



Rendimiento energético, económico y ambiental de una Central Fotovoltaica de 3,4 KWp en el modo de la generación distribuida (GD)

Energy, economic and environmental performance of a 3.4 KWp photovoltaic power plant in the distributed generation (DG) mode

Antonio VÁSQUEZ P. [1](#); María RODRÍGUEZ G. [2](#); Wilber M SALTOS A. [3](#); Ciaddy G RODRÍGUEZ B. [4](#); Lenín A CUENCA A. [5](#)

Recibido: 15/07/2018 • Aprobado: 30/08/2018

Contenido

[1. Introducción](#)

[2. Metodología](#)

[3. Resultados](#)

[4. Conclusiones](#)

[Referencias bibliográficas](#)

RESUMEN:

Actualmente el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía constituye una alternativa de solución al problema energético mundial. El estudio muestra los resultados de una evaluación energética, económica y ambiental de una central fotovoltaica de 3,4 kWp instalada en la Universidad Técnica de Manabí, mostrando la disponibilidad de energía y su aplicación en el modo de generación distribuida. Se expone la validación de la calidad del potencial solar, la capacidad de la central fotovoltaica diseñada y su productividad energética.

Palabras clave: Energía fotovoltaica, generación distribuida, potencial solar

ABSTRACT:

Currently the use of renewable energy sources is an alternative solution to the global energy problem. The study shows the results of an energy, economic and environmental assessment of the 3,4 kWp photovoltaic power plant installed at the Technical University of Manabí, showing the availability of energy and its application in the distributed generation mode. The validation of the solar potential quality, the capacity of the designed photovoltaic power station and its energy productivity are exposed.

Keywords: Photovoltaic energy, distributed generation, solar potential

1. Introducción

La energía eléctrica no está presente en la naturaleza como fuente de energía primaria y en consecuencia, sólo se dispone de ella mediante la transformación de alguna u otra forma de energía. Es por eso que han surgido distintos tipos de plantas generadoras de energía a partir de combustibles fósiles, sin embargo, se ha notado que dicha forma de generación produce elevadas tasas de contaminación y devastación de los recursos naturales con los que cuenta el

país (YES, 2014), (OROSCO, VARELA, SALCEDO, VEGA. 2018).

En los últimos tiempos cada vez es más necesario priorizar la atenuación del proceso energético para satisfacer la demanda, por sus profundos efectos sobre la sostenibilidad del desarrollo socioeconómico, e incluso por su implicación para la supervivencia humana, debido a que el sistema económico basado en el petróleo, no solo es insostenible, sino que amenaza a la propia especie, porque la contaminación producida por el empleo derrochador de los combustibles fósiles ha puesto en peligro a la humanidad, debido al crecimiento acelerado de las concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero (GEI) emitidos cuando se queman (ARRASTÍA, M & LIMA, M. 2011).

La producción de energía, sobre todo la que se realiza sobre la base de combustibles fósiles, puede provocar una contaminación atmosférica significativa a escala local, regional y global, tanto por la emisión directa de contaminantes primarios, como por los efectos secundarios que se forman en la propia atmósfera a partir de los primeros (LALEMAN, ALBRECHT, DEWULF. 2011), (ACOSTA, 2016). La contaminación atmosférica se define como la alteración de la composición química media de la misma, a niveles de concentración de los contaminantes que producen efectos adversos sobre la salud humana y otros elementos del ambiente como ríos, lagos, mares, bosques y por supuesto toda forma de vida encontrada en esos lugares (DOMINGUEZ, 2012).

Casi todas las fuentes renovables de energía (FRE) son derivadas de la que proporciona el Sol, la mayor parte de la radiación solar que llega a la Tierra se transforma en energía térmica: 76 % calienta la atmósfera, 23 % mantiene el ciclo hidrológico, cerca del 1% restante causa los vientos y las corrientes oceánicas (PEREZ, 2018) y una fracción muy pequeña se emplea en la fotosíntesis que permite el crecimiento de los vegetales y las cosechas (RODRIGUEZ & VAZQUEZ. 2018).

A las energías renovables se les denomina también alternativas por no generar contaminación y entre ellas se encuentran la energía eólica y la energía solar. La generación de estos tipos de energías produce muy baja contaminación, que últimamente ha tomado importancia debido a su alta disponibilidad (HERRERA, PALOMINO, REYES, VALENCIA. 2018).

El hombre ha aprendido recientemente a transformar la energía solar en eléctrica mediante diferentes procedimientos. Algunos de ellos, los llamados heliotérmicos o fototérmicos, que operan sobre principios semejantes a los de las centrales térmicas y nucleares convencionales y por otro lado se encuentran los llamados fotovoltaicos, los cuales significan una importante simplificación respecto a los procesos energéticos convencionales (LOU, LI, CHAN, LAM. 2017). Las células o celdas fotovoltaicas son dispositivos capaces de transformar la radiación solar en electricidad; son dispositivos estáticos, es decir, carecen de partes móviles (RODRIGUEZ & VAZQUEZ 2018).

El objetivo de la investigación consiste en mostrar los resultados de un análisis realizado respecto al rendimiento energético, económico y ambiental de una central fotovoltaica de 3,4 kWp instalada en el modo de la generación distribuida en la Universidad Técnica e Manabí, respecto a los siguientes indicadores (ORTIZ, 2013):

1. calidad del potencial solar en la zona donde fue instalada la tecnología,
2. disposición de la capacidad fotovoltaica diseñada,
3. estado del equipamiento instalado,
4. productividad energética de la central y,
5. estimación del ahorro económico y ambiental del proyecto.

Todo ello a partir de las mediciones realizadas una vez transcurrido el primer año de operación de la tecnología.

1.1. La Central Fotovoltaica en la Universidad Técnica de Manabí

La Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas de la Universidad Técnica de Manabí, en Ecuador, desde el año 2015 viene desarrollando el proyecto denominado: "Sistema de Información Geográfica para el Desarrollo Sostenible" (SIGDS) (RODRÍGUEZ, 2015); con el objetivo de impulsar el uso de las fuentes renovables de energía para alcanzar el desarrollo energético sostenible en la provincia. Mediante la gestión del proyecto se ha podido realizar el estudio del potencial solar de la provincia y se ha logrado comprobar que el mismo resulta

factible para la generación de electricidad mediante la implementación de tecnologías fotovoltaicas (INTRIAGO & SALVATIERRA. 2016), (CEDEÑO, 2017).

