

Factibilidad de la implementación de paneles solares
fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica en las
cabeceras municipales de las zonas no interconectadas de
Colombia

Por

Javier Alejandro Arroyave Valencia

Tutor

Alejandro Vásquez Hernández

Universidad EAFIT'

Escuela de Ingeniería

Medellín, Colombia

2018

DEDICATORIA

A mi familia, por enseñarme el valor de no parar nunca, perseverar siempre y disfrutar el camino; gran parte de los límites están en nuestras manos.

AGRADECIMIENTOS

A Alejandro Vásquez, Magister en Hábitat de la UNAL y profesor en la Universidad Eafit, por la confianza brindada y el acompañamiento integral dado durante toda la investigación.

A Wilson Hurtado, Maestro en ingeniería de la UNAM e ingeniero en Integral S.A, por sus valiosos aportes hacia el enfoque de las Zonas No Interconectadas, su conocimiento de la legislación relacionada y su apoyo constante durante todo el proceso investigativo.

A Mauricio Rendón, Magister en ingeniería de la UNAL y economista en Integral S.A, por sus constantes aportes económicos y por una de las piezas centrales de la investigación, el anexo de la Circular 069 de 2017 de la CREG.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| RESUMEN | 11 |
| ABSTRACT | 12 |
| INTRODUCCIÓN | 13 |
| 1 MARCO DE REFERENCIA | 16 |
| 1.1 MARCO TEÓRICO | 16 |
| 1.1.1 Energía y electricidad | 16 |
| 1.1.2 Energías no renovables | 16 |
| 1.1.3 Energías renovables | 16 |
| 1.1.4 Sistema Interconectado Nacional (SIN) | 20 |
| 1.1.5 Zonas No Interconectadas (ZNI) | 21 |
| 1.2 CONTEXTO | 22 |
| 1.2.1 Iniciativas internacionales en energías renovables | 22 |
| 1.2.2 Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE) | 27 |
| 1.2.3 Legislación colombiana favorable a la electrificación y las energías renovables | 28 |
| 1.2.4 Incentivos a la microgeneración y generación distribuida | 29 |
| 1.3 ESTADO DEL ARTE | 30 |
| 1.3.1 General | 30 |
| 1.3.2 Técnico | 35 |
| 1.3.3 Ambiental | 37 |
| 1.3.4 Económico | 38 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2 | <i>METODOLOGÍA</i> | 41 |
| 2.1 | TIPOLOGÍA | 41 |
| 2.2 | HERRAMIENTA DE ANÁLISIS | 41 |
| 2.3 | CONSIDERACIONES ESPECIALES | 42 |
| 3 | <i>TRATAMIENTO DE DATOS</i> | 43 |
| 3.1 | VERIFICACIÓN ZNI | 43 |
| 3.2 | RADIACIÓN Y COORDENADAS | 43 |
| 3.3 | COSTO DEL ACPM | 44 |
| 3.4 | PERFIL DE CARGA | 46 |
| 3.5 | DEMANDA DE ENERGÍA | 46 |
| 3.5.1 | Consumo promedio | 46 |
| 3.5.2 | Población | 46 |
| 3.6 | COSTO DE LOS SISTEMAS SOLARES FV | 46 |
| 3.6.1 | Suministro e instalación | 46 |
| 3.6.2 | Transporte de los equipos | 48 |
| 3.7 | COSTO DE LOS EQUIPOS DE GENERACIÓN DIESEL | 48 |
| 4 | <i>RESULTADOS DEL ANÁLISIS</i> | 49 |
| 4.1 | DATOS DE ENTRADA RECABADOS | 49 |
| 4.1.1 | Costos de combustible | 49 |
| 4.1.2 | Transporte de los equipos solares FV desde el centro de abasto | 50 |
| 4.1.3 | Costo total de los equipos solares FV | 51 |
| 4.1.4 | Costo total de los equipos de generación diesel | 52 |
| 4.1.5 | Variables económicas | 53 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 4.2 | ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS | 54 |
| 4.3 | CLASIFICACIÓN DE RESULTADOS | 54 |
| 4.4 | ALTERNATIVA DIESEL | 55 |
| 4.4.1 | Resultados | 56 |
| 4.4.2 | Análisis | 60 |
| 4.5 | ALTERNATIVA DIESEL + SOLAR FV | 61 |
| 4.5.1 | Resultados | 61 |
| 4.5.2 | Análisis | 64 |
| 4.6 | ALTERNATIVA DIESEL + SOLAR FV + BATERÍAS | 65 |
| 4.6.1 | Resultados | 65 |
| 4.6.2 | Análisis | 67 |
| 5 | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 68 |
| 5.1 | CONCLUSIONES | 68 |
| 5.2 | RECOMENDACIONES | 69 |
| 6 | BIBLIOGRAFÍA | 70 |

LISTADO DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Clasificación porcentual de los aspectos técnicos tratados por los autores (elaboración propia)..... | 35 |
| Tabla 2. Precios del combustible en los centros de abasto para marzo de 2018 | 44 |
| Tabla 3. Costo de transporte de combustible del centro de abasto a la cabecera municipal (CREG, 2017) | 45 |
| Tabla 4. Costo de equipos sistema solar FV de 1kWp..... | 47 |
| Tabla 5. Costo en USD/kWp para 1, 2, 4, 8 y 10..... | 47 |
| Tabla 6. Transporte de la ciudad de origen al centro de abasto. | 48 |
| Tabla 7. Costo del ACPM en los municipios ZNI | 49 |
| Tabla 8. Costo total de transporte de los equipos solares FV..... | 50 |
| Tabla 9. Costo total de equipos solares FV (USD/kW) | 51 |
| Tabla 10. Costo total de los equipos de generación diesel..... | 52 |
| Tabla 11. Mejor alternativa para cada municipio ZNI | 55 |
| Tabla 12. Resultados de municipios con diesel como mejor alternativa (1 de 3) | 57 |
| Tabla 13. Resultados de municipios con diesel como mejor alternativa (2 de 3) | 58 |
| Tabla 14. Resultados de municipios con diesel como mejor alternativa (3 de 3) | 59 |
| Tabla 15. Resultados de municipios con diesel + solar FV como mejor alternativa (1 de 2) | 62 |
| Tabla 16. Resultados de municipios con diesel + solar FV como mejor alternativa (2 de 2) | 63 |
| Tabla 17. Resultados de municipios con diesel + solar FV + baterías como mejor alternativa ... | 66 |

LISTADO DE ILUSTRACIONES

| | |
|---|----|
| Ilustración 1. Funcionamiento típico de una central hidroeléctrica (Wright, 2010)..... | 17 |
| Ilustración 2. Energía mareomotriz (OEE, 2015)..... | 19 |
| Ilustración 3. Solar Roof de Tesla ® (Tesla, 2017)..... | 20 |
| Ilustración 4. Cobertura de las ZNI en Colombia (IPSE, 2017)..... | 22 |
| Ilustración 5. Fuente de la energía consumida en el mundo a finales de 2013 (REN21, 2014).. | 24 |
| Ilustración 6. Fuente de la energía consumida en el mundo a finales de 2016 (REN21, 2017).. | 25 |
| Ilustración 7. Fuente de la energía renovable consumida en el mundo a finales de 2013 (REN21, 2014) .. | 26 |
| Ilustración 8. Fuente de la energía renovable consumida en el mundo a finales de 2016 (REN21, 2017) .. | 27 |
| Ilustración 9. Temas principales abordados por los autores en la categoría General (elaboración propia) .. | 31 |
| Ilustración 10. Distribución de los autores en sistemas híbridos (elaboración propia). .. | 33 |
| Ilustración 11. Principales aspectos económicos estudiados por los autores (elaboración propia) .. | 39 |

LISTADO DE ECUACIONES

| | |
|--|----|
| Ecuación 1. Emisión de CO2 del biocombustible..... | 38 |
| Ecuación 2. Valor presente neto..... | 39 |
| Ecuación 3. Costo de ciclo de vida | 40 |
| Ecuación 4. Costo de la energía | 40 |
| Ecuación 5. Tasa de interés real y tasa de descuento | 53 |

RESUMEN

El presente documento de tesis plantea el análisis de factibilidad del uso de paneles solares fotovoltaicos (FV) para la generación de energía eléctrica en las cabeceras municipales de las zonas no interconectadas (ZNI) de Colombia, teniendo en cuenta también otros estudios de factibilidad realizados con la herramienta de optimización Homer®, para determinar la mejor alternativa de combinación entre la generación de energía con generadores diesel, con paneles solares y el almacenamiento con baterías, para cada una de las 34 cabeceras municipales en las que se efectuó el análisis.

ABSTRACT

This thesis presents the feasibility analysis of the use of photovoltaic (PV) solar panels for the generation of electricity in the main municipalities of the non-interconnected zones of Colombia, also taking into account other studies of feasibility carried out with the Homer® optimization tool, to determine the best combination alternative among the generation of energy with diesel generators, solar panels and the storage with batteries, for each of the 34 main municipalities for which the analysis was carried out.

INTRODUCCIÓN

En el presente documento se analizan diferentes alternativas de combinación entre la generación de energía con generadores diesel, con paneles solares y el almacenamiento con baterías, y se obtiene la mejor de ellas para cada una de las 34 cabeceras municipales no conectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN) de Colombia; teniendo en cuenta, el uso actual de generadores diesel como única fuente de generación en dichos sitios, y primando en el análisis los factores económicos - cómo el costo presente neto o *net present cost* (NPC) y el costo de la energía o *cost of energy* (COE) -.

La realización de este trabajo parte de la necesidad de plantear diferentes opciones de generación de energía eléctrica, para las zonas no interconectadas (ZNI) de Colombia, a través de una de las principales fuentes de energías renovables no convencionales (ERNC), la energía solar fotovoltaica (solar FV).

Haciendo uso de un análisis de factibilidad para la posible implementación de energía solar FV en dichas zonas del país, se pretende determinar la alternativa económicamente óptima para cada zona, disminuyendo los costos de generación de energía, y, en caso que el análisis sea favorable a la energía solar se verán reducidas las emisiones de CO₂ y de otros gases nocivos.

Anteriormente en el mundo, incluyendo a Colombia, se han efectuado análisis de alternativas para diferentes combinaciones de fuentes de energía eléctrica, como el ACPM y la luz del sol, usando, además, el software *Homer*® como herramienta de optimización, sin embargo, para el caso específico de nuestro país, los análisis encontrados se basan en casos puntuales que permiten una visión detallada para algunos puntos específicos del país, pero difiere del objetivo del presente trabajo, consistente en brindar una visión macro para la energía solar FV en todas las cabeceras municipales de las ZNI del territorio nacional.

El objetivo general del presente trabajo será analizar la factibilidad que tiene la instalación de paneles solares fotovoltaicos, para la generación de energía eléctrica, en las cabeceras municipales no interconectadas al SIN, de una forma tal que se optimicen los costos de generación para dichos sitios, al mismo tiempo que se evalúan fuentes limpias de energía.

El primer objetivo específico será dar a conocer el marco de referencia para el proyecto, en el cual se plantea primeramente un marco teórico, que desarrolla los conceptos principales a tratarse, y luego el estado del arte en cada uno de los aspectos generales, técnicos, ambientales y económicos a tratar en el subsiguiente análisis.

Como segundo objetivo se plantea la consecución de los datos necesarios para efectuar los análisis de alternativas, tales como: coordenadas geográficas, demanda de energía, costo del combustible, costo de los sistemas de generación diesel y solar FV, costo de las baterías, costo de transporte e instalación de los sistemas, entre otros.

Tercero en la lista de objetivos se tiene la ejecución del análisis, el cual comprende el ingreso de las variables de entrada al software, su calibración, su ejecución y la organización de los datos de salida según la combinación que resulte ser la mejor alternativa dentro de las siguientes: diesel, diesel + solar FV y diesel + solar FV + baterías.

Finalmente, el cuarto objetivo será comparar los datos arrojados por el software, realizando relaciones porcentuales y obteniendo indicadores de acuerdo a los diferentes *Cost Of Energy* (COE) y las emisiones de CO₂ de las alternativas analizadas.

Este trabajo deberá tomarse como un análisis macro, en el cual, a través de unas variables de entrada (coordenadas, costos de ACPM, costos de equipos de generación, demanda proyectada de energía y variables económicas), se obtuvo la mejor alternativa de combinación (diesel, solar FV y baterías), en términos de costo presente neto, *Net Present Cost* (NPC), para cada una de las 34 cabeceras municipales de las ZNI de Colombia.

Se espera que con la publicación de este trabajo se aumente el interés de las personas en las energías renovables no convencionales (ERNC), y su importancia para Colombia, especialmente de la energía solar fotovoltaica.

1 MARCO DE REFERENCIA

1.1 MARCO TEÓRICO

1.1.1 Energía y electricidad

“La energía es el impulso o fuerza requerida para realizar un trabajo, existen muchas fuentes de energía en la naturaleza, algunas de ellas son: petróleo, gas, carbón, viento, mares, ríos, calor y electricidad” (ISA Intercolombia, 2014).

“La electricidad es un fenómeno que se origina por el movimiento de los electrones de un átomo, en algunos materiales conductores es posible hacer fluir estos electrones de un extremo al otro de los mismos estableciendo una corriente eléctrica, el camino por el que se desplazan los electrones se llama circuito eléctrico que es además el conjunto de elementos interconectados que permiten el paso de la corriente eléctrica” (ISA Intercolombia, 2014).

1.1.2 Energías no renovables

Las energías no renovables, son aquellas que usan como combustible recursos que son finitos y no pueden renovarse, principalmente combustibles fósiles y nucleares, los cuales, debido al aumento exponencial de la demanda energética del mundo han comenzado a disminuir considerablemente, hacia el año 2010 se calculaba que los suministros de estos combustibles tendrían una disponibilidad de: (i) petróleo y gas 50 años, (ii) Carbón 300 años, (iii) esquistos y arenas bituminosas 350 años. (Wright, 2010)

1.1.3 Energías renovables

Las energías renovables son aquellas cuya fuente de suministro es teóricamente infinita o capaz de regenerarse por medios naturales, es decir, el sol, el viento, las corrientes de los ríos, el

movimiento del mar, las corrientes y vapores geotérmicos y algunos elementos biológicos como la biomasa. (Akella, Saini, & Sharma, 2009)

Entre las principales fuentes de energía renovable se consideran las siguientes: energía hidroeléctrica, eólica, bioenergía, solar térmica, geotérmica, mareomotriz y solar fotovoltaica (REN21, 2014).

1.1.3.1 Energía hidroeléctrica (hidropower)

Es la energía eléctrica obtenida del potencial energético del agua cuando ésta se mueve de altas elevaciones a bajas elevaciones, transformándola con el uso de una turbina y un generador de energía, como se observa en la Ilustración 1. (REN21, 2017)

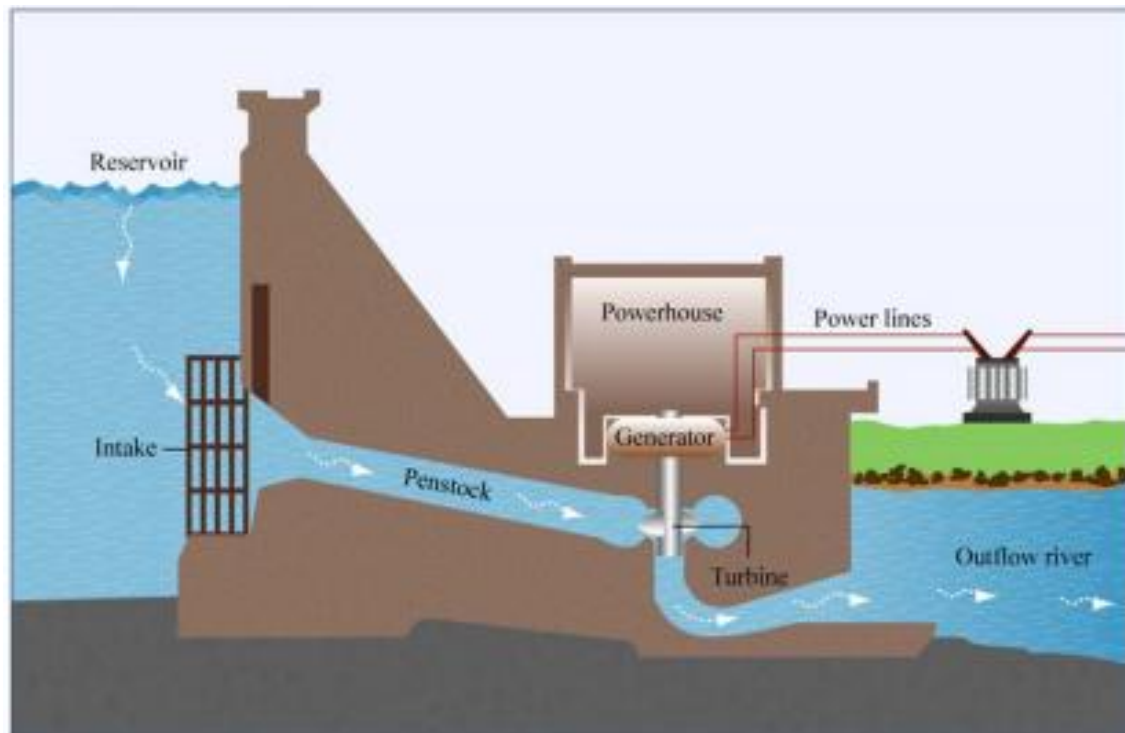


Ilustración 1. Funcionamiento típico de una central hidroeléctrica (Wright, 2010)

1.1.3.2 Energía eólica (wind power)

La energía eólica es aquella producida a través del aprovechamiento de la energía cinética del viento convirtiéndola en energía eléctrica, a través del uso de aerogeneradores (molinos de viento). (Wright, 2010)

1.1.3.3 Bioenergía (bio-power)

Es la energía generada a través del aprovechamiento de biomasa, en estado líquido, sólido o gaseoso. Algunos ejemplos de biomasa son el etanol, el biodiesel y el biogás. Generalmente el aprovechamiento de los biocombustibles es directo y se hace a través de su combustión. (REN21, 2017)

1.1.3.4 Energía solar térmica (Concentrating solar thermal Power CSP)

Es una tecnología que usa espejos para concentrar la luz del sol formando un rayo solar de gran intensidad que calienta un líquido de trabajo que puede ser aire, agua u otro. El fluido de trabajo luego de ser calentado por este rayo se dirige a una turbina conectada a un generador para producir electricidad. (REN21, 2017)

1.1.3.5 Energía geotérmica (geothermal energy)

Es aquella emitida por la corteza de la tierra en forma de agua a altas temperaturas y vapor de agua, se aprovecha para generar energía eléctrica a través del uso de plantas térmicas que usan el vapor o el agua para mover, de forma análoga a la energía hidroeléctrica, una turbina y un generador. (REN21, 2017)

1.1.3.6 Energía mareomotriz (ocean energy)

Es la energía que se aprovecha del mar, de sus olas, mareas, corrientes, gradientes salinos y diferencias de temperatura de sus aguas, tal como se observa en la Ilustración 2.

