentra instalada en San Andrés sin embargo no se encuentra en funcionamiento. La incineración de residuos consta de 4 etapas principales:

- ◆ Pre-tratamiento de los residuos: Separación del material reciclable y los residuos peligrosos [14] .
- ◆ Combustión de los residuos: La combustión debe ser controlada en un rango de temperatura entre 870 y 1.200°C para evitar la producción de dioxinas y gases corrosivos que pueden afectar la salud humana y dañar las tuberías de gas. Los compuestos orgánicos son convertidos en gas de síntesis mientras que los compuestos minerales en cenizas [14] .
- ◆ Recuperación de energía: El gas de síntesis obtenido en la combustión es alimentado a turbinas, las cuales están conectadas a un generador eléctrico que utiliza la rotación generada por el gas para producir electricidad [14] .
- ◆ Lavado de gases y control de la contaminación del aire: La incineración de residuos genera contaminantes del aire como SO_x, NO_x, CO_x y cenizas, por lo

cual es importante tratar los gases antes de ser liberados al ambiente, y además realizar una adecuada disposición de las cenizas [14] .

La capacidad instalada de la planta de aprovechamiento de residuos urbanos en la isla de San Andrés es de 1 MW, y se diseñó para generar 4 GWh por año 0de energía eléctrica con un consumo diario de 80 toneladas [7] de residuos urbanos generados cotidianamente y de los almacenados en el relleno sanitario Magic Garden [15] .

El ciclo comienza con la recolección de los residuos provenientes de la isla, los cuales constituyen en promedio 80 toneladas por día [8] , éstos son transportados hasta la planta de generación de RSU [7] , donde se produce la energía eléctrica. Los residuos acumulados en el relleno sanitario Magic garden constituyen alrededor de 400.000 toneladas de basura para el año 2012 [7] , son trasladados de igual manera hasta la planta de generación, de donde se rechazan las escorias de nuevo hacía el relleno.

2.3 MÉTODO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO (AHP)

Este método fue propuesto por el profesor Thomas L. Saaty en 1970 [16] , el AHP (*Analytic Hierarchy Process*) por sus siglas en inglés, constituye un método estructurado de análisis de decisión simple, práctico y efectivo, que expresa jerárquicamente el problema y lo divide en diferentes niveles de acuerdo al objetivo deseado y a la naturaleza del mismo, permitiendo de esta manera un análisis multinivel del sistema estructurado [17] . Esta metodología resulta práctica cuando el objetivo es complejo y la información necesaria es escasa, ya que permite disponer cuantitativamente de la experiencia de analistas [18] .

La metodología AHP permite descomponer un problema complejo en una jerarquía de criterios, subcriterios y alternativas relacionadas con la resolución del problema en cuestión, los pasos básicos que componen esta metodología son: estructurar el problema en niveles jerárquicos con el objetivo situado en la cima de los mismos, seguido por los criterios, subcriterios y las alternativas; realizar una

comparación de pares para cada elemento de la estructura correspondiente a cada nivel; paralelamente asignar un valor numérico o factor de peso, ver Tabla 4, y con esto calcular la prioridad para cada criterio, subcriterio y alternativa. Finalmente se integran los juicios producidos sobre cada nivel jerárquico con el objetivo de determinar un ranking de prioridad global para las alternativas propuestas [19] .

Tabla 4. Escala de evaluación de nueve puntos de Saaty

Factor de peso	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos criterios contribuyen de igual manera al objetivo
3	Débil o moderada importancia	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente un criterio sobre otro
5	Fuerte o esencial importancia	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente un criterio sobre otro
7	Muy fuerte o determinante importancia	Un criterio es favorecido muy fuerte frente a otro; su dominio es demostrado en la práctica
9	Importancia absoluta	La evidencia favorece un criterio sobre otro, es de los más altos ordenes de afirmación
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos valores de la escala	Usado para representar importancia entre las prioridades listadas arriba
Recíprocos		Si un criterio i tiene asignado uno de los número enteros listados arriba cuando es comparado con un criterio j , a j le corresponde el número recíproco del criterio i

Fuente: [20]

3 DISEÑO METODOLÓGICO

El desarrollo de este estudio se llevó a cabo en tres etapas, la primera consistió en la revisión bibliográfica mediante la cual se determinaron los indicadores correspondientes a los criterios (dimensiones de sostenibilidad): ambiental, económico, tecnológico y social (Anexo 1). La segunda etapa implicó la recolección y organización de la información referente a los indicadores, finalmente en la última fase se realizó la ejecución del método de análisis jerárquico.

En la primera etapa se seleccionaron cuatro indicadores por criterio, basando la escogencia en aspectos como; número de veces utilizados en otros estudios, la aplicabilidad en la región estudiada y la disponibilidad de los valores numéricos, es decir, conocer los valores de los indicadores (Tabla 5).

Tabla 5. Indicadores seleccionados para cada criterio

Indicadores	Descripción	Unidad	Referencia
Ambiental			
Tierra requerida	Representa el terreno usado por la planta de producción de energía.	m ²	[21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 19, 36, 20]
Emisión de CO₂	Mide las emisiones de dióxido de carbono, tomando en cuenta el ciclo operacional de la planta.	g CO ₂ / año	[22, 37, 25, 38, 28, 30, 34, 19, 36, 20]
Contaminación acústica	Representa el ruido generado en la operación de la planta.	Cualitativo	[22, 23, 25, 27, 30, 32, 33, 34, 36, 20]
Impacto sobre el hábitat	Representa el riesgo potencial sobre el ecosistema debido a la instalación y operación de la planta de generación, comprende impactos paisajísticos y sobre la biodiversidad.	Cualitativo	[22, 23, 25, 39, 27, 30, 31, 32, 34, 19, 36]
Económico			
Costo de inversión	Comprende los costos del terreno, construcciones, compra e instalación del equipo necesario para la operación de la planta.	\$ COP/kW	[22, 40, 37, 24, 41, 39, 42, 28, 29, 30, 34, 35, 36, 20, 49]
Costo de generación de energía eléctrica	Es la razón entre el promedio de costos anualizados y la cantidad de energía producida anualmente por el sistema.	\$ COP/kWh	[21, 40, 23, 24, 43, 25, 26, 44, 29, 30, 33, 34, 20]

Costos de operación y mantenimiento (O&M)	Se dividen en dos categorías, fijos y variables*, donde los últimos están relacionados directamente con la cantidad de energía producida a diferencia de los primeros.	\$ COP/kWh	[21, 22, 40, 24, 43, 41, 28, 30, 34, 35, 36, 20]
Disponibilidad de recursos	Representa el tiempo de vida restante de las reservas de combustible del país a la velocidad actual de extracción.	Años	[22, 37, 24, 25, 27, 28, 33, 34, 35, 19, 36]
Social			
Creación de empleo	Constituye el número de empleos directos e indirectos creados durante la operación de la planta de energía.	Empleos creados	[21, 22, 37, 24, 41, 38, 42, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 19, 36, 20]
Aceptación social	Expresa la opinión de la población local con respecto a la planta de generación de energía.	Cualitativo	[22, 39, 42, 27, 29, 30, 32, 33, 34, 19, 20]
Impacto sobre la salud humana	Impactos considerados desde accidentes de trabajo hasta emisiones tóxicas, en condiciones normales de operación.	Cualitativo	[23, 37, 24, 39, 27, 31, 34, 35, 36]
Progreso del área	Evalúa el impacto de la planta de generación en la comunidad local, se relaciona principalmente con el incremento en la calidad de vida de la población.	Cualitativo	[37, 24, 25, 42, 29, 30, 32, 34, 20]
Tecnológico			
Eficiencia	Representa la cantidad de energía útil que es posible obtener a partir de una fuente de energía primaria.	%	[21, 22, 40, 23, 43, 25, 26, 29, 30, 33, 34, 19, 20]
Capacidad de generación de energía	Es un factor que mide, en promedio, el porcentaje de la capacidad de diseño que está en uso.	%	[21, 22, 40, 24, 43, 25, 41, 42, 28, 30, 33, 34]
Tiempo de vida útil	Corresponde al período aceptable de uso en servicio antes de su desmantelamiento.	Años	[21, 40, 24, 44, 30, 34, 19, 20]
Madurez	Representa la madurez de la tecnología y su aceptación, acogimiento y confiabilidad en la industria internacional.	Cualitativo	[22, 29, 30, 34, 19, 20]

* Costos fijos: depreciaciones, impuestos y costos generales; costos variables: materia prima, servicios industriales, mano de obra, tratamiento de desechos.

Una vez los indicadores han sido definidos es posible construir el esquema jerárquico del caso estudiado, ver Figura 4, el cual muestra el objetivo global e integra las alternativas por evaluar, los criterios de evaluación y sus subcriterios asociados.

Parte de la información requerida para ejecutar el método provino de encuestas formuladas y aplicadas en este estudio, ver Anexo 3 y Anexo 4, a analistas expertos adscritos a entidades del archipiélago, Tabla 6, que se encuentran involucradas activamente con el tema. Por otro lado la información restante se obtuvo a partir de informes, reportes y artículos [8] [34] [45] [46] [47] (Anexo 2).

Figura 4. Mapa jerárquico

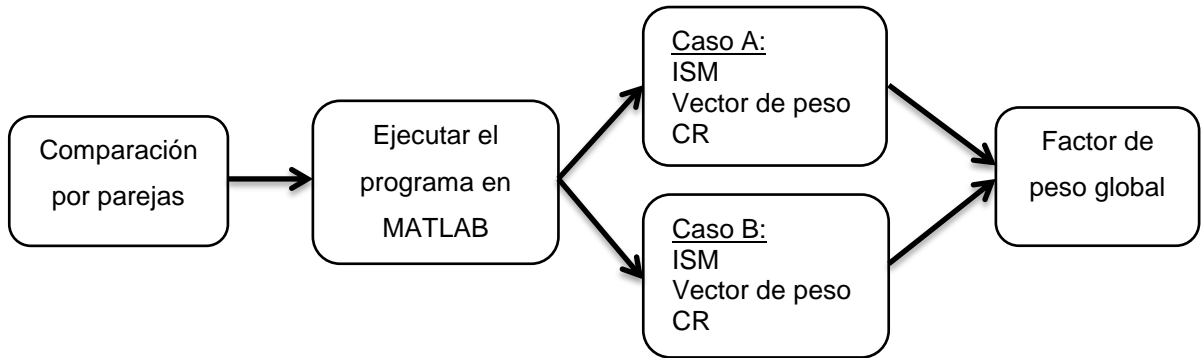


Tabla 6. Analistas expertos del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina

Nombre	Cargo	Empresa
Edward Jay Rueda	Subgerente Técnico y de Proyectos	Empresa de Energía del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina S.A. E.S.P.
Roberto Hudgson Reeves	Subdirector de Planeación y Desarrollo Institucional	Corporación para el desarrollo sostenible del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (CORALINA)
Darwin Méndez Jiménez	Instructor Área de Eficiencia Energética y Energías Alternativas	Servicio Nacional de Aprendizaje. SENA Centro de Formación Turística Gente de Mar y Servicio
Fernando Cruz Figueredo	Director de Proyectos	Sociedad Productora de Energía de San Andrés y Providencia S.A. E.S.P.

La ejecución del método, ver Figura 5, requirió dos tipos de comparaciones, A y B, la A es la comparación por parejas de los subcriterios asociados a cada criterio en cada tecnología, y la B la comparación por parejas de las alternativas para cada subcriterio.

Figura 5. Esquema general de la metodología de cálculo



Estas comparaciones se realizaron haciendo uso de la escala de evaluación de nueve puntos de Saaty (Tabla 4) asignando un valor numérico entre 1 y 9 dependiendo de la importancia relativa entre cada uno de los subcriterios, para el caso en el que el indicador es menos predominante se asigna la calificación inversa, por ejemplo 1/9. Siendo el subcriterio más importante aquel que obtenga por parte de los analistas la calificación más favorable en relación a la consecución del objetivo global que es el desarrollo sostenible.

A continuación se realiza el cálculo tipo de la comparación A referente a los subcriterios pertenecientes al criterio social de la alternativa tecnológica diésel. Lo anterior se hizo para cada uno de los 4 evaluadores (Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9, Tabla 10).