Una medida equivalente del potencial solar del territorio del Ecuador, ha sido estimada en función a la radiación solar promedio que incide en la provincia de Manabí, siendo aproximadamente equivalente a medio litro de petróleo por metro cuadrado día del espacio territorial, estos datos se han evaluado a partir de las investigaciones realizadas en el mencionado proyecto (RODRÍGUEZ M. 2015).

En el año 2016 se realizó la instalación de tecnología fotovoltaica conectada a la red de baja tensión en uno de los edificios de la Universidad Técnica de Manabí (UTM), lo que ha permitido evaluar el régimen de trabajo operativo y el rendimiento energético, económico y ambiental lograda por la tecnología en las condiciones ambientales de la ciudad de Portoviejo, de tal manera que se pueda determinar hasta donde pueden ser competitivos estos sistemas con el resto de las tecnologías de generación que se utilizan en el territorio (QUIJIJE & REINA. 2016).

2. Metodología

Para el desarrollo del trabajo se asumió el tipo de investigación de campo, para la realización de la evaluación sobre el régimen de trabajo y la eficiencia operacional de la central fotovoltaica de 3,4 kWp instalada en el edificio 3 de la UTM. Ello permitió el conocimiento más a fondo que posibilitó manejar los datos con más seguridad y obtener información respecto al funcionamiento de la central fotovoltaica instalada y su eficiencia.

El método seleccionado es descriptivo-deductivo, por lo que este tipo de investigación se ocupa de la descripción de datos y características de la instalación. El objetivo es la adquisición de datos confiables, precisos y sistemáticos que fueron usados en promedios, frecuencias y cálculos estadísticos.

Se emplearon las técnicas investigativas de revisión de documentos, textos, tesis, libros, normas técnicas, páginas web y manuales, para la obtención de la información apropiada y clara para el desarrollo del tema abordado; además se investigó sobre los diversos sistemas de energías renovables, los sistemas fotovoltaicos que se instalan en los sistemas eléctricos a nivel nacional e internacional.

Para gestionar la información relacionada con el potencial solar se utilizó el SIGDS (RODRÍGUEZ M. 2015), que se fundamenta en un sistema de información geográfica que contiene los datos relacionados con el perfil energético del territorio y el comportamiento de la radiación solar promedio anual en el territorio de la provincia de Manabí.

Las estimaciones relacionadas con el diseño de la central y el rendimiento energético de la tecnología fotovoltaica, así como la definición de los impactos ambientales derivados se realizaron mediante simulaciones utilizando el software PVSyst, V5.55, que constituye una herramienta ampliamente usada a nivel internacional para el diseño y desarrollo de simulación de instalaciones fotovoltaicas, ya sean de forma aisladas o conectadas a la red.

3. Resultados

En la actualidad es conocido el efecto reductor que propicia la introducción de la tecnología fotovoltaica conectada a la red para el consumo de energía del sistema convencional. Existen resultados de investigaciones realizadas en la UTM (QUIJIJE & REINA. 2016) donde se demuestra que, más del 90 % del consumo de energía eléctrica en el edificio 3 de profesores a tiempo completo de la UTM se realiza en las horas del día, cuando el potencial solar se encuentra disponible de ser aprovechado. La universidad debe pagar a la empresa eléctrica un importe de 0,08 centavos por cada kWh consumido.

A finales del mes de febrero de 2016 se instaló en la cubierta del edificio 3 de profesores a tiempo completo de la UTM, una central fotovoltaica de 3,4 kWp conectada a la red de baja tensión de dicha instalación (QUIJIJE & REINA. 2016). Después de transcurrido poco más de un año y la central fotovoltaica ha generado un total de 4 MWh de energía eléctrica, pudiendo haber ahorrado en un año unos 280,00 USD por concepto de factura eléctrica. Es importante considerar que la energía eléctrica que se consume en la universidad tiene origen térmico, con un costo real del kWh servido de más de 0,30 USD, por lo que el principal impacto puede ser para el estado ecuatoriano que asume el subsidio vinculado al precio comercial del kWh servido

a los usuarios (INTRIAGO & SALVATIERRA. 2016). Se puede estimar que la tecnología instalada ha propiciado en un año de operaciones, un ahorro económico para el estado ecuatoriano equivalente a 1.200,00 USD.

La generación fotovoltaica supone evitar el consumo de cualquier otro combustible para la producción de electricidad. En un sistema conectado a la red esta energía es entregada a la línea eléctrica mediante el uso de un inversor que la transforma de corriente directa (DC) a corriente alterna (AC), puesto que los módulos fotovoltaicos generan corriente continua. Dicha generación puede mejorar el perfil de tensión de la red junto con otros beneficios que sólo se logran con el aprovechamiento de la energía solar en el modo de la generación distribuida (VAZQUEZ, SANTOS, RODRIGUEZ & ESPINO. 2013). En las condiciones del potencial solar que incide en la ciudad de Portoviejo, por cada 10 kWp de tecnología fotovoltaica conectada a la red, se puede estar ahorrando anualmente 3,33 ton de petróleo (INTRIAGO & SALVATIERRA. 2016).

La generación eléctrica en la provincia de Manabí es básicamente térmica mediante el consumo de petróleo. Sobre el sistema de las líneas eléctricas de la provincia influye una situación ambiental desfavorable, dada la contaminación y el aerosol marino que impera en buena parte del territorio, implicando niveles importantes de pérdidas energéticas que pueden afectar la calidad del servicio eléctrico. A esta situación se debe agregar el mal estado en que se encuentran las líneas eléctricas servicio eléctrico de la institución.