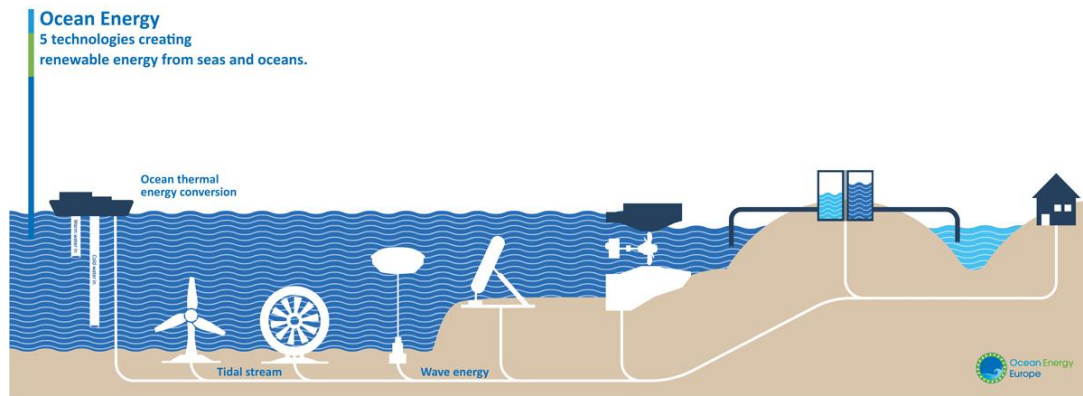


Ilustración 2. Energía mareomotriz (OEE, 2015)

De izquierda a derecha en la Ilustración 2: (i) La energía térmica oceánica aprovecha la diferencia de la temperatura entre el fondo del mar (fría) y en la superficie (caliente) que se da en algunos lugares del planeta, cómo lo es el océano pacífico en verano, (ii) Las corrientes profundas pueden aprovecharse con dispositivos del tipo molino eólico o turbinas hidráulicas, las cuales convierten la energía hidráulica de estas corrientes en energía mecánica que las mueve y posteriormente hacen girar un generador que la transforman en energía eléctrica, (iii) de la misma forma en que los dispositivos del numeral (ii) los siguientes tres elementos permiten aprovechar la energía de las olas y de los cambios en el nivel del mar, de izquierda a derecha el primero es un flotador que con el movimiento de las olas produce energía eléctrica, el segundo actúa de igual forma al anterior pero con el nivel del mar y el tercero funciona de la misma forma que la turbina de una hidroeléctrica, y en el (iv) la diferencia en la salinidad del agua de mares y ríos (gradiente salino) se trata en tanques intercambiando su posición lo cual a través de procesos químicos genera un movimiento que se aprovecha para generar electricidad (OEE, 2015).

1.1.3.7 Energía solar fotovoltaica (Solar PV)

La energía solar fotovoltaica es aquella en la que la luz proveniente del sol se transforma en energía eléctrica a través de células (o celdas) construidas con materiales semiconductores que usan la luz del sol para separar electrones de los átomos y generar una corriente eléctrica, las celdas individuales se conectan para formar un panel. (REN21, 2017)

En la actualidad existen: (i) paneles mono-cristalinos, conformados por un solo cristal de silicio puro, lo que los hace más costosos pero más eficientes y (ii) paneles multi-cristalinos que se pensaron como una alternativa más económica a la tecnología mono-cristalina que fue la original, se fabrican con una semilla de cristal en un molde de silicio fundido y luego se permite que este se enfríe formando múltiples cristales pequeños y un cristal no uniforme alrededor de la semilla. A través de los años la diferencia de costo entre ambos se ha ido reduciendo por lo que el uso de los mono-cristalinos, al ser más eficientes, está en aumento. (REN21, 2017)

Capas delgadas de materiales solares fotovoltaicos se pueden usar como capas flexibles sobre superficies existentes, como techos especiales Ilustración 3 (solar roofs), generando un tipo de construcción que integra la energía solar fotovoltaica con estos materiales en lugar de los convencionales para los techos y fachadas. (REN21, 2017).



Ilustración 3. Solar Roof de Tesla ® (Tesla, 2017)

1.1.4 Sistema Interconectado Nacional (SIN)

Es el sistema compuesto por las plantas y equipos de generación, la red de interconexión, la redes regionales e interregionales de transmisión, las redes de distribución y las cargas eléctricas de los usuarios; todos los anteriores conectados entre sí de acuerdo a lo dispuesto en el (Artículo 11 de la Ley 142 de 1994). (IPSE, 2017)

1.1.5 Zonas No Interconectadas (ZNI)

Municipios, corregimientos, localidades y caseríos no conectados al Sistema Interconectado Nacional (SIN) de acuerdo al artículo 1º de la Ley 855 de 2003. (UPME, 2009)

Algunas ZNI son el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Leticia en el Amazonas, Capurganá en el Chocó, Puerto Carreño en Vichada y Mitú en Vaupés. (UPME, 2009)

En las ZNI la prestación del servicio de energía eléctrica se hace mediante el uso de plantas de generación diesel, paneles solares y pequeñas centrales hidroeléctricas. (UPME, 2009)

Las ZNI se caracterizan por ser zonas dispersas, es decir, con una baja densidad poblacional, con bajos niveles de consumo promedio, baja capacidad de pago, bajo nivel de recaudo y por lo tanto altos costos de prestación de energía eléctrica. (IPSE, 2017)

Los altos niveles de pérdidas y el bajo nivel de micro medición son otras de las características de las ZNI, las cuales se encuentran principalmente en zonas de frontera y áreas de consolidación, zonas costeras e insulares y generalmente en áreas biodiversas y territorios colectivos de comunidades étnicas. (IPSE, 2017)

En la Ilustración 4 se observa la cobertura de las ZNI de Colombia, las cuales son estudiadas por el IPSE. (IPSE, 2017)

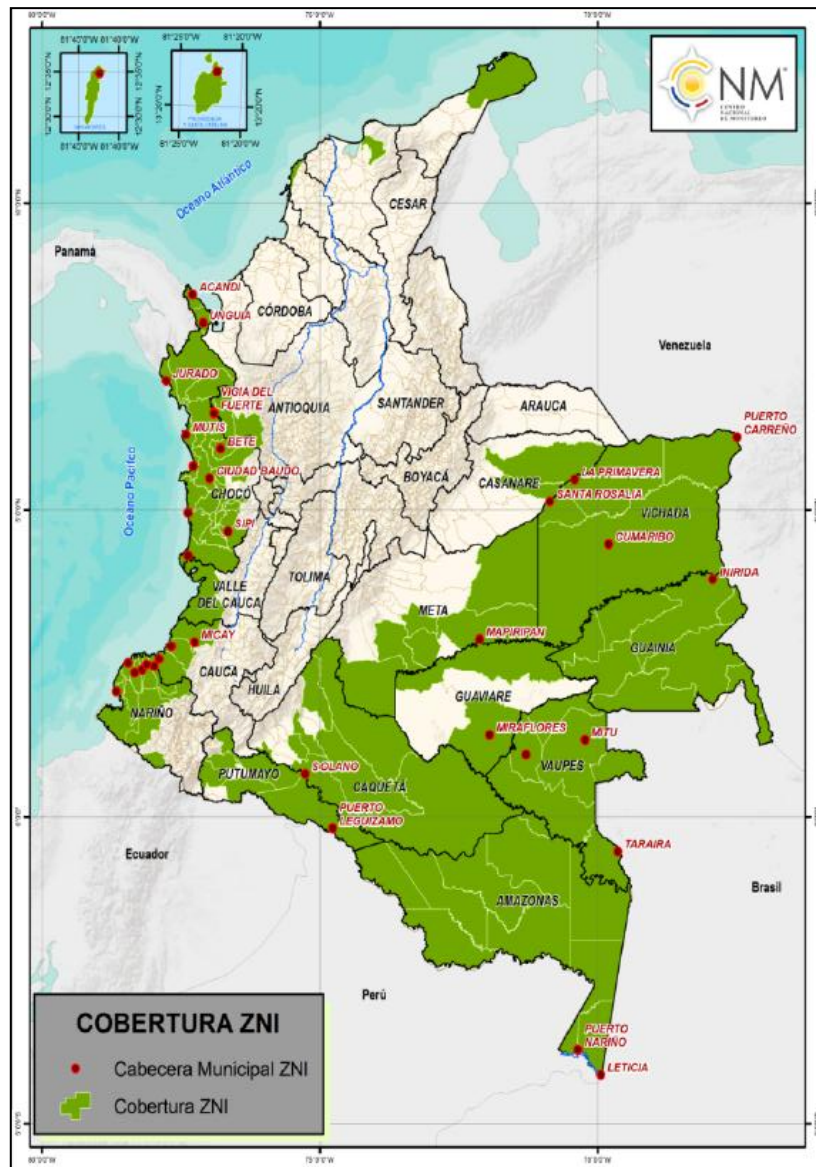


Ilustración 4. Cobertura de las ZNI en Colombia (IPSE, 2017)

1.2 CONTEXTO

1.2.1 Iniciativas internacionales en energías renovables

En el año 2004 en Bonn, Alemania, impulsada por el gobierno local, se llevó a cabo la “*International Conference for Renewable Energies Bonn 2004*”, en la cual, surgió la iniciativa de crear una red que permitiera generar políticas que guiaran el destino del mundo en cuanto a energías renovables, lo cual dio origen a REN21 “*Renewable Energy Policy Network for the*

21st Century” organización que actualmente cuenta con contribuciones de más de 500 expertos en temas energéticos a nivel mundial. (REN21, 2017)

El principal producto de REN21 es un reporte anual del estado de las energías renovables en el mundo y de lo que se espera para los próximos años en este tema. El primero de estos reportes “*Renewables 2005 Global Status report*” (en adelante GSR), se publicó por primera vez en 2004 y, desde su lanzamiento, se convirtió en un referente para los gobiernos de todo el mundo, generando grandes aliados en el uso y el fomento de las energías renovables. En 2005 se llevó a cabo la “*Beijing International Renewable Energy Conference*” en China, cuya temática se centró en las alternativas que se tenían respecto al uso del petróleo como principal fuente de energía, esto debido a los incrementos de precio que éste presentaba en ese año. (REN21, 2017)

Dentro de los análisis realizados por REN 21 se encuentra una estimación anual de la fuente de la energía eléctrica consumida en los Estados Unidos, la Unión Europea, Rusia, India, China y Brasil, en el año inmediatamente anterior a la publicación, teniendo en cuenta que el consumo de electricidad de estos países corresponde a dos terceras partes de la energía consumida en todo el planeta. (REN21, 2014) (REN21, 2017)

A finales de 2013, se plantea la siguiente distribución en cuanto a la fuente de la energía eléctrica consumida en las grandes potencias mencionadas en el párrafo anterior:

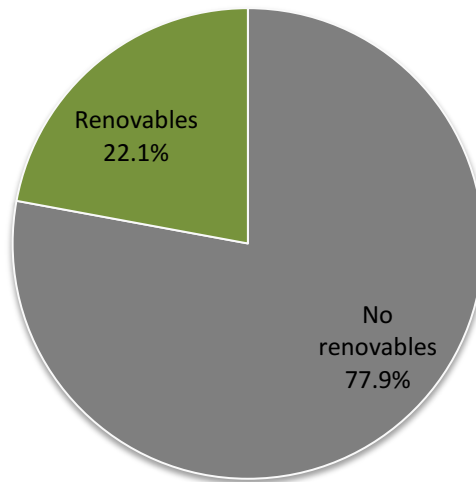


Ilustración 5. Fuente de la energía consumida en el mundo a finales de 2013 (REN21, 2014)

Así pues, para finales de 2013 la distribución era de un 22.1% de energías renovables, mientras que la participación de las no renovables era del 77.9%, es decir que en el mundo para finales de 2013, aproximadamente, de cada 10 bombillas que se encendían, 8 de ellas eran electrificadas por energías alimentadas por fuentes finitas.

Ahora bien, desde 2014 hacia el presente el mundo ha cambiado poco a poco sus políticas e inversiones energéticas y para finales de 2016 la participación de las energías renovables había pasado en tres años del 22.1% a un 24.5%, es decir, la tendencia entre estos años 2013 y 2016 fue positiva para la energía renovable en más de dos puntos porcentuales.

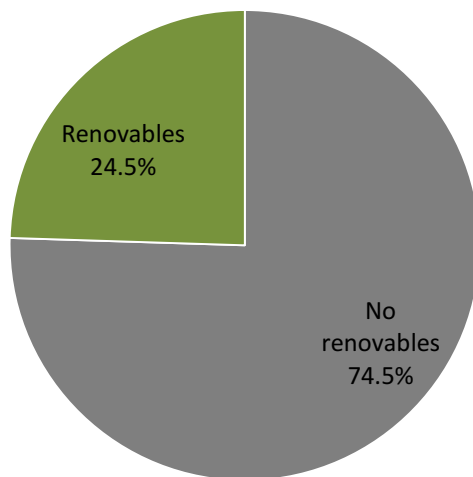


Ilustración 6. Fuente de la energía consumida en el mundo a finales de 2016 (REN21, 2017)

Aunque es interesante comparar el comportamiento global del crecimiento de la energía renovable se debe tener en cuenta que ésta se compone, a su vez, de varios tipos de energía (hidráulica, eólica, solar FV, etc.) que deben ser analizados individualmente, así pues, se presenta en la Ilustración 7 la participación que tuvieron cada uno de estos tipos de energía para finales de 2013, en los mismos países en los que se efectuó el análisis presentado anteriormente de energías renovables versus energías no renovables.

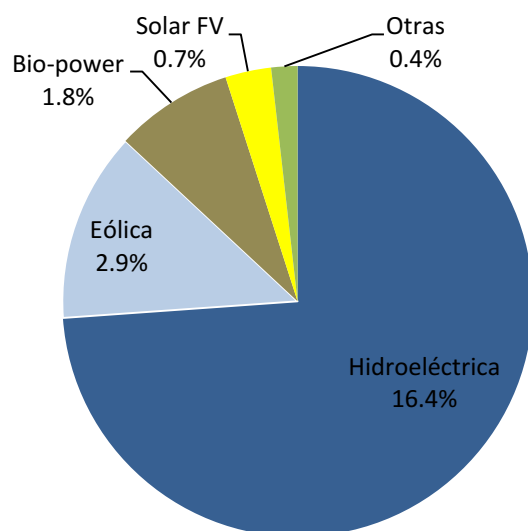


Ilustración 7. Fuente de la energía renovable consumida en el mundo a finales de 2013 (REN21, 2014)

La energía hidroeléctrica aventaja las otras fuentes de energía renovable superando a su competidor más cercano, la eólica, con más de cinco veces su participación y la energía solar fotovoltaica ocupa el cuarto lugar dentro de éstas energías por detrás de la bioenergía que ocupa el tercero, sin embargo, la energía solar fotovoltaica es mucho más usada (casi el doble) que la suma de las demás energías renovables (oceánica, solar térmica y geotérmica).

En los resultados del GSR 2017 respecto a la participación de éstas mismas energías renovables se observan comportamientos muy interesantes en cuanto a su crecimiento en el periodo de tres años transcurrido desde los resultados del GSR 2014, observándose, además, que a excepción de las energías renovables clasificadas como “otras” (Solar térmica, Geotérmica y mareomotriz) todas las demás presenciaron crecimiento en este periodo, así pues se observa un pequeño aumento en energía hidroeléctrica (0.2%), que muestra que en este periodo fue la de menos crecimiento, de manera conjunta con la bioenergía que creció el mismo porcentaje. Ahora bien, de gran crecimiento fueron la energía solar fotovoltaica que aumentó su participación en un (0.8%) y la energía eólica que fue la de mayor crecimiento con un (1.1%).

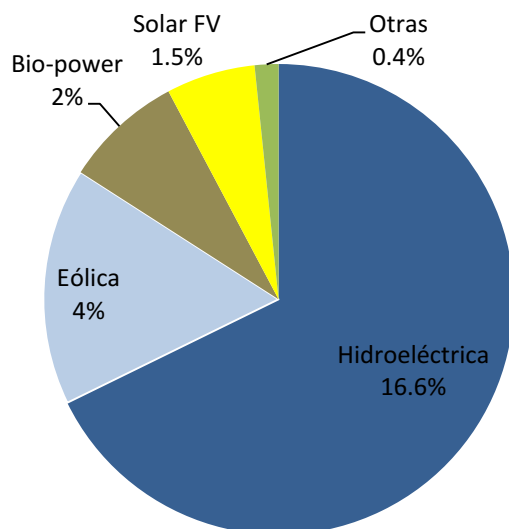


Ilustración 8. Fuente de la energía renovable consumida en el mundo a finales de 2016 (REN21, 2017)

Sin embargo, a pesar de que la energía solar fotovoltaica no fue la de mayor crecimiento porcentual cabe resaltar que su participación pasó de un 0.7% a un 1.4%, es decir que, teniendo en cuenta el crecimiento normal de la producción total de energía eléctrica de los últimos tres años, para este mismo periodo de tiempo entraron en funcionamiento una cantidad de sistemas de energía solar fotovoltaica un poco mayor que los que entraron en funcionamiento desde su invención hasta el inicio de dicho periodo de crecimiento de tres años.