Tabla 7. Matriz de comparación por parejas de los cuatro subcriterios por el evaluador 1

Evaluador 1	Creación de empleo	Aceptación Social	Impacto sobre la salud humana	Progreso del área
Creación de empleo	1	1/5	5	3
Aceptación Social	5	1	9	5
Impacto sobre la salud humana	1/5	1/9	1	1/5
Progreso del área	1/3	1/5	5	1

Tabla 8. Matriz de comparación por parejas de los cuatro subcriterios por el evaluador 2

Evaluador 2	Creación de empleo	Aceptación Social	Impacto sobre la salud humana	Progreso del área
-------------	--------------------	-------------------	-------------------------------	-------------------

Creación de empleo	1	7	9	1
Aceptación Social	1/7	1	3	1/7
Impacto sobre la salud humana	1/9	1/3	1	1/9
Progreso del área	1	7	9	1

Tabla 9. Matriz de comparación por parejas de los cuatro subcriterios por el evaluador 3

Evaluador 3	Creación de empleo	Aceptación Social	Impacto sobre la salud humana	Progreso del área
Creación de empleo	1	1/3	5	1
Aceptación Social	3	1	7	3
Impacto sobre la salud humana	1/5	1/7	1	1/5
Progreso del área	1	1/3	5	1

Tabla 10. Matriz de comparación por parejas de los cuatro subcriterios por el evaluador 4

Evaluador 4	Creación de empleo	Aceptación Social	Impacto sobre la salud humana	Progreso del área
Creación de empleo	1	1/5	1/3	1/5
Aceptación Social	5	1	3	1
Impacto sobre la salud humana	3	1/3	1	1/3
Progreso del área	5	1	3	1

Estas matrices se sintetizaron utilizando el código *Factores de peso AHP* programado en MATLAB, versión 7.0.4.365 [48], (Anexo 5) para obtener la matriz integrada de puntuación (ISM por sus siglas en inglés), Tabla 11, en donde se empleó el método del promedio geométrico el cual se define en la ecuación 1.

$$ISM = \left(\prod_{i=1}^m x_{i,j} \right)^{1/m} ; \forall j \quad (1)$$

Donde $x_{i,j}$ representa el puntaje designado por el evaluador i para cada par de comparación j y m el número total de evaluadores.

Tabla 11. Matriz integrada de puntuación para la alternativa tecnológica diésel y el criterio social

	Creación de empleo	Aceptación Social	Impacto sobre la salud humana	Progreso del área
Creación de empleo	1,000	0,553	2,943	0,880
Aceptación Social	1,809	1,000	4,880	1,210
Impacto sobre la salud humana	0,340	0,205	1,000	0,196
Progreso del área	1,136	0,827	5,097	1,000

Para realizar el cálculo de los vectores de peso se normalizan los elementos de la ISM usando la ecuación 2;

$$r'_{i,j} = \frac{r_{i,j}}{\sum_{k=1}^n r_{k,j}} \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

Donde n indica el tamaño de la ISM, siendo i sus filas y j sus columnas.

Seguidamente se calcula el vector de peso (ω_i), Tabla 12, el cual indica la importancia relativa de cada subcriterio en el criterio social, esto se hace mediante la ecuación 3:

$$\omega_i = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n r'_{i,j} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

Tabla 12. Vector de peso de la ISM para la tecnología diésel en el criterio social

Creación de empleo	Aceptación Social	Impacto sobre la salud humana	Progreso del área
0,232	0,382	0,073	0,314

Con el objeto de probar la consistencia de los factores de peso obtenidos se calcula la razón de consistencia [49] , CR. Para esto se calcula en primer lugar el

parámetro lambda máximo ($\lambda_{m\acute{a}x}$), que representa el máximo eigenvalor de la ISM, mediante la solución del determinante de la diferencia entre la ISM y su matriz identidad multiplicada por $\lambda_{m\acute{a}x}$, esto es;

$$\det \left(ISM - \lambda_{m\acute{a}x} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right) \quad (4)$$

Debido a que lambda máxima es una variable desconocida el resultado de la ecuación 4 corresponde a un polinomio de cuarto orden, del cual se deben determinar sus raíces, esto es;

$$ra\acute{i}z\ 1 = 4,020 \quad ra\acute{i}z\ 2 = -0,006 + 0,282i \quad ra\acute{i}z\ 3 = -0,006 - 0,282i \quad ra\acute{i}z\ 4 = -0,007$$

Por lo que $\lambda_{m\acute{a}x}$ corresponde al valor de la raíz 1 (4,02), el cual es el máximo valor real dentro de las raíces resultantes, seguidamente se calcula el índice de consistencia (CI), así;

$$CI = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad (5)$$

Siendo n el número de filas o columnas de la ISM.

De este modo se calcula la razón de consistencia mediante la ecuación 6, si el valor del parámetro CR no excede 0,08 [49] indica que las calificaciones asignadas por los analistas expertos fueron consistentes.

$$CR = \frac{CI}{\chi} = 0,007 \quad (6)$$

Donde $\chi=0,9$ cuando $n=4$ y $\chi=0,58$ cuando $n=3$ [49] .

Para las alternativas restantes, criterios y subcriterios asociados a las comparaciones A y B se realizó el procedimiento mostrado anteriormente. Los factores de peso obtenidos en la comparación A (Anexo 6) y en la comparación B (Anexo 7) determinan la importancia relativa de cada subcriterio por alternativa y el

desempeño de cada tecnología por subcriterios, respectivamente, resaltando que cuanto más grande sea el valor de cada uno de estos más se favorece el desarrollo sostenible.

En el caso A se procede a determinar los factores de peso globales para cada subcriterio, esto se hace promediando los factores de peso de cada subcriterio de las cuatro tecnologías, Tabla 13, posteriormente estos valores se normalizan determinando la influencia porcentual de cada uno de ellos sobre el objetivo global, ecuación 7, asegurando de esta manera que el porcentaje de cada criterio sea del 25% sobre el objetivo global.

$$\%Indicador = 0,27 * \frac{25}{100} \quad (7)$$

Tabla 13. Factor de peso promedio del subcriterio tierra requerida

Subcriterio: Tierra Requerida				
Diésel	Eólica	Solar	RSU	Promedio
0,52	0,04	0,04	0,47	0,27

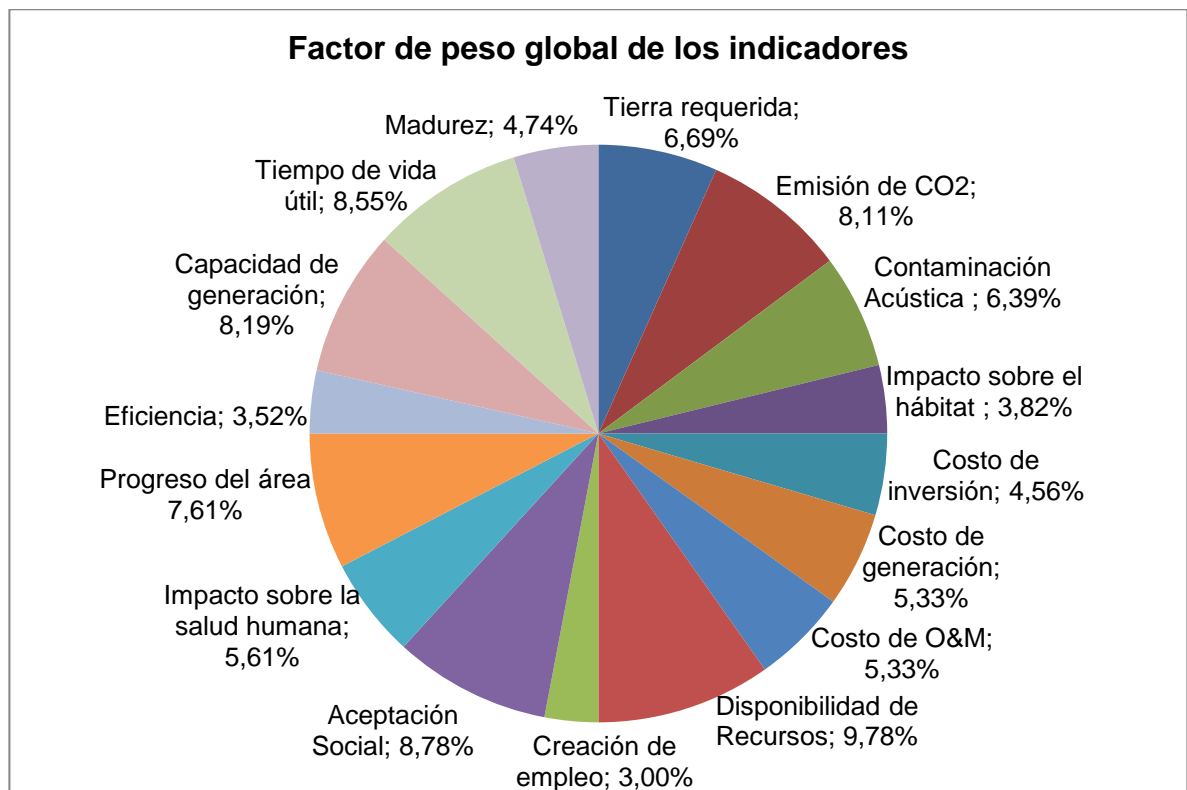
Los resultados obtenidos de las comparaciones A y B se operaron generando los factores de peso globales correspondientes a las alternativas para cada criterio, los cuales resaltan la importancia de las alternativas en la consecución del desarrollo sostenible.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los factores de peso globales obtenidos en el caso A se muestran en la Figura 6, donde se observa la influencia porcentual de cada subcriterio sobre el desarrollo sostenible de las posibles tecnologías a implementar en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.

Los subcriterios con mayor influencia sobre el objetivo global son: la disponibilidad de recursos, aceptación social, tiempo de vida útil y la emisión de CO₂, correspondientes a los criterios económico, social, tecnológico y ambiental, respectivamente. Por otro lado los criterios poseen igual importancia entre ellos y equivalen al 25 % del objetivo global, aspecto que se evidencia en la Figura 6.

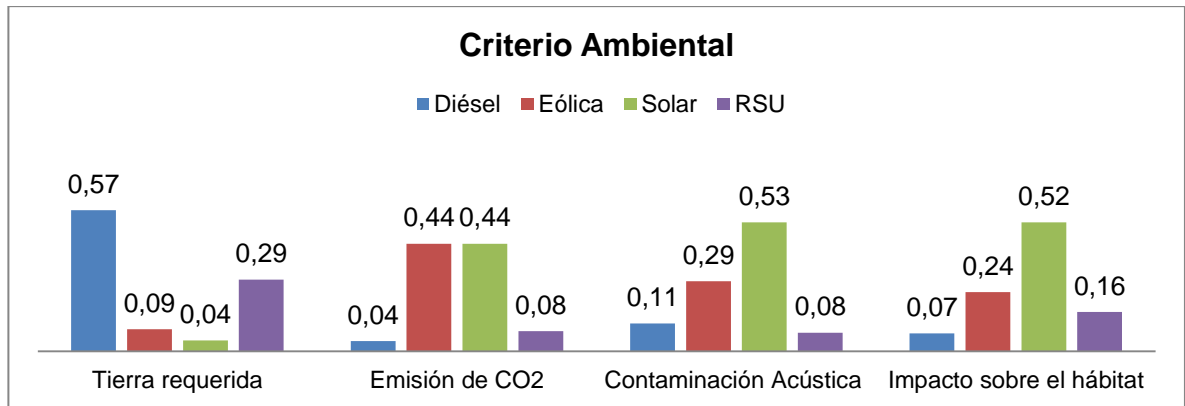
Figura 6. Factores de peso global correspondientes a los subcriterios



En el caso B, comparación por parejas de las alternativas para cada subcriterio, se obtuvieron las matrices integradas de puntuación mostradas en el Anexo 7, cuyos resultados se resumen en la Figura 7, Figura 8, Figura 9 y Figura 10.