En la actualidad resulta una realidad innegable el efecto altamente reductor de impactos ambientales que puede propiciar la introducción de las fuentes renovables de energía en la matriz energética de cualquier región, pudiendo ser superior cuando se aplican en función de articular sistemas en el modo de la generación distribuida (PEREDA, 2005).

Cuando se analiza la energía generada por la central fotovoltaica instalada y las pérdidas energéticas que tienen lugar en el sistema de potencia del territorio, se logra estimar que la tecnología ha permitido evitar el consumo de 1 tonelada de petróleo y haber reducido la emisión de unas 3,6 toneladas de CO₂ a la atmósfera.

Para estimar el ahorro promedio de petróleo derivado de la introducción de la tecnología fotovoltaica en las condiciones del potencial solar de la ciudad de Portoviejo se utilizó la ecuación 1.

$$EaC = EfvG + Pe * ElcC \quad (1)$$

Donde:

EaC → estimado de ahorro de combustible (ton)

EfvG → energía fotovoltaica generada e incorporada al autoconsumo (kWh)

Pe → pérdidas energéticas evitadas (kWh)

ElcC → estimado del índice de consumo de combustible en la generación térmica (25g/kWh)

Para estimar la reducción de las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera derivado de la introducción de la tecnología fotovoltaica se utilizó la ecuación 2.

$$GcE = EfvG + Pe * EleG \quad (2)$$

Donde:

GcE → gases contaminantes evitados (ton)

EleG → estimado del índice de emisión de gases derivado de la generación térmica (900g/kWh)

La investigación permitió definir que la calidad del servicio eléctrico en la universidad de Manabí puede mejorarse mediante la introducción de estos sistemas conectados a la red de baja tensión de los edificios e instalaciones, contribuyendo a mejorar el factor de potencia, estabilizando el perfil de tensión (RODRÍGUEZ, 2015) y economizando la utilización de transformadores y redes eléctricas.

3.1 Calidad del potencial solar en la zona donde fue instalada la

tecnología

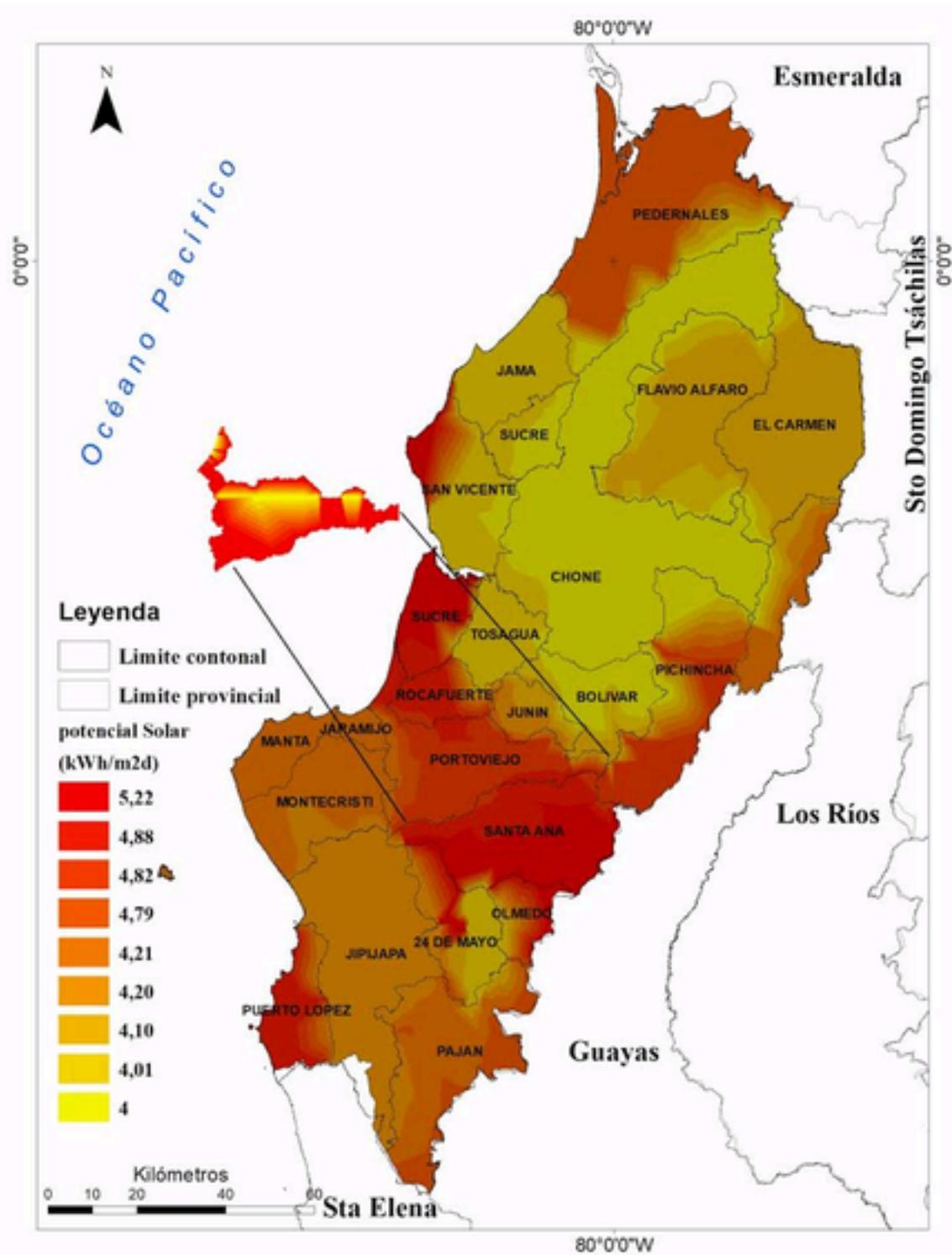
La intensidad de energía solar disponible en un punto determinado de la tierra depende de la forma complicada pero predecible, del día, del año y de la hora (VANEGAS, CHURIO, VALENCIA, VILLICAÑA, OSPINO. 2017). La provincia de Manabí se encuentra ubicada en el territorio costero del Ecuador, posee uno de los niveles más elevados de la radiación solar incidente en relación con el resto del país.