1.2.2 Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE)

En Colombia el sector eléctrico ha tenido diversas modificaciones y desarrollos en los últimos dos siglos, desde la creación del Instituto de Aprovechamiento de Aguas y Fomento Eléctrico (Electroaguas) en 1946, pasando por su reestructuración en 1968, transformándolo en el Instituto Colombiano de Energía Eléctrica (ICEL), que continuaba vinculado como establecimiento público nacional al Ministerio de Obras Públicas, antes de que en 1974 se le asignara al Ministerio de Minas y Energía proponer y adelantar la política nacional en materia de electricidad, a través de las diferentes entidades adscritas o vinculadas al mismo. Luego, en

1992 se modificaron los estatutos básicos del ICEL y la entidad se transformó en empresa industrial y comercial del estado. (IPSE, 2017)

Pero fue hasta 1994 que mediante la promulgación de las leyes 142 y 143 se marcó un nuevo camino en lo referente al servicio público domiciliario de energía, concibiendo un grado superior de desarrollo en materia de cobertura y calidad en el Sistema Interconectado Nacional (SIN), generando transmisión, distribución y comercialización, señalando, a su vez, la existencia de Zonas No Interconectadas (ZNI). (IPSE, 2017)

Para 1999 El ICEL se transformó en el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas (IPSE) y en 2004 se reestructura el IPSE en el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas, el cual tiene por objeto identificar, promover, fomentar, desarrollar e implementar soluciones energéticas en Colombia mediante esquemas empresariales eficientes, viables financieramente y sostenibles en el largo plazo, procurando la satisfacción de las necesidades energéticas de las Zonas No Interconectadas (ZNI), apoyando técnicamente a las entidades definidas por el Ministerio de Minas y Energía. (IPSE, 2017)

Una de las tareas base del IPSE es desarrollar *planes de energización rural sostenible* (PERS) a través de diferentes formas de desarrollo, entre ellas los convenios con universidades. (IPSE, 2017)

1.2.3 Legislación colombiana favorable a la electrificación y las energías renovables

En el contexto de la coyuntura actual colombiana del acuerdo de paz y sus decretos derivados (como el Decreto 884 de 2017 de Implementación del Plan Nacional de Electrificación Rural en el marco del Acuerdo de Paz) y teniendo en cuenta la voluntad de regulación e implementación de las energías renovables expresada en la Ley 1715 de 2014 de integración de energías renovables no convencionales al sistema energético nacional se vislumbra un panorama favorable para este tipo de proyectos. (MINMINAS, 2017) (Congreso de la República, 2014)

1.2.4 Incentivos a la microgeneración y generación distribuida

En la Ley 1715 de 2014 se promueve la generación distribuida y la microgeneración de energía eléctrica, entendiendo la primera como generación descentralizada y la segunda como aquella asociada a la autogeneración, es decir, la generación que tiene como principal objetivo satisfacer la demanda propia de la persona natural o jurídica que genera dicha energía. (Jímenez, 2016)

Los mecanismos de promoción de la generación distribuida y la microgeneración en Colombia contemplados en la ley 1715 son: (i) Entrega de excedentes a la red de distribución y/o transporte orientada a Microgeneradores, (ii) Sistemas de medición bidireccional y mecanismos simplificados de conexión y entrega de excedentes orientada a microgeneradores de pequeña escala, (iii) Venta de energía orientada a Generadores distribuidos, (iv) Venta de créditos de energía orientada a microgeneradores, (v) Programas de divulgación masiva sobre microgeneración de pequeña escala orientada a público en general y microgeneradores de pequeña escala y por último (vi) Programa de divulgación focalizada orientada a microgeneradores a pequeña escala. (Congreso de la República, 2014)

En el mundo los incentivos más usados para incentivar la generación distribuida y la microgeneración son: (i) Intervención de costo de generación, dentro del cual se disminuyen impuestos y tasas de financiación de sistemas de generación de energía solar FV, (ii) Medición de energía neta (*net metering*) que permite remunerar la inyección de energía a la red y regular las máximas cantidades de energía inyectada y (iii) Cambiar los incentivos de modo tal que se pueda controlar la demanda y el almacenamiento de energía en caso de requerirse. (IEA, 2014)

De acuerdo a los dos tipos de incentivos que se muestran en los apartes anteriores del presente documento se observa que Colombia está el rumbo correcto de legislación en cuanto a promoción de energías renovables no convencionales.

1.3 ESTADO DEL ARTE

Para el análisis de estado del arte se tomaron como base artículos publicados en los últimos 8 años que se relacionan con el tema de estudio, de acuerdo a tres enfoques diferentes: (i) Publicaciones afines de los autores más destacados a nivel internacional en factibilidad de proyectos de energía solar fotovoltaica, (ii) Publicaciones que estudian el desarrollo de la energía solar FV en Colombia, y (iii) Publicaciones internacionales con estudios de factibilidad económica y ambiental de energía solar fotovoltaica en zonas rurales (no conectadas).

Los resultados se clasificaron de acuerdo a sus aportes al trabajo investigativo en cuatro categorías: (i) **General**, para aquellos temas que abarcan la factibilidad de proyectos de energía solar FV o avances en el país en este tema que no tengan relación directa con los aspectos técnicos, ambientales o económicos, (ii) **Técnico**, aquellos aportes que estudian factores técnicos específicos que son propios del uso de la tecnología solar FV, (iii) **Ambiental**, Los aspectos ambientales analizados en dichos estudios de factibilidad propuestos, y (iv) **Económico**, Aquellos indicadores económicos usados para analizar la factibilidad de los proyectos.

A continuación se describen los principales temas de estudio tratados dentro de cada categoría descrita en el párrafo anterior, con un enfoque cuantitativo, en el cual se da mayor importancia a aquellos abordados con mayor frecuencia por los autores.

1.3.1 General

Dentro de la categoría de aportes generales al trabajo se encontró la mayor variedad de temas tratados (10 temas), los cuales se presentan a continuación.

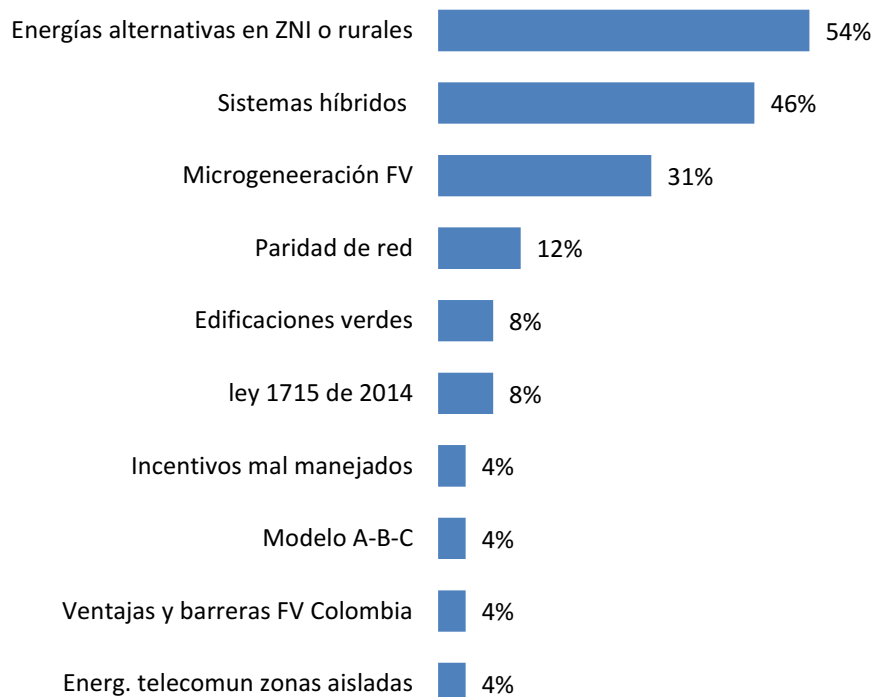


Ilustración 9. Temas principales abordados por los autores en la categoría **General** (elaboración propia)

Así pues, los cinco principales temas abordados por los autores fueron Paridad de red, Microgeneración FV, Sistemas híbridos, y el de mayor estudio: Energías alternativas en ZNI o rurales.

1.3.1.1 Energías alternativas en ZNI o rurales

Debido al enfoque propio de la investigación se obtuvo que la mayoría de los autores consultados abordaron de forma general el tema del uso de energías alternativas en zonas rurales, o no interconectadas.

De forma geográfica los autores trabajaron dicho tema en países como: Yemen, India, Egipto, Grecia, Malasia, Irán, Argelia, Palestina, Estados Unidos y Colombia. Cabe resaltar que los casos de estudio de Estados Unidos e India (Ambos potencias económicas mundiales) son los más antiguos en el tema (2012), por lo que se puede apreciar una relación cronológica que denota un movimiento en el que todos los demás países mencionados, que no son potencias, se inclinan hacia la implementación de tecnologías propias de las energías renovables en sitios

piloto ubicados en zonas rurales o no conectadas, las cuales por su condición propia de lejanía poseen sistemas eléctricos de menor tamaño y pocas opciones de generación, creando así un ambiente favorable para el uso de sistemas solares FV.

En el caso particular de Colombia, los casos puntuales analizados fueron: (Cifuentes & Sarmiento, 2016) que tratan el caso del municipio de Cimitarra, en el departamento de Santander, a través del modelo de negocios para una futura empresa que brinde el servicio de energía alternativa en esta población, (Toledo, 2013) que evalúa una solución a la dependencia energética de dichas zonas y (Haghighat Mamaghani, Avella Escandon, Najafi, Shirazi, & Rinaldi, 2016) quienes para tres municipios, Puerto Estrella en la Guajira, Unguia (Titimate) en Choco y Jericó (Rural) en Boyacá, desarrollan un análisis de diferentes combinaciones entre energía solar FV, energía eólica y generación Diesel buscando los porcentajes óptimos de cada una de estas fuentes para los diferentes sitios.

1.3.1.2 Sistemas híbridos

Entendiendo un sistema híbrido cómo aquel en el que diferentes fuentes de energía eléctrica alimentan una misma red, los autores: [1], [3], [5], [12], [14], [15], [17], [24], [36], [40], [41] y [50], analizan las diferentes combinaciones óptimas entre las fuentes de energía para sitios específicos usando software de optimización.

Dentro de los sistemas híbridos, los autores consultados obtuvieron más resultados con las combinaciones entre: (i) energía Solar FV, Eólica y Diesel, y (ii) Solar FV y Diesel. Como se observa en la siguiente ilustración Ilustración 10.

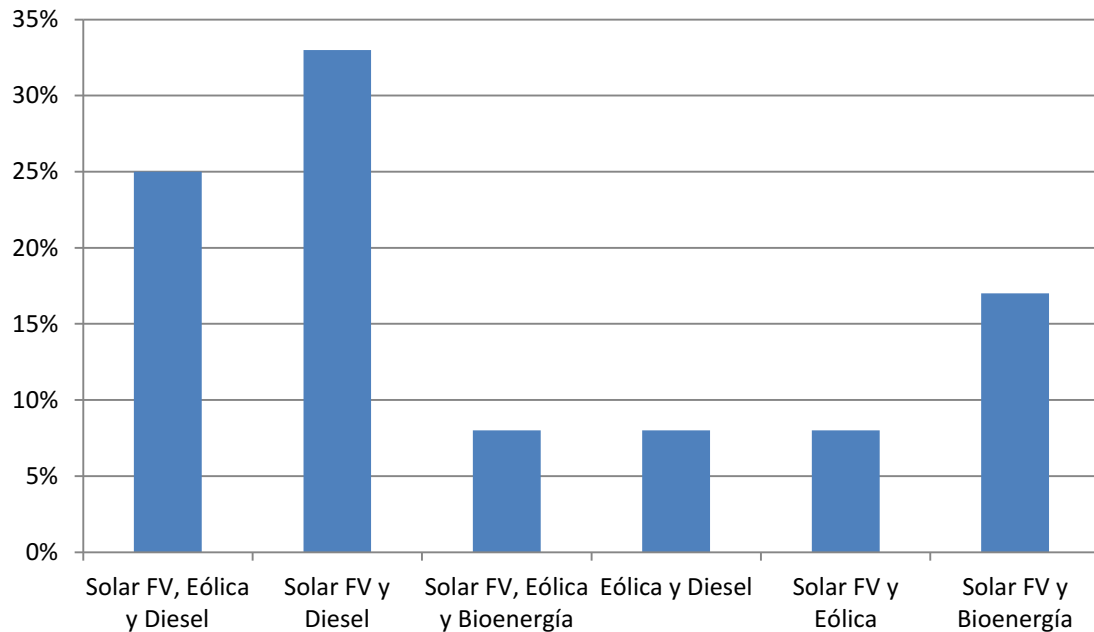


Ilustración 10. Distribución de los autores en sistemas híbridos (elaboración propia).

De acuerdo a la cronología de las publicaciones se observa que las combinaciones obtenidas son relativas al tiempo, así pues, para la época de (2012-2013) se observa una dispersión entre: (i) Solar FV, Eólica y Bioenergía, (ii) Eólica y Diesel, y (iii) Solar FV y Eólica. Para el periodo comprendido entre (2013-2016) se observan más resultados con la combinación entre Solar FV y Diesel, En 2016 la combinación de solar FV y biomasa, y entre (2016-2017) la combinación más obtenida es la de Solar FV, Eólica y Diesel.

1.3.1.3 *Microgeneración FV*

Teniendo previamente la microgeneración (1.2.4) y la energía solar fotovoltaica (1.1.3.7) cómo conceptos independientes, se debe entender la microgeneración FV cómo aquella generación a pequeña escala que usa la energía solar FV cómo fuente de generación.

Dentro de los estudios del profesor Tamer Khatib (Muhsen, Khatib, & Haider, 2017) y (Kazem, Khatib, Sopian, & Elmenreich, 2014), se trata el tema de microgeneración FV, en (Muhsen, Khatib, & Haider, 2017) Khatib plantea el uso de un sistema híbrido de energía solar fotovoltaica con baterías y un generador de diesel, y en (Kazem, Khatib, Sopian, & Elmenreich, 2014) presenta el rendimiento de un techo solar en una zona desértica.

Para el caso colombiano Maritza Jiménez plantea el análisis de energía solar FV en (Jiménez, 2016) y (Cadavid, Jiménez, & Franco, 2015), donde el principal tema es la autogeneración en el sector residencial, en (Jiménez, 2016) se evalúa el efecto que tendría el conectar hogares generadores al sistema interconectado nacional y en (Cadavid, Jiménez, & Franco, 2015) se profundiza en un análisis financiero de diferentes configuraciones para la generación de energía solar FV en los hogares colombianos.

1.3.1.4 Paridad de red

La paridad de red se entiende cómo la comparación entre el costo de generación de un sistema de energía específico y el costo de comprar dicha energía del SIN. (Jiménez, Cadavid, & Franco, 2014)

Para el caso colombiano (Jiménez, Cadavid, & Franco, 2014) evaluaron 5 escenarios para el comportamiento de la paridad de red de la energía solar fotovoltaica: (i) escenario base, (ii) averso al riesgo, (iii) precios altos, (iv) baja curva de aprendizaje de la tecnología, y (v) financiación bancaria.

Los distintos escenarios se evaluaron en ocho ciudades colombianas: Cúcuta, Barranquilla, Cartagena, Cali, Medellín, Ibagué, Santa Marta y Riohacha. En el escenario base cinco de las ocho ciudades han alcanzado la paridad de red para 2014 y las tres restantes (Bucaramanga, Manizales y Bogotá) lo alcanzan para 2021.

Para los demás escenarios se obtuvo: (i) Incluso en el escenario más desfavorable (averso al riesgo) para 2028 en Colombia se lograría paridad de red para los sistemas solar FV, (ii) En caso de que aumentara el precio de la energía a comprar en el SIN para 2021 todas las ciudades analizadas tendrían paridad de red, (iii) Con una curva de aprendizaje baja (aceptación de la tecnología en los hogares) se obtiene un escenario similar al base, y (iv) en caso de que la financiación de los sistemas solares FV deba hacerse a través de entidades bancarias ninguna ciudad tendría paridad de red a 2014, pero todas a excepción de Bucaramanga la tendrían para 2021.

1.3.2 Técnico

En el aspecto técnico los autores consultados trataron principalmente seis temas, los cuales se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 1. Clasificación porcentual de los aspectos técnicos tratados por los autores (elaboración propia)

| Tema | Porcentaje de autores |
|-------------------------------|------------------------------|
| Demanda de energía | 54% |
| Optimización con HOMER® | 35% |
| Oferta de energía solar FV | 27% |
| Uso de baterías | 23% |
| Fracción renovable (RF) | 19% |
| Confiabilidad de los sistemas | 15% |

La optimización mediante HOMER® y la demanda de energía son los temas técnicos en los que la mayoría de los autores ahondaron sus estudios, lo que denota la importancia de acompañar los estudios de factibilidad con un estudio de demanda de energía y el papel que tiene la herramienta HOMER® en la actualidad para dichos estudios de factibilidad.

1.3.2.1 Optimización con HOMER®

El modelo para la optimización de energías renovables híbridas (HOMER®) por sus siglas en inglés (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*) permite realizar simulaciones de optimización de alternativas que permiten obtener la configuración híbrida más factible económicamente dentro de cada una de las combinaciones (diesel, diesel + solar FV, diesel +

baterías, solar FV + baterías, y diesel + solar FV + baterías) de acuerdo al *Net Present Cost* (NPC) de cada alternativa . (Ajlan, Tan, & Abdilahi, 2017)

Entre los datos de entrada relevantes para HOMER® se encuentran: (i) la configuración tentativa de los diferentes sistemas híbridos, (ii) las coordenadas geográficas del sitio en estudio, y (iii) los costos de inversión inicial, operación, y mantenimiento de los sistemas a usar. (Ajlan, Tan, & Abdilahi, 2017) (Willman & Krarti, 2012)

HOMER® emplea el algoritmo de Graham para sintetizar los datos de radiación solar horaria para un año completo, este algoritmo permite producir información confiable de radiación solar horaria usando las coordenadas geográficas de una ubicación en específico, sin embargo, debido a cambios climáticos diarios esta información sintética pierde precisión ocasionalmente, aunque varias investigaciones afirman que es lo suficientemente confiable y precisa para futuras investigaciones del potencial de energía solar. (Ajlan, Tan, & Abdilahi, 2017)

Los principales resultados de HOMER® son: (i) Carga eléctrica sintetizada para un año, (ii) Radiación solar en el sitio indicado con las coordenadas (a través de la NASA Surface Meteorology and Solar Energy), (iii) Curvas de potencia, (iv) Costo y tamaño óptimo para un sistema híbrido con una demanda específica, (v) Combinación ideal de tecnologías garantizando confiabilidad incluso en casos extremos, huracanes, tormentas y tifones. (Ajlan, Tan, & Abdilahi, 2017), (Das & Balakrishnan, 2012)

1.3.2.2 Demanda de energía

De forma específica más de la mitad de los autores consultados abordaron dentro de sus trabajos la demanda energética, teniendo en cuenta aspectos actuales cómo el crecimiento poblacional acelerado y el aumento de artefactos electrónicos, los cuales impulsan sustancialmente la demanda para años futuros.

