

**DESARROLLO DE LAS TRAYECTORIAS DE AMBICIÓN EN LA CATEGORÍA DE
ELECTRICIDAD EN ZONAS NO INTERCONECTADAS PARA LA CALCULADORA DE
CARBONO 2050 DE SAN ANDRÉS Y PROVIDENCIA**

**LIZA ALEJANDRA ACEVEDO LEYVA
JESÚS GABRIEL JIMÉNEZ PORTILLO**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ
2018**

**DESARROLLO DE LAS TRAYECTORIAS DE AMBICIÓN EN LA CATEGORÍA DE
ELECTRICIDAD EN ZONAS NO INTERCONECTADAS PARA LA CALCULADORA DE
CARBONO 2050 DE SAN ANDRÉS Y PROVIDENCIA**

**LIZA ALEJANDRA ACEVEDO LEYVA
JESÚS GABRIEL JIMÉNEZ PORTILLO**

**TESIS DE GRADO
TECNOLOGÍAS AMBIENTALES**

**DIRECTOR
IVÁN ORLANDO CABEZA ROJAS
DR. RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE**

**CODIRECTOR
MARIO ANDRÉS HERNÁNDEZ PARDO
DR. INGENIERÍA**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ
2018**

PAGINA DE ACEPTACIÓN

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	8
1. OBJETIVOS	10
1.1 OBJETIVO GENERAL	10
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
2. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 CAMBIO CLIMÁTICO.....	11
2.1.1 Consecuencias del cambio climático.....	11
2.1.2 Panorama y Estrategia Nacional para el Cambio Climático.	12
2.1.3 Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL).	13
2.1.4 Calculadora de carbono 2050.	13
2.1.5 Inventario de Emisiones.	13
2.2 ZONAS NO INTERCONECTADAS EN COLOMBIA	14
2.3 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN SAN ANDRÉS ISLAS.....	14
2.3.1 Planta de Residuos Sólidos Urbanos.	14
2.4 EMISIONES DE GEI EN EL SECTOR ELECTRICIDAD EN COLOMBIA.....	15
2.5 COMBUSTIBLES FÓSILES	16
2.5.1 Diésel.	16
2.5.2 Gas Natural.	16
2.5.3 Gas Licuado Petróleo.....	16
2.6 FUENTES DE ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES	17
2.6.1 Energía solar fotovoltaica.....	17
2.6.2 Energía eólica.	17
3. METODOLOGÍA	18
4. DESARROLLO CENTRAL	25
4.1 CAPACIDAD INSTALADA	25
4.1.1 Diésel	25
4.1.2 Residuos Sólidos Urbanos.	25
4.1.3 Potencial Solar Fotovoltaico.....	25

4.1.4	Potencial Eólico.....	26
4.1.5	Gas Licuado Petróleo.....	27
4.2	DEMANDA DE ENERGÍA	28
4.3	DEMANDA ENERGÉTICA POR FUENTE	29
4.3.1	Diésel.	30
4.3.2	Residuos Sólidos Urbanos	31
4.3.3	Solar Fotovoltaico.....	31
4.3.4	Eólico.	31
4.3.5	Gas Licuado Petróleo.....	32
4.4	CONSUMO DE COMBUSTIBLE.....	33
4.4.1	Diésel.	33
4.4.2	Residuos Sólidos Urbanos.	34
4.4.3	Gas Licuado Petróleo.....	34
4.5	EMISIONES	34
4.6	GENERACIÓN DE ESCENARIOS ALTERNATIVOS.....	38
4.7	MATRIZ ENERGÉTICA.....	41
4.7.1	Escenario 1	41
4.7.2	Escenario 2	43
4.7.3	Escenario 3	44
4.7.4	Escenario 4	45
5.	IMPACTO SOCIAL, HUMANÍSTICO DEL PROYECTO.....	47
6.	CONCLUSIONES.....	48
7.	RECOMENDACIONES	49
	BIBLIOGRAFÍA	50
	ANEXOS	56

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Datos requeridos para el cálculo de potencial.....	25
Tabla 2. Potencial Solar Fotovoltaico.	26
Tabla 3. Potencial eólico mensual.....	27
Tabla 4. Potencia GLP.	28
Tabla 5. Demanda de energía por año.....	28
Tabla 6. Demanda de energía a sustituir por nivel.	29
Tabla 7. Demanda energética de diésel por nivel y año.....	30
Tabla 8. Demanda energética por residuos sólidos urbanos por nivel y año.	31
Tabla 9. Demanda energética por generación solar fotovoltaica por nivel y año, % de participación.	31
Tabla 10. Demanda energética por generación eólica por nivel y año, % participación.	32
Tabla 11. Demanda energética por GLP por nivel y año.....	32
Tabla 12. Factores de consumo del diésel.....	33
Tabla 13. Consumo de diésel.....	33
Tabla 14. Consumo de GLP.....	34
Tabla 15. Factores de emisión de los combustibles.....	35
Tabla 16. Reducción de emisiones cada año respecto a la línea base.....	37
Tabla 17. Emisiones por escenario.	40

LISTA DE GRÁFICAS

pág.

Gráfica 1. Curva de potencia Nordex N80-2500.....	26
Gráfica 2. Demanda energética.....	29
Gráfica 3. Demanda energética a partir de diésel.	30
Gráfica 4. Total de emisiones por año.....	35
Gráfica 5. Emisiones de CO2 por nivel	36
Gráfica 6. Emisiones de CH4 y N2O por nivel.....	36
Gráfica 7. Matriz energética actual.....	41
Gráfica 8. Matriz energética escenario 1, años 2030 y 2050.....	42
Gráfica 9. Matriz energética escenario 2, años 2030 y 2050.....	44
Gráfica 10. Matriz energética escenario 3, años 2030 y 2050.....	45
Gráfica 11. Matriz energética escenario 4, años 2030 y 2050.....	46

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Metodología.	18
Figura 2. Cálculo demanda de energía.	19
Figura 3. Capacidad Instalada.....	20
Figura 4. Cálculo de demanda de energía por fuente.	21
Figura 5. Cálculo de emisiones para las fuentes renovables de energía.	22
Figura 6. Cálculo de consumo de combustible.....	22
Figura 7. Cálculo de emisiones por el uso de GLP y de Residuos Sólidos Urbanos.....	23
Figura 8. Cálculo de emisiones por parte del uso de diésel.	23
Figura 9. Cálculo del % de participación.	24

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrollaron las trayectorias del apartado de “Electricidad en Zonas No Interconectadas” de la calculadora de carbono 2050 de San Andrés y Providencia, identificando inicialmente las energías renovables que pueden implementarse en la isla. Seguido a esto se actualizó el árbol de cálculo utilizado por la herramienta, definiendo primero el potencial de las diferentes fuentes de generación de energía para calcular la demanda de energía por tecnología y así el porcentaje de participación dentro de la matriz energética de la isla. Para las tecnologías que requieren de combustible para su funcionamiento, se determinó la cantidad necesaria del mismo para la generación de energía y a partir de este dato se calcularon las emisiones de CO₂ equivalente; para las fuentes de energía renovable se calcularon las emisiones referentes a la construcción y operación de las tecnologías. Con el porcentaje de reemplazo de diésel propuesto por la Calculadora de Carbono 2050 para cada nivel, se obtuvo un porcentaje de reducción de emisiones de gases efecto invernadero proporcional.

Palabras clave: zonas no interconectadas, calculadora de carbono 2050, energías renovables, emisiones, gases efecto invernadero.

ABSTRACT

The Pathways of the San Andrés y Providencia's Carbon Calculator 2050 in the section of "Non Interconnected Zones' electricity" were developed, identifying at first the renewable energies that could be implemented on the island. Therewith, the current calculation tree was modified; defining first the potential of the technologies selected which allowed the calculation of each technology energy request, consequently the percentage of participation in the island energetic matrix. The amount of diesel, LPG and municipal waste required was determined afterwards and with those values was calculated the kilograms of emissions in equivalents of CO₂. For the solar and wind power, the emissions came from the installation and operation stages. The percentage of emissions obtained were proportional to the percentages of diesel substitution in the suggested levels of ambitions by the Carbon Calculator 2050.

Key words: Non Interconnected Zones, Carbon Calculator 2050, renewable energies, emissions, greenhouse gases.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático se ha trabajado en las últimas décadas de manera intensiva como un tema de orden global, debido a que las consecuencias proyectadas serían catastróficas si no se genera una solución. El camino ideal en su momento a nivel mundial fue el de 7 combinar políticas a favor, que permitan enfrentar la problemática, con acciones en los diferentes sectores para reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) y estabilizar las concentraciones de los mismos [1].

La emisión de GEI es una de las mayores preocupaciones a nivel mundial, tanto así que en la versión 15 de la “Conference of Parties” (COP-15) se hace especial énfasis en la reducción de estas emisiones, tanto por parte de países desarrollados como en países con economía emergente y economías en vía de desarrollo, logrando así la reducción de un 55% de las emisiones globales [1]. En la última reunión de la Conference of Parties (COP-21), realizada en diciembre del 2015, Colombia se comprometió a reducir en un 20% las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a las proyectadas para el año 2030 [2].

Para contribuir con dicho objetivo es necesaria la existencia de herramientas adecuadas y actualizadas, que permitan tomar decisiones políticas acertadas en lo referente a la mitigación del cambio climático y el desarrollo del país; por esta razón, el presente trabajo investigativo se enfoca en el desarrollo de las trayectorias de ambición en la categoría de energía para la calculadora de carbono 2050 de San Andrés y Providencia, aprovechando el potencial solar y eólico presente en la isla, presentando diferentes escenarios de implementación de las tecnologías, que contribuirán a la proyección de las emisiones de GEI en el año 2050 y a la diversificación de la matriz energética del país que a pesar de estar en el Plan de Desarrollo Nacional no ha tenido grandes avances [3].

El Archipiélago de San Andrés y Providencia pertenece al grupo de Zonas No Interconectadas (ZNI) del país, siendo, posiblemente por su ubicación, el lugar que presenta mayor dificultad para integrar al Sistema Interconectado Nacional (SIN). Por esta razón se ha optado por el uso de diésel para la generación de energía eléctrica y suplir la demanda de la isla, que adicional a sus 75.167 habitantes con una densidad de 1.439 habitantes por cada kilómetro cuadrado (según reportes del DANE para el 2014) recibe turistas en diferentes temporadas del año [4]. La dependencia de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica afecta directamente a la población de San Andrés y Providencia pues obliga a los usuarios a hacer parte del mercado de combustibles fósiles ajustándose a los precios fluctuantes. Por ende, en los últimos años, entidades como la Unidad de Planeación Minero Energética (UMPE), el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y el Ministerio de Minas y Energía, entre otros, han

generado estudios que proponen alternativas para mejorar el servicio energético en las islas y la calidad de vida de sus habitantes [5].

Adicionalmente, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible adoptó una herramienta digital del Reino Unido (Calculadora de Carbono 2050), que con ayuda de una base de datos con información de los diferentes sectores que utilizan y generan energía, expone las cifras de emisiones que el país aporta mundialmente [6]. Así mismo, permite modificar las trayectorias de los diferentes sectores según los adelantos y/o cambios tecnológicos que se presenten al pasar los años. Dicha herramienta puede servir como guía para la toma de decisiones y manejo de proyectos con el fin de ajustarse a los compromisos que Colombia tiene con la Organización de Naciones Unidas para el control de emisiones a 2030. Sin embargo, la Calculadora está a nivel nacional y en fase de desarrollo a nivel departamental [7].

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar las trayectorias de ambición en la categoría de energía para la calculadora de carbono 2050 de San Andrés y Providencia

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las energías renovables que se pueden implementar para el archipiélago de San Andrés y Providencia.
- Establecer el potencial energético de cada tipo de energía renovable para la construcción de los niveles de ambición.
- Actualizar los árboles de cálculo para comprender el funcionamiento y las entradas que requiere el modelo en Excel de la calculadora.
- Cuantificar el potencial de mitigación de los escenarios propuestos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 CAMBIO CLIMÁTICO

Según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático firmado el 13 de junio de 1992, Cambio Climático hace referencia a ***“change of climate which is attributed directly or indirectly to human activity that alters the composition of the global atmosphere and which is in addition to natural climate variability observed over comparable time periods.”*** [8].

Actualmente, Naciones Unidas clasifica el cambio climático como uno de los problemas globales prioritarios argumentando que es el mayor reto que afrontamos en nuestro tiempo, así como la carga que agrega a nuestra sociedad y al medio ambiente. Asegura que los patrones climáticos cambiantes ponen en riesgo la producción de alimentos y los incrementos en el nivel del mar representan inundaciones catastróficas, siendo estos de interés mundial al tener impactos de alcance mundial. Adicionalmente, enfatiza que ***“Sin una acción drástica hoy, la adaptación a estos impactos en el futuro será más difícil y costosa.”*** [9].

2.1.1 Consecuencias del cambio climático. La temperatura a nivel global continuará en aumento durante las próximas décadas, científicos que hacen parte del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) aseguran un aumento en la temperatura mundial de 2,5 a 10 grados Fahrenheit durante el próximo siglo. Sin embargo, el efecto a nivel regional variará en el tiempo debido a las habilidades que disponga cada sociedad para mitigar los cambios y el ambiente en el que se encuentren. Así mismo el clima seguirá en constante cambio a través de este siglo y los próximos, estos a su vez dependerá de la cantidad de gases emitidos que acumulan el calor y por ende la tierra seguirá incrementando la temperatura. Se prevé cambio en los patrones de las precipitaciones a nivel mundial, más sequías y mayores olas de calor; los eventos o fenómenos naturales serán más fuertes e intensos a lo largo de la superficie terrestre, el nivel del mar aumentará de 1-4 pies hacia el año 2100 y el Ártico perderá gran parte de su superficie de hielo a mediados de siglo [10].

Colombia a pesar de ser un país con baja contribución al calentamiento global, es una víctima de éste. Se prevé un aumento entre 2,3 y 3,5 mm del nivel del mar en la costa Caribe y de 2,2 mm en la costa pacífica, lo que ocasionaría inundaciones en gran parte del territorio del Archipiélago de San Andrés. De igual manera los eventos extremos de cambios en la temperatura afectan la salud de los habitantes, deteriora el ecosistema con poca resiliencia y causa daños a la infraestructura de la isla (transporte, hospitales e infraestructura que proporcione energía eléctrica, entre otros). La isla actualmente depende externamente de los combustibles fósiles para cubrir la demanda energética, aportando (en menor cantidad) a la emisión de gases de efecto invernadero a la

atmósfera, al mismo tiempo, dicha matriz energética impide que las comunidades satisfagan su demanda pues se ven limitados por los incrementos en el mercado de combustibles fósiles. Por lo anterior, esa dependencia se percibe como la mayor amenaza del cambio climático hacia las islas y la manera de atacar es diversificando la matriz energética [11].

2.1.2 Panorama y Estrategia Nacional para el Cambio Climático. En la Ley 164 de 1995 y la Ley 629 de 2000 Colombia ratificó una serie de compromisos para reducir la emisión de GEI, a partir de la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (CMNUCC)-1992 y el Protocolo de Kioto-1997 [12].

De acuerdo con la CMNUCC el país garantiza [12]:

- Recoger y compartir la información sobre la emisión de GEI, las políticas nacionales y las prácticas óptimas.
- Poner en marcha estrategias nacionales para abordar el problema de las emisiones de GEI y adaptarse a los efectos previstos, incluida la prestación de apoyo financiero y tecnológico a los países en desarrollo.
- Cooperar para prepararse y adaptarse a los efectos del cambio climático.