En la tabla 1 se muestra la información estadística del potencial solar promedio anual y por meses del año y en la figura 1 se muestra el mapa a escala cromática con el potencial solar diario promedio anual en la provincia de Manabí y una ampliación de la ciudad de Portoviejo donde se ubica el sitio de instalación de la tecnología fotovoltaica.

Tabla 1
Datos estadísticos de la radiación solar diaria promedio anual de la provincia de Manabí

| Concepto | Prom. anual | Ener | Feb | Marz | Abril | Mayo | Junio | Julio | Agost | Sep | Oct | Nov | Dic |
|---|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Potencial solar promedio anual de la provincia de Manabí (kWh/m ² día) | 4,601 | 4,982 | 4,977 | 5,526 | 5,409 | 4,867 | 3,930 | 3,753 | 4,056 | 4,312 | 4,269 | 4,367 | 4,758 |

Figura 1
Radiación solar diaria promedio anual, de la provincia de Manabí y una ampliación de la ciudad de Portoviejo



Dada la ubicación latitudinal del sitio donde se ubica la ciudad de Portoviejo en relación con el movimiento aparente del Sol y las condiciones climáticas propias que tienen lugar a lo largo del año, la radiación solar presenta una variación relativa. En la tabla 2 se exponen los datos estadísticos de la radiación solar promedio anual y por meses que incide en la ciudad de Portoviejo.

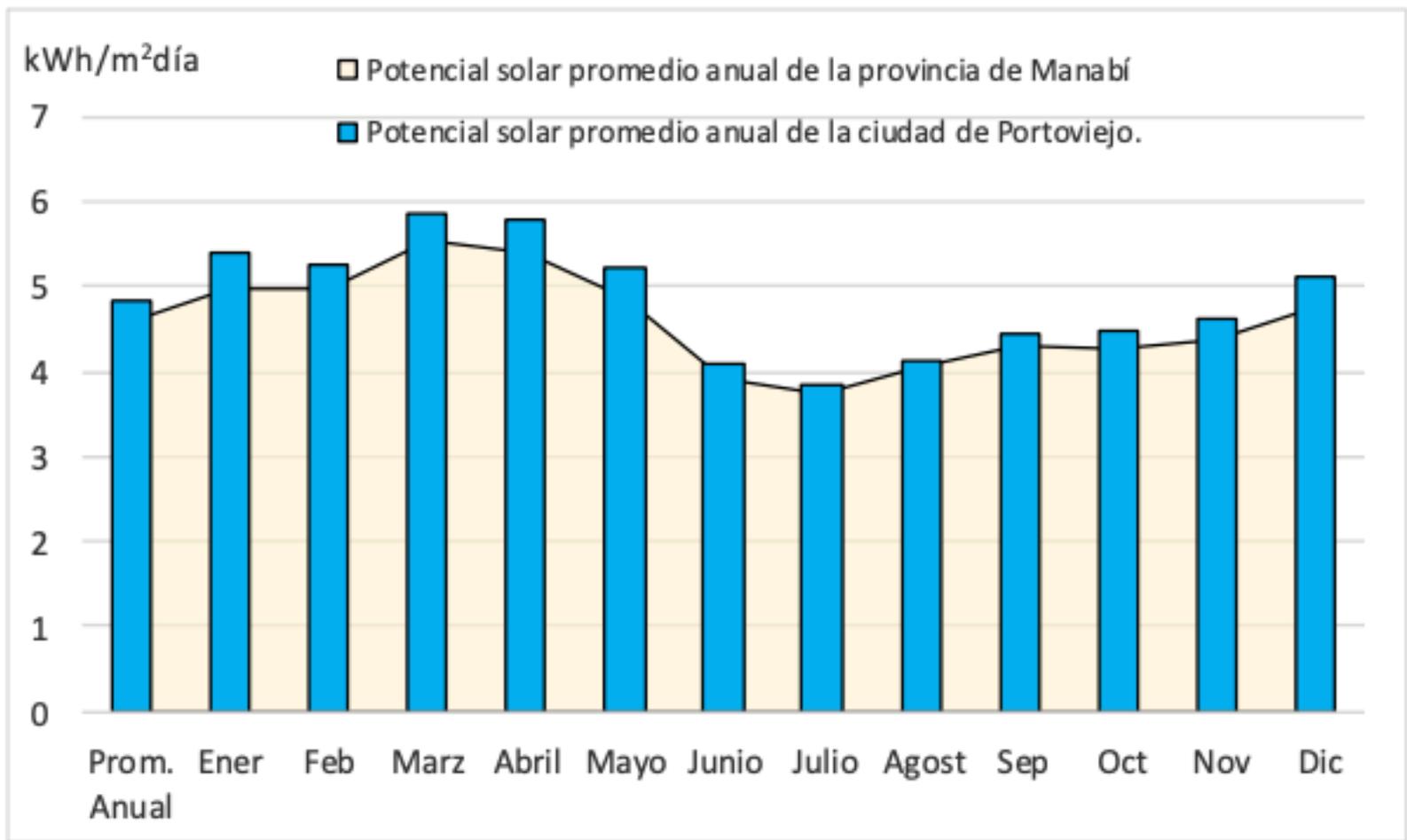
Tabla 2
Radiación solar promedio anual que incide en la ciudad de Portoviejo

| Concepto | Prom. Anual | Enero | Feb | Marzo | Abril | Mayo | Junio | Julio | Agosto | Sep. | Oct | Nov | Dic |
|---|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| Potencial solar promedio anual de la ciudad de Portoviejo. (kWh/m ² día) | 4,850 | 5,385 | 5,270 | 5,865 | 5,775 | 5,235 | 4,085 | 3,830 | 4,115 | 4,430 | 4,470 | 4,610 | 5,135 |

El análisis de los datos reflejados en las tablas 1 y 2 permite definir que el nivel de la radiación solar promedio anual incidente en la ciudad de Portoviejo, se encuentra por encima de los

valores promedios registrados para la provincia de Manabí, por lo que cualquier inversión realizada en el área de estudio con el objetivo de aprovechar el potencial solar incidente, garantiza niveles energéticos superiores a los esperados en el resto de la provincia. En la figura 2 se muestra gráficamente la relación existente entre la radiación solar promedio anual de la provincia de Manabí y la que incide en la ciudad de Portoviejo.