En la Figura 7 se observa que las tecnologías solar y eólica se destacan en los subcriterios emisión de CO₂, contaminación acústica e impacto sobre el hábitat, ya que son tecnologías limpias y no afectan significativamente el medio ambiente, a diferencia de las tecnologías diésel y RSU, sin embargo estas sobresalen en el subcriterio tierra requerida ya que no demandan grandes cantidades de tierra para su operación.

Figura 7. Factores de peso de cada tecnología para los subcriterios asociados al criterio ambiental



La tecnología eólica sobresale con las mejores puntuaciones en los subcriterios costo de inversión, costo de generación y costo de operación y mantenimiento, y la tecnología que obtuvo las puntuaciones más bajas es la de RSU, Figura 8. En el subcriterio disponibilidad de recursos, las tecnologías eólica, solar y RSU se destacan con la mejor puntuación; las dos primeras por sus recursos inagotables y la de RSU debido a que la capacidad de generación de los residuos es mayor que su capacidad de consumo.

En el subcriterio creación de empleo, la mejor y peor puntuación corresponde a las tecnologías diésel y RSU respectivamente, de igual manera en el subcriterio aceptación social, la tecnología mejor puntuada es la de RSU y la peor es la

eólica. En los subcriterios impacto sobre la salud humana y progreso del área, las tecnologías mejor puntuadas son solar y eólica respectivamente, asimismo las peor puntuadas son diésel y solar, Figura 9.

Figura 8. Factores de peso de cada tecnología para los subcriterios asociados al criterio económico

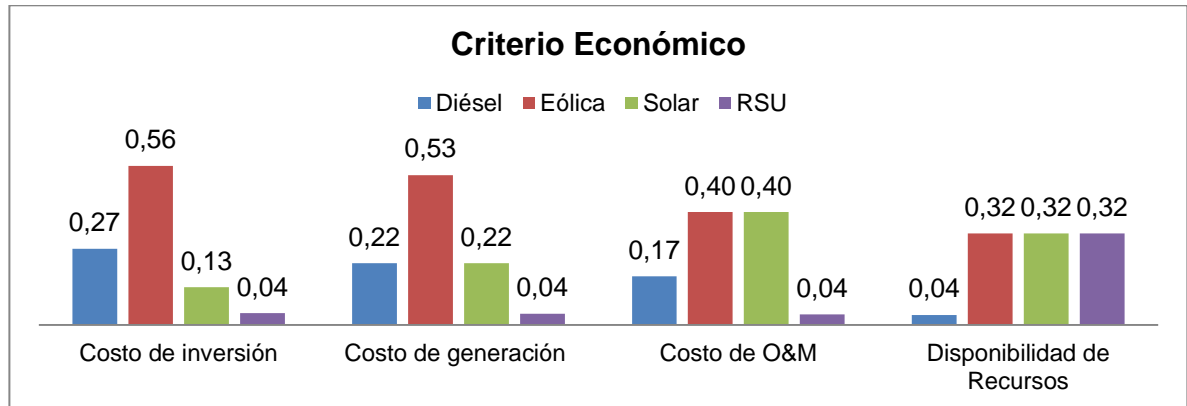
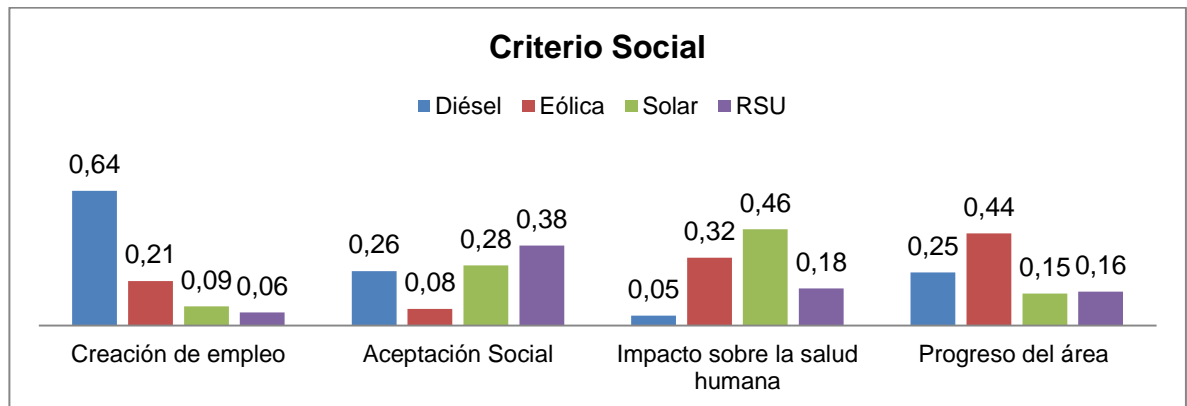


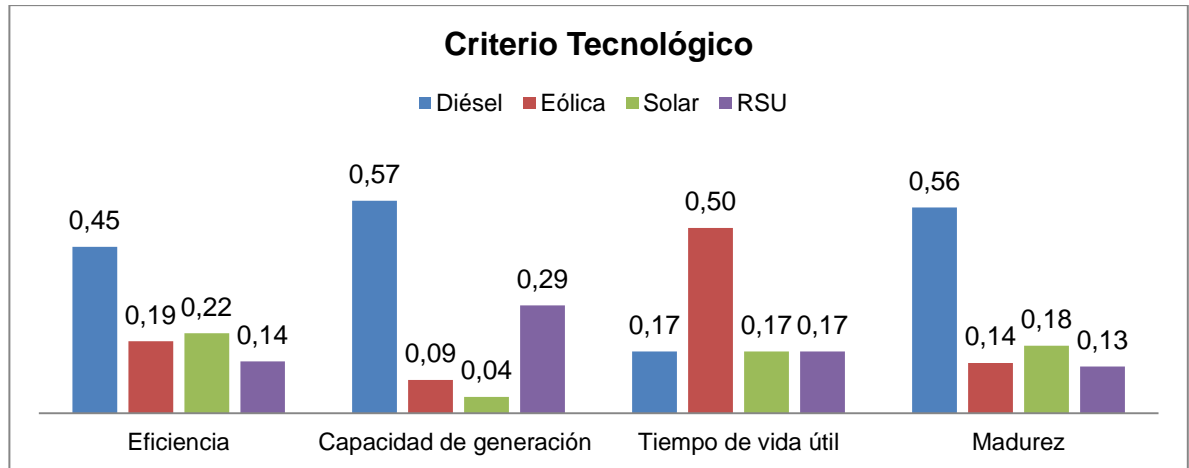
Figura 9. Factores de peso de cada tecnología para los subcriterios asociados al criterio social



El criterio tecnológico, Figura 10, exhibe una tendencia marcada en relación a la tecnología diésel la cual obtuvo la mejor puntuación en los subcriterios eficiencia, capacidad de generación y madurez, por el contrario en el subcriterio tiempo de vida útil la tecnología que se destaca es la eólica. La madurez en las tecnologías eólica, solar y RSU muestran puntuaciones inferiores comparadas con la tecnología diésel, ya que éstas aún se consideran tecnologías emergentes. Por otro lado la capacidad de generación discontinua de las tecnologías solar y eólica

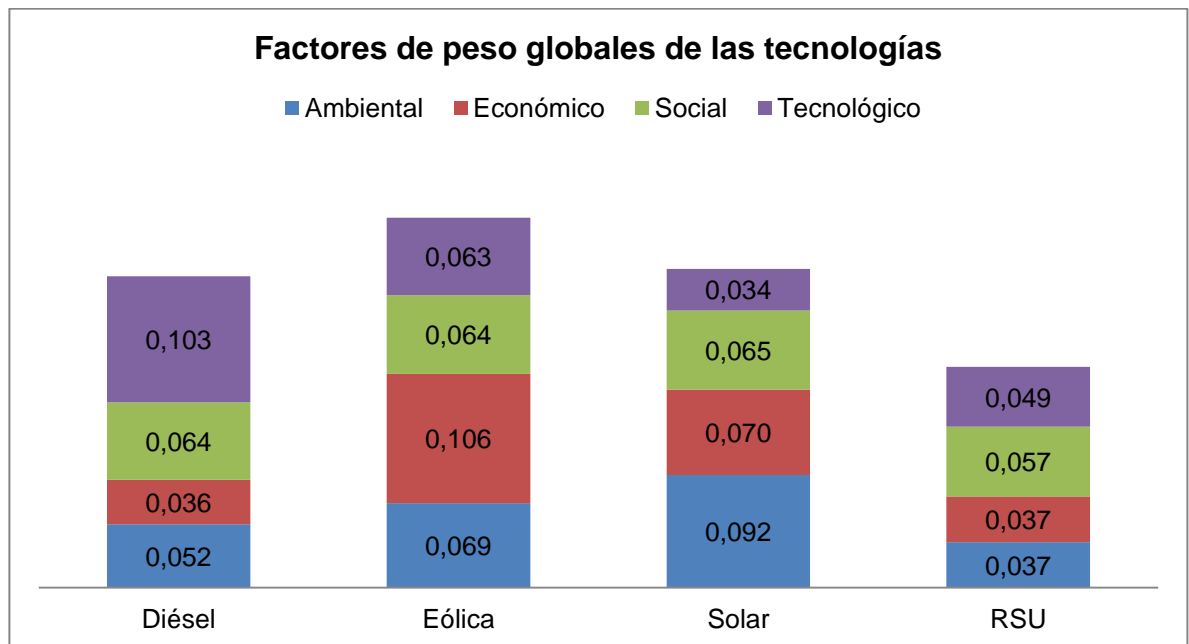
no logra competir con las tecnologías diésel y RSU, lo cual se observa en las puntuaciones obtenidas para este subcriterio.

Figura 10. Factores de peso de cada tecnología para los subcriterios asociados al criterio tecnológico



Los factores de peso globales de las alternativas, que expresan la importancia de las mismas en la consecución del desarrollo sostenible integrando cada uno de los criterios se muestra en la Figura 11.

Figura 11. Factores de peso globales de las tecnologías en cada criterio



En el criterio ambiental las tecnologías más relevantes en orden descendente son: tecnología solar, eólica, diésel y RSU. Por otro lado en el criterio económico la tecnología eólica exhibe una clara diferencia sobre las tecnologías solar, RSU y diésel, estas últimas ubicadas en el segundo, tercer y cuarto lugar, respectivamente. El criterio social presenta en todas las tecnologías factores de importancia similares, sin embargo la tecnología solar se ubica como la mejor, seguida de las tecnologías eólica, diésel y RSU. Finalmente en el criterio tecnológico la tecnología diésel se destaca como la mejor con una diferencia significativa sobre las tecnologías eólica, RSU y solar, estas últimas ubicadas en orden descendente de importancia.

En términos generales las tecnologías obtuvieron niveles de importancia equitativos, es decir estas presentan un pseudo-equilibrio en cada uno de los criterios evaluados. La tecnología eólica es la alternativa que posee la mejor calificación global, conservando un pseudo-equilibrio entre criterios y sobresaliendo favorablemente en los aspectos ambientales, económicos, sociales y tecnológicos. En segundo lugar se encuentra la tecnología solar, que se destaca con los mayores puntajes en las dimensiones ambiental y social. La tecnología diésel logró la tercera puntuación gracias a sus fortalezas en los criterios tecnológico y social. Finalmente en el último lugar se encuentra la tecnología de residuos sólidos urbanos (RSU), que no sobresalió en ninguno de los criterios, sin embargo es una de las tecnologías que mejor equilibrio tiene en relación al impacto de cada uno de los criterios evaluados.

En resumen, el objetivo de este estudio es encontrar la alternativa más sostenible para el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, esto implica un desarrollo uniforme en cada uno de los criterios considerados. En la tecnología eólica se observa que en el criterio económico se viola la uniformidad en el sentido positivo, lo que significa que es más favorable que los demás criterios, sin afectar negativamente la sostenibilidad; además esta obtuvo la mayor puntuación global, por lo que se considera la tecnología más sostenible. Por otro lado en las

tecnologías diésel y solar se viola esta uniformidad en los criterios económico y tecnológico, respectivamente. No obstante los criterios ambiental, económico y social de la tecnología solar sobresalieron como tres de los criterios más fuertes ubicándola como la segunda más sostenible, contrario a lo sucedido en la tecnología diésel, hecho que la ubicó en la tercera posición. Por último para la tecnología de residuos sólidos urbanos (RSU), los criterios no alcanzan individualmente altas puntuaciones evidenciando desventajas en los mismos, lo que la ubica en la última posición.