Con base en un diagnóstico realizado por el Departamento Nacional de Planeación DNP y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial MAVDT (2002), en el cual se revisó la capacidad institucional para abarcar los compromisos derivados de la CMNUCC y del Protocolo de Kioto, se creó en 2002 la Oficina Colombiana para la Mitigación del Cambio Climático, que hoy corresponde al Grupo de Mitigación de Cambio Climático del MAVDT, como instancia institucional específica que concentra y articula las acciones de mitigación con los temas de cambio climático a nivel nacional [12].

En términos generales, algunos planes y políticas que tienen en cuenta acciones para la mitigación del cambio climático son: El Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2002- 2006, hacia un estado comunitario; la estrategia institucional para la venta de servicios ambientales derivados de la mitigación de cambio climático (Conpes 3242); el Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2006-2010 -Estado comunitario: desarrollo para todos; Visión Colombia II Centenario 2019; y los acuerdos de cooperación multilateral (principalmente relacionados con proyectos MDL [12].

Adicionalmente, se vienen desarrollando esfuerzos a nivel legislativo como el reciente Decreto 298 de 2016 que establece la organización y funcionamiento del Sistema Nacional de Cambio Climático (SISCLIMA) que busca tener un control sobre los distintos

proyectos y programas que tengan que ver con la adaptación al cambio climático y GEI. Una parte importante del Decreto es la conformación de nodos regionales que permitan coordinar acciones de mitigación de los GEI y proyectos que traten el tema de cambio climático [13, 14].

2.1.3 Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL). Los mecanismos de desarrollo limpio (MDL) son un instrumento innovador que permite a los países industrializados implementar proyectos que permitan la reducción de emisiones de GEI, estas emisiones pueden ser certificadas y utilizadas por los países para cumplir con su cuota de reducción de emisiones (Países que se han comprometido a reducir su emisión de gases efecto invernadero), estos MDL pueden ser aplicados para el sector minero energético, el sector industrial, sector transporte, sector residuos, sector agrícola y el sector forestal. Principalmente, estos sectores pueden implementar MDL reemplazando los combustibles utilizados en sus diferentes actividades, además utilizando fuentes alternativas de energía reduciendo las emisiones de GEI y aprovechando los residuos que generan [15].

2.1.4 Calculadora de carbono 2050. La calculadora de carbono 2050 es una herramienta que permite la generación de escenarios posibles en el futuro para la reducción de emisiones de gases efecto invernadero con el objetivo de reducir la dependencia de combustibles fósiles y fomentar el uso de energías renovables [16].

Esta herramienta apoya la toma de decisiones en cuanto a la planeación a corto y largo plazo de los escenarios de mitigación en los diferentes sectores de la economía del país, pues permite simular la oferta y demanda de energía de cada escenario, y evaluar el potencial y el costo de cada opción de mitigación [17].

La calculadora de carbono colombiana fue desarrollada por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo bajo el marco de la Estrategia Colombiana de Desarrollo bajo en Carbono ECDBC, con base en la calculadora del Reino Unido [16].

2.1.5 Inventario de Emisiones. Colombia ha realizado para el año 2012 el inventario de emisiones y absorciones de GEI según la metodología del IPCC con el fin de reportar resultados que permitan ser comparados entre todos los países. Los principales grupos en los que se dividen las emisiones son las provenientes del sector de la energía, de procesos industriales, de la agricultura y de otros usos de la tierra y residuos [18].

En dicho inventario se realizaron estimaciones de CO₂, CH₄, N₂O, SF₆, CO, NO_x, COVDM y SO_x, y se organizaron mesas de trabajo referentes a la energía, la agricultura, el cambio y uso de la tierra y silvicultura, y los residuos. En este inventario se obtuvo el sector

energético como el que mayor porcentaje de CO₂ equivalente genera (44%), seguido del sector agricultura (43%), los residuos con 8% y procesos industriales con un 5% [18].

2.2 ZONAS NO INTERCONECTADAS EN COLOMBIA

Las Zonas No interconectadas (ZNI) están conformadas por los municipios, corregimientos, localidades, y caseríos no interconectados al Sistema Interconectado Nacional (SIN). Estas zonas representan el 52% del territorio nacional, el cual incluye 90 municipios, 1.448 localidades, 39 cabeceras municipales. En estas zonas la baja densidad poblacional (entre 0,73 y 4 hab/km²) las largas distancias y al costo de transporte de los energéticos constituyen algunas de las barreras para el desarrollo de proyectos de generación eléctrica [19].

El 92% de la capacidad instalada de generación en las ZNI corresponde a generación con diésel (155 MW que atiende a una demanda de 0,5 TWh) y el 8% restante corresponde a fuentes renovables [19].

2.3 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN SAN ANDRÉS ISLAS

La prestación de servicio eléctrico del Archipiélago de San Andrés y Providencia está a cargo de la empresa SOPESA S.A. E.S.P. (Sociedad Productora de Energía de San Andrés y Providencia S.A. E.S.P.) desde el año de 1996, como una iniciativa privada enfocada en la satisfacción de las necesidades básicas de los habitantes de la isla [20]. Gran parte de la generación de energía eléctrica de San Andrés es a base de combustibles fósiles, los cerca de 146 GWh año de demanda eléctrica son cubiertos con 18 unidades generadoras diésel que suman una capacidad de 83,68 MW [4]. La planta de generación Punta Evans consume aproximadamente 14 millones de galones de diésel al año, estimando unas emisiones de CO₂ de 145.560 toneladas al año [21, 22].

2.3.1 Planta de Residuos Sólidos Urbanos. Las plantas incineradoras de residuos sólidos, son una fuente alternativa de generación de energía eléctrica que se utiliza en muchos países, debido a que adicional a la generación eléctrica permiten dar un manejo a los residuos sólidos generados en un lugar. El desarrollo de las tecnologías de incineración ha ido en aumento en los últimos años, para lograr disminuir y controlar las emisiones y lograr una mayor eficiencia en la combustión [23].

Las plantas incineradoras de residuos sólidos, son una fuente alternativa de generación de energía eléctrica que se utiliza en muchos países, debido a que adicional a la generación eléctrica permiten dar un manejo a los residuos sólidos generados en un lugar. El desarrollo de las tecnologías de incineración ha ido en aumento en los últimos

años, para lograr disminuir y controlar las emisiones y lograr una mayor eficiencia en la combustión [23].

La energía eléctrica se produce por el movimiento de una turbina, este movimiento es generado por el vapor de agua obtenido por el calor de la combustión de los residuos sólidos [24].

Dentro del contrato de concesión que actualmente ejecuta SOPESA, quedaron establecidos compromisos según los cuales debe ejecutar dos proyectos más de expansión en capacidad instalada, uno de estos proyectos era poner en servicio una planta de aprovechamiento energético de basuras de 1 MW, con el fin de generar al menos 4 GWh por año de energía eléctrica a partir de los residuos sólidos urbanos producidos cotidianamente en la isla de San Andrés y de los residuos dispuestos en el relleno sanitario Magic Garden [4].

A pesar de que la entrada en funcionamiento de la planta de incineración de residuos sólidos urbanos estaba estimada para el año 2016, al día de hoy no ha iniciado su funcionamiento debido al incumplimiento en la presentación del Plan de Manejo Ambiental de la misma [25].

2.4 EMISIONES DE GEI EN EL SECTOR ELECTRICIDAD EN COLOMBIA

El sector energético del país presenta emisiones de aproximadamente 29,40 Mt CO₂eq; para la reducción de esta cantidad de emisiones se han planteado 4 líneas estratégicas que comprenden la eficiencia energética, las emisiones fugitivas, la generación y la gestión de la demanda [26].

Dentro de la línea estratégica referente a la generación, se encuentra la diversificación de la matriz energética, la promoción de auto-generación a través de fuentes alternativas y la modificación en la generación de energía eléctrica en la Zonas No Interconectadas del país. De acuerdo con estimaciones realizadas por el Ministerio de Minas y Energía, esta línea estratégica sería con 4,74 Mt Co₂eq al año 2030, la de mayor potencial de reducción de emisiones [26].

Según el Inventario Nacional y Departamental de Gases Efecto Invernadero del IDEAM, el sector energético del archipiélago de San Andrés y Providencia contribuyó con 100,2 Kt CO₂eq en el año 2012, debido al consumo de combustibles [27].

2.5 COMBUSTIBLES FÓSILES

Los combustibles fósiles son sustancias que provienen de restos vegetales y animales, que debido a la presión y acción de diferentes microorganismos durante millones de años se han transformado en sustancias con gran contenido energético [28].

Estudios de inicios del siglo XXI sustentan que el principal causante de los cambios en la variedad del clima se debe al uso excesivo de la energía generada por fuentes fósiles; dichos combustibles han establecido el sistema energético mundial desde su explotación hasta la actualidad [29, 1].

2.5.1 Diésel. El diésel es un hidrocarburo que se obtiene de la destilación del petróleo, según las características que este tenga es utilizado como combustible vehicular, de maquinaria o para equipos que generen calor. A comparación de la gasolina, el diésel tiene alta eficiencia, debido a que su proceso de combustión es mejor y a que tiene mayor poder calorífico [30].

Este combustible es el utilizado actualmente en la Isla de San Andrés y Providencia, en las 18 unidades generadoras de energía, abasteciendo completamente la demanda de energía eléctrica de la isla. Aproximadamente el 53% de la emisiones del Archipiélago de San Andrés y Providencia son generadas por el consumo de diésel para la generación de energía eléctrica [27].

2.5.2 Gas Natural. El gas natural es un hidrocarburo, compuesto por la mezcla de diferentes gases livianos, principalmente por metano [31]. Este combustible fósil cuenta con grandes reservas a nivel mundial y debido a su bajo costo es competitivo con otros combustibles como el petróleo, el carbón y el diésel [32].

Gracias a las bajas emisiones y a su alto rendimiento, en las últimas décadas la demanda de este combustible fósil ha ido en aumento. El gas natural es utilizado comúnmente como combustible doméstico, combustible comercial, para la extracción de petróleo y para generación de energía eléctrica, esta última mediante centrales térmicas, centrales de cogeneración termoeléctrica y centrales de ciclo combinado [33, 34].

2.5.3 Gas Licuado Petróleo. El Gas Licuado Petróleo es una mezcla de hidrocarburos que obtiene por la refinación del petróleo o durante la extracción de Gas Natural [35]. Este combustible es una alternativa energética para pequeñas ciudades y pueblos de bajos recursos donde no hay acceso a la red de distribución nacional de energía, debido a su bajo costo y a su facilidad de almacenamiento y transporte. Estas ventajas junto a

su alta eficiencia y su baja huella de carbono, permiten que el GLP pueda representar una transición energética a modelos sostenibles, seguros y competitivos [36, 37].

2.6 FUENTES DE ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES

2.6.1 Energía solar fotovoltaica. Este tipo genera energía eléctrica a partir de la radiación solar, esto mediante una célula fotovoltaica; este tipo de tecnología no emite gases efecto invernadero y tiene una gran capacidad de generación eléctrica [38]. Debido a las crecientes preocupaciones por el cambio climático ha aumentado su uso en la actualidad [39]. Actualmente, el país cuenta con una granja solar “Celsia Solar Yumbo” ubicada en Yumbo, Valle del Cauca. Este proyecto tiene una capacidad instalada de 9,8 MW, brindando energía a 8.000 hogares, adicional a este proyecto, se encuentra en construcción el proyecto AWARALA en el departamento de Sucre con una capacidad instalada de 20 MW [40].

2.6.2 Energía eólica. La energía eólica es la energía que se obtiene por movimiento de las masas de aire y que puede ser transformada en diferentes formas útiles de energía. Los vientos con velocidades promedio entre 5 y 12 m/s se consideran aprovechables para su uso y transformación energética [29, 41].

Este tipo de energía pertenece a las energías renovables y es considerada un tipo de energía verde debido a que es limpia y al ser utilizada para reemplazar termoeléctricas a base de combustibles fósiles contribuye con la reducción de emisiones de gases efecto invernadero.

Diferentes estudios señalan el gran potencial eólico del país debido a su ubicación, este potencial se encuentra principalmente en la región norte de Colombia, en las zonas costeras del departamento de la Guajira, Bolívar, Cesar, Magdalena y San Andrés [41].

El país cuenta hoy en día con el parque eólico Jepirachi en el departamento de La Guajira, al cual corresponden los 19 MW de capacidad total instalada en el país [42].

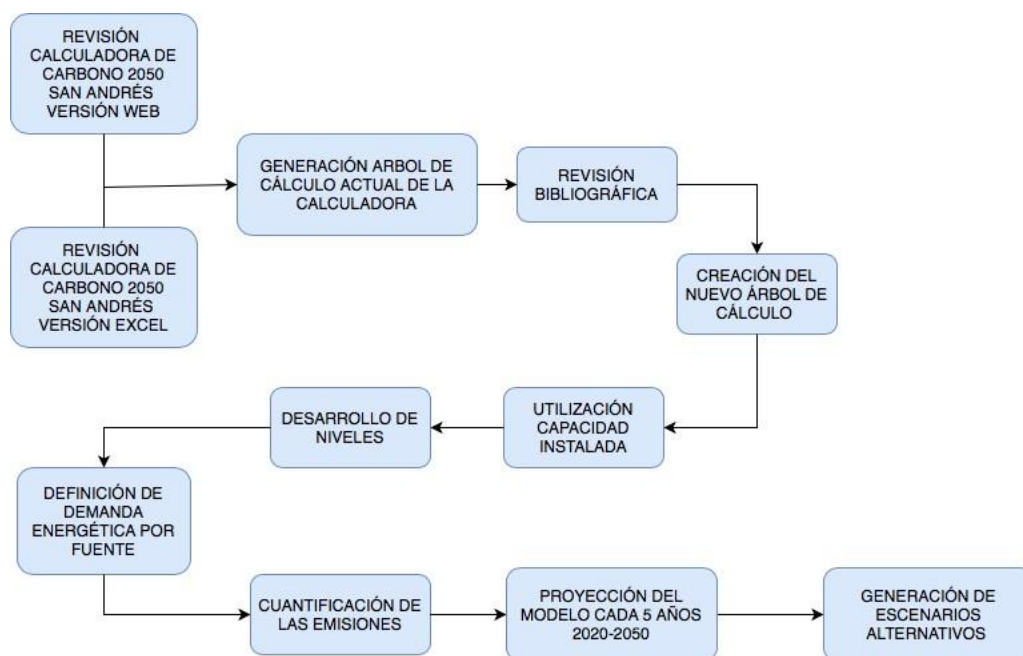
Como en el caso de la energía solar, una de las barreras para el desarrollo de la energía eólica es la carencia de información sobre la oferta de este recurso en Colombia. En este caso, la información que existe tampoco es lo suficientemente detallada como para simular, dimensionar y diseñar un sistema de generación en un lugar específico. El desarrollo de campañas de medición de vientos es un paso previo necesario para el desarrollo de estos proyectos. Estas deben desarrollarse de manera detallada en las zonas que, como la Guajira, han mostrado un potencial interesante [43].

3. METODOLOGÍA

La calculadora de carbono 2050 elaborada para las islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (avalada por la Gobernación de San Andrés), propone en sus 4 niveles de ambición reemplazar el porcentaje de diésel usado para la generación de energía eléctrica, por tecnologías que aprovechen la energía eólica, solar, GLP y Residuos Sólidos Urbanos. Sin embargo no hay valores en la calculadora para ninguna de las energías mencionadas anteriormente, lo que impide realizar una correcta proyección y finalmente la matriz energética queda reducida a la generación por diésel hasta 2050.

Por lo anterior, se propone utilizar los mismos porcentajes que se observan en los niveles de ambición para reemplazar la participación del diésel y agregar potencial eólico, solar y GLP logrando la meta en cada nivel. Finalmente se generan 4 escenarios alternativos con sus respectivos niveles de ambición, los cuales fueron creados con información recolectada en paralelo a los documentos base de la UPME. En la figura 1 se observa el camino general de la investigación, más adelante se hace énfasis en la metodología utilizada para el desarrollo de los niveles de ambición.