Para el caso de las ZNI en Colombia (Valencia & Ferreira, 2013), presentan la proyección de la demanda del islote Santa Cruz, en el cual, a través de una herramienta de modelamiento lineal LEAP (Long Range Energy Alternatives Planning System), proyectan la demanda de la

población para los cinco años próximos (2013-2018). El software LEAP permite simular la matriz energética de un escenario muestral enfocándose detalladamente en las características, del lado de la oferta (especificaciones de equipos de generación), y del lado de la demanda (censos de carga, factores demanda, energía consumida de equipos eléctricos en unidades residenciales o centros de consumo).

Dentro de las principales características de las ZNI identificadas para el estudio de demanda de (Valencia & Ferreira, 2013) se encuentran: (i) Pocas horas de prestación de servicio de energía, (ii) Carencia de información detallada que pueda determinar el crecimiento del consumo energético de forma confiable, (iii) Infraestructura energética deficiente y (iv) Afectación de actividades económicas. De forma paralela a las características energéticas de las ZNI el estudio de demanda debe comprender: (i) Demanda energética total, (ii) Crecimiento de la demanda, (iii) Recursos energéticos, (iv) Balance energético oferta/demanda, y (v) Cuadro de cargas.

Para la obtención de los datos de entrada para LEAP se debe: (i) recopilar en campo la cantidad y el consumo promedio de los equipos residenciales, de salud, educativos y comerciales, para luego obtener los datos medios de cada uno de estos usos, (ii) realizar la caracterización energética de los usuarios dentro de cada uno de estos usos, diferenciando el uso de cada equipo, y (iii) el análisis de demanda per se que implica la fijación de un escenario referencia y unas tendencias esperadas para cada uso, las cuales se ingresan a LEAP para obtener la demanda anual proyectada para cada uso. (Valencia & Ferreira, 2013)

1.3.3 Ambiental

Para el aspecto ambiental el tema central tratado por los autores (58% de ellos), es la comparación de emisiones de CO₂, para el periodo de tiempo estudiado, entre los sistemas tradicionales (diesel principalmente) y las energías renovables (solar, eólica y biomasa), teniendo en cuenta que la principal unidad de medida para las emisiones serán los kilogramos por años (kg/año, *kg/year*).

En (Barakat, Samy, Eteiba, & Wahba, 2016) se estudia la emisión del biocombustible, el cual se calcula así:

Ecuación 1. Emisión de CO₂ del biocombustible

$$E_m = Q_{BIO} \times F_{EM}$$

Dónde E_m son las emisiones en kg/año, Q_{BIO} es el consumo anual de biocombustible de un sistema dado y F_{EM} son las emisiones GHG (greenhouse gases), sin embargo (Barakat, Samy, Eteiba, & Wahba, 2016) lo calculan usando HOMER®.

Los gases que provocan el efecto invernadero (GHG) que se estudian en (Barakat, Samy, Eteiba, & Wahba, 2016) y (Shafiullah & Carter, 2016) son: CO_x, SO_x, NO_x, material particulado e hidrocarburos sin quemar.

De forma general los autores consultados calculan las emisiones de CO₂ usando estimaciones del software HOMER®, sin embargo, algunos usan datos referencia tomados de otros estudios, cómo es el caso de (Ismail, Moghavvemi, & Mahlia, 2013) que emplea los datos de (Mazandarani, Mahlia, Chong, & Moghavvemi, 2011).

1.3.4 Económico

Entre los principales aspectos económicos tratados por los autores, en orden de importancia porcentual, se encuentran: (i) El valor presente neto del proyecto (VPN/NPC), (ii) El costo de la energía generada, *Cost Of Energy* (COE), y (iii) Costo de ciclo de vida del sistema, *Life Cycle Cost* (LCC).

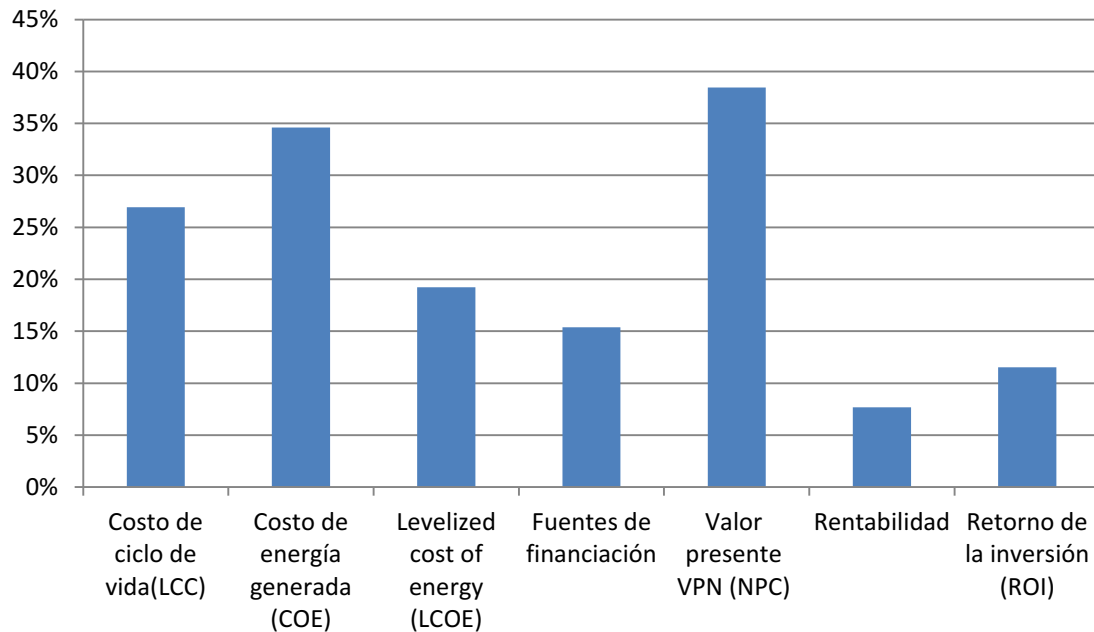


Ilustración 11. Principales aspectos económicos estudiados por los autores (elaboración propia)

1.3.4.1 Valor presente neto (VPN/NPC)

De acuerdo a (Lee, Hong, Koo, & Kim, 2017) el valor presente neto (VPN), *Net Present Cost* (NPC), es la suma de los valores de flujo de caja de entrada y salida, los cuales se descuentan basados en la tasa real de descuento, el VPN se usa para determinar la factibilidad económica de un proyecto, en general, un proyecto es económicamente factible si su $VPN > 0$, para la tasa de descuento deseada, teniendo en cuenta que 0 es el punto en el cual se alcanza el punto de quiebre, en general el VPN se calcula así:

Ecuación 2. Valor presente neto

$$VPN = \sum_{t=0}^n \frac{E_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{S_t}{(1+r)^t}$$

Dónde n son los periodos de estudio, t es un periodo dado, E_t son las entradas en el periodo t , S_t las salidas en el periodo t y r es la tasa real de descuento.

1.3.4.2 Costo de ciclo de vida del sistema, *Life Cycle Cost* (LCC)

De acuerdo a (Kazem, Khatib, Sopian, & Elmenreich, 2014) el costo de ciclo de vida, *Life Cycle Cost* (LCC), de un sistema solar FV incluye los paneles, la estructura de soporte, el inversor, el

cableado, el equipo y la instalación, además de los costos de preparación del sitio de instalación, el diseño del sistema, la mano de obra de instalación, los permisos y los costos de mantenimiento y operación, así:

Ecuación 3. Costo de ciclo de vida

$$LCC = C_C + \sum_1^n C_{O\&M} \times P + \sum_1^n C_R \times P - C_S \times P$$

Dónde C_C es el costo de capital, $C_{O\&M}$ es el costo de operación y mantenimiento, P es el factor de conversión para traer cada valor a valor presente $P = F/(1+r)^n$, F es el valor futuro, r es la tasa de descuento dada, n un año dado, C_R es el costo de reemplazo de componentes, y C_S es el costo de salvamento del sistema.

1.3.4.3 Costo de la energía generada, Cost Of Energy (COE)

(Kazem, Khatib, Sopian, & Elmenreich, 2014) Calculan el costo de la energía generada (COE), una vez calculado el costo de ciclo de vida del sistema, *Lyfe Cycle Cost* (LCC), así:

Ecuación 4. Costo de la energía

$$COE = LCC / \sum_1^n E_t$$

Dónde E_t es la energía anual generada por el sistema.

2 METODOLOGÍA

2.1 TIPOLOGÍA

Partiendo de los hallazgos realizados en el estado del arte del proyecto se realizará un estudio de caso, a través del cual se analice la factibilidad técnica, ambiental y económica de la implementación de paneles solares fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica en las zonas no interconectadas (ZNI) de Colombia, con el fin de brindar alternativas de energías renovables no convencionales (ERNC) a zonas que tradicionalmente han sido atendidas con generadores diesel.

2.2 HERRAMIENTA DE ANÁLISIS

Dada la inclinación por el software *Homer*® evidenciada en el estado del arte (ver 1.3.2.1) se optó por realizar los análisis usando dicha herramienta y concentrando los esfuerzos investigativos en la consecución de los datos de entrada que éste requiere:

- Nombre o coordenadas del sitio a estudiar.
- Costo del ACPM en sitio (USD/l).
- Tipo de perfil de carga (Comercial, comunitario, industrial, residencial).
- Carga promedio (kWh-día requeridos para el sistema).
- Costo en USD/kW de los paneles, inversores y controladores.
- Costo en USD/batería a usarse.
- Costo en USD/kW de los generadores diesel.
- Variables económicas (tasa de descuento e inflación).

2.3 CONSIDERACIONES ESPECIALES

Teniendo en cuenta que en los sitios de estudio actualmente se usan generadores diesel se analizaron dos alternativas para cada municipio: (i) para un escenario actual, en el cual dada la existencia de generadores diesel el costo inicial de suministro, transporte e instalación de los equipos es nulo (se usó 1 USD/kW para efectos de cálculo) y (ii) la alternativa para el caso futuro en que el generador fuera a ser reemplazado.

Comparando así económicamente la energía solar FV con la generada por diesel en un caso de implementación desde cero y en un caso de generador diesel existente.

3 TRATAMIENTO DE DATOS

Para la consecución de los datos necesarios para llevar a cabo el análisis en *Homer*® se realizó primeramente la revisión bibliográfica descrita en el estado del arte del presente documento, luego se complementó con la revisión de la legislación nacional y por último se llevo a cabo un trabajo de cotización de generadores solares FV y diesel en Colombia, además de sus respectivos costos de instalación y transporte.

3.1 VERIFICACIÓN ZNI

Con el fin de confirmar si los 35 municipios que se entienden como ZNI en el anexo de la Circular 069 de 2017 de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) de la Republica de Colombia, se realizó una verificación con los datos del SIEL (Sistema de Información Eléctrico Colombiano) dónde existen bases de datos (SIEL, 2009), en que se expresa la cobertura del SIN en las cabeceras y en las zonas rurales de los municipios de Colombia. Se obtuvo que la cabecera municipal del municipio de Calamar, Guaviare si se encuentra conectada al SIN, motivo por el cual se descartó del análisis, obteniendo así 34 municipios.

3.2 RADIACIÓN Y COORDENADAS

Teniendo en cuenta que el software *Homer*® posee una herramienta de búsqueda de coordenadas a través del nombre del sitio se reduce este dato de entrada a una variable secundaria, que únicamente con el nombre del sitio es resuelta.

Sin embargo, con el fin de brindar confiabilidad a los datos de coordenadas se realizó una verificación para cada sitio empleando el software de Google Earth®.

3.3 COSTO DEL ACPM

Para los costos del ACPM en las ZNI se usaron datos reales para el mes de marzo de 2018 en las estaciones de servicio (EDS) de los centros de abasto de las ZNI.

Tabla 2. Precios del combustible en los centros de abasto para marzo de 2018

| Centro de abasto | Precio (COP/gal) |
|-------------------------|-----------------------------|
| Buenaventura | 8240 |
| Florencia | 8480 |
| Medellín | 8370 |
| Leticia | 9616 |
| Mansilla | 8160 |
| Puerto Asís | 7043 |
| Puerto Carreño | 7700 |
| San José de Guaviare | 9804 |
| Turbo | 8400 |
| Yumbo | 8096 |

Además de los costos de combustible en los centros de abasto y teniendo en cuenta que las ZNI se destacan por su lejanía de los principales centros poblados y de abasto del país se optó por usar un costo de ACPM variable para cada sitio de análisis, teniendo en cuenta que los costos de transporte de este combustible pueden hacer variar ostensiblemente su precio final.

Para los costos de transporte de combustible se tuvo en cuenta la Circular 069 de 2017 de la Comisión de Regulación de Energía y Gas de la Republica de Colombia (CREG, 2017), referente a: “Actualización de la matriz referencia de costos de transporte de combustible y lubricante en las Zonas No Interconectadas (ZNI)”, incluyendo además una hoja de cálculo (la cual se tomó como referencia).

Tabla 3. Costo de transporte de combustible del centro de abasto a la cabecera municipal

(CREG, 2017)

| Centro Abasto | Municipio | Costo (COP/Gal) | Centro Abasto | Municipio | Costo (COP/Gal) | Centro Abasto | Municipio | Costo (COP/Gal) |
|----------------------|----------------|-----------------|---------------|----------------------------------|-----------------|---------------|---------------------|-----------------|
| Mansilla | Cumaribo | 1,650 | Puerto Asís | Puerto Leguízamo | 500 | Buenaventura | Bahía Solano | 1,195 |
| Mansilla | La Primavera | 1,800 | Buenaventura | El Charco | 895 | Buenaventura | Bajo Baudó | 895 |
| Mansilla | Santa Rosalía | 1,100 | Buenaventura | Iscuandé - Santa Barbara | 895 | Buenaventura | Juradó | 1,645 |
| Puerto Carreño | Puerto Carreño | 28 | Buenaventura | La Tola | 895 | Buenaventura | Litoral De San Juan | 895 |
| Florencia | La Macarena | 1,500 | Buenaventura | Mosquera | 1,095 | Medellín | Medio Atrato | 1,000 |
| San José de Guaviare | Mapiripán | 500 | Buenaventura | Bocas de Satinga (Olaya Herrera) | 995 | Buenaventura | Nuquí | 995 |
| Mansilla | Inírida | 2,300 | Yumbo | Salahonda (Pizarro) | 1,200 | Buenaventura | Sipí | 1,000 |
| San José de Guaviare | Miraflores | 2,900 | Buenaventura | Guapi | 695 | Turbo | Bellavista (Bojayá) | 0 |
| San José de Guaviare | Mitú | 11,360 | Buenaventura | López De Micay | 790 | Turbo | Unguía | 300 |
| Leticia | Taraira | 10,000 | Buenaventura | Timbiquí | 895 | Turbo | Acandí | 450 |
| San José de Guaviare | Carurú | 11,360 | Buenaventura | Alto Baudó (Pie De Pato) | 1,195 | Turbo | Vigía Del Fuerte | 600 |
| Florencia | Solano | 675 | | | | | | |

Cabe resaltar que para el caso de Mitú, Taraira y Carurú Vaupés el transporte se hace por medios aéreos lo cual incrementa significativamente su costo.

3.4 PERFIL DE CARGA

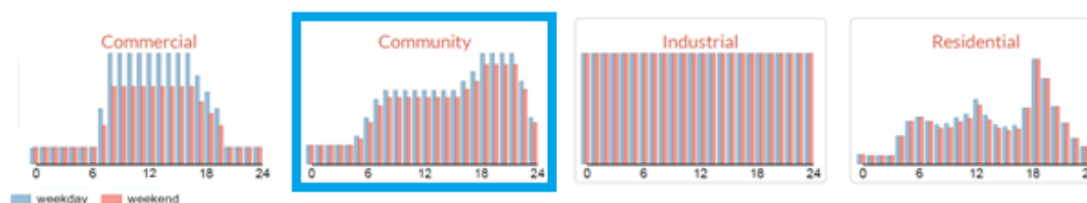


Ilustración 12. Perfiles de carga usados en Homer®

Dentro de los perfiles de carga a elegir se optó por el comunitario, debido al enfoque social que se pretende tener con el presente trabajo.

3.5 DEMANDA DE ENERGÍA

Para la obtención de la demanda de energía requerida en cada cabecera municipal se multiplicará la población a 2017 proyectada por el DANE para cada una de las cabeceras municipales y el consumo promedio de energía eléctrica obtenido de EPM.

3.5.1 Consumo promedio

De acuerdo con (EPM, 2012) el consumo promedio por persona en Colombia es de 38 kWh-mes, los cuales cubren consumos suficientes incluso para usuarios urbanos.

3.5.2 Población

Para el cálculo de la población en 2017 en los municipios a efectuarse el análisis de factibilidad se tendrá en cuenta el estudio de estimaciones y proyecciones de población del DANE, en el cual se establecen las poblaciones de los centros poblados a estudiarse. (DANE, 2007)

3.6 COSTO DE LOS SISTEMAS SOLARES FV

3.6.1 Suministro e instalación

Para calcular el costo de los sistemas solares FV se realizó una cotización (Hybrytec SAS, 2017), en la cual se obtuvieron los costos de sistemas de 1, 2, 4, 8 y 10 kWp de capacidad, en la Tabla 4 se analizan los costos porcentuales para un sistema de 1kWp.

Tabla 4. Costo de equipos sistema solar FV de 1kWp

| Descripción | Cantidad (un) | Unitario (COP) | Total (COP) | % del total |
|--|--------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|
| Panel Solar GT 265 Wp | 4 | 598,900 | 2,395,600 | 15.91% |
| Batería AGM sellada 12V/300 Ah | 4 | 2,414,000 | 9,656,000 | 64.14% |
| Controlador MPPT 50A-12/24VDC VICTRON MPPT 100/50 | 1 | 1,279,000 | 1,279,000 | 8.50% |
| Protección de baterías 65A Victron | 1 | 194,000 | 194,000 | 1.29% |
| Inversor Onda Pura 24V - 800W Victron Phoenix | 1 | 1,326,000 | 1,326,000 | 8.81% |
| Cable solar 6 mm | 20 | 5,409 | 108,180 | 0.72% |
| Terminal hembra simple MC4 | 3 | 7,000 | 21,000 | 0.14% |
| Terminal macho simple MC4 | 3 | 6,000 | 18,000 | 0.12% |
| Conector (hembra) y 1 negativo / 2 positivo | 1 | 28,000 | 28,000 | 0.19% |
| Conector (macho) y 1 positivo / 2 negativo | 1 | 28,000 | 28,000 | 0.19% |
| TOTAL | | | 15,053,780 | 100.00% |

De acuerdo a los datos de la tabla anterior se observa que el costo total de suministro de equipos para un 1 kWp con una TRM de 3000 COP/USD es de alrededor de los 5000 USD/kWp.