En los estudios realizados en Malasia [19] y Estambul, Turquía [30] , se implementó al igual que en este trabajo la metodología de análisis multicriterio AHP (en el primer caso) y el método integrado de Fuzzy VIKOR-AHP (en el segundo caso), para determinar la tecnología, que basando su funcionamiento en recursos renovables, permita desarrollar un sistema de generación eléctrica sostenible. Las tecnologías consideradas en los estudios fueron: solar fotovoltaica, biomasa, geotérmica, hidroeléctrica y eólica, de las cuales en el primer caso la solar fotovoltaica con un 35,8 % fue la opción más destacada, seguida de biomasa con el 24,6 %, hidroeléctrica con el 23,5 % y en el último lugar la tecnología eólica con un 17,1 %. En el segundo caso las tecnologías más destacadas en orden descendente de importancia fueron: eólica, solar, biomasa, geotérmica e hidroeléctrica.

Los estudios anteriores seleccionaron las tecnologías solar fotovoltaica y eólica como las más apropiadas, resultados similares a los obtenidos en este trabajo. Esto debido al hecho de que las tres regiones estudiadas presentan condiciones climáticas semejantes lo que les permite aprovechar recursos naturales similares y a la creciente necesidad de implementar tecnologías limpias que aprovechen los recursos naturales inherentes a la región, y que permita a su vez eliminar la dependencia de combustibles fósiles.

5 CONCLUSIONES

Para garantizar el desarrollo sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, se deben implementar nuevas alternativas de generación de energía, usando la transferencia tecnológica y aprovechando los recursos naturales de la región. A través del análisis de sostenibilidad de tecnologías de generación eléctrica realizado en el Archipiélago de San Andrés, se seleccionó la tecnología eólica *on shore* (parque eólico propuesto) como la opción más favorable dentro de las alternativas consideradas en este trabajo, seguida de las tecnologías solar, diésel y residuos sólidos urbanos (RSU).

No obstante, la implementación de este parque eólico no supe por completo la demanda energética del Archipiélago de San Andrés, razón por la cual es necesario ejecutar proyectos que integren tecnologías limpias sustituyendo progresivamente el sistema de generación de energía convencional; esto es, implementar simultáneamente los parques eólico y solar fotovoltaico propuestos en este estudio, que proporcionan en conjunto el 14,8 % de la demanda energética actual, reduciendo las emisiones de CO₂ en 17.962 toneladas por año y evitando la compra de 2 millones de galones de diésel por año aproximadamente.

Por otro lado, la tecnología de incineración de residuos sólidos urbanos (RSU) instalada en San Andrés corresponde a la alternativa menos sostenible para la generación eléctrica, aunque proporciona una solución parcial al problema de disposición y tratamiento de residuos sólidos urbanos. Además se corroboró que la tecnología diésel es una de las alternativas menos sostenibles, debido principalmente a sus problemas ambientales y económicos.

El uso de los indicadores de sostenibilidad permite estudiar de forma apropiada las variables que influyen en el desarrollo sostenible de una región, midiendo el impacto de cada tecnología en las dimensiones ambiental, económica, tecnológica

y social, todo esto gracias a la extensa variedad disponible en la literatura que facilita su adaptabilidad y aplicabilidad en todo tipo sistemas.

El método multicriterio de análisis jerárquico (AHP) y el enfoque del mismo, proporciona una herramienta útil para evaluar alternativas tecnológicas en una región determinada, ya que permite considerar criterios y subcriterios asociados al objetivo global simultáneamente y la opinión cualitativa de múltiples analistas expertos. Además herramientas computacionales como Matlab (versión 7.0.4.365) facilitan el proceso de cálculo haciendo posible el análisis de cualquier tipo de indicadores de sostenibilidad, alternativas tecnológicas y criterios asociados con mayor efectividad.

6 RECOMENDACIONES

La información asociada a los indicadores de sostenibilidad no se encuentra disponible con facilidad, aspecto que está relacionado con la falta de apoyo por parte de las entidades gubernamentales del Archipiélago de San Andrés, quienes no muestran interés en proyectos de generación de energía a partir de fuentes renovables, que permitan alcanzar el desarrollo sostenible de la región. Se recomienda integrar los esfuerzos de las entidades gubernamentales y privadas, en la promoción y ejecución de proyectos de generación eléctrica sostenibles en el archipiélago.

Para la generación eléctrica en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, se recomienda considerar la implementación de sistemas de generación eléctrica combinados basados en tecnologías limpias, como: la eólica *on shore* y *off shore*, la solar fotovoltaica y termosolar, gracias al potencial energético de las corrientes de viento y de la radiación solar; la tecnología undimotriz y mareomotriz, debido a la energía contenida en las olas y corrientes marinas; y tecnologías como la producción de biodiésel a partir del aceite de la nuez de coco y de aceite de cocina usado, debido a que estos últimos se encuentran disponibles en el archipiélago. Lo anterior con el objetivo de sustituir progresivamente el uso de combustibles fósiles hasta reemplazarlo en su totalidad.

Para lograr lo anterior se recomienda realizar estudios específicos sobre la implementación de estas tecnologías que promuevan el desarrollo sostenible, considerando no solamente las características de la región y los recursos inherentes sino también la opinión de la población, quien es el beneficiario directo.

Finalmente se recomienda fortalecer la cultura de ahorro energético en el Archipiélago de San Andrés, ya que esta representa una medida preventiva que contribuye de manera significativa a la disminución de la demanda energética de la región.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] COLOMBIA. DANE. Proyecciones de población. [En línea]. [Consultado 13 marzo 2014]. Disponible en <<https://www.dane.gov.co/index.php/poblacion-y-demografia/proyecciones-de-poblacion>>
- [2] COLOMBIA. GOBERNACIÓN DEL ARCHIPIÉLAGO DE SAN ANDRÉS, PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA. [En línea]. [Consultado 19 Marzo 2014]. Disponible en <<http://www.sanandres.gov.co/>>
- [3] UNESCO, Oficina en Quito. Comunicado de Prensa: Rectificación sobre declaraciones acerca de la Reserva de la Biósfera 'Seaflower'. [En línea]. [Consultado 13 marzo 2014]. Disponible en <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Quito/pdf/Comunicado_seaflower.pdf>
- [4] UNESCO, MAB Biosphere Reserves Directory. Biosphere Reserve Information, Colombia, SEAFLOWER. [En línea]. [Consultado 13 marzo 2014]. Disponible en <<http://www.unesco.org/mabdb/br/brdir/directory/database.asp>>
- [5] COLOMBIA. UPME. Sistema de información electrónico colombiano zonas no interconectadas. [En línea]. [Consultado 9 abril 2014]. Disponible en <<http://www.upme.gov.co/zni/>>
- [6] SOCIEDAD PRODUCTORA DE ENERGÍA DE SAN ANDRÉS Y PROVIDENCIA S.A. E.S.P. Informe de gestión. Bogotá, 2013. P
- [7] EMPRESA DE ENERGÍA DEL ARCHIPIELAGO DE SAN ANDRÉS, PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA S.A. E.S.P. Documento de estudio, análisis y propuesta para la creación de un modelo integral que conlleve a la política pública departamental de uso racional de energía, gestión integral energética y ambiental, tendiente a lograr la reducción de los consumos actuales, como medida para contrarrestar el impacto socio-económico por el desmonte de subsidios a la energía contenido en la resolución No. 18 0196 de 2011. Versión 5. San Andrés Islas. 104 p.
- [8] UNIVERSIDAD DE FREIBURGO., et al. Informe del proyecto: Análisis preparatorio para el suministro de energía sostenible en las islas Colombianas San Andrés y Old Providence. Freiburg, 2005. 93 p.
- [9] NACIONES UNIDAS. Informe de la conferencia de las naciones unidas sobre el medio ambiente y el desarrollo. Vol 1. Rio de Janeiro. 1992. [En línea]. [Consultado 9 abril 2014]. Disponible en <<http://www.un.org/documents/ga/conf151/spanish/aconf15126-1annex1s.htm>>
- [10] DEL VALLE CÁRDENAS, Beatriz. Análisis de sostenibilidad de diferentes opciones de generación eléctrica para México. Tesis de maestría en ingeniería Energía y Economía de la Energía. México D.F: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2006. 1-7 p.
- [11] GENERADORES Eléctricos tienda de generadores eléctricos, especialistas en maquinaria eléctrica, Generadores eléctricos Diésel. [En línea]. [Consultado 24 marzo 2014]. Disponible en <<http://www.generadorelectrico.com/generador-electrico/info-diesel.php>>

- [12] HARPER, Gilberto Henríquez. Tecnologías de generación de energía eléctrica. 1a edición. México, D.F: Limusa, 2009. 237-272 p.
- [13] HARPER, Gilberto Henríquez. El ABC de las instalaciones eléctricas en sistemas eólicos y fotovoltaicos. 1a edición. México, D.F: Limusa, 2011. 83-141 p.
- [14] OFORI-BOATENG, Cynthia; TEONG LEE, Keat y MENSAH, Moses. The prospects of electricity generation from municipal solid waste (MSW) in Ghana: A better waste management option. En : Fuel Processing Technology. 110 (Enero, 2013); p. 97.
- [15] SOCIEDAD PRODUCTORA DE ENERGÍA DE SAN ANDRÉS Y PROVIDENCIA S.A. E.S.P. Proyectos, Planta de generación RSU. [En línea]. [Consultado 20 Marzo 2014]. Disponible en <<http://www.sopesa.com/proyectos/planta-de-generacion-rsu>>
- [16] ZHANG, Jianqing. The application of analytic hierarchy process in Mine gas prevention system. En : Procedia Engineering. 26 (Noviembre, 2011); p. 1576-1584.
- [17] FAN, Chao-nan., et al. Study on technique of mine safety management analysis based on Analytic Hierarchy Process. En : Procedia engineering. 26 (Noviembre, 2011); p.1990-1996.
- [18] DELGADO GALVÁN, Xitlali., et al. An analytic hierarchy process for assessing externalities in water leakage management. En : Mathematical and Computer Modelling. 52 (Marzo, 2010); p. 1194-1202.
- [19] AHMAD, Salman y MAT TAHAR, Razman. Selection of renewable energy sources for sustainable development of electricity generation system using analytic hierarchy process: A case of Malaysia. En : Renewable Energy. 63 (Octubre, 2013); p. 458-466.
- [20] WANG, Jiang-Jiang., et al. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 13 (Junio, 2009); p. 2263-2278.
- [21] YANG, Q., et al. Environmental sustainability of wind power: An emergy analysis of a Chinese wind farm. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 25 (Mayo, 2013); p. 229-239.
- [22] KURKA, Thomas y BLACKWOOD, David. Participatory selection of sustainability criteria and indicators for bioenergy developments. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 24 (Abril, 2013); p. 92-102.
- [23] PHILLIPS, Jason. Determining the sustainability of large-scale photovoltaic solar power plants. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 27 (Agosto, 2013); p. 435-444.
- [24] STAMFORD, Laurence y AZAPAGIC, Adisa. Sustainability indicators for the assessment of nuclear power. En : Energy. 36 (Septiembre, 2011); p. 6037-6057.
- [25] ONAT, Nevzat y BAYAR, Haydar. The sustainability indicators of power production systems. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 14 (Julio, 2010); p. 3108-3115.
- [26] EVANS, Annette; STREZOV, Vladimir y EVANS, Tim. Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 13 (Marzo, 2008); p. 1082-1088.