Figura 1. Metodología.



Fuente: elaboración propia.

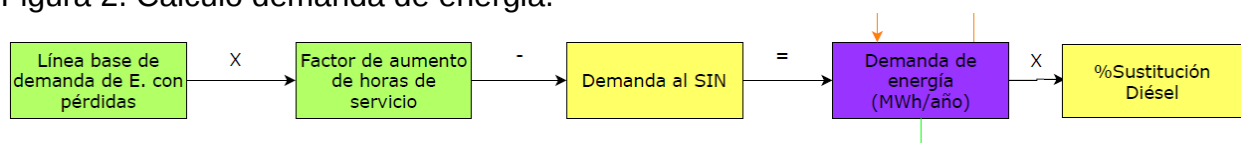
En términos generales, se realizó una revisión en paralelo de las calculadoras web y excel de la isla que dispone el MADS, se generó el árbol de cálculo actual para comprender la ruta utilizada por el ministerio a la hora de generar niveles en el apartado de energías renovables y zonas no interconectadas. Posteriormente se realizó una búsqueda bibliográfica identificando las variables que carecen de información actualizada y se procedió a realizar nuestra versión del árbol de cálculo para desarrollar nuestra propuesta.

Luego de establecer las entradas, salidas, variables y constantes en el árbol, se generan las emisiones por año y tecnología, las proyecciones del modelo se determinan y se entrega una calculadora actualizada con su debida justificación. Finalmente se realiza la propuesta de escenarios alternativos con información adicional recolectada de otra fuente.

Para actualizar los valores de las diferentes energías se genera el árbol de cálculo (Anexo B) de las diferentes etapas de la calculadora, identificando las entradas, las operaciones y los resultados expresados en emisiones, así como los porcentajes de participación para cada tecnología. Es necesario tener información actualizada para reducir la incertidumbre en las proyecciones de demanda a 2050; como se puede ver en la figura 2 y en los siguientes bloques, el esquema dispone de colores los cuales están asociados al tipo de dato que compone las diferentes etapas los cuales se encuentran especificados en el Anexo E. El árbol se encuentra dividido para poder enfatizar en la metodología empleada para la sustitución del diésel en la matriz.

La primera parte corresponde al resultado de la **Línea Base de la Demanda Energética con Pérdidas** por el **Factor de las Horas de Servicio**, restando ese resultado con la **Demanda al SIN** (San Andrés y Providencia al ser una ZNI el valor es de 0); obteniendo como resultado la **Demanda energética**. Es importante resaltar que, al tener la matriz alimentada únicamente con diésel, la demanda se abastece en su totalidad del combustible.

Figura 2. Cálculo demanda de energía.



Fuente: elaboración propia.

Se propone sustituir parte del porcentaje total de diésel utilizado para la generación de energía por tecnologías alternativas que ayuden a reducir las emisiones y diversifiquen

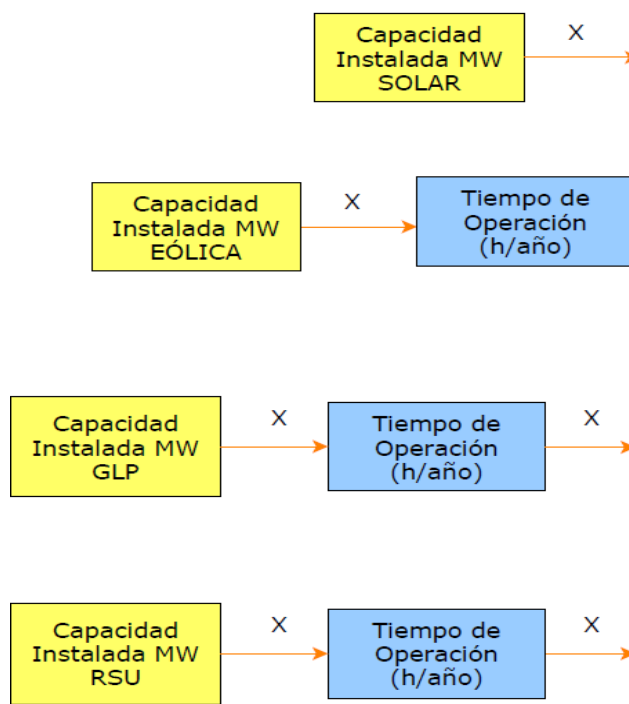
la matriz energética, disminuyendo la dependencia a los combustibles fósiles, este porcentaje es propuesto por la calculadora actual y aumenta en los diferentes niveles de ambición.

No obstante, el porcentaje de la planta de RSU, el uso de GLP y el diésel en menor porcentaje, aportan emisiones a la suma de GEI en Colombia, aunque no en la misma cantidad, pues estas alternativas reducen la cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera.

La guía para actualizar las cifras con respecto a las tecnologías en la calculadora de San Andrés y Providencia, y poder obtener un panorama actual sobre la proyección, implementación y uso de las tecnologías renovables en la isla, fue el informe publicado por la UPME ***“Integración de las Energías Renovables no Convencionales en Colombia”***, en donde se dedica todo un anexo a la isla de San Andrés y Providencia, y se exponen todas las proyecciones, que a la fecha, estaban en proceso de aprobación y desarrollo, y que se encontraban lideradas por la empresa que SOPESA para introducir tecnologías renovables que permitan incrementar el desarrollo en la isla y alejarse de la dependencia del diésel como fuente principal-mayoritaria de energía. Por otro lado, la calculadora de San Andrés presentaba límites para la implementación de fuentes renovables (Niveles) los cuales fueron respetados y así dedicar los esfuerzos de este trabajo a la actualización de información, realizando las correctas proyecciones por tecnología.

Figura 3. Capacidad Instalada.

Se realizó la selección de la tecnología por fuente para poder determinar la capacidad actual instalada en la isla y los planes que la gobernación y la empresa SOPESA establecieron para implementar nuevas fuentes en los próximos años como un proyecto de expansión. La figura 3 muestra la **capacidad instalada** por fuente como el punto de partida para la sustitución del diésel en el árbol; es necesario determinar una capacidad instalada realista, pues territorialmente hablando la isla no cuenta con espacios destinados a la instalación de equipos de gran magnitud.

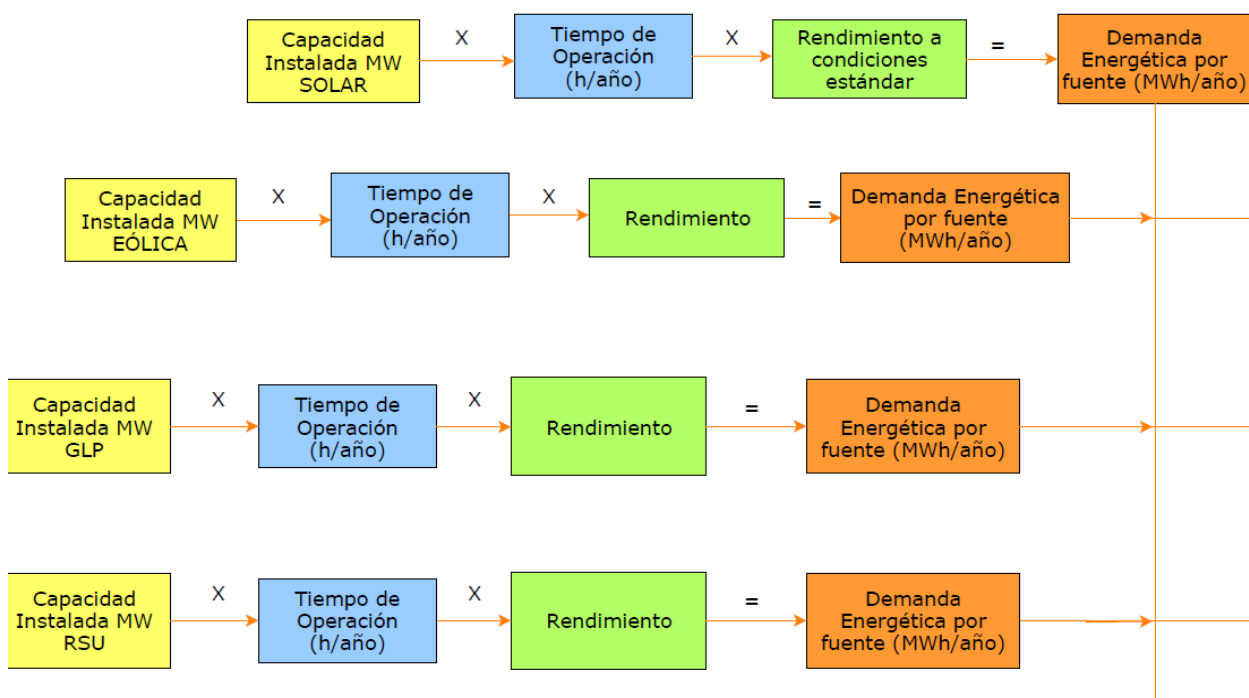


Fuente: elaboración propia.

Obteniendo la capacidad real instalada en MW se busca llegar a la potencia máxima de los diferentes equipos y su aporte a la matriz energética, pues es la manera de saber cuánto pueden llegar a remplazar en MW a la carga que suple el diésel a la demanda anual de la isla.

Para establecer la potencia anual por fuente y determinar la **demanda a suplir**, es necesario tener en cuenta algunos factores que alteran su valor energético final, ya que en campo los equipos no rendirán 100% las 24 horas del día. Es posible observar en la figura 4 la ruta de cálculo que se usó para cada tecnología y que permitió llegar a valores más reales de la oferta. Los cálculos utilizados para cada tecnología se encuentran más adelante en el desarrollo central de este documento, donde se enseña el paso a paso de los cálculos para obtener una **demanda por fuente**.

Figura 4. Cálculo de demanda de energía por fuente.

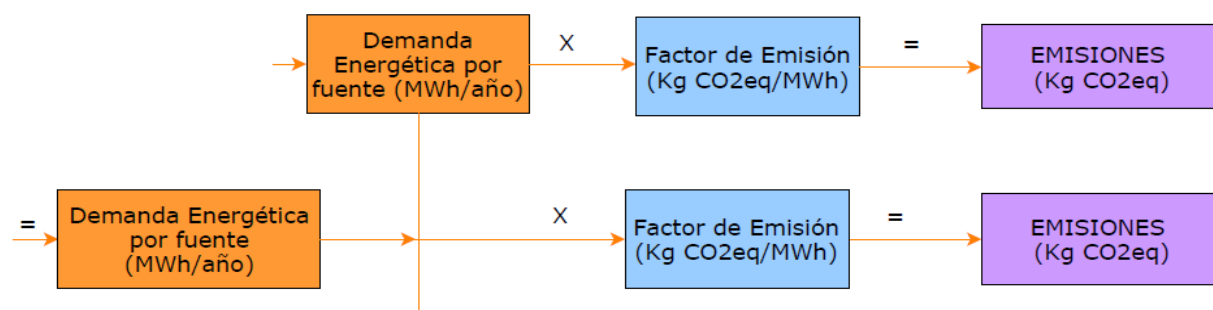


Fuente: elaboración propia.

Al finalizar el desarrollo del anterior esquema obteniendo el valor de la demanda energética por fuente se abren dos caminos que en este caso serán el resultado para exponer en la calculadora de San Andrés: el primero son las **emisiones por fuente** y su aporte a la suma de GEI y el segundo es la demanda de diésel a reemplazar. Si bien las fuentes de energía renovable se consideran limpias, es cierto que en los últimos años se ha demostrado que la instalación y operación de los equipos generan emisiones que

lamentablemente no se le atribuyen. Para este trabajo se determinaron las emisiones de la energía eólica y solar como se observa en la figura 5:

Figura 5. Cálculo de emisiones para las fuentes renovables de energía.

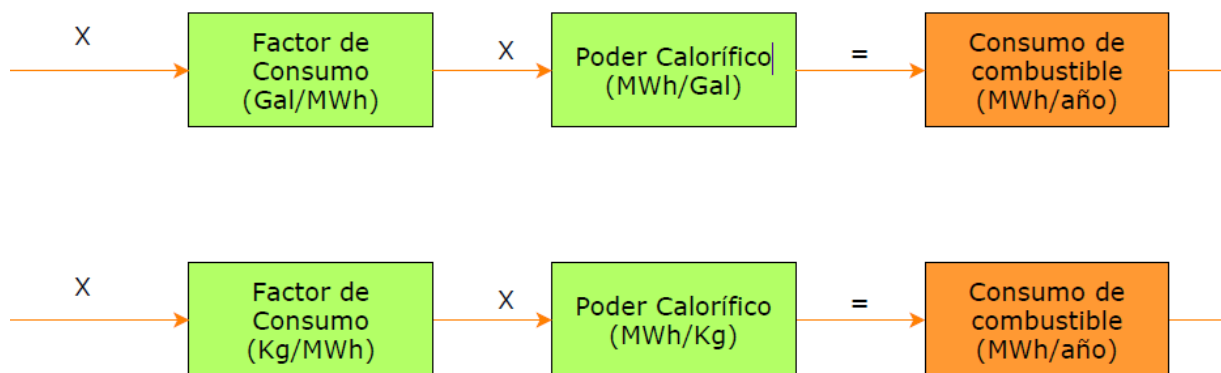


Fuente: elaboración propia.

Se utilizó un factor de emisión establecido por cada fuente y tecnología en fase de construcción, operación y mantenimiento, y de esa manera poder convertir dichas emisiones y/o cargas en dióxido de carbono equivalente, el cual representa la forma en la cual el país es evaluado en emisiones desde cualquier sector de la economía y el desarrollo.

Para determinar las emisiones de la planta de residuos y el GLP se definió un **factor de consumo** y el **poder calorífico** de cada uno (figura 6) para saber el **consumo de combustible** al año, pues en los residuos se utiliza como combustible los desechos que pueden estar compuestos de materiales orgánicos, así como inorgánicos los cuales al entrar en contacto con el calor reaccionan y generan emisiones a la atmósfera.

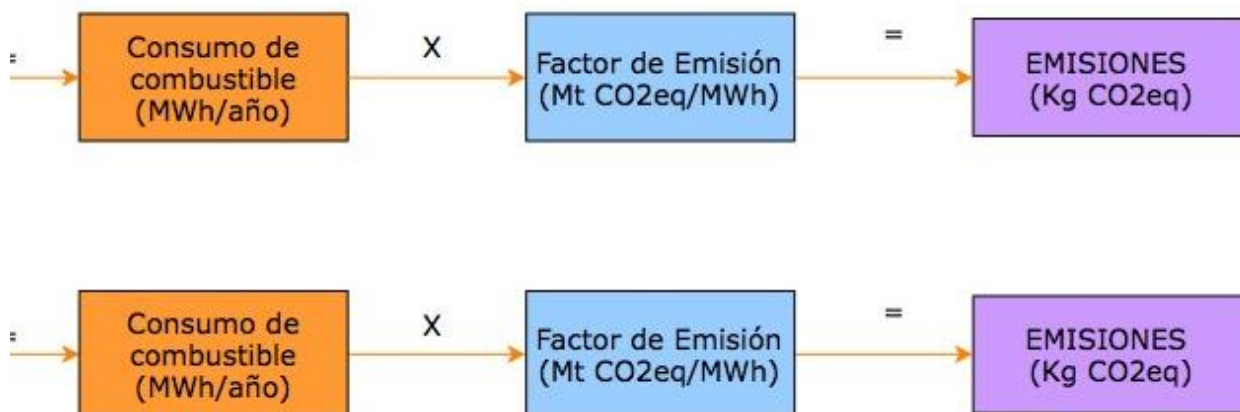
Figura 6. Cálculo de consumo de combustible.



Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, el GLP es gas natural que al ser quemado genera menor cantidad de emisiones, pero que en la práctica es necesario contar pues aporta a la emisión nacional. Teniendo el consumo anual de combustible, con ayuda de un **factor de emisión** para combustibles y plantas de incineración, es posible determinar las emisiones aportadas por la planta de residuos y el GLP, tal como se puede observar en la figura 7.

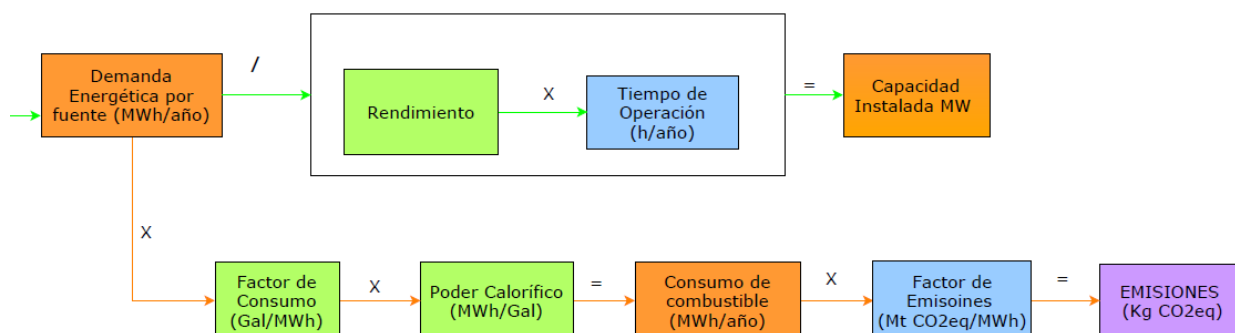
Figura 7. Cálculo de emisiones por el uso de GLP y de Residuos Sólidos Urbanos.



Fuente: elaboración propia.

Llegando a las emisiones de las tecnologías que van a sustituir el diésel en la matriz energética, es necesario determinar las emisiones (si bien en menor medida) que el diésel genera, así los niveles de la calculadora disminuyan su intervención. Es posible ver en la figura 8 el camino a recorrer para determinar las **emisiones** que aportará el uso (en menor medida) del diésel en las plantas generadoras de energía.

Figura 8. Cálculo de emisiones por parte del uso de diésel.

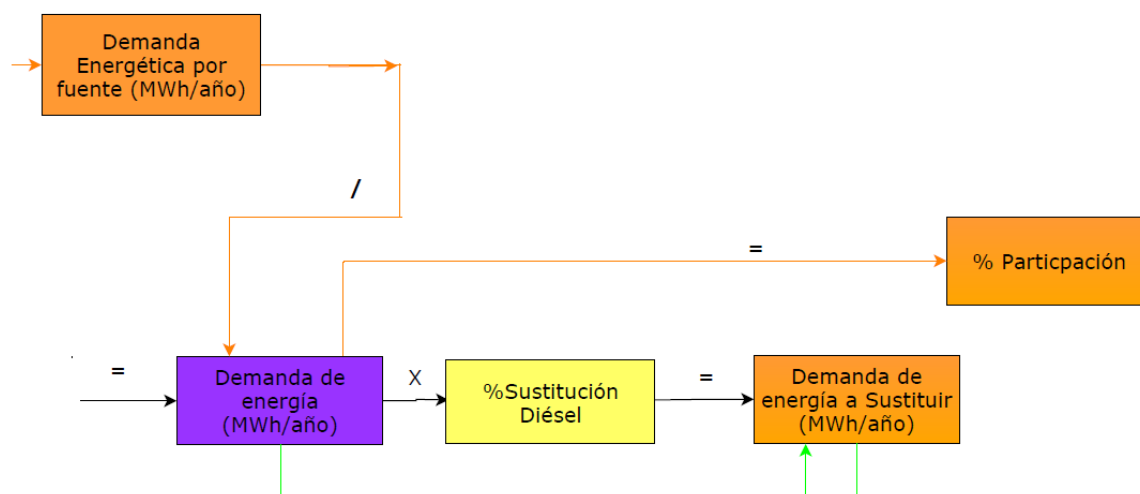


Fuente: elaboración propia.

Finalmente, se puede hacer la sumatoria de las emisiones aportadas por todas las partes de la matriz energética diversificada para los diferentes niveles que propone el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en su calculadora.

El segundo camino dentro del árbol de cálculo es determinar la demanda a reemplazar de diésel por parte de las tecnologías renovables no convencionales para Colombia y el **porcentaje de participación** dentro de la matriz energética. Luego de obtener la **demanda energética por fuente**, se busca reemplazar el porcentaje que la calculadora requiera en el momento para hacer la proyección (0%, 25%, 30% y 50%) y se determina los MW que cada fuente aportará para finalmente expresar dicho resultado porcentualmente (figura 9), cumpliendo con los límites que la calculadora interpone.

Figura 9. Cálculo del % de participación.



Fuente: elaboración propia.

4. DESARROLLO CENTRAL

4.1 CAPACIDAD INSTALADA

4.1.1 Diésel. De acuerdo con los datos obtenidos de los equipos utilizados para la generación de energía eléctrica en la isla de San Andrés y Providencia, se determinó una capacidad instalada de 474.392,37 MWh/año, superando la oferta que es de tan solo 286.266 MWh/año. Dicha generación se hace a través de seis equipos GM-EM L16-710G4b de 2,85 MW de potencia cada uno, dos Mirrlees Blackstone MB430 de 9,69 MW y dos equipos MAN de 14,4 [4, 44].

4.1.2 Residuos Sólidos Urbanos. En la actualidad la Isla de San Andrés y Providencia, cuenta con una Planta de Incineración de Residuos Sólidos Urbanos para aprovechamiento energético. Esta planta tiene una capacidad de 1MW y recibe aproximadamente 80 toneladas de residuos diarias, debido a la cantidad de residuos que se generan en la isla y a la falta de información, se supone que la incineración es continua y se realiza durante todos los días del año [4].

$$\text{Capacidad Instalada} = 1\text{MW} * 24 \text{ h/día} * 365 \text{ día/año}$$

$$\text{Capacidad Instalada} = 8.760 \text{ MWh/año}$$

4.1.3 Potencial Solar Fotovoltaico. La Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) propone en el Anexo 5 del documento “Integración de las Energías Renovables no Convencionales en Colombia” la implementación de 6,6 MW de energía solar para el año 2020. Según lo anterior, se obtuvo la potencia anual de esta fuente de energía de la siguiente forma:

$$\text{Horas Pico Solar} = \text{Irradiación media diaria} / \text{Potencia de radiación incidente}$$

Tabla 1. Datos requeridos para el cálculo de potencial.

Irradiación Media Diaria (KWh/m2*día)	4,5
Potencia de Radiación Incidente (KW/m2)	1
Horas Pico Solar	4,5

Fuente: elaboración propia, con base en [45] [46].

$$\text{Disponibilidad} = \text{horas pico solar} \times \text{días del año}$$

$$\text{Potencia} = \text{Potencia} \times \text{disponibilidad} \times \text{rendimiento a condiciones estándar}$$

$$\text{Disponibilidad} = \text{Horas Pico solar} * 365$$

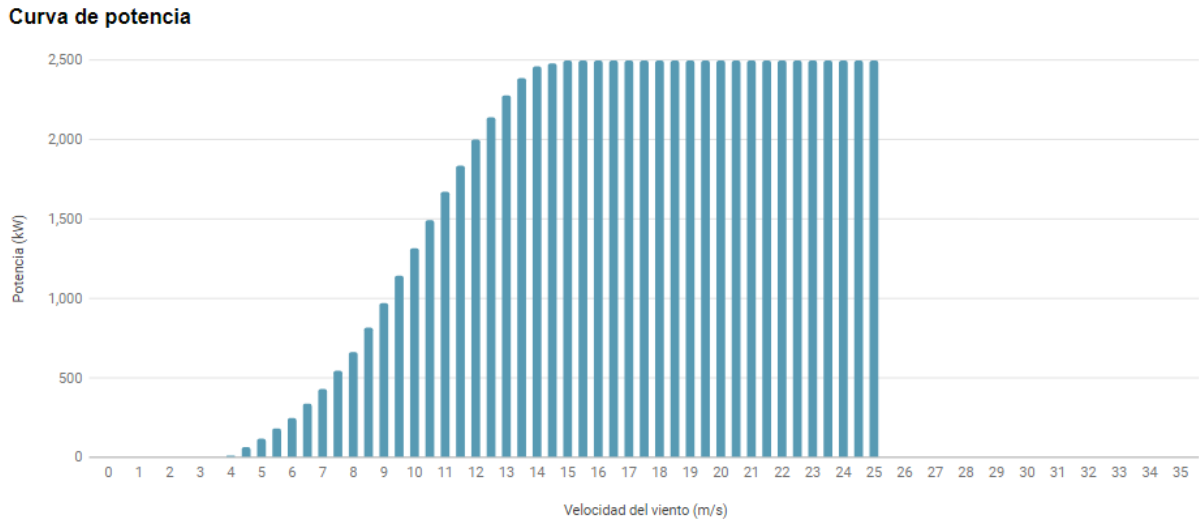
Tabla 2. Potencial Solar Fotovoltaico.

Capacidad Instalada (KW)	Disponibilidad (h/año)	Rendimiento a Condiciones Estándar	Potencia (MWh/año)
6.600	1.642,5	0,85	9.214,425

Fuente: elaboración propia, con base en [4].

4.1.4 Potencial Eólico. Para la estimación del potencial eólico, se tomó del documento “Integración de las Energías Renovables no Convencionales en Colombia” - Anexo 5, la capacidad instalada y la tecnología propuesta, Nordex N80 2500.

Gráfica 1. Curva de potencia Nordex N80-2500.



Fuente: [47].

Con la gráfica Potencia vs. Velocidad de dicha turbina, mostrada en la gráfica 1, y las velocidades obtenidas del atlas de velocidad del IDEAM a 80 metros de altura, se determinó el potencial eólico de la isla de San Andrés y Providencia. Para conocer el valor de la potencia mensual, se multiplicaron las horas del mes por los valores obtenidos de la Curva de potencia.

En la siguiente tabla se muestran los resultados del potencial eólico y los datos obtenidos del atlas eólico del IDEAM para cada uno de los meses del año.

Tabla 3. Potencial eólico mensual.

Mes	Velocidad 80m (m/s)	Día/Mes	Horas/Mes	Curva de Potencia (KW)	Potencia (KWh/mes)
Enero	11	31	744	1.675	1.246.200
Febrero	12	28	672	2.004	1.346.688
Marzo	8	31	744	667	496.248
Abril	10	30	720	1.319	949.680
Mayo	8	31	744	667	496.248
Junio	9	30	720	974	701.280
Julio	10	31	744	1.319	981.336
Agosto	8	31	744	667	496.248
Septiembre	6	30	720	251	180.720
Octubre	7	31	744	433	322.152
Noviembre	9	30	720	974	701.280
Diciembre	11	31	744	1.675	1.246.200

Fuente: elaboración propia, con base en [48] [47].

La suma de los valores de potencia mensual permite conocer la potencia de la turbina a lo largo del año, esta suma da un valor de 9164,28 MWh/año. En el documento, la UPME propone la implementación de 8 turbinas eólicas, lo cual permite un potencial eólico de 73.314,24 MWh/año.

4.1.5 Gas Licuado Petróleo. La UPME propone el uso de tres turbinas para GLP de 16,2 MW cada una, para completar una capacidad instalada de 48,8 MW [4]. Debido a que no se encontraron las especificaciones para dicha tecnología, se tomaron los datos de la turbina Siemens SGT-500 con una potencia de 19,1 MW, necesitando una máximo de dos turbinas para cubrir la demanda energética que la energía eólica y solar no alcanzan a sustituir [49].

Tabla 4. Potencia GLP.

Equipo	Potencia (MW)	Tiempo de uso (h/día)	Tiempo de uso (h/año)	Rendimiento (%)	Potencia por turbina (MWh/año)
Turbina Siemens SGT-500	19,1	24	8.760	33,80%	56.552,808

Fuente: elaboración propia, con base en [49] [50].

4.2 DEMANDA DE ENERGÍA

En la tabla 5 se presenta la demanda de energía de San Andrés en MWh/año. Estas cifras muestran la demanda energética neta, teniendo en cuenta las pérdidas de energía que se generan en la transmisión y distribución de energía.

Tabla 5. Demanda de energía por año.

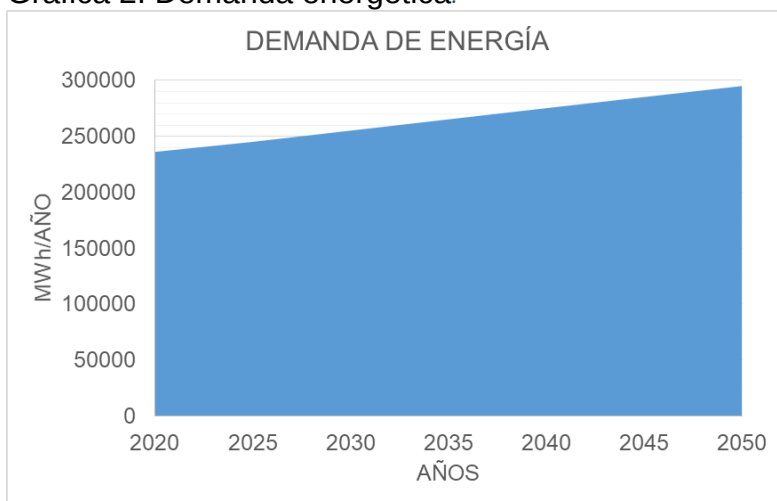
	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Demanda de energía	236.137	245.099,9	255.134	265.168,1	275.202,2	285.161,6	295.026,5

Fuente: elaboración propia, con base en [51].

En la actualidad, la demanda de energía mostrada en la tabla anterior es generada en gran parte por motores diésel y en menor parte por la planta de residuos sólidos.

Esta demanda se relaciona con el aumento poblacional y la población flotante de la isla, su aumento es constante puesto que no se tienen en cuenta la inclusión de medidas de eficiencia energética en la isla.

Gráfica 2. Demanda energética.



Fuente: elaboración propia.

4.3 DEMANDA ENERGÉTICA POR FUENTE

La Calculadora de Carbono 2050 de San Andrés y Providencia en el apartado “Energías Renovables en el ZNI” propone un porcentaje de sustitución de diésel para los diferentes niveles de ambición. Dichos porcentajes y su equivalente en MWh/año se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 6. Demanda de energía a sustituir por nivel.

	% Sustitución de Diésel	MWh/año
Nivel 1	0%	286.266,5
Nivel 2	25%	71.566,6
Nivel 3	30%	85.879,9
Nivel 4	50%	143.133,2

Fuente: elaboración propia, con base en [52].

De acuerdo a los porcentajes de sustitución propuestos en la Calculadora de Carbono 2050 en los diferentes niveles de ambición, a los potenciales solar y eólico calculados y a la demanda energética anual se determinó la generación de energía en MWh al año por fuente como se muestra a continuación.

4.3.1 Diésel. En la siguiente tabla se muestra la demanda en MWh al año, que debería cubrir el diésel en cada nivel, cada cinco años hasta el 2050, teniendo en cuenta los porcentajes de sustitución establecidos.