Figura 2
Relación gráfica entre la radiación solar promedio anual de la provincia de Manabí y la que incide en la ciudad de Portoviejo



En la tabla 3 se muestra el cálculo de la productividad normalizada promedio anual y por meses del año en la ciudad de Portoviejo.

Tabla 3
Productividad normalizada promedio anual y por meses del año

| Concepto | Prom. Anual | Enero | Feb | Marzo | Abril | Mayo | Junio | Julio | Agosto | Sep. | Oct | Nov | Dic |
|-------------------------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| Productividad normalizada (kWh/kWp) | 3,957 | 4,394 | 4,300 | 4,785 | 4,712 | 4,271 | 3,333 | 3,125 | 3,357 | 3,614 | 3,647 | 3,761 | 4,190 |

La productividad normalizada constituye un indicador que representa el resultado del cálculo sobre la cantidad de energía eléctrica que puede ser generada por cada kWp de tecnología fotovoltaica instalada en un día de operación. En ello juega un papel determinante la consideración del potencial solar incidente en el sitio de la instalación y se expresa (kWh/kWp día).

La radiación solar incidente en la ciudad de Portoviejo garantiza que por cada kWp de fotovoltaica instalada se puedan generar hasta unos 36 MWh de electricidad en del ciclo de vida de la tecnología, con un precio comercial promedio estimado en 0,08 centavos dólar y un costo real aproximado de 0,30 centavos dólar el kWh generado.

Los cálculos energéticos fueron realizados aplicando la ecuación 3.

Donde:

$GeCv$ → generación de energía en el ciclo de vida de la tecnología (MWh Cv)

Pn → productividad normalizada (kWh/kWp día)

Toa → tiempo de operación en un año (1 año/365días)

$ToCv$ → tiempo de operación en el ciclo de vida (25 años)

3.2 Disposición de la tecnología en la central fotovoltaica de 3,4 kWp.

Durante el desarrollo del proyecto se pudo comprobar el generador fotovoltaico está integrado por dos cadenas de 9 módulos cada una conectados en serie, cada módulo es del tipo SM572-190, con una potencia nominal de 190 Wp, que tienen una dimensión de 1.58 mm de largo por 808 mm de ancho y 35 mm de alto. Consta de 72 células fotovoltaicas conectadas en serie, las mismas que forman un área de 15625 mm² y que ocupan un área por módulo de 1,26 m². La eficiencia nominal del módulo en cuanto al aprovechamiento de la energía primaria del Sol, está planteada entre un 16,4 % hasta un 17,6 % y un tiempo de vida útil de 25 años. Dentro de las características técnicas se tiene que el módulo a circuito abierto posee una tensión de 40Vcd y con circuito cerrado 24 Vcd (QUIJIJE & REINA. 2016).

Se instaló un inversor SUNNY BOY 3000 SMA, que posee un grupo de protecciones y un sistema de siguiente del punto de máxima potencia (QUIJIJE & REINA. 2016). Se instalaron además las protecciones adecuadas para el lado de corriente continua y de la del lado de corriente alterna. Se utilizaron cables del tipo solar de 6 mm y las estructuras metálicas de soporte para los módulos fotovoltaicos.

La vitalidad de la instalación fue puesta a prueba el 16 de abril de 2016, al soportar un sismo con una intensidad de 7,8 grados y cuando colapso el sistema eléctrico centralizado, la central fotovoltaica continuó generando energía sin dificultades.

3.3. Modo de instalación de la capacidad fotovoltaica diseñada

En algunos países europeos que son líderes en el desarrollo de sistemas fotovoltaicos conectados a la red, prevalece el concepto de concentrar la energía solar en grandes instalaciones, para luego distribuir y transportar la electricidad bajo los mismos criterios aplicados al esquema energético tradicional. No obstante, es perfectamente verificable que, en las condiciones del sistema eléctrico ecuatoriano y especialmente en la región costa, dicho modo de aprovechamiento de la energía fotoeléctrica, no en todos los casos resulta eficientemente rentable, pudiendo aplicarse el modo de la generación distribuida, garantizando reducir las pérdidas que son propias de los sistemas convencionales centralizados. En la provincia de Manabí las pérdidas promedio del sistema eléctrico pueden estar estimadas hasta en un 15%, de los cuales el 5% corresponden a la transportación de la energía y un 10% a la distribución. Durante la etapa de diseño de los sistemas fotovoltaicos resulta importante considerar esta particularidad, pues con una misma potencia instalada, es decir, con un mismo gasto económico de inversión pueden lograrse diferentes resultados (SALAMANCA-AVILA. 2017).

En la tabla 4 se muestran los resultados de una simulación relacionada con el supuesto de dos centrales FV de 1 MWp ubicadas en Portoviejo. La primera conectada a la red de distribución, estimándose pérdidas promedio del 5 % asociada a los procesos de transportación y 10 % vinculada a distribución; la segunda conectada directamente a la red de cara al usuario y partiendo de que en ningún sistema eléctrico las pérdidas llegan a ser iguales a 0, se prevén mermas energéticas mínimas que pudieran llegar a ser hasta del 2 %. En el análisis se pueden apreciar los impactos económicos y ambientales.

| Variante | TC (kWh/kWp) | Ega (MWh/año) | Esc (MWh/año) | IE (USD) | IA (ton CO2) |
|--|-----------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| Conectado a la red de distribución. | 1 444 | 1 444 | 1 228 | 368 297,00 | 1 105,20 |
| Conectado Directamente al centro de carga. | 1 444 | 1 444 | 1 415 | 424 625,60 | 1 273,80 |
| Diferencia | -- | -- | 187 | 56 328,60 | 168,60 |

Fuente: Elaboración propia mediante simulaciones utilizando el software *PVSyst V5.55*

Descripción de acrónimos:

TC → Tiempo característico (kWh/kWp año)

Ega → Cálculo de energía que puede generarse en un año (kWh/año)

Esc → Estimado de energía que puede ser suministrada al consumo (kWh/año)

IE → Estimado del Impacto económico para el estado (USD)

IA → Estimado del Impacto ambiental (USD)

El tiempo característico resulta un indicador abreviado que consiste en la estimación de la energía que se puede generar con un kWp de fotovoltaica instalado durante un año de operación. Es el equivalente a la productividad normalizada por 365 días.