- [27] GALLEGO, Diana y MACK, Alexander. Sustainability assessment of energy technologies via social indicators: Results of a survey among European energy experts. En : Energy Policy. 38 (Noviembre, 2009); p. 1030-1039.
- [28] NZILA, Charles., et al. Multi criteria sustainability assessment of biogas production in Kenya. En : Applied Energy. 93 (Enero, 2012); p. 496-506.
- [29] REN, Jingzheng., et al. Fuzzy Multi-actor Multi-criteria Decision Making for sustainability assessment of biomass-based technologies for hydrogen production. En : International journal of hydrogen energy. 38 (Junio, 2013); p. 9111-9120.
- [30] KAYA, Tolga y KAHRAMAN, Cengiz. Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul. En : Energy. 35 (Abril, 2010); p. 2517-2527.
- [31] CORBIERE-NICOLLIER, Tourane; BLANC, Isabelle y ERKMAN, Suren. Towards a global criteria based framework for the sustainability assessment of bioethanol supply chains. Application to the Swiss dilemma: Is local produced bioethanol more sustainable than bioethanol imported from Brazil?. En : Ecological Indicators. 11 (Marzo, 2011); p. 1447-1458.
- [32] MARKEVICIUS, A., et al. Trends and sustainability criteria of the production and use of liquid biofuels. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 14 (Julio, 2010); p. 3226-3231.
- [33] MAXIM, Alexandru. Sustainability assessment of electricity generation technologies using weighted multi-criteria decision analysis. En : Energy Policy. 38 (Noviembre, 2009); p.1030-1039.
- [34] STEIN, Eric. A comprehensive multi-criteria model to rank electric energy production technologies. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 22 (Marzo, 2013); p. 640-654.
- [35] STREIMIKIENE, Dalia., et al. Prioritizing sustainable electricity production technologies: MCDM approach. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 16 (Marzo, 2012); p. 3302-3311.
- [36] RIBEIRO, Fernando; FERREIRA, Paula y ARAÚJO Madalena. Evaluating future scenarios for the power generation sector using a Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) tool: The Portuguese case. En : Energy. 52 (Febrero, 2013); p. 126-136.
- [37] KARGER, Cornelia y HENNINGS, Wilfried. Sustainability evaluation of decentralized electricity generation. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 13 (Noviembre, 2007); p. 583-593.
- [38] SCHLÖR, Holger; FISCHER, Wolfgang y HAKE, Jürgen-Friedrich. Methods of measuring sustainable development of the German energy sector. En : Applied Energy. 101 (June, 2012); p. 172-181.
- [39] LIU, Jian., et al. Sustainability in hydropower development: A case study. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 19 (Diciembre, 2012); p. 230-237.
- [40] FRANGO, Maria; TSOUTSOS, Theocharis y SAKELLARIOU, Nikos. Sustainability assessment of a solar thermal power project in Mediterranean application in the island of Crete. En : Ecological Indicators. 18 (Diciembre, 2012); p. 379-386.

- [41] BASTO, Luciano., et al. Analysis of the sustainability of using wastes in the Brazilian power industry. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 12 (Octubre, 2006); p. 883-890.
- [42] DEL RÍO, Pablo y BURGUILLO, Mercedes. An empirical analysis of the impact of renewable energy deployment on local sustainability. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 13 (Agosto, 2008); p. 1314-1325.
- [43] CHATZIMOURATIDIS, Athanasios y PILAVACHI, Petros. Technological, economic and sustainability evaluation of power plants using the Analytic Hierarchy Process. En : Energy Policy. 37 (Nobiembre, 2008); p. 778-787.
- [44] VARUN; PRAKASH, Ravi y KRISHNAN, Inder. Energy, economics and environmental impacts of renewable energy systems. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 13 (Mayo, 2009); p. 2716-2721.
- [45] ECOPETROL. El contexto de la economía política del petróleo en Colombia. [En línea]. [Consultado 1 Abril 2014]. Disponible en <<http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Libro60anos/esp/cap9-2.htm>>
- [46] ENTREVISTA con Francisco Palacios, Gerente general Empresa de Energía del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina S.A. E.S.P. Isla de San Andrés, 16 de agosto del 2013.
- [47] TURTON, Richard ., et al. Estimation of manufacturing cost. En : _____. Analysis, synthesis, and design of chemical processes. 4 ed. Michigan : Pearson Education, Inc, 2012. p. 203 - 208.
- [48] MATHWORKS, Matlab. [Programa de computador]: Versión 7.0.4.365 (R14). Liciencia 251532, UIS CENTIC. The MathWorks, 2005.
- [49] KABIR, Golam y AKHTAR Ahsan. Comparative analysis of AHP and fuzzy AHP models for multicriteria inventory classification. En : International Journal of Fuzzy Logic Systems. Vol. 1, No. 1 (Octubre, 2011); p. 4

BIBLIOGRAFÍA

AHMAD, Salman y MAT TAHAR, Razman. Selection of renewable energy sources for sustainable development of electricity generation system using analytic hierarchy process: A case of Malaysia. En : Renewable Energy. 63 (Octubre, 2013); p. 458-466.

BASTO, Luciano., et al. Analysis of the sustainability of using wastes in the Brazilian power industry. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 12 (Octubre, 2006); p. 883-890.

CHATZIMOURATIDIS, Athanasios y PILAVACHI, Petros. Technological, economic and sustainability evaluation of power plants using the Analytic Hierarchy Process. En : Energy Policy. 37 (Nobiembre, 2008); p. 778-787.

COLOMBIA. DANE. Proyecciones de población. [En línea]. [Consultado 13 marzo 2014]. Disponible en <<https://www.dane.gov.co/index.php/poblacion-y-demografia/proyecciones-de-poblacion>>

_____ GOBERNACIÓN DEL ARCHIPIÉLAGO DE SAN ANDRÉS, PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA. [En línea]. [Consultado 19 Marzo 2014]. Disponible en <<http://www.sanandres.gov.co/>>

_____ UPME. Sistema de información electrónico colombiano zonas no interconectadas. [En línea]. [Consultado 9 abril 2014]. Disponible en <<http://www.upme.gov.co/zni/>>

CORBIERE-NICOLLIER, Tourane; BLANC, Isabelle y ERKMAN, Suren. Towards a global criteria based framework for the sustainability assessment of bioethanol supply chains. Application to the Swiss dilemma: Is local produced bioethanol more sustainable than bioethanol imported from Brazil?. En : Ecological Indicators. 11 (Marzo, 2011); p. 1447-1458.

DEL RÍO, Pablo y BURGUILLO, Mercedes. An empirical analysis of the impact of renewable energy deployment on local sustainability. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 13 (Agosto, 2008); p. 1314-1325.

DEL VALLE CÁRDENAS, Beatriz. Análisis de sostenibilidad de diferentes opciones de generación eléctrica para México. Tesis de maestría en ingeniería Energía y Economía de la Energía. México D.F: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2006. 1-7 p.

DELGADO GALVÁN, Xitlali., et al. An analytic hierarchy process for assessing externalities in water leakage management. En : Mathematical and Computer Modelling. 52 (Marzo, 2010); p. 1194-1202.

ECOPETROL. El contexto de la economía política del petróleo en Colombia. [En línea]. [Consultado 1 Abril 2014]. Disponible en <<http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Libro60anos/esp/cap9-2.htm>>

EMPRESA DE ENERGÍA DEL ARCHIPIELAGO DE SAN ANDRÉS, PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA S.A. E.S.P. Documento de estudio, análisis y propuesta para la creación de un modelo integral que conlleve a la política pública departamental de uso racional de energía, gestión integral energética y ambiental, tendiente a lograr la reducción de los consumos actuales, como medida para contrarrestar el impacto socio-económico por el desmonte de subsidios a la energía contenido en la resolución No. 18 0196 de 2011. Versión 5. San Andrés Islas. 104 p.

ENTREVISTA con Francisco Palacios, Gerente general Empresa de Energía del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina S.A. E.S.P. Isla de San Andrés, 16 de agosto del 2013.

EVANS, Annette; STREZOV, Vladimir y EVANS, Tim. Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 13 (Marzo, 2008); p. 1082-1088.

FAN, Chao-nan., et al. Study on technique of mine safety management analysis based on Analytic Hierarchy Process. En : Procedia engineering. 26 (Noviembre, 2011); p.1990-1996.

FRANGO, Maria; TSOUTSOS, Theocharis y SAKELLARIOU, Nikos. Sustainability assessment of a solar thermal power project in Mediterranean application in the island of Crete. En : Ecological Indicators. 18 (Diciembre, 2012); p. 379-386.

GALLEGO, Diana y MACK, Alexander. Sustainability assessment of energy technologies via social indicators: Results of a survey among European energy experts. En : Energy Policy. 38 (Noviembre, 2009); p. 1030-1039.

GENERADORES Eléctricos tienda de generadores eléctricos, especialistas en maquinaria eléctrica, Generadores eléctricos Diésel. [En línea]. [Consultado 24 marzo 2014]. Disponible en <<http://www.generadorelectrico.com/generador-electrico/info-diesel.php>>

HARPER, Gilberto Henríquez. El ABC de las instalaciones eléctricas en sistemas eólicos y fotovoltaicos. 1a edición. México, D.F: Limusa, 2011. 83-141 p.

_____ Tecnologías de generación de energía eléctrica. 1a edición. México, D.F: Limusa, 2009. 237-272 p.

KABIR, Golam y AKHTAR Ahsan. Comparative analysis of AHP and fuzzy AHP models for multicriteria inventory classification. En : International Journal of Fuzzy Logic Systems. Vol. 1, No. 1 (Octubre, 2011); p. 4

KARGER, Cornelia y HENNINGS, Wilfried. Sustainability evaluation of decentralized electricity generation. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 13 (Noviembre, 2007); p. 583-593.

KAYA, Tolga y KAHRAMAN, Cengiz. Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul. En : Energy. 35 (Abril, 2010); p. 2517-2527.

KURKA, Thomas y BLACKWOOD, David. Participatory selection of sustainability criteria and indicators for bioenergy developments. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 24 (Abril, 2013); p. 92-102.

LIU, Jian., et al. Sustainability in hydropower development: A case study. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 19 (Diciembre, 2012); p. 230-237.

MARKEVICIUS, A., et al. Trends and sustainability criteria of the production and use of liquid biofuels. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 14 (Julio, 2010); p. 3226-3231.

MATHWORKS, Matlab. [Programa de computador]: Versión 7.0.4.365 (R14). Licencia 251532, UIS CENTIC. The MathWorks, 2005.

MAXIM, Alexandru. Sustainability assessment of electricity generation technologies using weighted multi-criteria decision analysis. En : Energy Policy. 38 (Noviembre, 2009); p.1030-1039.

NACIONES UNIDAS. Informe de la conferencia de las naciones unidas sobre el medio ambiente y el desarrollo. Vol 1. Rio de Janeiro. 1992. [En línea]. [Consultado 9 abril 2014]. Disponible en <<http://www.un.org/documents/ga/conf151/spanish/aconf15126-1annex1s.htm>>

NZILA, Charles., et al. Multi criteria sustainability assessment of biogas production in Kenya. En : Applied Energy. 93 (Enero, 2012); p. 496-506.

OFORI-BOATENG, Cynthia; TEONG LEE, Keat y MENSAH, Moses. The prospects of electricity generation from municipal solid waste (MSW) in Ghana: A better waste management option. En : Fuel Processing Technology. 110 (Enero, 2013); p. 97.

ONAT, Nevzat y BAYAR, Haydar. The sustainability indicators of power production systems. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 14 (Julio, 2010); p. 3108-3115.

PHILLIPS, Jason. Determining the sustainability of large-scale photovoltaic solar power plants. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 27 (Agosto, 2013); p. 435-444.

REN, Jingzheng., et al. Fuzzy Multi-actor Multi-criteria Decision Making for sustainability assessment of biomass-based technologies for hydrogen production. En : International journal of hydrogen energy. 38 (Junio, 2013); p. 9111-9120.

RIBEIRO, Fernando; FERREIRA, Paula y ARAÚJO Madalena. Evaluating future scenarios for the power generation sector using a Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) tool: The Portuguese case. En : Energy. 52 (Febrero, 2013); p. 126-136.

SCHLÖR, Holger; FISCHER, Wolfgang y HAKE, Jürgen-Friedrich. Methods of measuring sustainable development of the German energy sector. En : Applied Energy. 101 (June, 2012); p. 172-181.

SOCIEDAD PRODUCTORA DE ENERGÍA DE SAN ANDRÉS Y PROVIDENCIA S.A. E.S.P. Informe de gestión. Bogotá, 2013. P

_____ Proyectos, Planta de generación RSU. [En línea]. [Consultado 20 Marzo 2014]. Disponible en <<http://www.sopesa.com/proyectos/planta-de-generacion-rsu>>

STAMFORD, Laurence y AZAPAGIC, Adisa. Sustainability indicators for the assessment of nuclear power. En : Energy. 36 (Septiembre, 2011); p. 6037-6057.