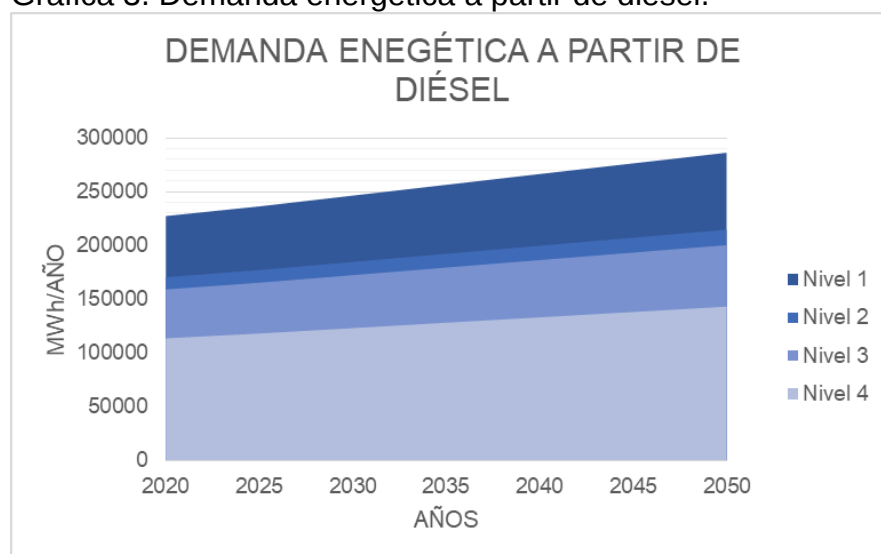
Tabla 7. Demanda energética de diésel por nivel y año.

Nivel/ Año	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
1	227.377	236.339,9	246.374	256.408,1	266.442,2	276.401,6	286.266,5
2	170.532,7	177.255	184.780,5	192.306,1	199.831,6	207.301,2	214.699,9
3	159.163,9	165.438	172.461,8	179.485,7	186.509,5	193.481,1	200.386,5
4	113.688,5	118.170	123.187	128.204	133.221,1	138.200,8	143.133,2

Fuente: elaboración propia.

Para el año 2020 en el nivel 2 se presenta una reducción de 56.844,2 MWh/año con respecto al nivel 1, y de 68.213,1 MWh/año y 113.688,5 MWh/año para los niveles 3 y 4 respectivamente; es importante recordar que el nivel 1 representa la situación actual de la isla en la cual no se realizan modificaciones en la generación de energía eléctrica de la isla a lo largo del tiempo. Para el año 2050 la disminución es de 71.566,6 MWh/año en el nivel 2, de 85.879,9 MWh/año en el nivel 3 y de 143.133,2 MWh/año en el nivel 4. Esta reducción se expresa en la gráfica 3.

Gráfica 3. Demanda energética a partir de diésel.



Fuente: elaboración propia.

4.3.2 Residuos Sólidos Urbanos. La Planta de incineración de Residuos Sólidos Urbanos al año 2013 no había entrado en funcionamiento. Sin embargo, se espera que al presente año y al año 2020 ya se encuentre en funcionamiento.

Debido a la baja capacidad instalada (1MW) y a que representa emisiones de gases efecto invernadero, no se plantea un aumento en su capacidad instalada en los diferentes niveles de ambición ni a lo largo del tiempo como se muestra a continuación.

Esta energía eléctrica generada a través de la planta de residuos sólidos urbanos, corresponde a un 3% de la matriz energética en San Andrés y Providencia.

Tabla 8. Demanda energética por residuos sólidos urbanos por nivel y año.

Nivel/Año	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
1-2-3-4	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760	8.760

Fuente: elaboración propia.

4.3.3 Solar Fotovoltaico. Al igual que la energía eólica, en el nivel 2 es necesaria la implementación del 100% de la capacidad solar fotovoltaica calculada, cubriendo esta tecnología el 12% de la sustitución de diésel.

Tabla 9. Demanda energética por generación solar fotovoltaica por nivel y año, % de participación.

Nivel/Año	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
1	0	0	0	0	0	0	0
2-3-4	9.214,4	9.214,4	9.214,4	9.214,4	9.214,4	9.214,4	9.214,4
% Participación	3,9	3,7	3,6	3,5	3,3	3,2	3,1

Fuente: elaboración propia.

La implementación del 100% de energía solar producida se implementa desde el nivel 2, por lo cual esta es constante desde el 2020 hasta el 2050, pasando de un 3,9% a un 3,1% de participación en la matriz energética.

4.3.4 Eólico. Debido a que al nivel 1 la generación de energía eléctrica sigue realizándose como en la actualidad, no hay generación eléctrica por fuentes renovables.

En el nivel 2 se propone un 25% de sustitución del diésel, equivalente a 71.566,62275 MWh/año, por lo cual es necesaria la implementación del 100% de la capacidad de generación eólica, cubriendo esta tecnología el 88% de la demanda a reemplazar.

Tabla 10. Demanda energética por generación eólica por nivel y año, % participación.

Nivel/Año	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
1	0	0	0	0	0	0	0
2-3-4	73.314,2	73.314,2	73.314,2	73.314,2	73.314,2	73.314,2	73.314,2
% Participación	31	30	28,7	27,6	26,6	25,7	24,8

Fuente: elaboración propia.

Como es necesario el potencial de generación eólica total para cubrir el 25% de sustitución de diésel, este se mantiene constante en los diferentes niveles y a lo largo del tiempo; modificando la matriz energética de la isla con un porcentaje del 29,9% de participación eólica en el año 2020 y un 23,9% en el año 2050.

4.3.5 Gas Licuado Petróleo. La inclusión de Gas Licuado Petróleo a la matriz energética de la isla es necesaria, debido a que el potencial generado a través de energía renovable propuesto por la UPME, no alcanza a cubrir el porcentaje de la demanda que va a ser sustituida en los niveles 3 y 4.

Con la potencia por turbina calculada en el punto 4.1.5 es posible cubrir la demanda del año 2050 en el nivel 3 y se obtiene un exceso de 56.552,8 MWh/año, brindando seguridad al sistema. Dicho exceso también permite disminuir las horas de uso hasta 2 horas al día en el tercer nivel.

Para cubrir el porcentaje de sustitución propuesto en el nivel 4, es necesaria la implementación de otra turbina GLP, lo que genera un exceso de 52.501,03 MWh/año, que permite al igual que en el nivel 3, un uso mínimo de 13 horas al día para el 2050.

Tabla 11. Demanda energética por GLP por nivel y año.

Nivel/Año	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
1-2	0	0	0	0	0	0	0
3	56.552,8	56.552,8	56.552,8	56.552,8	56.552,8	56.552,8	56.552,8
4	113.105,6	113.105,6	113.105,6	113.105,6	113.105,6	113.105,6	113.105,6

Fuente: elaboración propia.

4.4 CONSUMO DE COMBUSTIBLE

Para el cálculo del consumo de combustible requerido por cada fuente se siguió la siguiente ecuación:

$$\text{Consumo combustible} = \text{Demanda energía} \times \text{Factor de consumo} \times \text{Poder calorífico}$$

4.4.1 Diésel. Los datos de factor de consumo (Gal/MWh) que se muestran en la tabla 13, fueron tomados de la Calculadora de Carbono 2050 de San Andrés y Providencia, de la hoja III.a.

Tabla 12. Factores de consumo del diésel.

Nivel/Año	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
1	73,24	73,24	73,24	73,24	73,24	73,24	73,24
2	69,92	70,95	67,22	68,16	69,14	70,14	71,17
3	69,92	71,54	59,71	61,39	63,19	65,13	67,23
4	69,92	72,47	52,03	54,2	56,63	59,37	62,51

Fuente: [51].

En el año 2030 en los diferentes niveles se observa una reducción del factor de consumo de diésel, debido a que en la calculadora se propone la implementación de energías renovables a partir de este año, lo que reduciría el uso de diésel para la generación eléctrica, lo que se evidencia también en la tabla 13.

Con los factores de consumo anteriormente mostrados y el poder calorífico del diésel, 0,0386 MWh/Gal [53], se obtuvo el consumo de diésel en MWh por año, que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 13. Consumo de diésel.

Nivel /Año	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
1	642.774,4	66.8111,9	696.477,3	724.842,8	753.208,2	781.362,7	809.249,8
2	460.227,9	485.416,5	479.422,5	505.925,2	533.282,5	540.995,6	548.940,1
3	429.546	456.822,9	397.469,5	425.295,9	454.897	486.388,7	519.990,5
4	306.818,6	330.543,9	2473.90,2	268.203,7	291.194,6	316.695,1	345.345,5

Fuente: elaboración propia.

4.4.2 Residuos Sólidos Urbanos. El consumo de residuos sólidos urbanos se mantiene constante a lo largo de los años y en los 4 niveles debido a que no hay un aumento en la capacidad instalada. Los datos de factor de consumo y de poder calorífico de los residuos fueron tomados de la Calculadora de Carbono 2050 y corresponden a 1.700 Kg/MWh y 0,00433 MWh/Kg respectivamente [51].

Según la ecuación presentada al comienzo del punto, 4.4 Consumo de combustible, el consumo de residuos sólidos es de 64.482,36 MWh/año y se mantiene constante.

4.4.3 Gas Licuado Petróleo. El factor de consumo del GLP corresponde a 0,000132 galones por cada mega-vatio hora de energía producida; el poder calorífico es de 0,0246 mega-vatios hora por cada galón [51].

En la tabla 14 se encuentran los resultados del cálculo de consumo de GLP para los niveles 3 y 4 en los diferentes años, puesto que en los niveles 1 y 2 no hay implementación del gas.

Tabla 14. Consumo de GLP.

Nivel/ Año	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
3	0,184	0,184	0,184	0,184	0,184	0,184	0,184
4	0,367	0,367	0,367	0,367	0,367	0,367	0,367

Fuente: elaboración propia.

El aumento que se presenta en el nivel 4 se da por el aumento de la participación del GLP en la matriz energética, siendo necesario el doble del combustible para suplir la demanda requerida, a lo largo de los años se mantiene constante, pues su generación eléctrica también es constante.

4.5 EMISIONES

El cálculo de las emisiones de Gases Efecto Invernadero se realizó con los consumos hallados anteriormente y los factores de emisión que se muestran en la tabla 15, según la siguiente ecuación:

$$Emisiones = Consumo \times Factor \text{ de emisión}$$

Tabla 15. Factores de emisión de los combustibles.

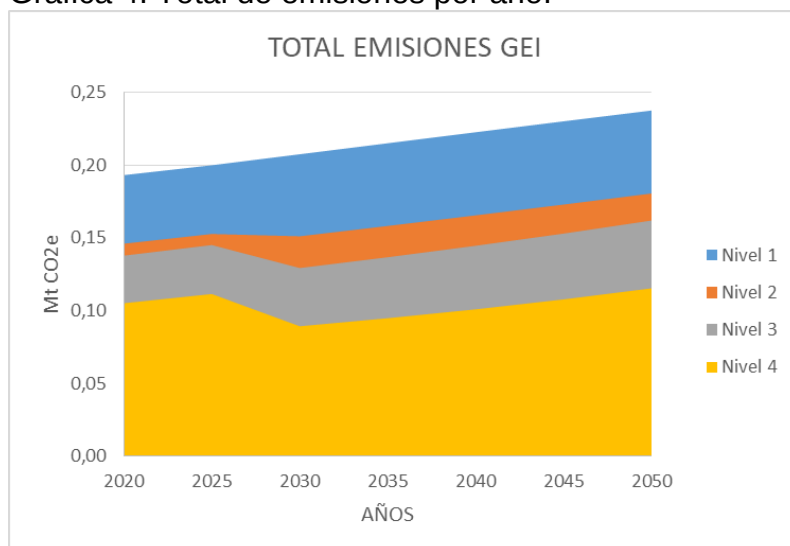
	CO2 (Mt)	CH4 (MT CO2e)	N2O (MT CO2e)
Diésel	2,66E-07	2,27E-10	6,70E-10
GLP	2,36E-07	7,56E-11	1,12E-10
Residuos	3,30E-07	2,27E-09	4,46E-09

Fuente: elaboración propia, con base en [51] [54].

Es importante aclarar que los factores de emisión utilizados son el resultado de la multiplicación del factor de emisión y el potencial de calentamiento global, y su cálculo se puede observar en la pestaña “Factores de emisión” del Anexo C.

En la gráfica 4 se observan en mega-toneladas de CO2 equivalentes las emisiones que se generan en cada nivel de ambición propuesto.

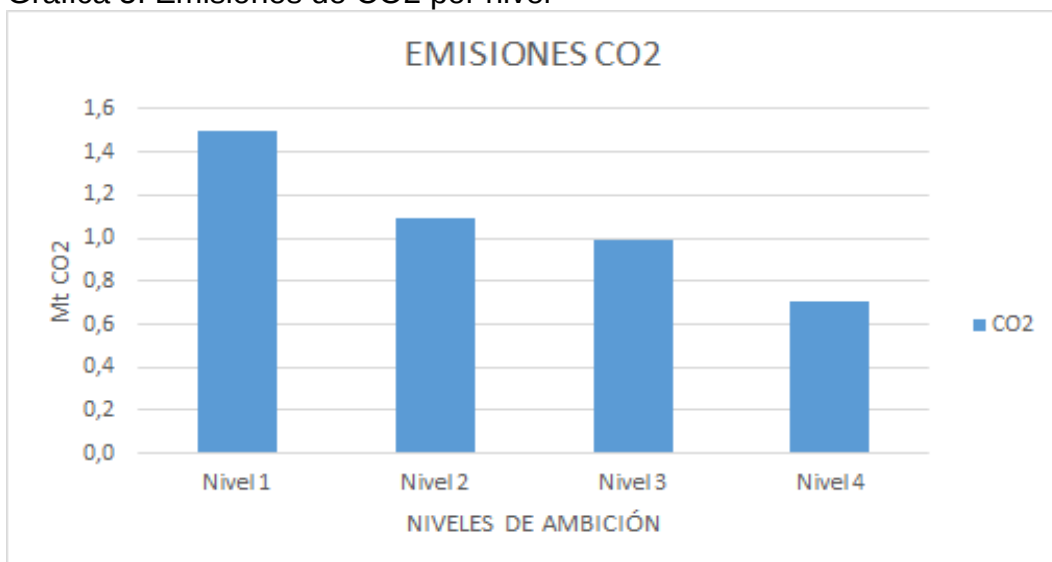
Gráfica 4. Total de emisiones por año.



Fuente: elaboración propia.

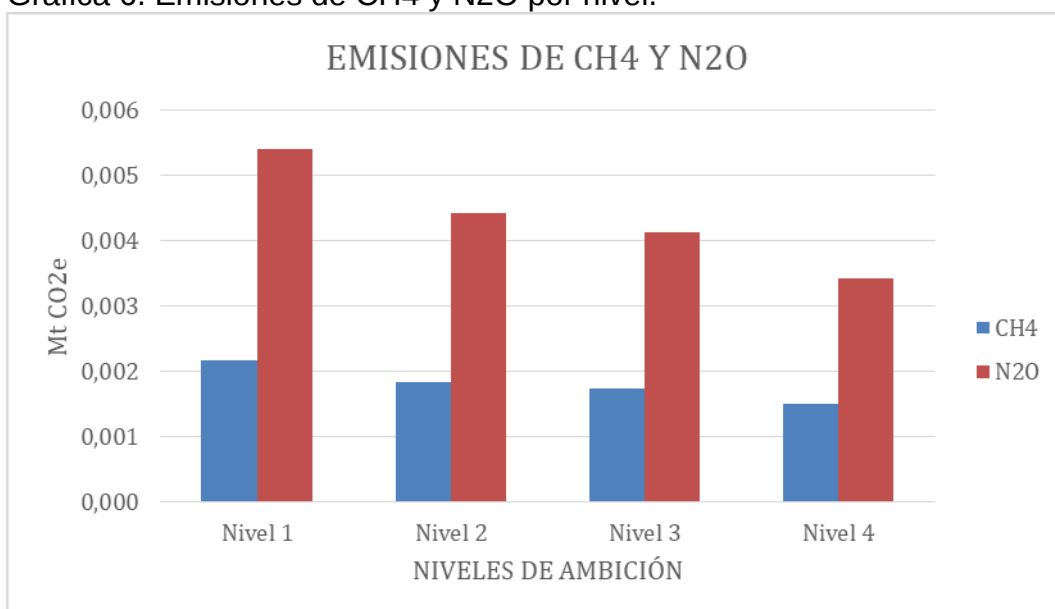
A continuación, se observan en las diferentes gráficas las emisiones de cada gas de efecto invernadero en los diferentes niveles de ambición.