Tabla 5. Costo en USD/kWp para 1, 2, 4, 8 y 10

| | 1 kWp | 2 kWp | 4 kWp | 8 kWp | 10 kWp |
|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| COP | 15,053,780 | 25,883,000 | 59,749,700 | 123,063,500 | 173,521,700 |
| USD | 5,018 | 8,628 | 19,917 | 41,021 | 57,841 |
| USD/KWp | 5,018 | 4,314 | 4,979 | 5,128 | 5,784 |

Dada la cotización de (Hybrytec SAS, 2017) se obtienen resultados de entre 4300 y 5800 USD/kWp aproximadamente, para un valor promedio de 5045 USD/kWp, es decir, 5000 USD/kWp aproximadamente (por concepto de suministro de equipos, sin instalación ni transporte).

Cabe resaltar que los costos de instalación constituyen un porcentaje adicional de un 30% sobre el costo del suministro de los equipos.

3.6.2 Transporte de los equipos

Para el costeo del transporte de los equipos a usarse se realizaron cotizaciones directas con empresas de mensajería para el envío desde la ciudad de origen de los equipos hasta los centros de abasto y se estimó un transporte adicional de acuerdo a los datos de transporte de combustible de los centros de abasto hasta los municipio ZNI.

Tomando como origen la ciudad de Medellín, y calculando un volumen aproximado de 2 m³, un peso de 320 kg y de \$15.000.000 de pesos por cada kW se cotizó con Servientrega la entrega de los equipos en los centros de abasto.

Tabla 6. Transporte de la ciudad de origen al centro de abasto.

| Ciudad de Origen | Ciudad de Destino | Medio de transporte | Valor (COP) |
|-------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------|
| Medellín | Buenaventura | Terrestre | 488,360 |
| Medellín | Florencia | Terrestre | 426,920 |
| Medellín | Leticia | Aéreo | 2,324,500 |
| Medellín | Facatativa | Terrestre | 285,800 |
| Medellín | Puerto Asís | Terrestre | 2,324,500 |
| Medellín | Puerto Carreño | Aéreo | 2,324,500 |
| Medellín | San José del Guaviare | Terrestre | 2,324,500 |
| Medellín | Turbo | Terrestre | 426,920 |
| Medellín | Yumbo | Terrestre | 285,800 |

3.7 COSTO DE LOS EQUIPOS DE GENERACIÓN DIESEL

Para el costo de los equipos de generación diesel se dividió de igual forma el costo en suministro, transporte e instalación.

El costo del suministro del equipo de acuerdo su precio comercial se estableció alrededor de los \$670.000 pesos por kW instalado y su costo de instalación en el 10% del costo de suministro.

4 RESULTADOS DEL ANÁLISIS

4.1 DATOS DE ENTRADA RECABADOS

4.1.1 Costos de combustible

Para obtener los costos de combustible a usarse en los análisis se suman los costos en el centro de abasto y los de transporte hacia el municipio, y se asume una relación de conversión monetaria para el análisis de 3000 COP/USD.

Tabla 7. Costo del ACPM en los municipios ZNI

| Municipio Departam | Costo (COP/gal) | Costo (USD/l) | Municipio Departam | Costo (COP/gal) | Costo (USD/l) | Municipio Departam | Costo (COP/gal) | Costo (USD/l) |
|------------------------|-----------------|---------------|-------------------------------|-----------------|---------------|-------------------------------|-----------------|---------------|
| Cumaribo Vichada | 9810 | 0.87 | Puerto Leguizamo Putumayo | 7543 | 0.67 | Bahía Solano Chocó | 9435 | 0.84 |
| La primavera Vichada | 9960 | 0.89 | El Charco Nariño | 9135 | 0.81 | Bajo Baudó Chocó | 9135 | 0.81 |
| Santa Rosalia Vichada | 9260 | 0.82 | Iscuandé (Sta Barbara) Nariño | 9135 | 0.81 | Juradó Chocó | 9885 | 0.88 |
| Puerto Carreño Vichada | 7728 | 0.69 | La Tola Nariño | 9135 | 0.81 | El Litoral del San Juan Chocó | 9135 | 0.81 |
| Macarena Meta | 9980 | 0.89 | Mosquera Nariño | 9335 | 0.83 | Medio Atrato Chocó | 9370 | 0.83 |
| Mapiripan Meta | 10304 | 0.92 | Olaya Herrera Nariño | 9235 | 0.82 | Nuquí Chocó | 9235 | 0.82 |
| Inírida Guainía | 10460 | 0.93 | Pizarro Nariño | 9296 | 0.83 | Sipí Chocó | 9240 | 0.82 |
| Miraflores Guaviare | 12704 | 1.13 | Guapí Cauca | 8935 | 0.79 | Bojayá Chocó | 8400 | 0.75 |

| Municipio Departam | Costo (COP/gal) | Costo (USD/l) | Municipio Departam | Costo (COP/gal) | Costo (USD/l) | Municipio Departam | Costo (COP/gal) | Costo (USD/l) |
|--------------------|-----------------|---------------|--------------------|-----------------|---------------|----------------------------|-----------------|---------------|
| Mitú Vaupés | 21164 | 1.88 | López Cauca | 9030 | 0.80 | Unguía Chocó | 8700 | 0.77 |
| Taraira Vaupés | 19616 | 1.74 | Timbiquí Cauca | 9135 | 0.81 | Acandí Chocó | 8850 | 0.79 |
| Carurú Vaupés | 21164 | 1.88 | Alto Baudó Chocó | 9435 | 0.84 | Vigía del fuerte Antioquia | 9000 | 0.80 |
| Solano Caquetá | 9155 | 0.81 | | | | | | |

4.1.2 Transporte de los equipos solares FV desde el centro de abasto

Para el transporte desde el centro de abasto hasta el municipio ZNI se realizó una relación con los costos de transportes del combustible tanto en peso (kg), como en volumen (l) y se estableció que el caso más conservador (mayor precio) era usar la relación por volumen.

Tabla 8. Costo total de transporte de los equipos solares FV

| Municipio | Costo transporte (COP/kW) | Municipio | Costo transporte (COP/kW) | Municipio | Costo transporte (COP/kW) |
|----------------|---------------------------|----------------------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|
| Cumaribo | 515,011 | Puerto Leguízamo | 2,393,958 | Bahía Solano | 654,364 |
| La Primavera | 535,848 | El Charco | 612,689 | Bajo Baudó | 612,689 |
| Santa Rosalía | 438,607 | Iscuandé - Santa Barbara | 612,689 | Juradó | 716,876 |
| Puerto Carreño | 2,328,390 | La Tola | 612,689 | Litoral De San Juan | 612,689 |
| La Macarena | 635,293 | Mosquera | 640,472 | Medio Atrato | 138,915 |
| Mapiripán | 2,393,958 | Bocas de Satinga (Olaya Herrera) | 626,581 | Nuquí | 626,581 |
| Inírida | 605,306 | Salahonda (Pizarro) | 452,499 | Sipí | 627,275 |

| Municipio | Costo transporte (COP/kW) | Municipio | Costo transporte (COP/kW) | Municipio | Costo transporte (COP/kW) |
|------------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------------------|---------------------|----------------------------------|
| Miraflores | 2,727,355 | Guapi | 584,906 | Bellavista (Bojayá) | 426,920 |
| Mitú | 3,902,580 | López De Micay | 598,103 | Unguía | 468,595 |
| Taraira | 3,713,655 | Timbiquí | 612,689 | Acandí | 489,432 |
| Carurú | 3,902,580 | Alto Baudó (Pie De Pato) | 654,364 | Vigía Del Fuerte | 510,269 |
| Solano | 520,688 | | | | |

4.1.3 Costo total de los equipos solares FV

Teniendo en cuenta los análisis anteriores de costo de suministro, transporte e instalación de los equipos para la generación de energía solar FV se obtienen los costos totales, (para una TRM de análisis de 3000 COP/USD).

Dentro de los costos totales de los equipos solares se obtiene un porcentaje de 64,14% de costo de las baterías y un 35,86% de paneles, inversores, controladores, cables, protecciones y demás.

Tabla 9. Costo total de equipos solares FV (USD/kW)

| Municipio | Costo total (USD/kW) | Municipio | Costo total (USD/kW) | Municipio | Costo total (USD/kW) |
|------------------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|
| Cumaribo | 6,730 | Puerto Leguízamo | 7,356 | Bahía Solano | 6,776 |
| La Primavera | 6,736 | El Charco | 6,762 | Bajo Baudó | 6,762 |
| Santa Rosalía | 6,704 | Iscuandé - Santa Barbara | 6,762 | Juradó | 6,797 |
| Puerto Carreño | 7,334 | La Tola | 6,762 | Litoral De San Juan | 6,762 |
| La Macarena | 6,770 | Mosquera | 6,771 | Medio Atrato | 6,604 |
| Mapiripán | 7,356 | Bocas de Satinga (Olaya Herrera) | 6,767 | Nuquí | 6,767 |

| Municipio | Costo total (USD/kW) | Municipio | Costo total (USD/kW) | Municipio | Costo total (USD/kW) |
|------------|----------------------|--------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| Inírida | 6,760 | Salahonda (Pizarro) | 6,709 | Sipí | 6,767 |
| Miraflores | 7,467 | Guapi | 6,753 | Bellavista (Bojayá) | 6,700 |
| Mitú | 7,859 | López De Micay | 6,757 | Unguía | 6,714 |
| Taraira | 7,796 | Timbiquí | 6,762 | Acandí | 6,721 |
| Carurú | 7,859 | Alto Baudó (Pie De Pato) | 6,776 | Vigía Del Fuerte | 6,728 |
| Solano | 6,731 | | | | |

4.1.4 Costo total de los equipos de generación diesel

El costo del transporte se asumió variable y se calculó para cada municipio de instalación de los equipos, finalmente con una TRM de 3000 COP/USD se computó un costo total en USD/kW por concepto de suministro, transporte e instalación.

Tabla 10. Costo total de los equipos de generación diesel

| Municipio | Costo total (USD/kW) | Municipio | Costo total (USD/kW) | Municipio | Costo total (USD/kW) |
|----------------|----------------------|----------------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| Cumaribo | 298 | Puerto Leguizamo | 335 | Bahía Solano | 301 |
| La Primavera | 298 | El Charco | 300 | Bajo Baudó | 300 |
| Santa Rosalía | 297 | Iscuandé - Santa Barbara | 300 | Jurado | 302 |
| Puerto Carreño | 334 | La Tola | 300 | Litoral De San Juan | 300 |
| La Macarena | 300 | Mosquera | 300 | Medio Atrato | 291 |
| Mapiripán | 335 | Bocas de Satinga (Olaya Herrera) | 300 | Nuquí | 300 |
| Inírida | 299 | Salahonda (Pizarro) | 297 | Sipí | 300 |

| Municipio | Costo total (USD/kW) | Municipio | Costo total (USD/kW) | Municipio | Costo total (USD/kW) |
|------------|----------------------|--------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| Miraflores | 339 | Guapi | 300 | Bellavista (Bojayá) | 297 |
| Mitú | 357 | López De Micay | 300 | Unguía | 298 |
| Taraira | 354 | Timbiquí | 300 | Acandí | 298 |
| Carurú | 357 | Alto Baudó (Pie De Pato) | 301 | Vigía Del Fuerte | 298 |
| Solano | 298 | | | | |

4.1.5 Variables económicas

Para el análisis económico del costo neto presente y el flujo de fondos del proyecto se tomó la inflación meta para este año 2018, del 3%. (Banco de la República de Colombia, 2013)

Tomando como referencia los TES (títulos de deuda pública) de Colombia con plazo de 16 años, con fecha de cumplimiento del 14 de febrero de 2018, de (6.71%), (Banco de la República de Colombia, 2013), se optó por una tasa real del 6.8% la cual es un poco mayor a dicha tasa referencia.

Ecuación 5. Tasa de interés real y tasa de descuento

$$i_{real} = \left(\frac{1 + i_{dto}}{1 + inf} \right) - 1$$

$$i_{dto} = [(1 + i_{real}) \cdot (1 + inf)] - 1$$

Dónde i_{real} es la tasa de interés real, i_{dto} es la tasa de descuento, e inf es la inflación.

Teniendo en cuenta la ecuación de interés real se obtiene una tasa de descuento del 10%.

4.2 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

De acuerdo a las alternativas planteadas en el numeral 2.3 se obtuvo que el análisis del caso de reemplazo de generadores diesel cuando estos lleguen al final de su vida útil y el reemplazo inmediato no alteran el orden ni la capacidad de las alternativas analizadas, esto debido a que dado el costo de la generación diesel, éste siempre se encuentra entre las mejores alternativas obtenidas, ya sea de forma individual o de forma híbrida.

4.3 CLASIFICACIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo con los resultados obtenidos de las simulaciones en Homer® se clasificaron los municipios ZNI de acuerdo con la alternativa (diesel, diesel + solar FV, diesel + baterías, solar FV + baterías, o diesel + solar FV + baterías) que mejor se adapta en términos de *Net Present Cost* (NPC) y *Cost Of Energy* (COE).

Las alternativas de diesel + baterías y de solar FV + baterías no fueron la mejor para ninguno de los municipios, esto debido, en gran parte, al alto costo de las baterías.

Tabla 11. Mejor alternativa para cada municipio ZNI

| Municipio Departamento | Mejor Alternativa | Municipio Departamento | Mejor Alternativa | Municipio Departamento | Mejor Alternativa |
|---------------------------|----------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| Cumaribo Vichada | diesel + solar FV | Mitú Vaupés | diesel + solar FV + Baterías | Bahía Solano Chocó | diesel |
| La primavera Vichada | | Taraira Vaupés | | Bajo Baudó Chocó | |
| Santa Rosalía Vichada | | Carurú Vaupés | | El Litoral del San Juan Chocó | |
| Macarena Meta | | Puerto Carreño Vichada | diesel | Medio Atrato Chocó | |
| Mapiripan Meta | | Solano Caquetá | | Nuquí Chocó | |
| Inírida Guainía | | Puerto Leguizamo Putumayo | | Sipí Chocó | |
| Miraflores Guaviare | | Iscuandé (Sta Barbara) Nariño | | Bojayá Chocó | |
| El Charco Nariño | | Guapí Cauca | | Unguía Chocó | |
| La Tola Nariño | | López Cauca | | Acandí Chocó | |
| Mosquera Nariño | | Timbiquí Cauca | | Vigia del fuerte Antioquia | |
| Olaya Herrera Nariño | | Alto Baudó Chocó | | | |
| Pizarro Nariño | | | | | |
| Juradó Chocó | | | | | |

4.4 ALTERNATIVA DIESEL

De los 34 municipios analizados se obtuvo que en 18 la mejor alternativa es continuar con el uso del diesel, es decir un 52,9% de ellos, confirmando que el diesel es una forma realmente económica de solventar la falta de interconexión eléctrica de estos municipios.

4.4.1 Resultados

Teniendo en cuenta que se realizó un análisis de alternativas para llegar a esta conclusión, se presentan a continuación las mejores alternativas en *Net Present Cost* (NPC), dentro de cada opción de combinación entre diesel, solar FV y baterías.

Ver página siguiente.

Tabla 12.Resultados de municipios con diesel como mejor alternativa (1 de 3)