STEIN, Eric. A comprehensive multi-criteria model to rank electric energy production technologies. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 22 (Marzo, 2013); p. 640-654.

STREIMIKIENE, Dalia., et al. Prioritizing sustainable electricity production technologies: MCDM approach. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 16 (Marzo, 2012); p. 3302-3311.

TURTON, Richard ., et al. Estimation of manufacturing cost. En : _____. Analysis, synthesis, and design of chemical processes. 4 ed. Michigan : Pearson Education, Inc, 2012. p. 203 - 208.

UNESCO, MAB Biosphere Reserves Directory. Biosphere Reserve Information, Colombia, SEAFLOWER. [En línea]. [Consultado 13 marzo 2014]. Disponible en <<http://www.unesco.org/mabdb/br/brdir/directory/database.asp>>

_____. Oficina en Quito. Comunicado de Prensa: Rectificación sobre declaraciones acerca de la Reserva de la Biósfera 'Seaflower'. [En línea]. [Consultado 13 marzo 2014]. Disponible en <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Quito/pdf/Comunicado_seaflower.pdf>

UNIVERSIDAD DE FREIBURGO., et al. Informe del proyecto: Análisis preparatorio para el suministro de energía sostenible en las islas Colombianas San Andrés y Old Providence. Freiburg, 2005. 93 p.

VARUN; PRAKASH, Ravi y KRISHNAN, Inder. Energy, economics and environmental impacts of renewable energy systems. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 13 (Mayo, 2009); p. 2716-2721.

WANG, Jiang-Jiang., et al. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 13 (Junio, 2009); p. 2263-2278.

YANG, Q., et al. Environmental sustainability of wind power: An emergy analysis of a Chinese wind farm. En : Renewable and Sustainable Energy Reviews. 25 (Mayo, 2013); p. 229-239.

ZHANG, Jianqing. The application of analytic hierarchy process in Mine gas prevention system. En : Procedia Engineering. 26 (Noviembre, 2011); p. 1576-1584.

ANEXOS

Anexo 1. Resultado de la revisión bibliográfica de los indicadores para los ámbitos ambiental, económico, social y tecnológico.

Los indicadores usados en este trabajo se determinaron a través de la revisión bibliográfica de 26 artículos, [19, 41, 43, 31, 42, 26, 40, 27, 37, 30, 22, 39, 32, 33, 28, 25, 23, 29, 36, 38, 24, 34, 35, 44, 20, 21], estos se enfocan en la sostenibilidad de diferentes tecnologías de generación eléctrica. De estos artículos, 23 utilizaban indicadores ambientales, 24 indicadores económicos, 21 indicadores sociales y 21 indicadores tecnológicos.

En el criterio ambiental el indicador más utilizado es la tierra requerida, seguido de las emisiones de gases de efecto invernadero, emisiones de CO₂ y la contaminación acústica, Figura 12. De estos cuatro, no se consideraron las emisiones de gases de efecto invernadero, debido a su similitud con las emisiones de CO₂ del cual existe más información disponible, por lo tanto se incluyó el impacto sobre el hábitat que envuelve a su vez el indicador transformación de la tierra.

En el criterio económico los indicadores escogidos fueron: costo de inversión, costo de generación, costos de operación y mantenimiento, y disponibilidad de recursos, los cuales se muestran en la Figura 13.

En el criterio social se escogieron los indicadores creación de empleo, aceptación social, progreso del área e impactos sobre la salud humana, mostrados en la Figura 14.

En el criterio tecnológico se destacaron los indicadores: eficiencia, capacidad de generación, tiempo de vida útil y la razón reservas/producto; como se observa en la Figura 15, de estos se omitió el último debido a su similitud con el indicador

económico disponibilidad de recursos, por lo tanto se consideró seleccionar la madurez, ya que resulta pertinente para el tipo de tecnologías estudiadas.

Figura 12. Frecuencia de uso de los indicadores ambientales

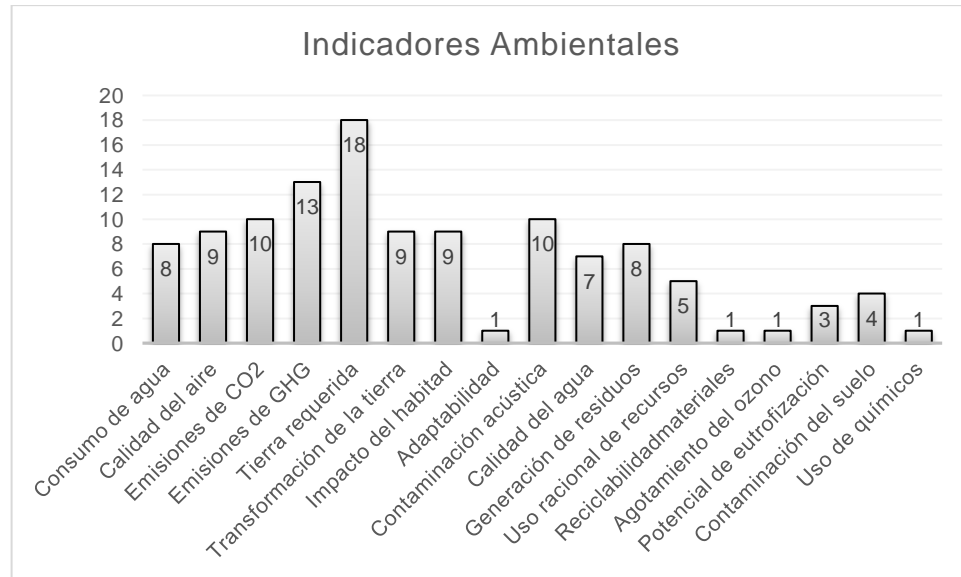


Figura 13. Frecuencia de uso de los indicadores económicos

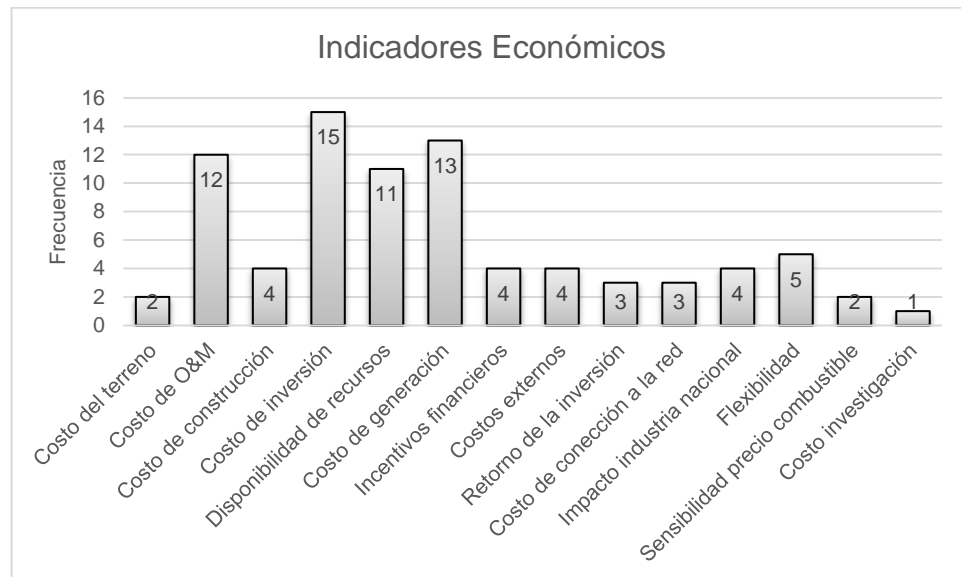


Figura 14. Frecuencia de uso de los indicadores sociales

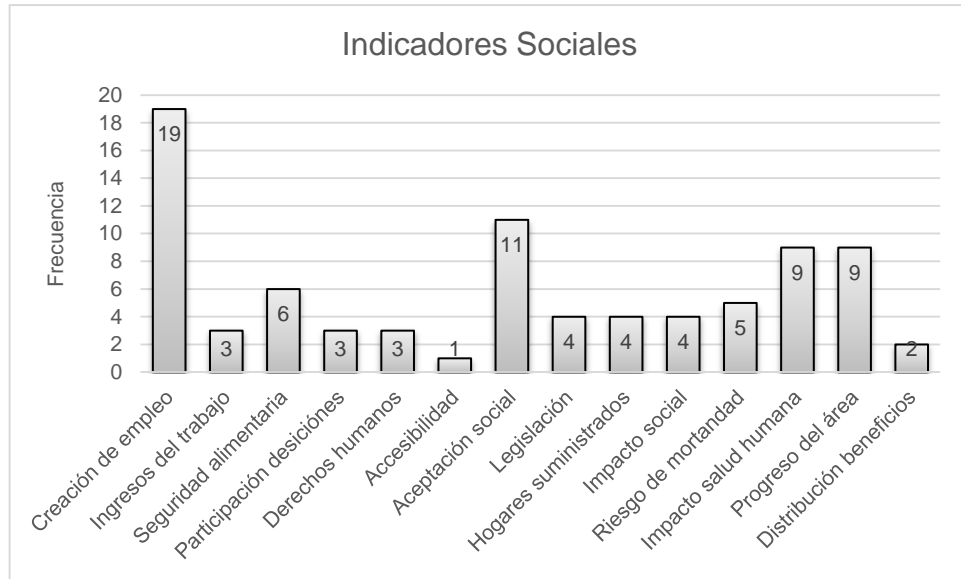
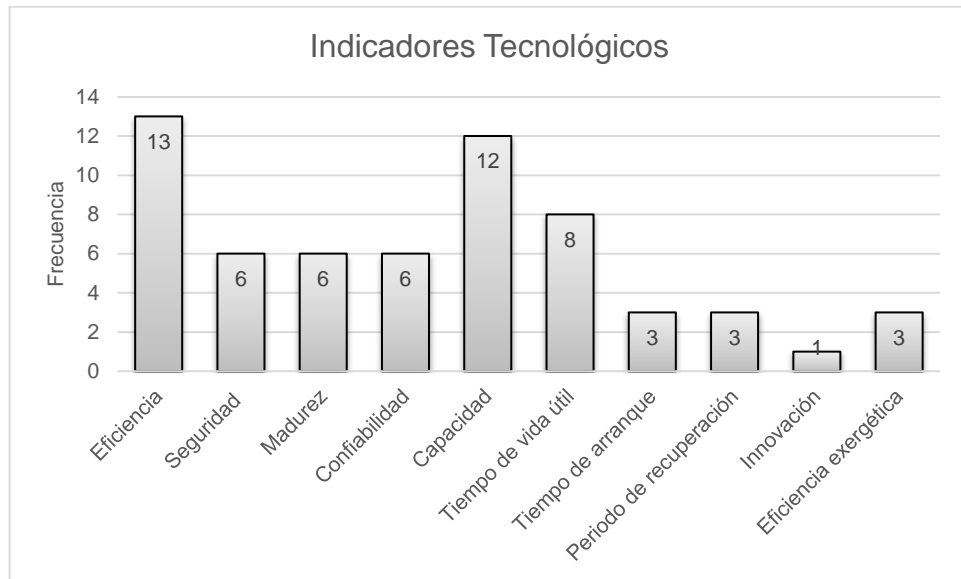


Figura 15. Frecuencia de uso de los indicadores tecnológicos



Anexo 2. Valores de los indicadores para cada tecnología.