En la tabla 5 se puede apreciar que de asumir la instalación de una central fotovoltaica de 1 MWp en el modo de la generación centralizada, en relación con otra instalada en el modo de la generación distribuida instalada de cara al usuario, las diferencias en un solo año de operación a favor de la segunda variante, llega a ser de decenas de MWh dejados de servir al consumo, pues se disipan en pérdidas, lo que se traduce en pérdidas económicas y emisiones de CO2 a la atmósfera que pudieran evitarse.

Con los resultados observados anteriormente se puede plantear que, para la instalación de los sistemas, es recomendable alcanzar una mayor proximidad de la generación a la carga, reduciendo las pérdidas y garantizando una mayor eficiencia y la recuperación económica del sistema en más breves plazos. Esencialmente aprovechando las áreas techadas, áreas perimetrales y otras superficies del ámbito urbano donde actualmente no es óptimo el aprovechamiento del espacio. Relacionado con el diseño de la instalación se pudo comprobar que existe correspondencia entre la el mismo y la realidad, pudiendo verificar que se cumplen las exigencias del diseño reflejado en el proyecto.

3.4. Estado del equipamiento tecnológico instalado

La investigación permitió comprobar que la tecnología (módulos fotovoltaicos e inversores) se encuentran en perfecto estado técnico y su funcionamiento se comporta de manera normal de acuerdo a los parámetros indicados por el fabricante de los módulos. Su verificó que en el mes de febrero de 2016 recién instalada la tecnología, en uno de los módulos fotovoltaicos se produjo un punto caliente por desperfecto de fabricación del módulo, el que fue cambiado inmediatamente por el proveedor. La instalación eléctrica y las estructuras de soporte de los módulos presentan buen estado técnico. En la figura 3 se muestra una imagen del estado actual de la central fotovoltaica.

Figura 3

Central fotovoltaica de 3,4 kWp instalada



El primer registro de información en el libro de incidencias técnicas de la central, corresponde al día 27 de enero de 2016 a las 11:14 horas, que coincide con el momento en que fue puesta en operación. El primer reporte operacional está registrado el 29 de enero a las 10:30 horas, es decir dos días después y se recoge una generación de 19 kWh entregados a la red, con un promedio diario de 9,5 kWh.

Hasta el mes de marzo las lecturas se efectuaron semanalmente y para el día 1ro de dicho mes, es decir en 34 días de operación, la central había generado e incorporado al consumo del edificio unos 302 kWh, para un promedio diario de 8,88 kWh. El día 11 de marzo la lectura reportó 406 kWh generados e incorporado al consumo del edificio, con un promedio diario de 10,4 kWh.

Se pudo comprobar que en adelante se interrumpen los reportes de lecturas, realizándose uno el 17 de mayo de 2016 y otro el 8 de junio del mismo año y no se vuelve a realizar otro reporte hasta el 13 de diciembre de 2016. Esta es una situación que debe ser resuelta, pues una de las formas de detectar desperfectos en este tipo de instalación, está relacionado con el control de los reportes de generación. El control al régimen operacional de la central debe realizarse cuando menos una vez por semana.

El día 13 de diciembre de 2016 se realizó un mantenimiento que incluyó la limpieza de las superficies de los módulos y se comenzó un ciclo de control periódico a la generación de la central fotovoltaica, sus resultados se muestran en las tablas 5 y 6.

Tabla 5
Control periódico operacional
Semana I- del 13 al 16 de diciembre de 2016

| | | Potencia | Tensión | Lectura | Energía generada en la | Promedio |
|--|--|----------|---------|---------|------------------------|----------|
| | | | | | | |

| Fecha | Hora | activa (W) | (V) | medidor (U) | semana (kWh) | diario (kWh) |
|------------|-------|---------------|-----|----------------|-----------------|-----------------|
| 13/12/2016 | 09:00 | 495 | 297 | 3294 | | |
| 13/12/2016 | 13:00 | 397 | 285 | 3300 | | |
| 13/12/2016 | 18:00 | 290 | 289 | 3306 | | |
| 14/12/2016 | 09:00 | 482 | 295 | 3312 | | |
| 14/12/2016 | 13:00 | 1115 | 298 | 3317 | | |
| 14/12/2016 | 18:00 | 342 | 299 | 3323 | | |
| 15/12/2016 | 09:00 | 458 | 292 | 3328 | | |
| 15/12/2016 | 13:00 | 401 | 301 | 3333 | | |
| 15/12/2016 | 18:00 | 312 | 292 | 3337 | | |
| 16/12/2016 | 09:00 | 488 | 310 | 3342 | | |
| 16/12/2016 | 13:00 | 1125 | 296 | 3348 | | |
| 16/12/2016 | 18:00 | 280 | 292 | 3353 | 59 | 14.75 |

En la figura 4 se muestra un gráfico con el comportamiento del perfil de tensión inyectado a la red durante los días de la semana que fueron registrados, donde se puede apreciar el punto más crítico el día 13 de diciembre de 2016 a las 13:00 horas, pudiendo comprobar que ese día y a esa hora se nubló el cielo de forma muy intensa y comenzó a caer una lluvia muy torrencial, luego se puede notar una recuperación gradual del clima y un punto más elevado el día 16 de diciembre de 2016 a las 09:00 horas con un cielo totalmente despejado que propició una alta captación de la radiación solar.