| Municipio Departamento | Architecture/ PV (kW) | Architectu re/Gen (kW) | Architec ture/1k Wh LA | Cost/COE (USD) | Cost/NPC (USD) | Cost/Operating cost (USD/yr) | Cost/Initial capital (USD) | System/Total Fuel (L/yr) | System/CO2 (kg/yr) | Gen/Production (kWh) | Gen/Fuel (L) | Gen/O&M Cost (USD/yr) | Gen/Fuel Cost (USD/yr) | PV/Capital Cost (USD) | PV/Production (kWh/yr) |
|--------------------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Puerto Carreño Vichada | 0.0 | 2,400 | - | 0.331 | 22,700,000 | 2,104,807 | 2,400 | 2,134,460 | 5,587,194 | 7,288,739 | 2,134,460 | 630,720 | 1,472,777 | - | - |
| | 2.8 | 2,400 | - | 0.331 | 22,700,000 | 2,104,194 | 9,848 | 2,133,531 | 5,584,762 | 7,285,041 | 2,133,531 | 630,720 | 1,472,136 | 7,448 | 4,354 |
| | 0.0 | 2,400 | 38 | 0.333 | 22,700,000 | 2,103,891 | 97,749 | 2,132,549 | 5,582,191 | 7,281,131 | 2,132,549 | 630,720 | 1,471,459 | - | - |
| | 29.1 | 2,400 | 48 | 0.333 | 22,800,000 | 2,097,239 | 200,038 | 2,122,313 | 5,555,397 | 7,240,382 | 2,122,313 | 630,720 | 1,464,396 | 76,403 | 44,665 |
| | 11849.9 | - | 19,483 | 1.266 | 83,600,000 | 324,987 | 80,100,000 | - | - | - | - | - | - | 31,200,000 | 18,200,000 |
| Solano Caquetá | 0.0 | 340 | - | 0.390 | 3,782,071 | 351,332 | 340 | 323,203 | 846,021 | 1,034,496 | 323,203 | 89,352 | 261,794 | - | - |
| | 0.4 | 340 | - | 0.390 | 3,782,116 | 351,246 | 1,311 | 323,092 | 845,730 | 1,034,054 | 323,092 | 89,352 | 261,704 | 971 | 509 |
| | 0.0 | 340 | 5 | 0.391 | 3,791,953 | 351,178 | 11,879 | 322,947 | 845,351 | 1,033,478 | 322,947 | 89,352 | 261,587 | - | - |
| | 11.7 | 340 | 5 | 0.391 | 3,794,065 | 348,696 | 40,709 | 319,726 | 836,920 | 1,020,656 | 319,726 | 89,352 | 258,978 | 28,305 | 14,842 |
| | 2156.1 | - | ,956 | 1.346 | 12,600,000 | 53,202 | 12,000,000 | - | - | - | - | - | - | 5,204,737 | 2,729,174 |
| Puerto Leguizamo Putumayo | 0.0 | 1,700 | - | 0.331 | 15,600,000 | 1,451,700 | 1,700 | 1,498,525 | 3,922,563 | 5,065,278 | 1,498,525 | 446,760 | 1,004,012 | - | - |
| | 2.0 | 1,700 | - | 0.331 | 15,600,000 | 1,451,355 | 6,854 | 1,497,981 | 3,921,138 | 5,063,112 | 1,497,981 | 446,760 | 1,003,648 | 5,154 | 2,545 |
| | 0.0 | 1,700 | 26 | 0.333 | 15,700,000 | 1,451,076 | 67,128 | 1,497,183 | 3,919,049 | 5,059,934 | 1,497,183 | 446,760 | 1,003,113 | - | - |
| | 20.0 | 1,700 | 33 | 0.333 | 15,700,000 | 1,447,280 | 138,158 | 1,491,093 | 3,903,107 | 5,035,690 | 1,491,093 | 446,760 | 999,032 | 52,872 | 26,108 |
| | 9856.8 | - | 14,380 | 1.429 | 65,000,000 | 252,259 | 62,300,000 | - | - | - | - | - | - | 26,000,000 | 12,800,000 |
| Iscuandé (Sta Barbara) Nariño | 0.0 | 520 | - | 0.380 | 5,670,972 | 526,798 | 520 | 481,307 | 1,259,877 | 1,588,560 | 481,307 | 136,656 | 389,859 | - | - |
| | 0.6 | 520 | - | 0.380 | 5,671,038 | 526,665 | 2,020 | 481,135 | 1,259,426 | 1,587,875 | 481,135 | 136,656 | 389,719 | 1,500 | 779 |
| | 0.0 | 520 | 8 | 0.381 | 5,686,909 | 526,557 | 19,059 | 480,904 | 1,258,821 | 1,586,955 | 480,904 | 136,656 | 389,532 | - | - |
| | 18.0 | 520 | 8 | 0.381 | 5,690,057 | 522,713 | 63,585 | 475,917 | 1,245,768 | 1,567,105 | 475,917 | 136,656 | 385,493 | 43,721 | 22,694 |
| | 3329.6 | - | 4,737 | 1.388 | 20,000,000 | 84,052 | 19,100,000 | - | - | - | - | - | - | 8,074,306 | 4,190,978 |
| Guapí Cauca | 0.0 | 3,200 | - | 0.364 | 33,100,000 | 3,075,010 | 3,200 | 2,825,701 | 7,396,597 | 9,704,142 | 2,825,701 | 840,960 | 2,232,304 | - | - |
| | 3.8 | 3,200 | - | 0.364 | 33,100,000 | 3,074,228 | 12,327 | 2,824,664 | 7,393,882 | 9,700,012 | 2,824,664 | 840,960 | 2,231,484 | 9,127 | 4,743 |
| | 0.0 | 3,200 | 50 | 0.365 | 33,200,000 | 3,073,544 | 118,878 | 2,823,174 | 7,389,982 | 9,694,081 | 2,823,174 | 840,960 | 2,230,307 | - | - |
| | 109.8 | 3,200 | 51 | 0.365 | 33,200,000 | 3,050,849 | 392,039 | 2,792,931 | 7,310,819 | 9,573,689 | 2,792,931 | 840,960 | 2,206,416 | 265,979 | 138,240 |
| | 20347.2 | - | 28,823 | 1.387 | 122,000,000 | 512,532 | 116,000,000 | - | - | - | - | - | - | 49,300,000 | 25,600,000 |
| López Cauca | 0.0 | 1,100 | - | 0.384 | 11,400,000 | 1,060,962 | 1,100 | 964,102 | 2,523,648 | 3,217,197 | 964,102 | 289,080 | 771,282 | - | - |
| | 1.2 | 1,100 | - | 0.384 | 11,400,000 | 1,060,714 | 4,084 | 963,777 | 2,522,796 | 3,215,901 | 963,777 | 289,080 | 771,021 | 2,984 | 1,551 |
| | 0.0 | 1,100 | 16 | 0.385 | 11,500,000 | 1,060,453 | 38,144 | 963,254 | 2,521,428 | 3,213,820 | 963,254 | 289,080 | 770,603 | - | - |
| | 12.6 | 1,100 | 21 | 0.386 | 11,500,000 | 1,057,677 | 80,652 | 959,552 | 2,511,738 | 3,199,084 | 959,552 | 289,080 | 767,642 | 30,613 | 15,910 |
| | 7174.7 | - | 8,821 | 1.382 | 39,700,000 | 166,805 | 37,900,000 | - | - | - | - | - | - | 17,400,000 | 9,034,780 |

Tabla 13. Resultados de municipios con diesel como mejor alternativa (2 de 3)

| Municipio Departamento | Architecture/ PV (kW) | Architecture/ Gen (kW) | Architecture/ 1k Wh LA | Cost/COE (USD) | Cost/NPC (USD) | Cost/Operating cost (USD/yr) | Cost/Initial capital (USD) | System/Total Fuel (L/yr) | System/CO2 (kg/yr) | Gen/Production (kWh) | Gen/Fuel (L) | Gen/O&M Cost (USD/yr) | Gen/Fuel Cost (USD/yr) | PV/Capital Cost (USD) | PV/Production (kWh/yr) |
|--------------------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Timbiquí Cauca | 0.0 | 760 | - | 0.377 | 8,243,938 | 765,811 | 760 | 698,356 | 1,828,026 | 2,327,322 | 698,356 | 199,728 | 565,668 | - | - |
| | 0.9 | 760 | - | 0.377 | 8,244,029 | 765,615 | 2,960 | 698,103 | 1,827,364 | 2,326,315 | 698,103 | 199,728 | 565,463 | 2,200 | 1,142 |
| | 0.0 | 760 | 12 | 0.378 | 8,267,877 | 765,452 | 28,560 | 697,756 | 1,826,456 | 2,324,934 | 697,756 | 199,728 | 565,182 | - | - |
| | 26.4 | 760 | 12 | 0.378 | 8,272,307 | 759,799 | 93,844 | 690,424 | 1,807,263 | 2,295,745 | 690,424 | 199,728 | 559,243 | 64,104 | 33,281 |
| | 4885.9 | - | 6,926 | 1.387 | 29,300,000 | 123,334 | 27,900,000 | - | - | - | - | - | - | 11,800,000 | 6,151,357 |
| Alto Baudó Chocó | 0.0 | 1,800 | - | 0.386 | 19,600,000 | 1,818,029 | 1,800 | 1,600,008 | 4,188,205 | 5,424,257 | 1,600,008 | 473,040 | 1,344,007 | - | - |
| | 2.1 | 1,800 | - | 0.386 | 19,600,000 | 1,817,608 | 6,906 | 1,599,482 | 4,186,828 | 5,422,162 | 1,599,482 | 473,040 | 1,343,565 | 5,106 | 2,424 |
| | 0.0 | 1,800 | 28 | 0.387 | 19,600,000 | 1,817,129 | 66,772 | 1,598,583 | 4,184,475 | 5,418,584 | 1,598,583 | 473,040 | 1,342,810 | - | - |
| | 21.6 | 1,800 | 36 | 0.387 | 19,600,000 | 1,812,422 | 138,287 | 1,592,610 | 4,168,840 | 5,394,806 | 1,592,610 | 473,040 | 1,337,792 | 52,383 | 24,868 |
| | 12911.0 | - | 16,315 | 1.483 | 72,500,000 | 302,897 | 69,300,000 | - | - | - | - | - | - | 31,400,000 | 14,900,000 |
| Bahia Solano Chocó | 0.0 | 860 | - | 0.387 | 9,536,364 | 885,871 | 860 | 784,993 | 2,054,809 | 2,621,826 | 784,993 | 226,008 | 659,394 | - | - |
| | 1.0 | 860 | - | 0.387 | 9,536,460 | 885,650 | 3,339 | 784,717 | 2,054,087 | 2,620,728 | 784,717 | 226,008 | 659,162 | 2,479 | 1,258 |
| | 0.0 | 860 | 14 | 0.388 | 9,564,133 | 885,434 | 33,332 | 784,296 | 2,052,985 | 2,619,053 | 784,296 | 226,008 | 658,809 | - | - |
| | 29.7 | 860 | 14 | 0.389 | 9,568,593 | 879,013 | 106,907 | 776,270 | 2,031,975 | 2,587,101 | 776,270 | 226,008 | 652,067 | 72,247 | 36,671 |
| | 6212.4 | - | 7,585 | 1.440 | 34,200,000 | 142,114 | 32,700,000 | - | - | - | - | - | - | 15,100,000 | 7,662,451 |
| Bajo Baudó Chocó | 0.0 | 580 | - | 0.381 | 6,284,125 | 583,756 | 580 | 532,118 | 1,392,881 | 1,758,840 | 532,118 | 152,424 | 431,016 | - | - |
| | 0.7 | 580 | - | 0.381 | 6,284,369 | 583,625 | 2,237 | 531,948 | 1,392,435 | 1,758,161 | 531,948 | 152,424 | 430,878 | 1,657 | 781 |
| | 0.0 | 580 | 9 | 0.382 | 6,302,029 | 583,483 | 21,431 | 531,662 | 1,391,687 | 1,757,025 | 531,662 | 152,424 | 430,647 | - | - |
| | 19.9 | 580 | 9 | 0.383 | 6,310,170 | 579,671 | 70,597 | 526,691 | 1,378,675 | 1,737,236 | 526,691 | 152,424 | 426,620 | 48,276 | 22,747 |
| | 4717.0 | - | 4,866 | 1.504 | 23,900,000 | 101,159 | 22,800,000 | - | - | - | - | - | - | 11,400,000 | 5,389,838 |
| El Litoral del San Juan Chocó | 0.0 | 250 | - | 0.400 | 2,808,545 | 260,897 | 250 | 240,816 | 630,363 | 751,222 | 240,816 | 65,700 | 195,061 | - | - |
| | 0.3 | 250 | - | 0.400 | 2,808,654 | 260,842 | 955 | 240,744 | 630,175 | 750,936 | 240,744 | 65,700 | 195,003 | 705 | 332 |
| | 0.0 | 250 | 4 | 0.401 | 2,816,494 | 260,775 | 9,512 | 240,613 | 629,832 | 750,415 | 240,613 | 65,700 | 194,897 | - | - |
| | 3.0 | 250 | 5 | 0.402 | 2,819,486 | 260,158 | 19,146 | 239,800 | 627,703 | 747,176 | 239,800 | 65,700 | 194,238 | 7,235 | 3,407 |
| | 1785.5 | - | 2,320 | 1.507 | 10,200,000 | 42,803 | 9,723,336 | - | - | - | - | - | - | 4,329,771 | 2,038,522 |
| Medio Atrato Chocó | 0.0 | 210 | - | 0.414 | 2,417,268 | 224,550 | 210 | 203,913 | 533,766 | 627,007 | 203,913 | 55,188 | 169,248 | - | - |
| | 0.2 | 210 | - | 0.414 | 2,417,329 | 224,503 | 784 | 203,853 | 533,608 | 626,767 | 203,853 | 55,188 | 169,198 | 574 | 280 |
| | 0.0 | 210 | 3 | 0.415 | 2,422,999 | 224,452 | 7,005 | 203,756 | 533,353 | 626,380 | 203,756 | 55,188 | 169,117 | - | - |
| | 7.1 | 210 | 3 | 0.415 | 2,425,250 | 223,079 | 24,033 | 202,010 | 528,783 | 619,429 | 202,010 | 55,188 | 167,668 | 16,714 | 8,147 |
| | 1529.0 | - | 1,825 | 1.443 | 8,128,474 | 34,730 | 7,754,644 | - | - | - | - | - | - | 3,620,718 | 1,764,942 |

Tabla 14. Resultados de municipios con diesel como mejor alternativa (3 de 3)

| Municipio Departamento | Architecture/ PV (kW) | Architecture/ Gen (kW) | Architecture/ 1k Wh LA | Cost/COE (USD) | Cost/NPC (USD) | Cost/Operating cost (USD/yr) | Cost/Initial capital (USD) | System/Total Fuel (L/yr) | System/CO2 (kg/yr) | Gen/Production (kWh) | Gen/Fuel (L) | Gen/O&M Cost (USD/yr) | Gen/Fuel Cost (USD/yr) | PV/Capital Cost (USD) | PV/Production (kWh/yr) |
|-----------------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Nuquí Chocó | 0.0 | 670 | - | 0.381 | 7,343,502 | 682,167 | 670 | 616,738 | 1,614,382 | 2,048,596 | 616,738 | 176,076 | 505,725 | - | - |
| | 0.8 | 670 | - | 0.381 | 7,343,724 | 682,007 | 2,607 | 616,534 | 1,613,848 | 2,047,784 | 616,534 | 176,076 | 505,558 | 1,937 | 925 |
| | 0.0 | 670 | 11 | 0.382 | 7,365,423 | 681,836 | 26,149 | 616,193 | 1,612,955 | 2,046,426 | 616,193 | 176,076 | 505,278 | - | - |
| | 23.3 | 670 | 11 | 0.383 | 7,373,204 | 677,219 | 83,632 | 610,255 | 1,597,413 | 2,022,789 | 610,255 | 176,076 | 500,409 | 56,444 | 26,954 |
| | 4861.0 | - | 6,343 | 1.496 | 27,800,000 | 116,061 | 26,500,000 | - | - | - | - | - | - | 11,800,000 | 5,633,886 |
| Sipí Chocó | 0.0 | 62 | - | 0.430 | 764,737 | 71,040 | 62 | 66,723 | 174,655 | 189,382 | 66,723 | 16,294 | 54,713 | - | - |
| | 0.1 | 62 | - | 0.430 | 764,759 | 71,026 | 241 | 66,704 | 174,606 | 189,307 | 66,704 | 16,294 | 54,697 | 179 | 85 |
| | 0.0 | 62 | 1 | 0.431 | 766,728 | 71,010 | 2,379 | 66,673 | 174,524 | 189,183 | 66,673 | 16,294 | 54,672 | - | - |
| | 0.8 | 62 | 1 | 0.431 | 766,922 | 70,854 | 4,249 | 66,473 | 174,001 | 188,388 | 66,473 | 16,294 | 54,508 | 1,840 | 873 |
| | 453.6 | - | 573 | 1.483 | 2,544,056 | 10,627 | 2,429,671 | - | - | - | - | - | - | 1,100,937 | 522,543 |
| Bojayá Chocó | 0.0 | 890 | - | 0.355 | 9,093,803 | 844,753 | 890 | 813,834 | 2,130,304 | 2,721,695 | 813,834 | 233,892 | 610,376 | - | - |
| | 1.1 | 890 | - | 0.355 | 9,094,192 | 844,553 | 3,438 | 813,553 | 2,129,568 | 2,720,575 | 813,553 | 233,892 | 610,165 | 2,548 | 1,275 |
| | 0.0 | 890 | 14 | 0.356 | 9,121,879 | 844,376 | 33,030 | 813,133 | 2,128,469 | 2,718,903 | 813,133 | 233,892 | 609,850 | - | - |
| | 10.9 | 890 | 18 | 0.357 | 9,133,685 | 842,165 | 68,636 | 809,976 | 2,120,206 | 2,706,338 | 809,976 | 233,892 | 607,482 | 26,135 | 13,076 |
| | 6686.7 | - | 7,586 | 1.420 | 35,100,000 | 147,449 | 33,500,000 | - | - | - | - | - | - | 16,100,000 | 8,039,343 |
| Unguía Chocó | 0.0 | 830 | - | 0.363 | 8,645,550 | 803,115 | 830 | 759,140 | 1,987,137 | 2,533,933 | 759,140 | 218,124 | 584,538 | - | - |
| | 1.0 | 830 | - | 0.363 | 8,645,704 | 802,909 | 3,205 | 758,860 | 1,986,402 | 2,532,815 | 758,860 | 218,124 | 584,322 | 2,375 | 1,277 |
| | 0.0 | 830 | 13 | 0.364 | 8,671,534 | 802,750 | 30,740 | 758,488 | 1,985,429 | 2,531,334 | 758,488 | 218,124 | 584,036 | - | - |
| | 28.7 | 830 | 13 | 0.364 | 8,677,952 | 796,796 | 101,253 | 750,351 | 1,964,130 | 2,498,943 | 750,351 | 218,124 | 577,770 | 69,228 | 37,226 |
| | 5110.5 | - | 7,403 | 1.341 | 30,800,000 | 130,228 | 29,400,000 | - | - | - | - | - | - | 12,300,000 | 6,617,312 |
| Acandí Chocó | 0.0 | 910 | - | 0.368 | 9,662,377 | 897,573 | 910 | 832,821 | 2,180,005 | 2,787,358 | 832,821 | 239,148 | 657,929 | - | - |
| | 1.1 | 910 | - | 0.368 | 9,662,468 | 897,339 | 3,528 | 832,510 | 2,179,191 | 2,786,121 | 832,510 | 239,148 | 657,683 | 2,618 | 1,408 |
| | 0.0 | 910 | 14 | 0.370 | 9,690,235 | 897,165 | 33,160 | 832,116 | 2,178,161 | 2,784,553 | 832,116 | 239,148 | 657,372 | - | - |
| | 31.7 | 910 | 15 | 0.370 | 9,697,023 | 890,365 | 113,148 | 823,063 | 2,154,461 | 2,748,510 | 823,063 | 239,148 | 650,219 | 76,305 | 41,028 |
| | 5860.8 | - | 7,960 | 1.344 | 34,000,000 | 142,933 | 32,400,000 | - | - | - | - | - | - | 14,100,000 | 7,594,401 |
| Vigia del fuerte Antioquia | 0.0 | 370 | - | 0.386 | 4,043,281 | 375,596 | 370 | 347,698 | 910,139 | 1,118,731 | 347,698 | 97,236 | 278,158 | - | - |
| | 0.4 | 370 | - | 0.386 | 4,043,396 | 375,509 | 1,417 | 347,584 | 909,841 | 1,118,279 | 347,584 | 97,236 | 278,067 | 1,047 | 522 |
| | 0.0 | 370 | 6 | 0.387 | 4,055,189 | 375,419 | 14,189 | 347,396 | 909,350 | 1,117,532 | 347,396 | 97,236 | 277,917 | - | - |
| | 4.5 | 370 | 7 | 0.387 | 4,058,182 | 374,471 | 27,378 | 346,140 | 906,062 | 1,112,532 | 346,140 | 97,236 | 276,912 | 10,745 | 5,354 |
| | 2737.7 | - | 3,105 | 1.426 | 14,400,000 | 60,360 | 13,800,000 | - | - | - | - | - | - | 6,606,103 | 3,291,876 |

4.4.2 Análisis

Para el caso de los municipios en que la mejor alternativa es seguir usando los generadores diesel se encontró que: (i) tienen un precio bajo de combustible, entre 0.67 y 0.84 USD/l, (ii) un costo de paneles entre 2368 y 2638 USD/kW y (iii) la segunda mejor alternativa en todos es una pequeña cantidad de paneles solares que bajarían las emisiones de CO₂ en una cantidad despreciable de entre el 0.03% y el 0.04%.