❖ Tecnología diésel

Ambiental						
Indicador	Unidad	Referencia	Datos			
Tierra requerida	m ²	Encuestas	60000	4915	1200	
Emisión de CO ₂	g CO ₂ / año	Encuestas	140.000*10 ⁶	130*10 ⁶	113.500*10 ⁶	
Contaminación acústica	Cualitativo	Encuestas	Alto	Poco	Alto	
Impacto sobre el hábitat	Cualitativo	Encuestas	Muy Alto	Alto	Medio	

Económico			
Indicadores	Unidad	Referencia	Datos
Costo de inversión	\$ COP/kW	[8]	473.106
Costo de generación de energía eléctrica	\$ COP/kWh	[8]	500
Costos de O&M	\$ COP/kWh	[8]	160
Disponibilidad de recursos	Años	[45]	8

Social						
Indicadores	Unidad	Referencia	Datos			
Creación de empleo	Empleos creados	Encuestas	230	500	200	160
Aceptación social	Cualitativo	Encuestas	Muy Aceptada	Poco Aceptada	Medianamente Aceptada	Muy Aceptada
Impacto sobre la salud humana	Cualitativo	Encuestas	Muy Dañino	Muy Dañino	Muy Dañino	Ligeramente dañino
Progreso del área	Cualitativo	Encuestas	Medio	Muy Alto	Medio	Muy Alto

Tecnológico						
Indicadores	Unidad	Referencia	Datos			
Eficiencia	%	Encuestas	33	75	90	40
Capacidad de generación de energía	%	[34]	87			
Tiempo de vida útil	Años	[8]	20			
Madurez	Cualitativo	Encuestas	Alto	Medio	Alto	Muy Alto

❖ Tecnología eólica

Ambiental				
Indicadores	Unidad	Referencia	Datos	
Tierra requerida	m2	Encuestas	100.000	
Emisión de CO ₂	g CO ₂ / año	Encuestas	0	
Contaminación acústica	Cualitativo	Encuestas	Medio	Nulo
Impacto sobre el hábitat	Cualitativo	Encuestas	Alto	Poco

Económico			
Indicadores	Unidad	Referencia	Datos
Costo de inversión	\$ COP/kW	[8]	72.071
Costo de generación de energía eléctrica	\$ COP/kWh	[8]	140
Costos de O&M	\$ COP / kWh	[8]	20
Disponibilidad de recursos	Años	[34]	2.000.000.000

Social				
Indicadores	Unidad	Referencia	Datos	
Creación de empleo	Empleos creados	Encuestas	215	55
Aceptación social	Cualitativo	Encuestas	Poco Aceptada	Medianamente Aceptada
Impacto sobre la salud humana	Cualitativo	Encuestas	Ligeramente Dañino	Ligeramente Dañino
Progreso del área	Cualitativo	Encuestas	Alto	Muy Alto

Tecnológico					
Indicadores	Unidad	Referencia	Datos		
Eficiencia	%	Encuestas	31	30	65
Capacidad de generación de energía	%	[34]	44		
Tiempo de vida útil	Años	[8]	25		
Madurez	Cualitativo	Encuestas	Alto	Bajo	Nulo

◆ Tecnología solar

Ambiental					
Indicadores	Unidad	Referencia	Datos		
Tierra requerida	m2	Encuestas	120.000		
Emisión de CO ₂	g CO2 / año	Encuestas	0		
Contaminación acústica	Cualitativo	Encuestas	Nulo	Nulo	Nulo
Impacto sobre el hábitat	Cualitativo	Encuestas	Poco	Poco	Ninguno

Económico			
Indicadores	Unidad	Referencia	Datos
Costo de inversión	\$ COP/kW	[46]	18.998.378
Costo de generación de energía eléctrica	\$ COP/kWh	[46]	325
Costos de O&M	\$ COP / kWh	[46]	36
Disponibilidad de recursos	Años	[34]	2.000.000.000

Social					
Indicadores	Unidad	Referencia	Datos		
Creación de empleo	Empleos creados	Encuestas	140	45	65
Aceptación social	Cualitativo	Encuestas	Medianamente Aceptada	Muy Aceptada	Muy Aceptada
Impacto sobre la salud humana	Cualitativo	Encuestas	Ligeramente Dañino	Nulo	Ligeramente Dañino
Progreso del área	Cualitativo	Encuestas	Alto	Bajo	Muy Alto

Tecnológico					
Indicadores	Unidad	Referencia	Datos		
Eficiencia	%	Encuestas	40	25	55
Capacidad de generación de energía	%	[34]	22		
Tiempo de vida útil	Años	[8]	20		
Madurez	Cualitativo	Encuestas	Alto	Bajo	Bajo

❖ Tecnología residuos sólidos

Ambiental						
Indicadores	Unidad	Referencia	Datos			
Tierra requerida	m ²	Encuestas	20.000	20.000	5.000	4.800
Emisión de CO ₂	g CO ₂ / año	Encuestas	117.000.000			
Contaminación acústica	Cualitativo	Encuestas	Alto	Medio	Poco	Medio
Impacto sobre el hábitat	Cualitativo	Encuestas	Medio	Alto	Poco	Poco

Económico			
Indicadores	Unidad	Referencia	Datos
Costo de inversión	\$ COP/kW	Encuestas	34.939.000
Costo de generación de energía eléctrica	\$ COP/kWh	Encuestas	9608
Costos de O&M	\$ COP / kWh	[47]	873
Disponibilidad de recursos	Años	[34]	2.000.000.000

Social					
Indicadores	Unidad	Referencia	Datos		
Creación de empleo	Empleos creados	Encuestas	240	80	44
Aceptación social	Cualitativo	Encuestas	Medianamente Aceptada	Muy Aceptada	Medianamente Aceptada
Impacto sobre la salud humana	Cualitativo	Encuestas	Ligeramente Dañino	Ligeramente Dañino	Dañino
Progreso del área	Cualitativo	Encuestas	Medio	Alto	Medio

Tecnológico					
Indicadores	Unidad	Referencia	Datos		
Eficiencia	%	Encuestas	25	45	40
Capacidad de generación de energía	%	[34]	70		
Tiempo de vida útil	Años	[8]	20		
Madurez	Cualitativo	Encuestas	Medio	Bajo	Bajo

Anexo 3. Encuesta 1: Plantas de generación de energía eléctrica para el Archipiélago de San Andrés.

Responda cada pregunta para el o los sistemas de generación de energía eléctrica de los cuales tenga información. Recuerde que son casos evaluados en el Archipiélago de San Andrés.

Por favor escriba su nombre, la empresa de la cual hace parte y su cargo dentro de la misma.

1. ¿Cuál ha sido o cree usted que será la aceptación por parte de la comunidad en relación a los sistemas de generación de energía eléctrica utilizados en el Archipiélago?

	Nada aceptada	Poco aceptada	Medianamente aceptada	Muy aceptada
Diésel	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Eólica (Aerogeneradores)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Solar (Fotovoltaica)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
RSU	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

2. ¿Cuál considera usted es el impacto sobre la salud humana que provocan los sistemas de generación de energía eléctrica al ser utilizados?

	Nulo	Ligeramente dañino	Dañino	Muy dañino
Diésel	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Eólica (Aerogeneradores)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Solar (Fotovoltaica)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
RSU	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

3. ¿Cuál cree usted que ha sido o será el progreso, en cuanto al incremento en la calidad de vida de la población, mejoras en el sistema educativo, generación

de empleo, desarrollo tecnológico, que trae el sistema de generación de energía en el Archipiélago?

	Nulo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Diésel	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Eólica (Aerogeneradores)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Solar (Fotovoltaica)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
RSU	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

4. ¿Cuál cree usted que ha sido el grado de contaminación acústica, en relación a sonidos desagradables que interrumpen el equilibrio del ser humano y de la vida animal, de cada planta de generación de energía en el Archipiélago?

	Nulo	Poco	Medio	Alto	Muy alto
Diésel	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Eólica (Aerogeneradores)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Solar (Fotovoltaica)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
RSU	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

5. ¿Cuál cree usted que es el riesgo sobre el ecosistema, incluyendo impactos paisajísticos y sobre la biodiversidad, que genera la instalación y operación de los sistemas de generación de energía eléctrica utilizados en el Archipiélago?

	Ninguno	Poco	Medio	Alto	Muy alto
Diésel	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Eólica (Aerogeneradores)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Solar (Fotovoltaica)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
RSU	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

6. ¿Qué grado de madurez cree usted que posee cada tecnología?

	Nulo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Diésel	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Eólica (Aerogeneradores)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Solar (Fotovoltaica)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
RSU	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

7. ¿Cuál es el número de empleos directos e indirectos creados a partir de la implementación, puesta en marcha, operación y desmantelamiento de los sistemas de generación de energía eléctrica?

Ejemplo: Diésel=120, Eólica=45, Solar=30 y RSU=75

8. ¿Cuál es el área superficial usada por la planta de producción de energía eléctrica?

Ejemplo: Diésel= 300 m², Eólica= 800 Ha, Solar= 1700 Ha y RSU= 250 m²

9. ¿Cuál considera usted que es el porcentaje de eficiencia global de cada tecnología para la producción de energía eléctrica?

Ejemplo: Diésel= 80 %, Eólica= 30 %, Solar= 20 % y RSU= 50 %

10. ¿Cuál es la cantidad en gramos de emisiones de dióxido de carbono generados por la planta de producción de energía a partir de Diésel y de residuos sólidos urbanos?

Anexo 4. Encuesta 2: Planta de generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos (RSU) en el Archipiélago de San Andrés.

1. ¿Cuál fue el costo de inversión requerido en la implementación de la planta?

Indique las unidades utilizadas

2. ¿Cuál es el costo de generación de energía eléctrica de la planta?

Indique las unidades utilizadas

3. ¿Cuál son los costos de operación y mantenimiento anualizados de la planta?

Indique las unidades utilizadas

4. ¿Cuál es la disponibilidad de recursos (residuos sólidos urbanos) con la que cuenta la planta?

Indique las unidades utilizadas

Anexo 5. Programa en MATLAB versión 7.0.4.365: Factores de peso AHP

```
%Programa del cálculo: Factores de peso AHP
clc
clear all

% n es el tamaño de la matriz (n*n) y x=0,9 cuando n=4
n=4;
x=0.9;

% Matrices de calificación por cada evaluador
M1=[1 1/5 5 3;5 1 9 5;1/5 1/9 1 1/5;1/3 1/5 5 1];
M2=[1 7 9 1;1/7 1 3 1/7;1/9 1/3 1 1/9;1 7 9 1];
M3=[1 1/3 5 1;3 1 7 3;1/5 1/7 1 1/5;1 1/3 5 1];
M4=[1 1/5 1/3 1/5;5 1 3 1;3 1/3 1 1/3;5 1 3 1];

% Cálculo de la matriz integrada puntuación (ISM)
for i=1:4
    for j=1:4
        % La ISM varía dependiendo del número de evaluadores
        ISM(i,j)=(M1(i,j)*M2(i,j)*M3(i,j)*M4(i,j))^(1/4);
    end
end

% Cálculo del factor de peso
S=zeros(4,1);
for i=1:4
    for j=1:4
        S(i)=S(i)+ISM(j,i);
    end
end

Sw=zeros(4,1);
W=zeros(4,1);
for i=1:4
    for j=1:4
        Sw(i)=Sw(i)+ISM(i,j)/S(j);
    end
    W(i)=Sw(i)/4;
end

W      % Factor de peso

% Cálculo de lambda máximo
L=eig(ISM),2;
Lm=max(L)

% Cálculo de la razón de consistencia (CR)
CI=(Lm-n)/(n-1);
CR=abs(CI/x)
```

Anexo 6. Resultados matrices integradas de puntuación caso A.

Para este anexo se utilizara la siguiente convención: A1=tierra requerida, A2=emisiones de CO₂, A3=contaminación acústica, A4=impacto sobre el hábitat, E1=costo de inversión, E2=costo degeneración, E3=costos de operación y mantenimiento, E4=disponibilidad de recursos, S1=creación de empleo, S2=aceptación social, S3=impacto sobre la salud humana, S4=progreso del área, T1=eficiencia, T2=capacidad de generación, T3=tiempo de vida útil, T4=madurez.