Gráfica 5. Emisiones de CO2 por nivel



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 6. Emisiones de CH4 y N2O por nivel.



Fuente: elaboración propia.

Según las gráficas 5 y 6 se observa que el CO2 es el mayor contaminante presente en la generación de energía eléctrica, seguido del óxido nitroso y finalmente del metano.

De continuar la generación de energía eléctrica como se hace en la actualidad (Nivel 1) las emisiones promedio serían de 215.258,76 cada 5 años, con un total de emisiones a final de 2050 de 1'506.811,36 Toneladas de CO2 equivalente.

De implementar la sustitución de diésel propuesta, en el segundo nivel de ambición, se reducirían las emisiones en un 26% y en un 33% y 53% en los niveles 3 y 4 respectivamente, siendo proporcionales a los porcentajes de sustitución propuestos, debido a que el combustible utilizado actualmente es el que mayores emisiones genera.

En la siguiente tabla se muestra la cantidad de emisiones, en toneladas de CO2 equivalente, que se reducirían en cada nivel de ambición en cada año, de llegar a implementar la sustitución de diésel propuesta en la calculadora de carbono 2050 según un escenario planteado basado en los valores de potencial eólico y solar, y las tecnologías propuestas por la UPME en el anexo 5 del documento “Integración de las Energías Renovables no Convencionales en Colombia”.

Tabla 16. Reducción de emisiones cada año respecto a la línea base.

Reducción de emisiones (Ton CO2e/año)	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Reducción
Nivel 2	47.160,7	47.200,4	56.370,8	56.868,0	57.137,1	57.195,6	57.014,5	378.947,15
Nivel 3	55.349,5	54.831,9	78.243,8	78.387,7	78.057,9	77.167,2	75.642,0	497.680,04
Nivel 4	88.105,1	88.535,4	118.299,5	120.315,1	121.749,5	122.457,9	122.254,1	781.716,57

Fuente: elaboración propia.

De optar por la implementación de un nivel ambicioso, se lograría a final del año 2050 una reducción de 378.947,15 Toneladas de CO2 equivalente con respecto a la situación actual de la isla; para un nivel altamente ambicioso se obtendría una reducción de 497.680,04 toneladas de CO2 equivalente por parte el sector energético, finalmente de implementar el nivel 4 se reducirían 781.716,57 toneladas de gases efecto invernadero. La reducción de emisiones podría ser aún mayor, puesto que en el presente trabajo se está contemplando el uso constante de la planta de residuos sólidos y las turbinas GLP, pero como se mencionó en la sección 4.3.5 Demanda energética de gas licuado petróleo, el tiempo de uso de dichas turbinas podría reducirse aproximadamente en un 45% hasta un 91%, dependiendo del nivel de ambición de interés.

4.6 GENERACIÓN DE ESCENARIOS ALTERNATIVOS

Para la generación de escenarios alternativos, se consideró la información de potencial eólico dispuesta en el documento “Formulación de un Plan de Desarrollo para las Fuentes no Convencionales de Energía en Colombia (PDFNCE)” en el apartado de Potencial de la Energía Eólica en Colombia, e información sobre área disponible en techos para el aprovechamiento de energía solar y el potencial aprovechable en la isla presente en los anexos 2 y 5 del documento “Integración de las Energías Renovables no Convencionales en Colombia”.

La obtención de potencial eólico se basa en un supuesto realizado por el doctor Álvaro Pinilla, pueden instalarse cada kilómetro cuadrado 6 aerogeneradores de 3,6 MW cada uno y un factor de planta del 50%, siendo el área a utilizar, el valor determinante de la potencia eólica disponible en la isla. En el documento de referencia se estudian estas condiciones para la Guajira y se considera el uso del 1% del territorio, haciendo extensivos estos valores para todo el país [55].

Referente al potencial solar fotovoltaico de la isla, en el anexo 2 “Potencial y proyecciones para el aprovechamiento de energía solar a través de sistemas solar FV en techos urbanos” del documento mencionado anteriormente, se estima 1 Km² de área en techos estructural y técnicamente aprovechables para la isla, sugiriendo la utilización del 10% del área. De acuerdo a estimaciones presentadas en el anexo 5 del mismo documento, son necesarias 13 hectáreas para la instalación de 6,6 MW de potencial solar, es decir que se puede obtener un potencial solar de aproximadamente 51 MW por cada kilómetro cuadrado; siendo nuevamente el área a utilizar, la variable que determinaría el potencial solar de la isla.

Según las consideraciones anteriores, y los porcentajes de área a utilizar en el territorio y en techos, se obtuvieron un potencial eólico de 15.768 MWh/año y un potencial solar de 7.088 MWh/año (los cálculos se encuentran en las pestañas denominadas “Eólico 2” y “Solar 2” del anexo D). Estos potenciales alcanzarían a cubrir aproximadamente el 9% y el 7% de la demanda energética de los años 2020 y 2050 respectivamente; porcentajes que no logran cubrir el porcentaje de sustitución de diésel propuesto en la calculadora de carbono de San Andrés y Providencia para el nivel 2, dejando poco más del 15% de demanda sin cubrir en el 2020 y poco más del 17% en el 2050. Esto permite plantear dos escenarios en los cuales esta demanda es cubierta por combustibles fósiles, ya sea GLP o diésel, en este último se desatenderían los porcentajes de sustitución propuestos en la calculadora de carbono 2050 y aumentaría las emisiones de GEI con respecto a las del nivel 2 del primer escenario, por lo que se sugiere utilizar GLP.

A continuación se realiza una breve descripción de la configuración de los 4 escenarios planteados.

Escenario 1: aprovechamiento eólico y solar según la capacidad instalada propuesta por la UPME en el anexo 5 del documento “Integración de las Energías Renovables no Convencionales en Colombia” e implementación de GLP para cumplir con los porcentajes de sustitución de diésel propuestos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible.

Escenario 2: aprovechamiento eólico y solar según el área a utilizar, de acuerdo a lo sugerido por Álvaro Pinilla para el potencial eólico y a lo sugerido en documento de la UPME para solar fotovoltaico, e implementación de GLP para cubrir la demanda que no alcanza a cubrirse para cumplir con el % de sustitución propuesto en la Calculadora 2050.

Escenario 3: sustitución de porcentajes propuestos en la Calculadora de carbono 2050 únicamente por tecnologías eólica y solar, dejando de lado las recomendaciones respecto a las áreas a utilizar, dando mayor relevancia a la participación eólica.

Escenario 4: sustitución de porcentajes propuestos en la Calculadora de carbono 2050 únicamente por tecnologías eólica y solar, dejando de lado las recomendaciones respecto a las áreas a utilizar, dando mayor relevancia a la participación solar fotovoltaica.

A diferencia del escenario 1 en el cual la implementación de una segunda turbina de GLP se realizaba en el nivel 4, en el escenario 2 es necesaria la implementación desde el nivel 3, ya que a partir del año 2040 no se alcanzaría a cumplir con el porcentaje de sustitución de diésel propuesto, en el nivel 4 es la implementación de las dos turbinas GLP desde el año 2020.

El tercer escenario parte de la utilización de 0,1 Km² en techos (área sugerida), para la instalación de 7.088,02 MWh/año, para lograr la sustitución de diésel en su totalidad por energías renovables, principalmente eólica como se propone en el escenario 3, es necesaria la utilización del 6% del territorio de San Andrés y Providencia, lo que equivale a 1,62 Km², área que permite la instalación de 9 aerogeneradores y una generación de 141.912 MWh/año. De este modo se suple la demanda energética a sustituir en los diferentes años y niveles.

Para realizar una similitud con el primer escenario e instalar la misma cantidad de aerogeneradores (8) en el tercer escenario, es necesaria la implementación de turbinas GLP o aumentar el área a utilizar en techos por energía solar fotovoltaica, pues en el nivel 4 a partir del año 2040 habría una demanda energética de 4.968,8 MWh/año insatisfecha.

La utilización del 100% del área disponible en techos, no es suficiente para cubrir el 50% de sustitución de diésel requerido por el nivel 4, es por esto que el escenario 4 requiere del aumento de la potencia eólica, es decir, utilizar un área mayor al 1% del territorio, si bien también podría implementarse turbinas de GLP, este escenario busca prescindir del uso de energías fósiles para la generación de energía. De este modo, la implementación de 6 aerogeneradores sería suficiente para cubrir el 12% de la energía en 2020 y el 20% de la energía en 2050, que hacen falta para cumplir con el porcentaje de sustitución propuesto para este nivel.

En la siguiente tabla se muestran las emisiones de GEI obtenidas por la implementación de los diferentes escenarios en cada uno de los niveles de ambición.

Tabla 17. Emisiones por escenario.

Gases de efecto invernadero (Mt CO₂e/año)	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Nivel 1	1,50681	1,50681	1,50681	1,50681
Nivel 2	1,12786	1,12108	1,13432	1,15168
Nivel 3	1,00913	1,00234	1,01559	1,03295
Nivel 4	0,72509	0,71831	0,73155	0,74891

Fuente: elaboración propia.

Según las emisiones registradas por los diferentes escenarios, se puede concluir que el escenario 4 es la opción que genera mayores emisiones a la atmósfera, siendo este el último escenario a tener en cuenta para implementar. Por el contrario, el escenario 2 es el que registra los menores valores de emisiones de GEI en sus diferentes niveles, por lo tanto es considerada la mejor opción.

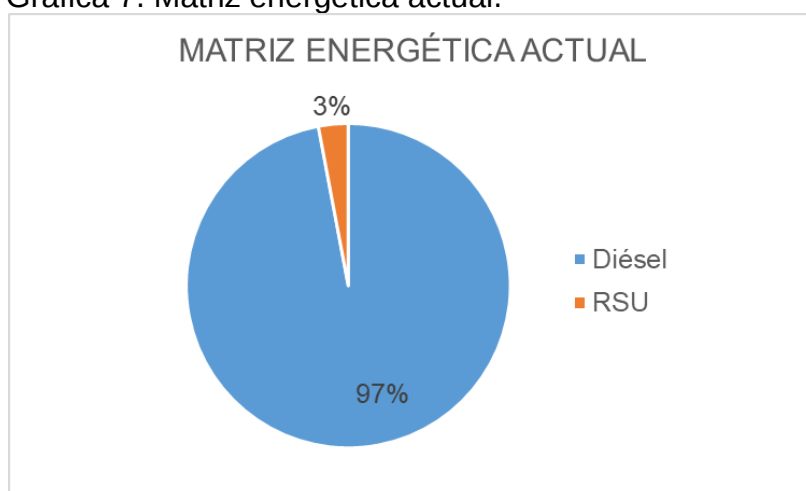
A pesar de que los escenarios 3 y 4 buscan la sustitución de diésel en su totalidad por energías renovables, y las emisiones mostradas en la tabla anterior hacen referencia a esto, también se realizó el cálculo de emisiones si se hubiera utilizado GLP para suplir la demanda necesaria para sustituir el diésel necesario en el nivel 4, obteniendo valores inferiores a los registrados en la tabla, es decir, en términos de emisiones, es preferible tener una matriz energética mixta, entre energías renovables y combustibles fósiles (como se puede observar en el anexo C en la pestaña de emisiones), a una matriz homogénea, adicional a esto, una matriz mixta brinda estabilidad y seguridad al servicio

debido a que diversifica la generación energética y no depende de una única entrada. Lo anterior se confirma también con los valores de emisiones obtenidos en el escenario 1, que son menores a los obtenidos por los escenarios 3 y 4.

4.7 MATRIZ ENERGÉTICA

La matriz energética actual de la isla se constituye principalmente de combustible diésel, ocupando este combustible el 97% de la misma, dejando el 3% restante a la generación eléctrica por medio de la planta de incineración de residuos sólidos urbanos.

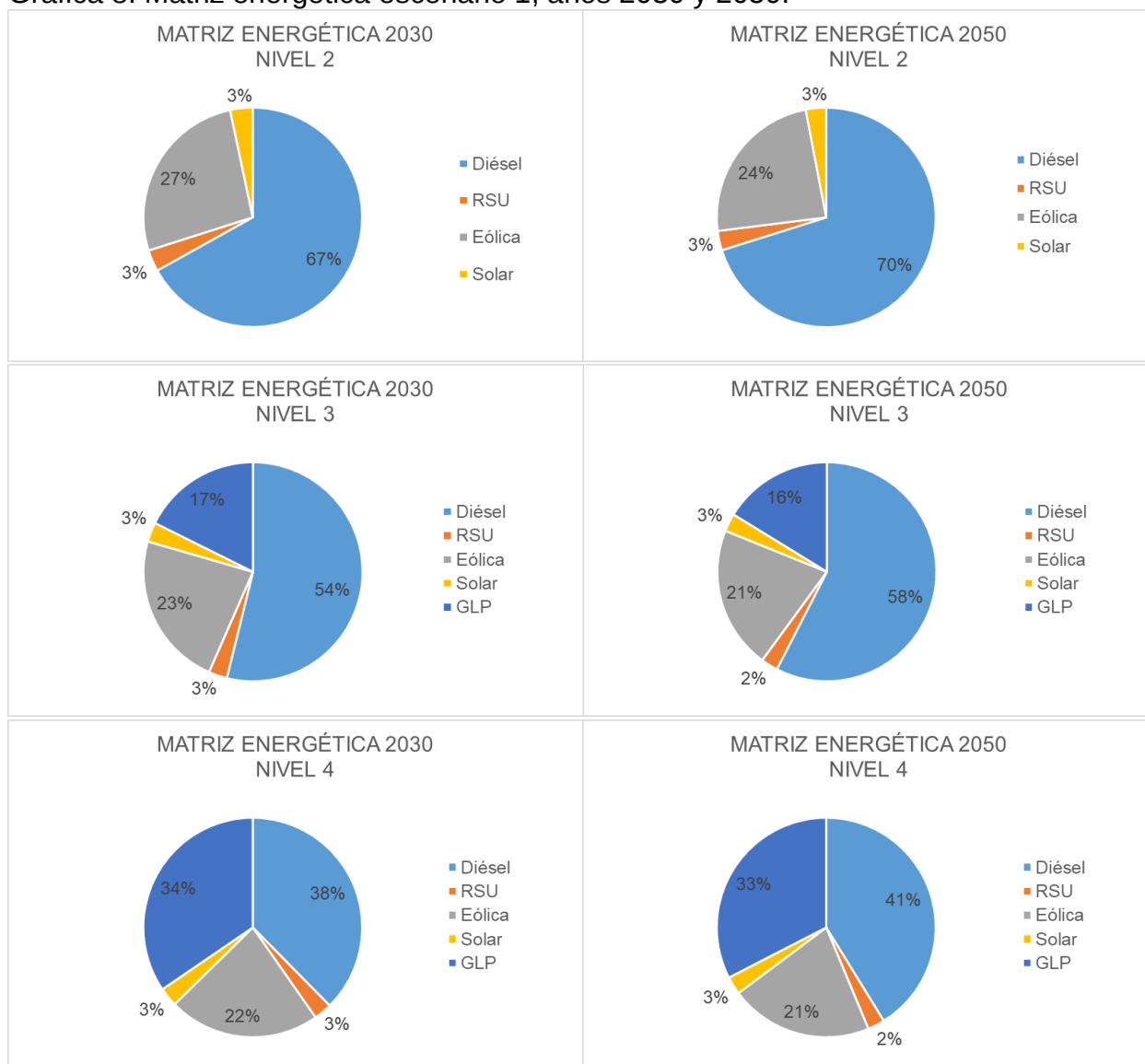
Gráfica 7. Matriz energética actual.