La opción limpia de paneles solares con baterías costaría entre tres (3x) y cuatro (4x) veces más en NPC que la opción de continuar con diesel, esto incluso agregando costos ambientales, tomando un costo de tonelada de CO₂ del mercado europeo de emisiones permitidas de 15 euros por tonelada emitida (Business Insider Inc, 2018), este costo ni se acerca, debido a la gran diferencia económica entre una opción y otra.

4.5 ALTERNATIVA DIESEL + SOLAR FV

De los 34 municipios analizados se obtuvo que en 13 (38.2%) la mejor alternativa es combinar el uso actual del diesel con paneles solares FV, de forma positiva para el medio ambiente y para las finanzas, permitiendo la implementación de fuentes no convencionales de energía a costos incluso menores.

4.5.1 Resultados

Teniendo en cuenta que se realizó un análisis de alternativas para llegar a esta conclusión se presentan a continuación las mejores alternativas en NPC dentro de cada opción de combinación entre diesel, solar FV y baterías.

Ver página siguiente.

Tabla 15.Resultados de municipios con diesel + solar FV como mejor alternativa (1 de 2)

| Municipio Departamento | Architecture/ PV (kW) | Architecture/ Gen (kW) | Architecture/ 1k Wh LA | Cost/COE (USD) | Cost/NPC (USD) | Cost/Operating cost (USD/yr) | Cost/Initial capital (USD) | System/Total Fuel (L/yr) | System/CO2 (kg/yr) | Gen/Production (kWh) | Gen/Fuel (L) | Gen/O&M Cost (USD/yr) | Gen/Fuel Cost (USD/yr) | PV/Capital Cost (USD) | PV/Production (kWh/yr) |
|------------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Cumaribo Vichada | 67,0 | 1.300 | - | 0,397 | 14.598.120 | 1.341.062 | 162.943 | 1.147.176 | 3.002.865 | 3.850.841 | 1.147.176 | 341.640 | 998.043 | 161.643 | 93.016 |
| | 0,0 | 1.300 | - | 0,398 | 14.607.000 | 1.356.905 | 1.300 | 1.166.155 | 3.052.546 | 3.926.396 | 1.166.155 | 341.640 | 1.014.555 | - | - |
| | 44,4 | 1.300 | 21 | 0,398 | 14.639.540 | 1.345.301 | 158.733 | 1.152.012 | 3.015.523 | 3.870.092 | 1.152.012 | 341.640 | 1.002.250 | 107.063 | 61.609 |
| | 0,0 | 1.300 | 20 | 0,399 | 14.645.860 | 1.356.230 | 47.418 | 1.165.136 | 3.049.878 | 3.922.340 | 1.165.136 | 341.640 | 1.013.669 | - | - |
| | 7280,5 | - | 10.912 | 1,266 | 44.836.270 | 189.745 | 42.793.850 | - | - | - | - | - | - | 17.567.860 | 10.109.290 |
| La primavera Vichada | 92,2 | 1.700 | - | 0,410 | 19.015.450 | 1.745.722 | 224.519 | 1.457.430 | 3.814.990 | 4.901.680 | 1.457.430 | 446.760 | 1.297.112 | 222.819 | 133.152 |
| | 0,0 | 1.700 | - | 0,410 | 19.032.050 | 1.767.965 | 1.700 | 1.483.458 | 3.883.121 | 5.005.296 | 1.483.458 | 446.760 | 1.320.277 | - | - |
| | 56,0 | 1.700 | 26 | 0,411 | 19.067.190 | 1.752.857 | 199.463 | 1.465.493 | 3.836.097 | 4.933.780 | 1.465.493 | 446.760 | 1.304.289 | 135.284 | 80.843 |
| | 0,0 | 1.700 | 26 | 0,411 | 19.082.010 | 1.767.034 | 61.679 | 1.482.103 | 3.879.574 | 4.999.901 | 1.482.103 | 446.760 | 1.319.071 | - | - |
| | 8509,0 | - | 13.615 | 1,220 | 54.560.600 | 231.216 | 52.071.800 | - | - | - | - | - | - | 20.557.770 | 12.284.900 |
| Santa Rosalía Vichada | 22,7 | 480 | - | 0,386 | 5.276.676 | 485.105 | 55.008 | 437.162 | 1.144.321 | 1.431.797 | 437.162 | 126.144 | 358.473 | 54.528 | 32.727 |
| | 0,0 | 480 | - | 0,386 | 5.279.553 | 490.438 | 480 | 443.942 | 1.162.069 | 1.458.789 | 443.942 | 126.144 | 364.033 | - | - |
| | 16,5 | 480 | 8 | 0,387 | 5.292.555 | 486.182 | 59.303 | 438.430 | 1.147.641 | 1.436.846 | 438.430 | 126.144 | 359.513 | 39.728 | 23.844 |
| | 0,0 | 480 | 8 | 0,387 | 5.295.316 | 490.198 | 18.837 | 443.545 | 1.161.030 | 1.457.209 | 443.545 | 126.144 | 363.707 | - | - |
| | 2522,3 | - | 3.999 | 1,213 | 16.008.050 | 68.124 | 15.274.770 | - | - | - | - | - | - | 6.063.495 | 3.639.175 |
| Macarena Meta | 54,4 | 790 | - | 0,403 | 9.185.615 | 841.016 | 132.926 | 710.594 | 1.860.063 | 2.360.830 | 710.594 | 207.612 | 632.429 | 132.136 | 75.370 |
| | 0,0 | 790 | - | 0,403 | 9.196.988 | 854.349 | 790 | 726.186 | 1.900.876 | 2.422.899 | 726.186 | 207.612 | 646.306 | - | - |
| | 27,5 | 790 | 13 | 0,404 | 9.214.067 | 846.811 | 99.000 | 717.228 | 1.877.428 | 2.387.239 | 717.228 | 207.612 | 638.333 | 66.855 | 38.134 |
| | 0,0 | 790 | 13 | 0,404 | 9.222.439 | 853.914 | 30.916 | 725.544 | 1.899.194 | 2.420.341 | 725.544 | 207.612 | 645.734 | - | - |
| | 4540,7 | - | 6.733 | 1,269 | 27.900.000 | 117.128 | 26.700.000 | - | - | - | - | - | - | 11.000.000 | 6.288.493 |
| Mapiripan Meta | 7,0 | 250 | - | 0,441 | 3.093.249 | 285.636 | 18.664 | 238.837 | 625.183 | 743.344 | 238.837 | 65.700 | 219.730 | 18.414 | 9.455 |
| | 0,0 | 250 | - | 0,441 | 3.093.680 | 287.387 | 250 | 240.816 | 630.363 | 751.222 | 240.816 | 65.700 | 221.551 | - | - |
| | 8,5 | 250 | 4 | 0,442 | 3.101.703 | 285.085 | 33.051 | 238.168 | 623.433 | 740.682 | 238.168 | 65.700 | 219.115 | 22.361 | 11.481 |
| | 0,0 | 250 | 4 | 0,442 | 3.102.189 | 287.243 | 10.312 | 240.613 | 629.832 | 750.415 | 240.613 | 65.700 | 221.364 | - | - |
| | 1453,6 | - | 2.047 | 1,389 | 9.400.805 | 36.617 | 9.006.664 | - | - | - | - | - | - | 3.834.595 | 1.968.928 |
| Inírida Guainía | 160,3 | 2.300 | - | 0,415 | 26.800.000 | 2.452.113 | 390.945 | 1.983.672 | 5.192.488 | 6.731.580 | 1.983.672 | 604.440 | 1.844.815 | 388.645 | 223.145 |
| | 0,0 | 2.300 | - | 0,416 | 26.800.000 | 2.491.473 | 2.300 | 2.027.718 | 5.307.786 | 6.906.925 | 2.027.718 | 604.440 | 1.885.778 | - | - |
| | 77,9 | 2.300 | 36 | 0,416 | 26.900.000 | 2.469.826 | 277.890 | 2.003.127 | 5.243.415 | 6.809.029 | 2.003.127 | 604.440 | 1.862.908 | 188.772 | 108.385 |
| | 0,0 | 2.300 | 36 | 0,417 | 26.900.000 | 2.490.147 | 85.642 | 2.025.882 | 5.302.980 | 6.899.616 | 2.025.882 | 604.440 | 1.884.071 | - | - |
| | 12368,1 | - | 19.170 | 1,255 | 78.000.000 | 328.546 | 74.500.000 | - | - | - | - | - | - | 30.000.000 | 17.200.000 |
| Miraflores Guaviare | 65,2 | 640 | - | 0,490 | 8.918.180 | 812.234 | 175.304 | 569.062 | 1.489.586 | 1.874.397 | 569.062 | 168.192 | 643.041 | 174.664 | 87.844 |
| | 0,0 | 640 | - | 0,491 | 8.945.826 | 831.029 | 640 | 586.272 | 1.534.636 | 1.942.909 | 586.272 | 168.192 | 662.488 | - | - |
| | 22,0 | 640 | 10 | 0,491 | 8.951.315 | 823.601 | 86.084 | 579.395 | 1.516.632 | 1.915.529 | 579.395 | 168.192 | 654.716 | 58.915 | 29.630 |
| | 0,0 | 640 | 10 | 0,492 | 8.966.371 | 830.565 | 26.186 | 585.767 | 1.533.314 | 1.940.898 | 585.767 | 168.192 | 661.917 | - | - |
| | 3814,4 | - | 5.332 | 1,418 | 24.900.000 | 95.648 | 23.900.000 | - | - | - | - | - | - | 10.200.000 | 5.137.397 |

Tabla 16. Resultados de municipios con diesel + solar FV como mejor alternativa (2 de 2)

| Municipio Departamento | Architecture/ PV (kW) | Architecture/ Gen (kW) | Architecture/ 1k Wh LA | Cost/COE (USD) | Cost/NPC (USD) | Cost/Operating cost (USD/yr) | Cost/Initial capital (USD) | System/Total Fuel (L/yr) | System/CO2 (kg/yr) | Gen/Production (kWh) | Gen/Fuel (L) | Gen/O&M Cost (USD/yr) | Gen/Fuel Cost (USD/yr) | PV/Capital Cost (USD) | PV/Production (kWh/yr) |
|-----------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| El Charco Nariño | 35,8 | 1.900 | - | 0,374 | 20.200.000 | 1.865.959 | 88.714 | 1.685.487 | 4.411.955 | 5.719.889 | 1.685.487 | 499.320 | 1.365.244 | 86.814 | 48.739 |
| | 0,0 | 1.900 | - | 0,374 | 20.200.000 | 1.874.141 | 1.900 | 1.696.031 | 4.439.555 | 5.761.863 | 1.696.031 | 499.320 | 1.373.785 | - | - |
| | 0,0 | 1.900 | 30 | 0,375 | 20.200.000 | 1.873.235 | 71.386 | 1.694.518 | 4.435.597 | 5.755.843 | 1.694.518 | 499.320 | 1.372.560 | - | - |
| | 65,2 | 1.900 | 31 | 0,375 | 20.200.000 | 1.858.220 | 234.706 | 1.675.099 | 4.384.765 | 5.678.538 | 1.675.099 | 499.320 | 1.356.830 | 158.126 | 88.776 |
| | 12140,8 | - | 15.246 | 1,304 | 68.100.000 | 287.369 | 65.000.000 | - | - | - | - | - | - | 29.400.000 | 16.500.000 |
| La Tola Nariño | 30,4 | 1.800 | - | 0,375 | 19.100.000 | 1.766.877 | 75.528 | 1.595.741 | 4.177.036 | 5.407.271 | 1.595.741 | 473.040 | 1.292.550 | 73.728 | 41.391 |
| | 0,0 | 1.800 | - | 0,375 | 19.100.000 | 1.773.815 | 1.800 | 1.604.682 | 4.200.441 | 5.442.865 | 1.604.682 | 473.040 | 1.299.793 | - | - |
| | 0,0 | 1.800 | 28 | 0,376 | 19.200.000 | 1.772.961 | 66.664 | 1.603.261 | 4.196.721 | 5.437.207 | 1.603.261 | 473.040 | 1.298.642 | - | - |
| | 61,5 | 1.800 | 29 | 0,376 | 19.200.000 | 1.758.837 | 220.906 | 1.584.992 | 4.148.899 | 5.364.479 | 1.584.992 | 473.040 | 1.283.844 | 149.212 | 83.769 |
| | 11456,3 | - | 14.387 | 1,304 | 64.300.000 | 271.177 | 61.300.000 | - | - | - | - | - | - | 27.800.000 | 15.600.000 |
| Mosquera Nariño | 25,5 | 1.100 | - | 0,387 | 11.900.000 | 1.101.651 | 63.128 | 977.970 | 2.559.949 | 3.272.404 | 977.970 | 289.080 | 811.715 | 62.028 | 34.765 |
| | 0,0 | 1.100 | - | 0,387 | 11.900.000 | 1.107.548 | 1.100 | 985.382 | 2.579.352 | 3.301.911 | 985.382 | 289.080 | 817.867 | - | - |
| | 37,2 | 1.100 | 17 | 0,388 | 12.000.000 | 1.098.333 | 132.577 | 973.578 | 2.548.453 | 3.254.921 | 973.578 | 289.080 | 808.070 | 90.384 | 50.657 |
| | 0,0 | 1.100 | 17 | 0,388 | 12.000.000 | 1.107.005 | 40.531 | 984.512 | 2.577.073 | 3.298.446 | 984.512 | 289.080 | 817.145 | - | - |
| | 6984,2 | - | 8.672 | 1,307 | 39.000.000 | 164.291 | 37.200.000 | - | - | - | - | - | - | 17.000.000 | 9.504.261 |
| Olaya Herrera Nariño | 24,9 | 1.800 | - | 0,381 | 19.100.000 | 1.771.620 | 62.342 | 1.582.132 | 4.141.413 | 5.353.096 | 1.582.132 | 473.040 | 1.297.349 | 60.542 | 33.961 |
| | 0,0 | 1.800 | - | 0,381 | 19.100.000 | 1.777.327 | 1.800 | 1.589.397 | 4.160.428 | 5.382.013 | 1.589.397 | 473.040 | 1.303.305 | - | - |
| | 0,0 | 1.800 | 28 | 0,382 | 19.200.000 | 1.776.446 | 66.678 | 1.587.960 | 4.156.668 | 5.376.295 | 1.587.960 | 473.040 | 1.302.127 | - | - |
| | 60,6 | 1.800 | 28 | 0,382 | 19.200.000 | 1.762.566 | 216.415 | 1.570.235 | 4.110.271 | 5.305.734 | 1.570.235 | 473.040 | 1.287.593 | 147.032 | 82.478 |
| | 11279,7 | - | 14.164 | 1,304 | 63.300.000 | 266.985 | 60.400.000 | - | - | - | - | - | - | 27.400.000 | 15.400.000 |
| Pizarro Nariño | 13,4 | 1.500 | - | 0,393 | 15.900.000 | 1.474.091 | 33.762 | 1.299.925 | 3.402.704 | 4.365.894 | 1.299.925 | 394.200 | 1.078.938 | 32.262 | 18.240 |
| | 0,0 | 1.500 | - | 0,393 | 15.900.000 | 1.477.112 | 1.500 | 1.303.728 | 3.412.657 | 4.381.031 | 1.303.728 | 394.200 | 1.082.094 | - | - |
| | 0,0 | 1.500 | 22 | 0,394 | 15.900.000 | 1.476.379 | 52.076 | 1.302.563 | 3.409.608 | 4.376.394 | 1.302.563 | 394.200 | 1.081.127 | - | - |
| | 48,8 | 1.500 | 23 | 0,394 | 15.900.000 | 1.465.374 | 174.048 | 1.288.656 | 3.373.205 | 4.321.033 | 1.288.656 | 394.200 | 1.069.585 | 117.526 | 66.446 |
| | 7821,6 | - | 12.906 | 1,303 | 50.800.000 | 215.260 | 48.500.000 | - | - | - | - | - | - | 18.800.000 | 10.600.000 |
| Juradó Chocó | 1,3 | 280 | - | 0,420 | 3.348.688 | 310.776 | 3.502 | 269.347 | 705.048 | 849.009 | 269.347 | 73.584 | 237.026 | 3.222 | 1.631 |
| | 0,0 | 280 | - | 0,420 | 3.348.690 | 311.075 | 280 | 269.703 | 705.978 | 850.424 | 269.703 | 73.584 | 237.339 | - | - |
| | 0,0 | 280 | 4 | 0,421 | 3.356.517 | 310.936 | 9.603 | 269.496 | 705.438 | 849.603 | 269.496 | 73.584 | 237.157 | - | - |
| | 9,6 | 280 | 5 | 0,421 | 3.358.893 | 308.723 | 35.805 | 266.852 | 698.514 | 839.074 | 266.852 | 73.584 | 234.829 | 23.477 | 11.884 |
| | 1891,8 | - | 2.487 | 1,417 | 10.900.000 | 45.398 | 10.400.000 | - | - | - | - | - | - | 4.610.270 | 2.333.670 |

4.5.2 Análisis

Para el caso de los municipios en que la mejor alternativa es combinar el uso de los generadores diesel con la instalación de paneles solares FV, se encontró que: (i) tienen un precio medio de combustible, entre 0.81 y 1.13 USD/l, (ii) un costo de paneles entre 2404 y 2678 USD/kW y (iii) la segunda mejor alternativa en todos es continuar usando únicamente los generadores diesel, pero en este caso la cantidad de paneles solares de la mejor alternativa permiten reducir las emisiones de CO₂ en una cantidad menos despreciable de entre el 0.13% y el 3.02% al mismo tiempo que se reduce un poco el NPC.

En este caso la opción totalmente limpia de paneles solares con baterías también costaría entre tres (3x) y cuatro (4x) veces más en NPC que la opción de continuar con el diesel, incluso si también se agregan costos ambientales (ver 4.4.2), debido a la gran diferencia económica que representa el uso de baterías.