Figura 4
Comportamiento del perfil de tensión inyectado a la red

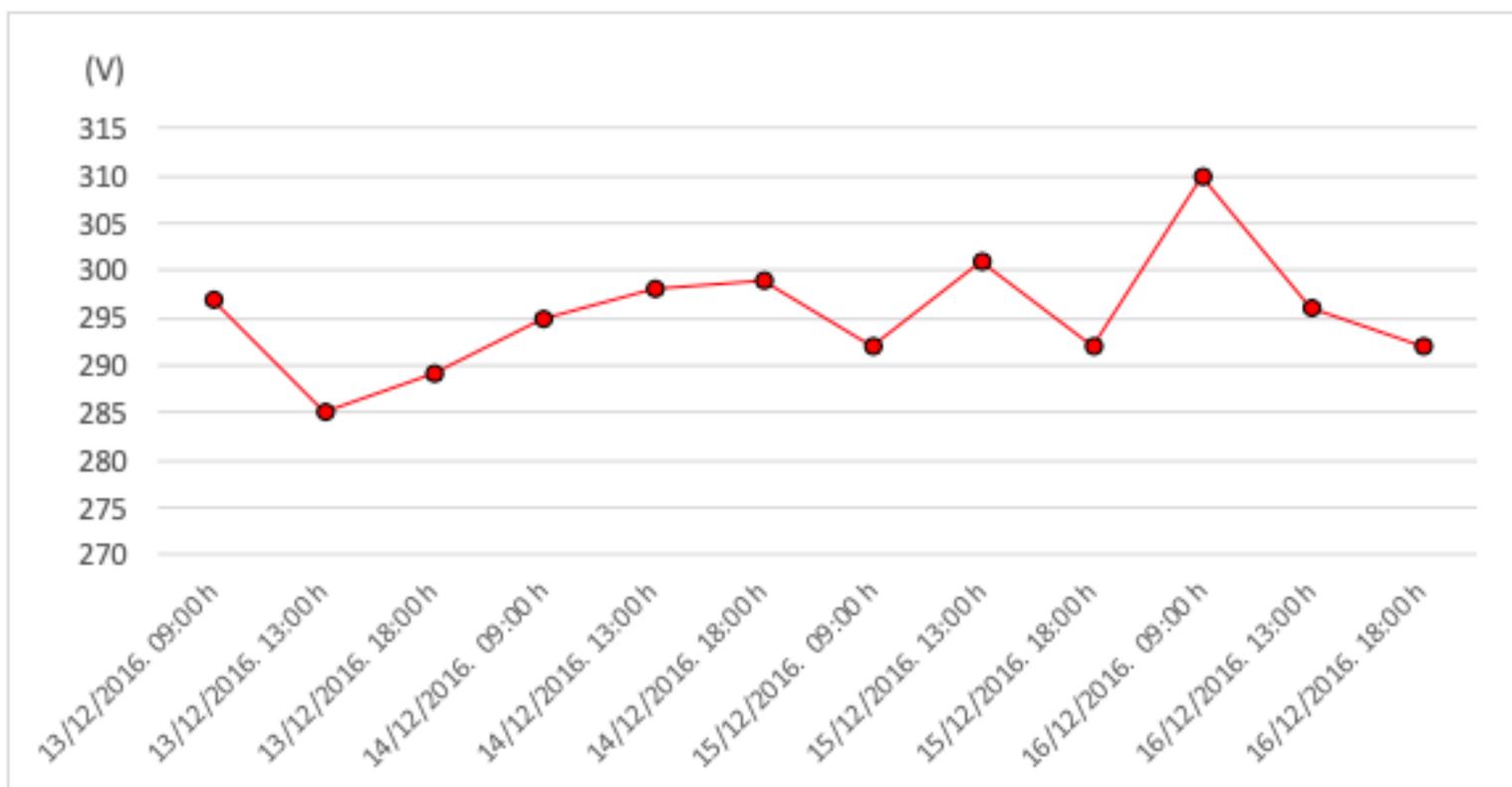
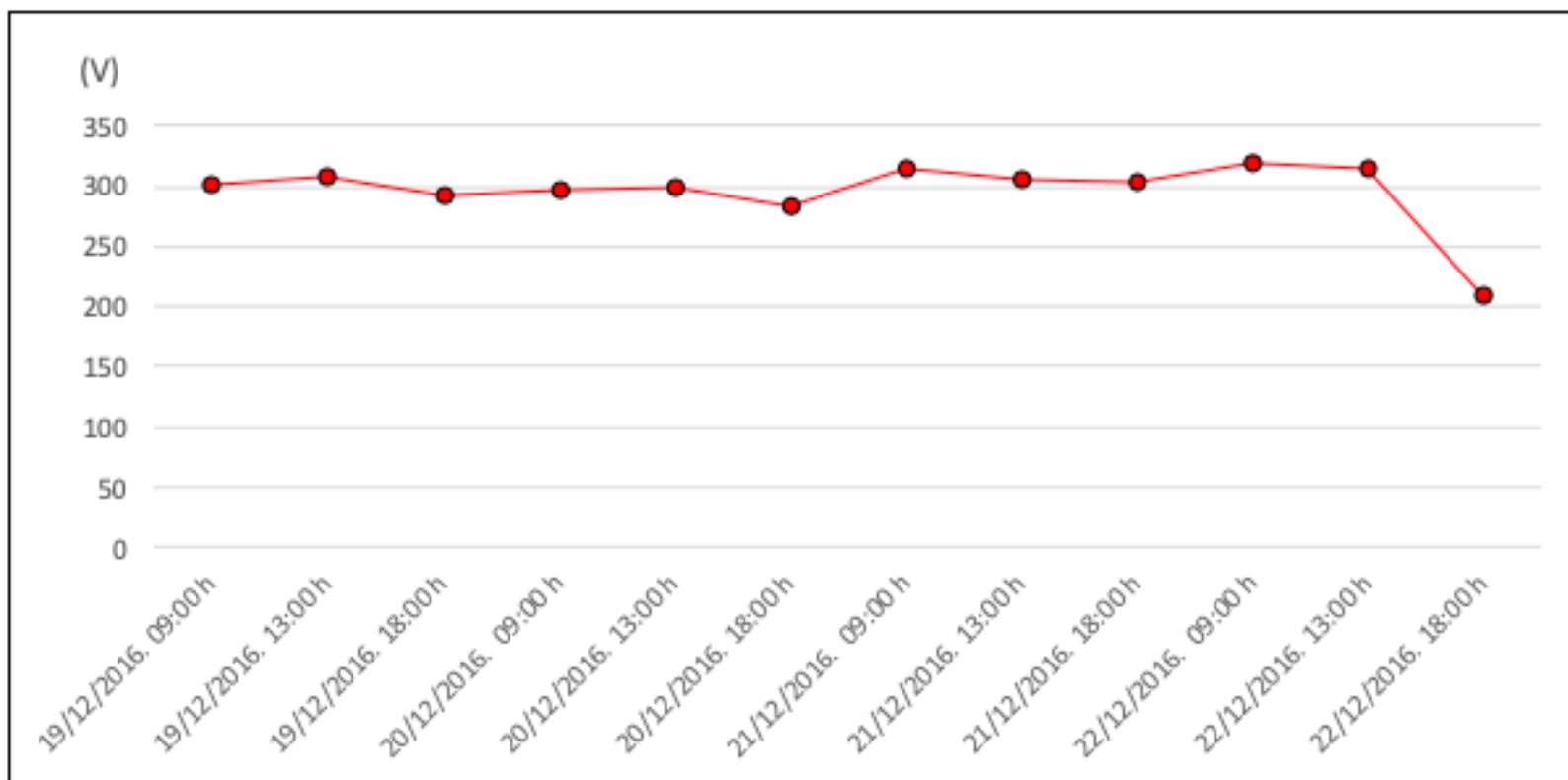