Tabla 14. Matrices integradas de puntuación para el caso A

TECNOLOGÍA DIÉSEL							
Ambiental							
ISM	A1	A2	A3	A4	Factor de Peso	λ máx.	CR
A1	1,000	4,718	1,913	4,718	0,52	4,013	0,005
A2	0,212	1,000	0,481	1,000	0,12		
A3	0,523	2,080	1,000	1,710	0,24		
A4	0,212	1,000	0,585	1,000	0,12		
Económico							
ISM	E1	E2	E3	E4	Factor de Peso	λ máx.	CR
E1	1,000	1,000	1,000	7,000	0,32	4,000	0,000
E2	1,000	1,000	1,000	7,000	0,32		
E3	1,000	1,000	1,000	7,000	0,32		
E4	0,143	0,143	0,143	1,000	0,05		
Social							
ISM	S1	S2	S3	S4	Factor de Peso	λ máx.	CR
S1	1,000	0,553	2,943	0,880	0,23	4,020	0,007
S2	1,809	1,000	4,880	1,210	0,38		
S3	0,340	0,205	1,000	0,196	0,07		
S4	1,136	0,827	5,097	1,000	0,31		
Tecnológico							
ISM	T1	T2	T3	T4	Factor de Peso	λ máx.	CR
T1	1,000	0,287	1,136	0,712	0,14	4,024	0,009
T2	3,482	1,000	5,000	2,590	0,53		
T3	0,880	0,200	1,000	0,386	0,11		
T4	1,404	0,386	2,590	1,000	0,22		
TECNOLOGÍA EÓLICA							
Ambiental							
ISM	A1	A2	A3	A4	Factor de Peso	λ máx.	CR
A1	1,000	0,111	0,149	0,218	0,04	4,104	0,038
A2	9,000	1,000	2,236	4,583	0,53		

A3	6,708	0,447	1,000	3,000	0,29		
A4	4,583	0,218	0,333	1,000	0,14		
Económico							
ISM	E1	E2	E3	E4	Factor de Peso	λ máx.	CR
E1	1	1	1	1	0,25	4,000	0,000
E2	1	1	1	1	0,25		
E3	1	1	1	1	0,25		
E4	1	1	1	1	0,25		
Social							
ISM	S1	S2	S3	S4	Factor de Peso	λ máx.	CR
S1	1,000	0,655	0,218	0,192	0,08	4,018	0,007
S2	1,528	1,000	0,447	0,258	0,13		
S3	4,583	2,236	1,000	0,577	0,31		
S4	5,196	3,873	1,732	1,000	0,48		
Tecnológico							
ISM	T1	T2	T3	T4	Factor de Peso	λ máx.	CR
T1	1,000	0,693	0,189	1,119	0,11	4,016	0,006
T2	1,442	1,000	0,200	1,710	0,15		
T3	5,278	5,000	1,000	5,739	0,63		
T4	0,894	0,585	0,174	1,000	0,10		
TECNOLOGÍA SOLAR							
Ambiental							
ISM	A1	A2	A3	A4	Factor de Peso	λ máx.	CR
A1	1,000	0,111	0,111	0,131	0,04	4,040	0,015
A2	9,000	1,000	1,000	2,080	0,38		
A3	9,000	1,000	1,000	2,080	0,38		
A4	7,612	0,481	0,481	1,000	0,21		
Económico							
ISM	E1	E2	E3	E4	Factor de Peso	λ máx.	CR
E1	1	1/3	1/3	1/5	0,08	4,043	0,016
E2	3	1	1	1/3	0,20		
E3	3	1	1	1/3	0,20		
E4	5	3	3	1	0,52		
Social							
ISM	S1	S2	S3	S4	Factor de Peso	λ máx.	CR
S1	1,000	0,174	0,195	0,251	0,06	4,009	0,003
S2	5,739	1,000	1,442	1,913	0,41		
S3	5,130	0,693	1,000	1,326	0,30		
S4	3,979	0,523	0,754	1,000	0,23		
Tecnológico							
ISM	T1	T2	T3	T4	Factor de Peso	λ máx.	CR
T1	1,000	2,466	0,585	0,585	0,20	4,012	0,004

T2	0,405	1,000	0,200	0,251	0,08		
T3	1,710	5,000	1,000	1,442	0,40		
T4	1,710	3,979	0,693	1,000	0,31		
TECNOLOGÍA RSU							
Ambiental							
ISM	A1	A2	A3	A4	Factor de Peso	λ máx.	CR
A1	1,000	1,732	3,873	3,409	0,47	4,003	0,001
A2	0,577	1,000	2,590	1,968	0,28		
A3	0,258	0,386	1,000	0,760	0,11		
A4	0,293	0,508	1,316	1,000	0,14		
Económico							
ISM	E1	E2	E3	E4	Factor de Peso	λ máx.	CR
E1	1,000	1,000	1,000	0,111	0,08	4,000	0,000
E2	1,000	1,000	1,000	0,111	0,08		
E3	1,000	1,000	1,000	0,111	0,08		
E4	9,000	9,000	9,000	1,000	0,75		
Social							
ISM	S1	S2	S3	S4	Factor de Peso	λ máx.	CR
S1	1,000	0,273	0,405	0,493	0,10	4,037	0,014
S2	3,659	1,000	2,466	3,000	0,49		
S3	2,466	0,405	1,000	1,000	0,21		
S4	2,027	0,333	1,000	1,000	0,19		
Tecnológico							
ISM	T1	T2	T3	T4	Factor de Peso	λ máx.	CR
T1	1,000	0,212	0,405	0,843	0,10	4,023	0,008
T2	4,718	1,000	3,000	4,217	0,55		
T3	2,466	0,333	1,000	2,080	0,23		
T4	1,186	0,237	0,481	1,000	0,12		

Tabla 15. Factores de peso globales para los subcriterios

Indicadores	Promedio	% Global
A1	0,27	6,69%
A2	0,32	8,11%
A3	0,26	6,39%
A4	0,15	3,82%
E1	0,18	4,56%
E2	0,21	5,33%
E3	0,21	5,33%
E4	0,39	9,78%
S1	0,12	3,00%

S2	0,35	8,78%
S3	0,22	5,61%
S4	0,30	7,61%
T1	0,14	3,52%
T2	0,33	8,19%
T3	0,34	8,55%
T4	0,19	4,74%

Anexo 7. Resultados matrices integradas de puntuación caso B.

Tabla 16. Matrices integradas de puntuación para el caso B

AMBIENTAL							
Tierra requerida							
ISM	Diésel	Eólica	Solar	RSU	Factor de Peso	λ máx.	CR
Diésel	1,00	7,00	9,00	3,00	0,57	4,16	0,06
Eólica	0,14	1,00	3,00	0,20	0,09		
Solar	0,11	0,33	1,00	0,14	0,04		
RSU	0,33	5,00	7,00	1,00	0,29		
Emisión de CO2							
ISM	Diésel	Eólica	Solar	RSU	Factor de Peso	λ máx.	CR
Diésel	1,00	0,11	0,11	0,33	0,04	4,09	0,03
Eólica	9,00	1,00	1,00	7,00	0,44		
Solar	9,00	1,00	1,00	7,00	0,44		
RSU	3,00	0,14	0,14	1,00	0,08		
Contaminación Acústica							
ISM	Diésel	Eólica	Solar	RSU	Factor de Peso	λ máx.	CR
Diésel	1,00	0,33	0,22	1,73	0,11	4,03	0,01
Eólica	3,00	1,00	0,45	3,87	0,29		
Solar	4,58	2,24	1,00	5,92	0,53		
RSU	0,58	0,26	0,17	1,00	0,08		
Impacto sobre el hábitat							
ISM	Diésel	Eólica	Solar	RSU	Factor de Peso	λ máx.	CR
Diésel	1,00	0,26	0,17	0,45	0,07	4,03	0,01
Eólica	3,87	1,00	0,45	1,29	0,24		
Solar	5,92	2,24	1,00	3,87	0,52		
RSU	2,24	0,77	0,26	1,00	0,16		
ECONÓMICO							
Costo de inversión							
ISM	Diésel	Eólica	Solar	RSU	Factor de Peso	λ máx.	CR
Diésel	1,00	0,33	3,00	7,00	0,27	4,17	0,06
Eólica	3,00	1,00	5,00	9,00	0,56		
Solar	0,33	0,20	1,00	5,00	0,13		
RSU	0,14	0,11	0,20	1,00	0,04		
Costo de generación							
ISM	Diésel	Eólica	Solar	RSU	Factor de Peso	λ máx.	CR
Diésel	1,00	0,33	1,00	7,00	0,22	4,09	0,03
Eólica	3,00	1,00	3,00	9,00	0,53		
Solar	1,00	0,33	1,00	7,00	0,22		
RSU	0,14	0,11	0,14	1,00	0,04		
Costo de O&M							

ISM	Diésel	Eólica	Solar	RSU	Factor de Peso	λ máx.	CR
Diésel	1,00	0,33	0,33	7,00	0,17	4,09	0,03
Eólica	3,00	1,00	1,00	9,00	0,40		
Solar	3,00	1,00	1,00	9,00	0,40		
RSU	0,14	0,11	0,11	1,00	0,04		
Disponibilidad de Recursos							
ISM	Diésel	Eólica	Solar	RSU	Factor de Peso	λ máx.	CR
Diésel	1,00	0,11	0,11	0,11	0,04	4,00	0,00
Eólica	9,00	1,00	1,00	1,00	0,32		
Solar	9,00	1,00	1,00	1,00	0,32		
RSU	9,00	1,00	1,00	1,00	0,32		
SOCIAL							
Creación de empleo							
ISM	Diésel	Eólica	Solar	RSU	Factor de Peso	λ máx.	CR
Diésel	1,00	4,58	6,71	7,94	0,64	4,09	0,03
Eólica	0,22	1,00	3,00	3,87	0,21		
Solar	0,15	0,33	1,00	1,73	0,09		
RSU	0,13	0,26	0,58	1,00	0,06		
Aceptación Social							
ISM	Diésel	Eólica	Solar	RSU	Factor de Peso	λ máx.	CR
Diésel	1,00	2,65	1,00	1,00	0,26	4,43	0,16
Eólica	0,38	1,00	0,26	0,26	0,08		
Solar	1,00	3,87	1,00	1,00	0,28		
RSU	3,00	3,87	1,00	1,00	0,38		
Impacto sobre la salud humana							
ISM	Diésel	Eólica	Solar	RSU	Factor de Peso	λ máx.	CR
Diésel	1,00	0,14	0,13	0,22	0,05	4,04	0,02
Eólica	7,00	1,00	0,58	2,24	0,32		
Solar	7,94	1,73	1,00	2,65	0,46		
RSU	4,58	0,45	0,38	1,00	0,18		
Progreso del área							
ISM	Diésel	Eólica	Solar	RSU	Factor de Peso	λ máx.	CR
Diésel	1,00	0,58	1,53	1,73	0,25	4,02	0,01
Eólica	1,73	1,00	2,65	3,00	0,44		
Solar	0,65	0,38	1,00	0,77	0,15		
RSU	0,58	0,33	1,29	1,00	0,16		
TECNOLÓGICO							
Eficiencia							
ISM	Diésel	Eólica	Solar	RSU	Factor de Peso	λ máx.	CR
Diésel	1,00	2,27	2,08	3,27	0,45	4,00	0,00
Eólica	0,44	1,00	0,84	1,44	0,19		
Solar	0,48	1,19	1,00	1,44	0,22		

RSU	0,31	0,69	0,69	1,00	0,14		
Capacidad de generación							
ISM	Diésel	Eólica	Solar	RSU	Factor de Peso	λ máx.	CR
Diésel	1,00	7,00	9,00	3,00	0,57	4,16	0,06
Eólica	0,14	1,00	3,00	0,20	0,09		
Solar	0,11	0,33	1,00	0,14	0,04		
RSU	0,33	5,00	7,00	1,00	0,29		
Tiempo de vida útil							
ISM	Diésel	Eólica	Solar	RSU	Factor de Peso	λ máx.	CR
Diésel	1,00	0,33	1,00	1,00	0,17	4,00	0,00
Eólica	3,00	1,00	3,00	3,00	0,50		
Solar	1,00	0,33	1,00	1,00	0,17		
RSU	1,00	0,33	1,00	1,00	0,17		
Madurez							
ISM	Diésel	Eólica	Solar	RSU	Factor de Peso	λ máx.	CR
Diésel	1,00	3,56	3,27	4,72	0,56	4,01	0,00
Eólica	0,28	1,00	0,69	1,00	0,14		
Solar	0,31	1,44	1,00	1,44	0,18		
RSU	0,21	1,00	0,69	1,00	0,13		