Fuente: elaboración propia.

4.7.1 Escenario 1. Con la propuesta de implementación de energías renovables, como la solar y la eólica, para la disminución de emisiones de gases efecto invernadero por parte del sector eléctrico de la isla, la diversificación de las matrices energéticas del primer escenario en los años 2030 y 2050 para los diferentes niveles se muestran en la gráfica 6.

Gráfica 8. Matriz energética escenario 1, años 2030 y 2050.



Fuente: elaboración propia.

La reducción de la participación de la energía eólica en el año 2050 y el aumento de la participación de combustibles fósiles se debe al aumento de la demanda energética durante el tiempo, pues la generación eólica es constante desde el año 2020 hasta el año 2050. Para el nivel 2, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible propone una sustitución del 25%, obteniendo en el año 2030 una sustitución del 30% y del 37% en el 2050.

En el nivel altamente ambicioso o nivel 3, el gas licuado petróleo entra a formar parte de la matriz energética de la isla dado que para los años 2045 y 2050 la oferta energética

por parte de las energías renovables no alcanzaría a cubrir el porcentaje de sustitución de diésel propuesto; según esto podría implementarse una turbina de GLP en los años intermedios entre el 2040 y el 2045, o como se plantea en este trabajo desde el año 2020 para brindar seguridad y estabilidad a la red. En este nivel la matriz encuentra un verdadero equilibrio, dado que en este nivel se diversifica y utiliza 4 tipos de tecnologías para remplazar el uso exclusivo de diésel

Al igual que en el nivel 2, en el nivel 3 se excede el porcentaje de sustitución propuesto por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, pues a partir del 2030 se propone una sustitución del 30% y se está reemplazando el 43% de diésel en dicho año y un 40% en el 2050.

En el nivel 4 la participación de la energía eólica y solar continúa constante, y se observa que la participación del GLP es cercana al uso diésel. En este nivel es necesaria la implementación de otra turbina GLP con las especificaciones ya mencionadas, pues en el año 2045 no se generan excedentes energéticos y para el año 2050 hay una demanda energética de 4.051,8 MWh que no alcanza a cubrirse con una turbina, al igual que en el nivel anterior se propone la instalación de dos unidades de gas licuado petróleo a partir del año 2020 para brindar seguridad y estabilidad al sistema.

En este nivel el reemplazo de diésel se da en un 59% para el año 2030 y en un 57% para el 2050, manteniendo una participación en energías alternativas aproximada al 30%, un logro significativo en la implementación de fuentes no convencionales de energía para la isla.

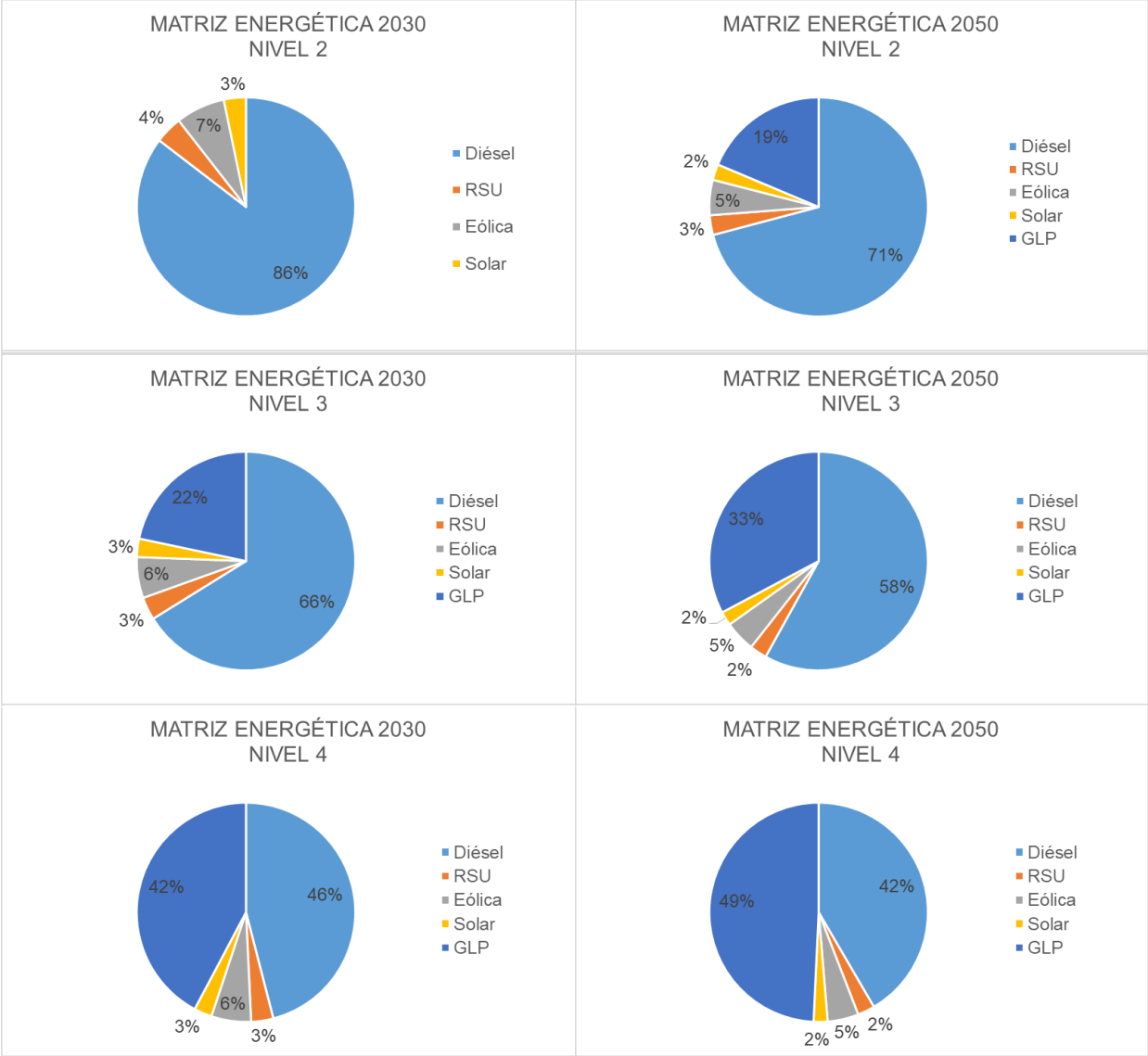
4.7.2 Escenario 2. A diferencia del primer escenario, la participación eólica es baja, y la participación de GLP aumenta para cubrir el porcentaje de sustitución requerido por cada nivel, la participación solar sigue constante y se observa un aumento en la participación de GLP a lo largo del tiempo.

El nivel 2 se encuentra dominado por el uso de diésel, la introducción de energías limpias es solo del 10% y no proporciona un cambio significativo en las emisiones hasta la llegada del GLP en el nivel 3, pues el uso de diésel disminuye 20 puntos porcentuales aunque la matriz se encuentre dominada por en mayoría por combustibles fósiles.

El nivel 4 se considera el momento donde la matriz energética es apoderada por el GLP relegando el uso diésel a un segundo plano, por otra parte, el uso de fuentes de energía alternativa no representa más del 10% aunque remplazar el combustible es una manera de disminuir las emisiones en los siguientes años. Se considera este escenario en casos

donde la implementación de tecnologías renovables resulte contraproducente para el territorio pero se quiera invertir en disminuir las emisiones que aporta la isla.

Gráfica 9. Matriz energética escenario 2, años 2030 y 2050.

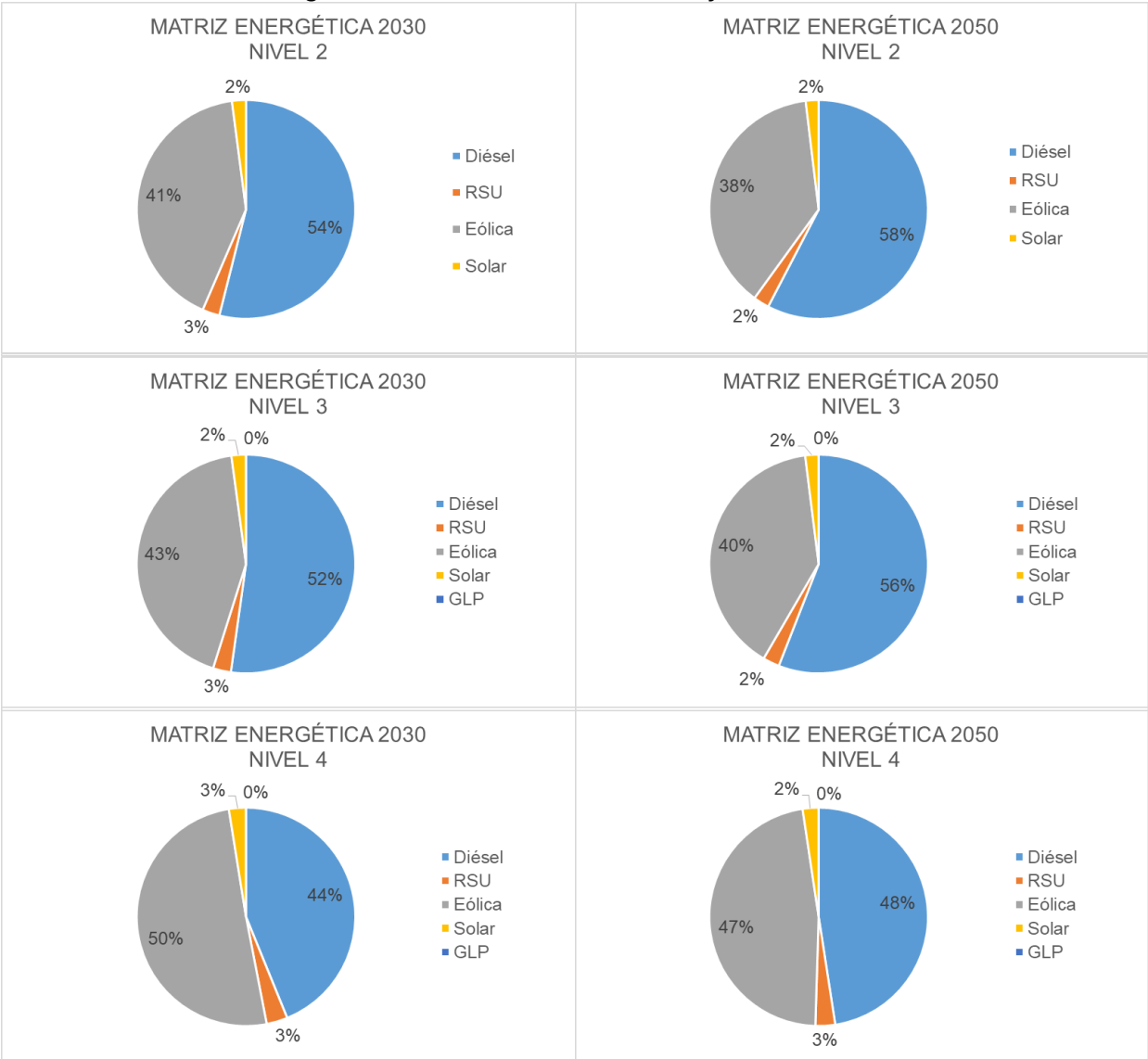


Fuente: elaboración propia.

4.7.3 Escenario 3. En la matriz del tercer escenario la participación solar es igual a la de los escenarios anteriores, siendo mayor la participación eólica en cuanto a la sustitución de diésel. Por primera vez se puede evidenciar la sustitución de casi la mitad de la matriz por una fuente renovable la cual requiere una gran logística e inversión para su puesta en marcha en el territorio, así como políticas que permitan la introducción de esta nueva cultura en la zona, además es necesario un gran área y tecnología que genere la suficiente potencia con la velocidad de viento que se tiene en la isla (Anexo C pestaña

Eólica). No varía mucho el uso de energía eólica en los niveles, pero debido al incremento de la demanda energética durante el tiempo, el porcentaje de participación eólica se reduce en 3 puntos porcentuales en el año 2050 con respecto al 2030. La participación de GLP es nula por lo que la mitad de la matriz está libre de combustibles fósiles.

Gráfica 10. Matriz energética escenario 3, años 2030 y 2050.



Fuente: elaboración propia.

4.7.4 Escenario 4. En este último escenario la participación solar aumenta significativamente, logrando la sustitución del 20% de diésel en el segundo nivel y del 24% en el cuarto nivel de ambición. Se observa una similitud con el escenario 3 en donde aproximadamente la mitad de la matriz es remplazada para sustituir el uso de combustibles fósiles. Ambos escenarios requieren inversión, voluntad política,

introducción en la zona para asimilación de la población y una gran extensión de territorio; cualquier factor de los nombrados anteriormente son pieza fundamental para el desarrollo y cumplimiento de la propuesta, por eso, es un escenario con proyecciones ambiciosas, que bajo los factores correctos se puede desarrollar. Adicionalmente, para sustituir los porcentajes requeridos, se requiere una participación eólica alta, situación que diferencia el anterior escenario. A lo largo de los años los porcentajes varían poco, aunque la sustitución de diésel brindada por las tecnologías eólica y solar disminuyen debido al aumento de la demanda energética para 2050. Al igual que en el escenario anterior, la participación de GLP es nula, pues en estos se propone la sustitución de diésel únicamente con tecnologías renovables.

Gráfica 11. Matriz energética escenario 4, años 2030 y 2050.



Fuente: elaboración propia.

5. IMPACTO SOCIAL, HUMANÍSTICO DEL PROYECTO

Debido a que el proyecto se enfoca en determinar el potencial eólico y solar de San Andrés y Providencia, así como su generación de energía eléctrica y aporte a la mitigación de los gases de efecto invernadero, su impacto para la toma de decisiones con respecto a las acciones para mitigar el cambio climático incrementará. Adicionalmente, es importante resaltar que se obtendría un registro para futuras propuestas que permitirá establecer las bases para la investigación en tecnologías para la generación de energía eléctrica en zonas no interconectadas aprovechando su potencia energética.

Teniendo como excusa la generación de energía eléctrica en el archipiélago, se pueden satisfacer necesidades básicas, como la generación constante del servicio de energía eléctrica, almacenando los excedentes energéticos y el acceso a agua potable utilizando la energía producida en plantas desalinizadoras. De igual modo puede implementarse un sistema de vehículos eléctricos, abastecidos por energía renovables; llegando a convertir al Archipiélago en una isla verde.

Sumado a lo anterior y debido al potencial de la isla, se puede pensar en la eliminación de los subsidios energéticos que hay en la actualidad e invertir estos recursos en diferentes áreas. Por otra parte, esta investigación será punto de referencia para otros proyectos que busquen actualizar y/o desarrollar información con respecto a la matriz energética de diferentes locaciones en el país, desde ZIN hasta ciudades principales. El mayor impacto social es integrar las islas de San Andrés y Providencia a la economía emergente en que se encuentra Colombia, haciéndola parte de proyectos de desarrollo que beneficien a la comunidad y mejoren el futuro de las islas; resaltando el potencial energético renovable de esta zona como territorio colombiano incluyéndola en las discusiones referentes para cada gobierno.