4.6 ALTERNATIVA DIESEL + SOLAR FV + BATERÍAS

De los 34 municipios analizados se obtuvo que en 3 (8.8%) la mejor alternativa es combinar el uso actual del diesel con paneles solares FV y baterías, de una forma posible técnicamente, positiva para el medio ambiente y económicamente mejor, permitiendo la implementación de fuentes no convencionales de energía a costos incluso menores a los que implicaría seguir usando únicamente fuentes convencionales.

4.6.1 Resultados

Teniendo en cuenta que se realizó un análisis de alternativas para llegar a esta conclusión se presentan a continuación las mejores alternativas en NPC dentro de cada opción de combinación entre diesel, solar FV y baterías.

Ver página siguiente.

Tabla 17. Resultados de municipios con diesel + solar FV + baterías como mejor alternativa

| Municipio Departamento | Architecture/ PV (kW) | Architecture/ Gen (kW) | Architecture/ 1k Wh LA | Cost/COE (USD) | Cost/NPC (USD) | Cost/Operating cost (USD/yr) | Cost/Initial capital (USD) | System/Total Fuel (L/yr) | System/CO2 (kg/yr) | Gen/Production (kWh) | Gen/Fuel (L) | Gen/O&M Cost (USD/yr) | Gen/Fuel Cost (USD/yr) | PV/Capital Cost (USD) | PV/Production (kWh/yr) |
|------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Mitú Vaupés | 2090,3 | 2.900 | 4.358 | 0,681 | 56.100.000 | 3.562.245 | 17.800.000 | 1.660.884 | 4.347.554 | 5.924.898 | 1.660.884 | 368.619 | 3.122.461 | 5.890.374 | 2.783.923 |
| | 601,4 | 2.900 | - | 0,718 | 59.200.000 | 5.345.430 | 1.697.700 | 2.433.890 | 6.370.987 | 8.268.885 | 2.433.890 | 762.120 | 4.575.713 | 1.694.800 | 801.000 |
| | 0,0 | 2.900 | - | 0,729 | 60.200.000 | 5.589.519 | 2.900 | 2.566.924 | 6.719.218 | 8.798.479 | 2.566.924 | 762.120 | 4.825.817 | - | - |
| | 0,0 | 2.900 | 46 | 0,730 | 60.300.000 | 5.585.655 | 126.460 | 2.564.609 | 6.713.159 | 8.789.263 | 2.564.609 | 762.120 | 4.821.465 | - | - |
| | 15855,5 | - | 26.638 | 1,523 | 121.000.000 | 440.543 | 116.000.000 | - | - | - | - | - | - | 44.700.000 | 21.100.000 |
| Taraira Vaupés | 21,8 | 25 | 41 | 0,735 | 519.974 | 31.812 | 177.554 | 16.230 | 42.484 | 48.834 | 16.230 | 2.783 | 28.240 | 60.988 | 28.176 |
| | 0,0 | 25 | 23 | 0,820 | 579.719 | 48.069 | 62.306 | 24.527 | 64.202 | 68.608 | 24.527 | 5.120 | 42.677 | - | - |
| | 4,5 | 25 | - | 0,843 | 595.845 | 54.178 | 12.677 | 27.327 | 71.531 | 71.534 | 27.327 | 6.570 | 47.549 | 12.652 | 5.845 |
| | 0,0 | 25 | - | 0,851 | 601.593 | 55.887 | 25 | 28.335 | 74.171 | 75.549 | 28.335 | 6.570 | 49.303 | - | - |
| | 149,4 | - | 219 | 1,535 | 1.044.817 | 3.851 | 1.003.360 | - | - | - | - | - | - | 417.646 | 192.949 |
| Carurú Vaupés | 99,7 | 120 | 193 | 0,726 | 2.482.697 | 154.522 | 819.422 | 73.025 | 191.151 | 236.041 | 73.025 | 13.810 | 137.286 | 280.949 | 134.164 |
| | 25,0 | 120 | - | 0,815 | 2.787.287 | 252.403 | 70.431 | 117.315 | 307.085 | 342.189 | 117.315 | 31.536 | 220.552 | 70.311 | 33.576 |
| | 0,0 | 120 | - | 0,827 | 2.827.541 | 262.674 | 120 | 122.911 | 321.734 | 364.468 | 122.911 | 31.536 | 231.073 | - | - |
| | 0,0 | 120 | 2 | 0,828 | 2.831.127 | 262.509 | 5.489 | 122.812 | 321.474 | 364.072 | 122.812 | 31.536 | 230.886 | - | - |
| | 713,5 | - | 1.003 | 1,491 | 4.914.230 | 18.040 | 4.720.051 | - | - | - | - | - | - | 2.010.536 | 960.112 |

4.6.2 Análisis

Para los municipios en que la mejor alternativa es combinar el uso de los generadores diesel con la instalación de paneles solares FV y baterías, se encontró que: (i) el combustible ACPM tiene un precio muy alto de entre 1.74 y 1.88 USD/l, (ii) un costo de paneles entre 2796 y 2818 USD/kW. Estos municipios son Mitú, Taraira y Carurú en Vaupés y deben los altos costos de combustible a la necesidad de transportarlo por medios aéreos debido a su complejidad de conexión por medios terrestres y fluviales.

Para los casos de Carurú y Mitú la segunda mejor alternativa es el uso de paneles solares FV combinados con el generador diesel, pero debido al alto costo del combustible en estos lugares (1.88 USD/l), el uso de baterías permite aumentar la cantidad de paneles, disminuir la cantidad de ACPM y de paso reducir los costos de operación significativamente, reduciendo el NPC en un 5.24% en Mitú y 10.93% en Carurú, al mismo tiempo que se reducen las emisiones de CO₂ en un 31.76% y 37.75% respectivamente.

Para Taraira la segunda mejor alternativa es continuar usando únicamente los generadores diesel, pero en este caso la cantidad de paneles solares de la mejor alternativa permiten reducir las emisiones de CO₂ en una cantidad nada despreciable del 33.83% y al mismo tiempo que se reduce el NPC en un 10.31%.

En este caso la opción totalmente limpia de paneles solares con baterías costaría dos (2x) veces más en NPC que la opción de continuar con el diesel, incluso si también se agregan costos ambientales (ver 4.4.2), este costo no se acercaría, debido a la gran diferencia económica que representa el reemplazar totalmente la tecnología actual por el uso de baterías.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

1. Actualmente en el mundo se observa una tendencia hacia el uso cada vez mayor de energías renovables no convencionales (ERNC), como es el caso insignia de Alemania, que a pesar de no poseer las condiciones más favorables de radiación y clima se encuentra volcada hacia el uso de paneles solares FV.
2. En Colombia el uso de paneles solares FV tiene aún un gran potencial de crecimiento. Futuras decisiones legislativas de incentivos y otras regulaciones permitirán que el uso de esta tecnología sea cada vez más frecuente.
3. El cuidado del medio ambiente es cada vez más importante y en el mundo se están observando incrementalmente medidas restrictivas del tipo de bonos de CO₂, límites de emisión y multas, en un futuro quizá no muy lejano los costos ambientales serán los que definan la suerte de un proyecto y la mejor alternativa a usar.
4. El uso de software del tipo Homer® para análisis de microrredes permite simplificar enormemente los cálculos a realizar, disminuyendo los tiempos de análisis y permitiendo que las personas encargadas de efectuarlos dediquen un mayor tiempo a la consecución de información detallada o a la ampliación del rango de estudio.
5. A través de conceptos económicos como el *Net Present Cost* (NPC) es posible simplificar el comportamiento del dinero en el tiempo, esto con el fin de realizar fácilmente comparaciones de flujos de dinero y las alternativas que estos representan.
6. Actualmente las emisiones de CO₂ son un tema importante en la generación de energía eléctrica, pero aún no se encuentran disponibles las herramientas, del tipo de bonos de carbón y afines, necesarias para que su influencia en lo económico sea suficiente para inclinar la balanza en favor del medio ambiente.

7. El estudio de 34 municipios de las ZNI de Colombia permitió conocer, a la luz de un análisis completo, las mejores combinaciones entre tecnologías diesel, solar FV y de baterías para cada uno de ellos. Teniendo en cuenta que en la actualidad todos usan la tecnología de generación diesel este análisis representa la visualización de cambios factibles para 16 de ellos, cambios que al ser estudiados a la luz de “Sistema Actual” vs ”Alternativa 1 a 5” permitieron conocer aquellos sitios dónde es realmente más económico instalar paneles o paneles y baterías que seguir usando los generadores diesel.
8. El uso de datos aproximados de: radiación, demanda de energía y perfiles de carga en este estudio hacen necesario que en caso tal de pretender la implementación de alguna de las soluciones acá propuestas se deban realizar estudios específicos para cada sitio.
9. A pesar de que para el presente análisis se utilizó un ciclo de vida del proyecto de 20 años cabe resaltar que los resultados presentados son sensiblemente dependientes del cambio de variables macroeconómicas, como el precio del petróleo, y de variables de mercado como el precio de las baterías y los paneles solares FV.

5.2 RECOMENDACIONES

1. Se recomienda que para la continuación de este trabajo investigativo se desarrollen estudios específicos para cada una de las cabeceras municipales acá mencionadas tratando de corroborar al máximo los datos en campo y ampliando las variables de entrada de *Homer*®, con el fin de obtener cifras más precisas y estudios más detallados.
2. Dado el enfoque macro de este trabajo se recomienda discreción en el uso de los datos acá contenidos, y, en caso de hacerlo se recomienda verificar adicionalmente la última información disponible de las fuentes citadas.

...

6 BIBLIOGRAFÍA

1. Ajlan, A., Tan, C. W., & Abdilahi, A. M. (2017). Assessment of environmental and economic perspectives for renewable-based hybrid power system in yemen. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 559-570.
2. Akella, A. K., Saini, R. P., & Sharma, M. P. (2009). Social, economical and environmental impacts of renewable energy systems. *Renewable Energy*, 34, 390-396.
3. Alsharif, M. H., Nordin, R., & Ismail, M. (2015). Energy optimisation of hybrid off-grid system for remote telecommunication base station deployment in malaysia. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 1-15.
4. Banco de la República de Colombia. (2013). *banrep.gov.co*. (Banco de la República, Colombia) Recuperado el 5 de Marzo de 2018, de <http://www.banrep.gov.co/>
5. Barakat, S., Samy, M., Eteiba, M. B., & Wahba, W. I. (2016). Feasibility study of grid connected PV-biomass integrated energy system in egypt. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 17(5), 519-528.
6. Business Insider Inc. (2018). *Markets Insider*. Recuperado el 28 de Marzo de 2018, de <http://markets.businessinsider.com/commodities/co2-emissionsrechte>
7. Cadavid, L., Jiménez, M., & Franco, C. J. (2015). Financial Analysis of Photovoltaic Configurations for Colombian Households. *IEEE Latin America Transactions*, 13(12), 3832–3837.
8. Cifuentes, R. A., & Sarmiento, M. (2016). Modelo de negocios de servicio de energía alternativa para la población fuera de la interconexión eléctrica nacional. Caso práctico: área rural de Cimitarra, Santander.

9. Congreso de la República. (2014). *Ley 1715*. Bogotá.
10. CREG. (2017). *Circular 069*. Bogotá D.C.
11. DANE. (2007). *ESTIMACIONES DE POBLACIÓN 1985 - 2005 Y PROYECCIONES DE POBLACIÓN 2005 - 2020 TOTAL MUNICIPAL POR ÁREA*. Bogotá D.C.
12. Das, A., & Balakrishnan, V. (2012). Grid-connectivity of remote isolated islands-A proposition in indian context. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 4(4).
13. EPM. (2012). *Uso inteligente de la energía eléctrica*. Medellín.
14. Ghasemi, A., Asrari, A., Zarif, M., & Abdelwahed, S. (2013). Techno-economic analysis of stand-alone hybrid photovoltaic-diesel-battery systems for rural electrification in eastern part of iran - A step toward sustainable rural development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 456-462.
15. Ghiani, E., Vertuccio, C., & Pilo, F. (2016). Optimal sizing of multi-generation set for off-grid rural electrification. *Paper presented at the IEEE Power and Energy Society General Meeting*.
16. Grajales, J. S. (2016). Esquemas de inversión para la micro generación fotovoltaica de energía eléctrica en el sector residencial colombiano. *Facultad de Minas*.
17. Haghghat Mamaghani, A., Avella Escandon, S. A., Najafi, B., Shirazi, A., & Rinaldi, F. (2016). Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in colombia. *Renewable Energy*, 97, 293-305.
18. Hong, T., Koo, C., & Kwak, T. (2013). Framework for the implementation of a new renewable energy system in an educational facility. *Applied Energy*, 103, 539-551.
19. Hybrytec SAS. (2017). *Lista de precios Octubre*. Medellín.
20. IEA. (2014). *Medium-Term Renewable Energy Market Report 2014*.

21. IPSE. (2017). *Informe Rendición Social de Cuentas 2016-2017*. Bogotá: MINIMINAS.
22. IPSE. (2017). *IPSE.gov*. (MINMINAS) Recuperado el 4 de Septiembre de 2017, de <http://www.ipse.gov.co/>
23. ISA Intercolombia. (2014). *intercolombia.com*. Recuperado el 8 de Septiembre de 2017, de <http://www.intercolombia.com/Negocio/Paginas/Principios-basicos-energia.aspx>
24. Ismail, M. S., Moghavvemi, M., & Mahlia, T. M. (2013). Design of an optimized photovoltaic and microturbine hybrid power system for a remote small community: Case study of palestine. *Energy Conversion and Management*, 75, 271-281.
25. Jiménez, M. (2016). Evaluación de los efectos de la penetración fotovoltaica en la curva de carga del sector residencial el caso colombiano. *Facultad de Minas*.
26. Jiménez, M., Cadavid, L., & Franco, C. (2014). Scenarios of photovoltaic grid parity in Colombia. *Dyna*, 188 (81), 237–245.
27. Katsaprakakis, D. A., & Christakis, D. G. (2016). The exploitation of electricity production projects from renewable energy sources for the social and economic development of remote communities. the case of greece: An example to avoid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 341-349.
28. Kazem, H. A., Khatib, T., Sopian, K., & Elmenreich, W. (2014). Performance and feasibility assessment of a 1.4 kW roof top grid-connected photovoltaic power system under desertic weather conditions. *Energy and Buildings*, 82, 123-129.
29. Kim, C., Hong, T., Kim, J., & Seo, D. (2015). A process for the implementation of new renewable energy systems in a building by considering environmental and economic effect. *Sustainability (Switzerland)*, 7(9), 12870-12890.

30. Koo, C., Hong, T., Park, H. S., & Yun, G. (2014). Framework for the analysis of the potential of the rooftop photovoltaic system to achieve the net-zero energy solar buildings. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 22(4), 462-478.
31. Lee, M., Hong, T., Koo, C., & Kim, C. (2017). A break-even analysis and impact analysis of residential solar photovoltaic systems considering state solar incentives. *Technological and Economic Development of Economy*, 1-25.
32. Mazandarani, A., Mahlia, T. M., Chong, W. T., & Moghavvemi, M. (2011). Fuel consumption and emission prediction by iranian power plants until 2025. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1575-1592.
33. MINMINAS. (2017). *Decreto 884*. Bogotá.
34. Muhsen, D. H., Khatib, T., & Haider, H. T. (2017). A feasibility and load sensitivity analysis of photovoltaic water pumping system with battery and diesel generator. *Energy Conversion and Management*, 148, 287-304.
35. OEE. (2015). *Ocean Energy Europe*. (Altitude) Recuperado el 1 de Septiembre de 2017, de <http://www.oceanenergy-europe.eu/en/>
36. Ramchandran, N., Pai, R., & Parihar, A. K. (2016). Feasibility assessment of anchor-business-community model for off-grid rural electrification in india. *Renewable Energy*, 97, 197-209.
37. REN21. (2014). *Global Status Report*. París.
38. REN21. (2017). *Global Status Report*. París.
39. REN21. (2017). *REN21*. (Sofracs) Recuperado el 1 de Septiembre de 2017, de <http://www.ren21.net/>
40. Said, B., & Ahmed, I. (2014). Hybrid system of the existing central diesel with photovoltaics, technical and economic feasibility, case of talmine. *Paper presented at the*

3rd International Symposium on Environment Friendly Energies and Applications, EFEA 2014.

41. Shafiullah, G. M., & Carter, C. E. (2016). Feasibility study of photovoltaic (PV)-diesel hybrid power systems for remote networks. *Paper presented at the Proceedings of the 2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia, ISGT ASIA 2015.*
42. SIEL. (2009). *Sistema de Información Eléctrico Colombiano.* (UPME) Recuperado el 12 de Febrero de 2018, de <http://www.siel.gov.co/>
43. SIMEG. (2009). *SIPG.* Recuperado el 21 de Febrero de 2018, de <http://www.sipg.gov.co>
44. Tesla. (2017). *Tesla.com.* (Tesla) Recuperado el 4 de Septiembre de 2017, de <https://www.tesla.com/solarroof>
45. Toledo, C. A. (2013). *Evaluación de la energía solar fotovoltaica como solución a la dependencia energética de zonas rurales de Colombia.* Cartagena, España: Universidad politécnica de Cartagena.
46. Universidad Tecnológica del Chocó. (2015). *Diseño de un sistema de energía eléctrica a base de fuentes renovables para el fortalecimiento de la prestación de servicios de salud pública en el municipio de Medio Baudó, departamento de Chocó.* Chocó. Quibdó: IPSE-UPME-Cancillería.
47. UPME. (2004). *Resolución 355.* Bogotá D.C.
48. UPME. (2009). *upme.com.* (Upme) Recuperado el 4 de Septiembre de 2017, de <http://www.upme.gov.co/zni/>
49. Valencia, J. A., & Ferreira, M. C. (2013). *PROYECCIÓN DE DEMANDA DE ENERGÍA EN ZONAS AISLADAS, UTILIZANDO MODELAMIENTO LEAP (LONG RANGE ENERGYALTERNATIVES PLANNING SYSTEM).* Bogotá: IPSE.

50. Willman, L., & Krarti, M. (2012). An assessment of hybrid distributed generation systems in rural alaska. *Paper presented at the World Renewable Energy Forum, WREF 2012, Including World Renewable Energy Congress XII and Colorado Renewable Energy Society (CRES) Annual Conferen, , 3 1905-1912.*

51. Wright, D. J. (2010). Overview of Energy Use and Related Issues or, Energy - What's the problem. *MIT - Introduction to sustainable Energy Fall 2010 Lecture 2.* Cambridge, MA, USA.