6. CONCLUSIONES

- Debido a la ubicación geográfica de San Andrés y Providencia, la isla presenta un potenciales solar, eólico costa adentro, eólico costa afuera y mareomotriz importantes, estos últimos, requieren de mayor investigación debido a los impactos en el medio marino que pueden generar.
- El potencial eólico costa adentro de la isla es mucho mayor al potencial solar según el área disponible en los estudios.
- La determinación de los potenciales de las energías renovables permite establecer unos porcentajes de participación en la matriz energética más cercana a la realidad y menos arbitraria, puesto que se obtienen según las condiciones de la isla y de las tecnologías.
- En el segundo escenario propuesto se obtuvo la menor cantidad de emisiones de gases efecto invernadero, lo que señala que una matriz energética mixta genera mayores beneficios entre los que se encuentran la seguridad y estabilidad del servicio eléctrico.

7. RECOMENDACIONES

Es importante generar información referente al sector energético y potenciales de energías renovables para la isla de San Andrés y Providencia, teniendo en cuenta que la inversión de nuevos proyectos de generación eléctrica puede estimular el desarrollo de la isla y ser un destino turístico aún más importante.

El archipiélago de San Andrés y Providencia es objeto de interés de diversos sectores y entidades, quienes plantean proyectos y escenarios que convertirían al archipiélago en una isla verde, pero son pocos los cronogramas que se cumplen y los proyectos que se desarrollan a causa de la falta de información abierta al público y los altos costos que conlleva el levantamiento de información para inversores privados.

Para complementar la investigación realizada, se sugiere realizar los cálculos de costos y área necesaria a utilizar para la implementación de las diferentes alternativas, y determinar si pueden eliminarse los subsidios energéticos que se ofrecen en la isla en la actualidad y su posible inversión en otras áreas, que permitan el desarrollo de la isla.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Giddens, «La Política del Cambio Climático,» *Revista de Ciencia Política y Gobierno*, vol. 1, nº 2, pp. 223-228, 2014.
- [2] C. García Arbeláez, G. Vallejo López, M. L. Higgins y E. M. Escobar, «El Acuerdo de París. Así Actuará Colombia Frente al Cambio Climático,» WWF-Colombia, Cali, 2016.
- [3] Departamento Nacional de Planeación, «Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 - Tomo 2,» Bogotá, 2015.
- [4] Ministerio de Minas y Energía; Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), «Integración de las Energías Renovables no Convencionales en Colombia,» La Imprenta Editores S.A., Bogotá, 2015.
- [5] J. R. Gómez, J. E. Afanador y J. L. Rodríguez, «Hacia la sostenibilidad eléctrica en el Archipiélago de San Andrés y Providencia y Santa Catalina, Colombia: análisis de alternativas,» BID, 2016.
- [6] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Contexto Internacional - Calculadora Colombia 2050,» [En línea]. Available: <http://calculadora2050.minambiente.gov.co/es/contexto-internacional>.
- [7] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «¿Qué es la Calculadora de Carbono 2050? - Calculadora Colombia 2015,» [En línea]. Available: <http://calculadora2050.minambiente.gov.co/es/que-es-la-calculadora-de-carbono-2050>.
- [8] United Nations, «United Nations Framework Convention on Climate Change,» 1992. [En línea]. Available: https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/conveng.pdf.
- [9] United Nations, «Climate Change - United Nations,» 15 Febrero 2018. [En línea]. Available: <http://www.un.org/en/sections/issues-depth/climate-change/>.
- [10] NASA, «The Consequences of Climate Change. Global Climate Change: Vital signs of the Planet,» 2017. [En línea]. Available: <https://climate.nasa.gov/effects/>.

- [11] Y. Hernández, Â. G. Pereira y P. Barbosa, «Resilient futures of a small island: A participatory approach in Tenerife (Canary Islands) to address climate change,» *Environmental Science & Policy*, vol. 80, pp. 28-37, 2018.
- [12] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), «Colombia Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático,» 13 Diciembre 2001. [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/40860/219937/primeracomunicacionnacional/b99663bb-9023-47d1-b54a-41f74cca0b1e>.
- [13] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Medidas Priorizadas para la Contribución Nacionalmente Determinada de Colombia en Mitigación de GEI,» 25 Agosto 2016. [En línea]. Available: http://www.minambiente.gov.co/images/Medidas_NDC_25_agosto-1_Version_Comunicaciones_2.pdf.
- [14] *Decreto 298*, 2016.
- [15] Ministerio de ambiente y Desarrollo Sostenible, «Mecanismos de Desarrollo Limpio MDL,» [En línea]. Available: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/466-plantillacambio-climatico-22#documentos-relacionados>.
- [16] Á. V. Bohórquez, «Calculadora 2050 - Sector de Generación de Electricidad,» Bogotá, 2015.
- [17] PNUD, «Calculadora Colombiana de CARbono 2050,» 2015.
- [18] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM); Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; PNUD, «Estrategia Nacional de Educación, Formación y Sensibilización de Públicos Sobre Cambio Climático,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/herramientas-de-educacion-innovacion-y-planificacion-territorial/estrategia-nacional-de-educacion-formacion-y-sensibilizacion-a-publicos-sobre-cambio-climatico#enefspcc>.
- [19] Á. Cadena, R. Delgado, M. Espinosa, M. Hernández y K. Ovalle, «Oferta de Energía: generación eléctrica, petróleo, gas y carbón,» Marzo 2014. [En línea]. Available: http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/estudios_de_costos_de_abatimiento/capitulos_sectoriales_/Energia_Oferta_V5_Doc.pdf.

- [20] SOPESA S.A. E.S.P., «Historia - Sopesa,» [En línea]. Available: <http://sopesa.com/historia/>.
- [21] M. A. Gutiérrez Almonacid, «Diseño de una turbina eólica para abastecer las necesidades básicas de un hogar promedio Colombiano,» 2011. [En línea]. Available: <https://www.slideshare.net/JuanCruzMoreno/gutierrez-monica-2014-tesis-pregrado-diseo-de-una-trubina-eolica-san-andres-colombia-1>.
- [22] Gobernación Departamento Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, «Plan de Desarrollo Departamental 2016-2019,» Abril 2016. [En línea]. Available: http://www.sanandres.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=131.
- [23] M. S. Zubillaga, «El destino de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Buenos Aires. Breve diagnóstico y algunas alternativas.,» *Agronomía & ambiente*, vol. 1, nº 2, pp. 79-89, 2013.
- [24] H. D. Patiño Duque, «Diseño de la planta de utilidades de un proceso de incineración de residuos sólidos urbanos - un caso de estudio: Risaralda, Colombia.,» 2017. [En línea]. Available: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/8202/628445P298.pdf?sequence=1>.
- [25] E. Bent, «Así va el proceso judicial de la planta incineradora RSU,» *El Isleño*, 25 Febrero 2018.
- [26] Ministerio de Minas y Energía, «Potencial de mitigación de gas efecto invernadero - GEI del sector minero-energético,» 2017. [En línea]. Available: https://www.minminas.gov.co/documents/10192/23966980/240118_potencial_mitigacion_GEI_SME.pdf/76f31f95-3ec5-4db2-9d7f-fff54f070c9e.
- [27] Instituto de Hidrología, Metereología y Estudios Ambientales (IDEAM); PNUD; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; DNP; Cancillería, «Inventario Nacional y Departamental de Gases Efecto Invernadero - Colombia,» Noviembre 2016. [En línea]. Available: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023634/INGEI.pdf>.
- [28] IES Villalba Hervás, *Combustible fósiles*, 2012.
- [29] F. Posso, «Energía y Ambiente: pasado, presente y futuro. Parte dos: sistema energético basado en energías alternativas.,» *Geoenseñanza*, vol. 7, nº 1-2, pp. 54-73, 2002.

- [30] Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), «Derivados del petróleo - El Diésel,» [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/241728/DieselFT.pdf>.
- [31] P. j. Reyes Torres, «Combustibles Fósiles y Contaminación,» *Revista de la Facultad de Ingeniería*, pp. 87-92, 1999.
- [32] L. Cáceres Graziani, «Reservas de Gas Natural en el mundo,» de *El Gas Natural*, Callao, Grupo S.R.L, 2002, pp. 35-44.
- [33] gasNatural; Dirección General de Industria, Energía y Minas. Consejería de Economía e Innovación Tecnológica, «El Gas Natural. El recorrido de la energía,» 2002. [En línea]. Available: <https://www.fenercom.com/pdf/aula/recorrido-de-la-energia-gas-natural.pdf>.
- [34] L. Latorre Chacón, «Tecnología del Gas Natural,» *Ingeniería e Investigación*, pp. 77-86.
- [35] A. Di Pelino, G. Vianco, F. Iglesias, P. Katz y M. Daniele, «Informe sobre la situación actual de gas licuado petróleo,» 2002.
- [36] Herrera Jaime, Beatriz; Jaramillo Villa, Martha Patricia; Romero Romero, Luis Carlos; Vargas Rojas, Andrés; Unidad de Planeación Minero Energética (UPME); Ministerio de Minas y Energía, «La cadena del gas licuado de petróleo en Colombia,» [En línea]. Available: http://www.upme.gov.co/docs/glp_web.pdf.
- [37] World LPG Association - WLPGA , «LPG Exceptional Energy ¿Qué es?,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.wlpga.org/wp-content/uploads/2015/10/WLPGA-EE-PDF-ES.V1.pdf>.
- [38] Unidad de Planeación Minero Energética(UPME), «Energías Renovables: descripción, tecnologías y usos finales,» [En línea]. Available: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Iluminacion/CarFNCE.pdf>.
- [39] P. Puig y M. Jofra, «Energías Renovables para Todos: Solar Fotovoltaica,» 2007. [En línea].
- [40] CELSIA, «Empezó a generar energía Celsia Solar Yumbo, primera granja fotovoltaica de Colombia,» 2 Septiembre 2017. [En línea]. Available: <https://blog.celsia.com/sala-de-prensa/empezamos-a-operar-la-granja-de-energia-solar>.

- [41] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME); Ambiental Consultores; TAU Consultora Ambiental, «Informe Marco Ambiental Estratégico Consensuado Evaluación Ambiental del PERGT,» Bogotá D.C., 2010.
- [42] L. Rodríguez Arbeláez, «Colombia,» de LAWEA, *Anuario de Energía Eólica en America Latina y el Caribe 2009-2010*, Guadalajara, 2010, pp. 22-24.
- [43] Unión Temporal ACON; OPTIM; Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), «Estudio para determinar la vulnerabilidad y las opciones de adaptación del sector energético colombiano frente al cambio climático,» Bogotá D.C., 2013.
- [44] R. Echeverri Giraldo, «Avaluo de la Maquinaria y Equipo Propiedad de Corelca S.A. E.S.P. en Liquidación,» 2012. [En línea]. Available: <https://edoc.site/avaluo-de-maquinaria-4-pdf-free.html>.
- [45] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), «Atlas de Radiación Solar,» Bogotá D.C., 2018.
- [46] SunFields Europe, «Energía Fotovoltaica – Radiación, Geometría, Recorrido óptico, Irradiancia y HSP,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/energia-fotovoltaica-radiacion-geometria-recorrido-optico-irradiancia-y-hsp/>.
- [47] The Wind Power - Wind Energy Market Intelligence, «Nordex N80/2500 Curva de potencia,» 2018.
- [48] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), «Atlas de Vientos - Velocidad Promedio de Viento a 80 metros de altura (m/s),» Bogotá D.C., 2018.
- [49] Siemens AG, «SGT-500 Industrial Gas Turbines,» 2011. [En línea]. Available: https://www.energy.siemens.com/us/pool/hq/power-generation/gas-turbines/SGT-500/downloads/SGT-500_for_PG_EN.pdf.
- [50] A. La Seta, A. Meroni, J. Graa Andreassen, L. Pierobon, G. Perisco y F. Haglind, «Combined Turbine and Cycle Optimization for Organic Rankine Cycle Power Systems—Part B: Application on a Case Study,» *Energies*, vol. 9, nº 6, pp. 2-17, 2016.
- [51] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *model_san_andres.xlsx Calculadora de Carbono 2050 Versión Excel*.

- [52] Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, «Energía renovable en las Zonas no Interconectadas,» [En línea]. Available:
<http://calculadoracarbono.minambiente.gov.co/assets/onepage/12.pdf>.
- [53] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), «Proyección de demanda de combustibles líquidos en Colombia - Poder Calorífico de los Energéticos,» Diciembre 2016. [En línea]. Available:
<http://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/ProyecciónDemandaLíquidos-Rev2016.pdf>.
- [54] D. Gómez , J. Watterson, B. Americano, C. Ha, M. Gregg, E. Matsika, L. N. Namayanga, B. Osman-Elasha, J. Kalenga Saka y K. Treanton, «Combustión Estacionaria,» de *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.*, Japón, IGES, 2006, p. 17.
- [55] Consorcio Energético CORPOEMA, «Formulación de un Plan de Desarrollo para las Fuentes no Convencionales de Energía en Colombia (PDFNCE),» 30 Diciembre 2010. [En línea]. Available:
<http://www.upme.gov.co:81/SGIC/sites/default/files/3.2%20FORMULACION%20PLAN%20DE%20DESARROLLO%20Vol%202%202010.compressed.pdf>.
- [56] Ministerio de Minas y Energía, Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), «Integración de las Energías Renovables no Convencionales en Colombia,» La Imprenta Editores S.A., Bogotá, 2015.

ANEXOS

ANEXO A. ÁRBOL DE CÁLCULO ACTUAL

ANEXO B. MODIFICACIÓN DEL ÁRBOL DE CÁLCULO

ANEXO C. DESARROLLO DEL ÁRBOL DE CÁLCULO

ANEXO D. DESARROLLO DE ESCENARIOS ALTERNATIVOS

ANEXO E. INTRODUCCIÓN A LOS ÁRBOLES DE CÁLCULO

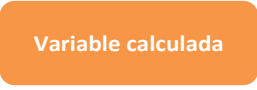
ANEXO E

INTRODUCCIÓN A LOS ÁRBOLES DE CÁLCULO

DRIVER TREES CALCULADORA COLOMBIANA DE CARBONO 2050

Los driver trees o arboles de cálculo son la representación gráfica de los cálculos internos que la calculadora realiza en su versión Excel. En ellos se representa mediante bloques las entradas o variables requeridas y las salidas o resultados obtenidos; mediante flechas y signos de operación los modos en los que las variables interactúan y los cálculos necesarios para obtener las salidas del modelo.

Para diferenciar los tipos de datos con componen un driver tree, se utiliza la escala de colores que se presenta a continuación:

Tipo de dato	Descripción
	Corresponden a los drivers para cada componente y están dados por los niveles de ambición o las trayectorias. Es información previamente establecida y que se proyecta durante la línea de tiempo 2010-2050.
	Son valores intermedios resultado de operaciones matemáticas entre las variables de entrada, los supuestos fijos y/o las constantes globales. En algunos casos pueden ser usados como variables intersectoriales o datos de salida
	Datos de salida, se usan para calcular los resultados agregados de un sector y/o son insumos para otro componente.
	Valores fijos requeridos para el cálculos intermedios o de salida, corresponde a información técnica que esta soportada por fuentes confiables y veraces. Proviene de resultados de estudios, informes oficiales o el dictamen de expertos.
	Son datos que pueden ser transversales en todos los sectores o resultados que pueden usarse para cálculos en otros sectores.
	Son valores estándar que se usan en todo el modelo sin discriminar su procedencia. (Ejemplo: Factores de emisión de combustibles, tiempo de operación, etc.)
	Categorías o agrupaciones utilizadas para indicar caminos o rutas de los cálculos. En algunos casos se refiere a grupos de población, regiones, tipo de tecnología o tipo de combustible.