Tabla 6
Control periódico operacional
Semana II- del 19 al 22 de diciembre de 2016

| Fecha | Hora | Potencia activa (W) | Tensión (V) | Lectura medidor (U) | Energía generada en la semana (kWh) | Promedio diario (kWh) |
|--------------|-------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|--|------------------------------|
| 19/12/2016 | 09:00 | 488 | 301 | 3390 | | |
| 19/12/2016 | 13:00 | 1142 | 309 | 3406 | | |
| 19/12/2016 | 18:00 | 276 | 293 | 3412 | | |
| 20/12/2016 | 09:00 | 1134 | 296 | 3418 | | |
| 20/12/2016 | 13:00 | 1150 | 299 | 3422 | | |
| 20/12/2016 | 18:00 | 110 | 284 | 3425 | | |
| 21/12/2016 | 09:00 | 1022 | 316 | 3429 | | |
| 21/12/2016 | 13:00 | 327 | 307 | 3433 | | |
| 21/12/2016 | 18:00 | 540 | 303 | 3436 | | |
| 22/12/2016 | 09:00 | 825 | 319 | 3439 | | |
| 22/12/2016 | 13:00 | 460 | 314 | 3442 | | |
| 22/12/2016 | 18:00 | 480 | 209 | 3445 | 55 | 13.75 |

En la figura 5 se muestra un gráfico con el comportamiento del perfil de tensión inyectado a la red durante los días del 19 al 22 de diciembre de 2016, donde se puede apreciar mucha estabilidad en la tensión inyectada a la red, excepto el día 22 de diciembre a las 18:00 horas, que corresponde con día que a partir de las 13:30 horas comenzó a nublarse, con ocurrencia de precipitaciones, que afectaron la capacidad de captación de la radiación solar por los módulos.

Figura 5
Comportamiento del perfil de tensión inyectado a la red



El día 9 de enero se comenzó otro ciclo de control periódico a la generación de la central fotovoltaica, esta vez sin realizar mantenimiento ni limpieza de la superficie de los módulos, con el objetivo de comprobar los efectos que puede implicar la suciedad en la superficie captadora y como consecuencia, hasta donde se puede afectar la generación de energía producto de la suciedad. Los resultados se muestran en las tablas 7 y 8.

Tabla 7
Control periódico operacional
Semana III- del 9 al 13 de enero de 2017

| Fecha | Hora | Potencia activa (W) | Tensión (V) | Lectura medidor (U) | Energía generada en la semana (kWh) | Promedio diario (kWh) |
|-----------|-------|---------------------|-------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| 9/1/2017 | 09:00 | 524 | 318 | 3587 | | |
| 9/1/2017 | 13:00 | 1175 | 301 | 3590 | | |
| 9/1/2017 | 18:00 | 427 | 295 | 3593 | | |
| 10/1/2017 | 09:00 | 1113 | 301 | 3595 | | |
| 10/1/2017 | 13:00 | 1093 | 303 | 3597 | | |
| 10/1/2017 | 18:00 | 525 | 301 | 3600 | | |
| 11/1/2017 | 09:00 | 770 | 296 | 3605 | | |
| 11/1/2017 | 13:00 | 1240 | 269 | 3609 | | |
| 11/1/2017 | 18:00 | 176 | 279 | 3614 | | |
| 12/1/2017 | 09:00 | 1131 | 297 | 3617 | | |
| 12/1/2017 | 13:00 | 1125 | 301 | 3620 | | |
| 12/1/2017 | 18:00 | 550 | 305 | 3626 | | |

| | | | | | | |
|-----------|-------|------|-----|------|----|------|
| 13/1/2017 | 09:00 | 495 | 303 | 3630 | | |
| 13/1/2017 | 13:00 | 1195 | 309 | 3635 | | |
| 13/1/2017 | 18:00 | 292 | 299 | 3639 | 52 | 10.4 |

En la figura 6 se muestra un gráfico con el comportamiento del perfil de tensión inyectado a la red durante los días del 9 al 13 de enero de 2017, donde se puede apreciar que a partir del día 9 de enero a las 13:00 horas, el perfil de tensión inyectado a la red comienza a descender, llegando al punto más crítico el día 11 de enero a las 13:00 horas, pudiendo notar que a partir del día 12 comienza a subir gradualmente. Se pudo comprobar que esta situación se debe a la ocurrencia de días nublados con lluvias, que afectaron la captación de la radiación solar por parte de las celdas fotovoltaicas.

Figura 6
Comportamiento del perfil de tensión inyectado a la red

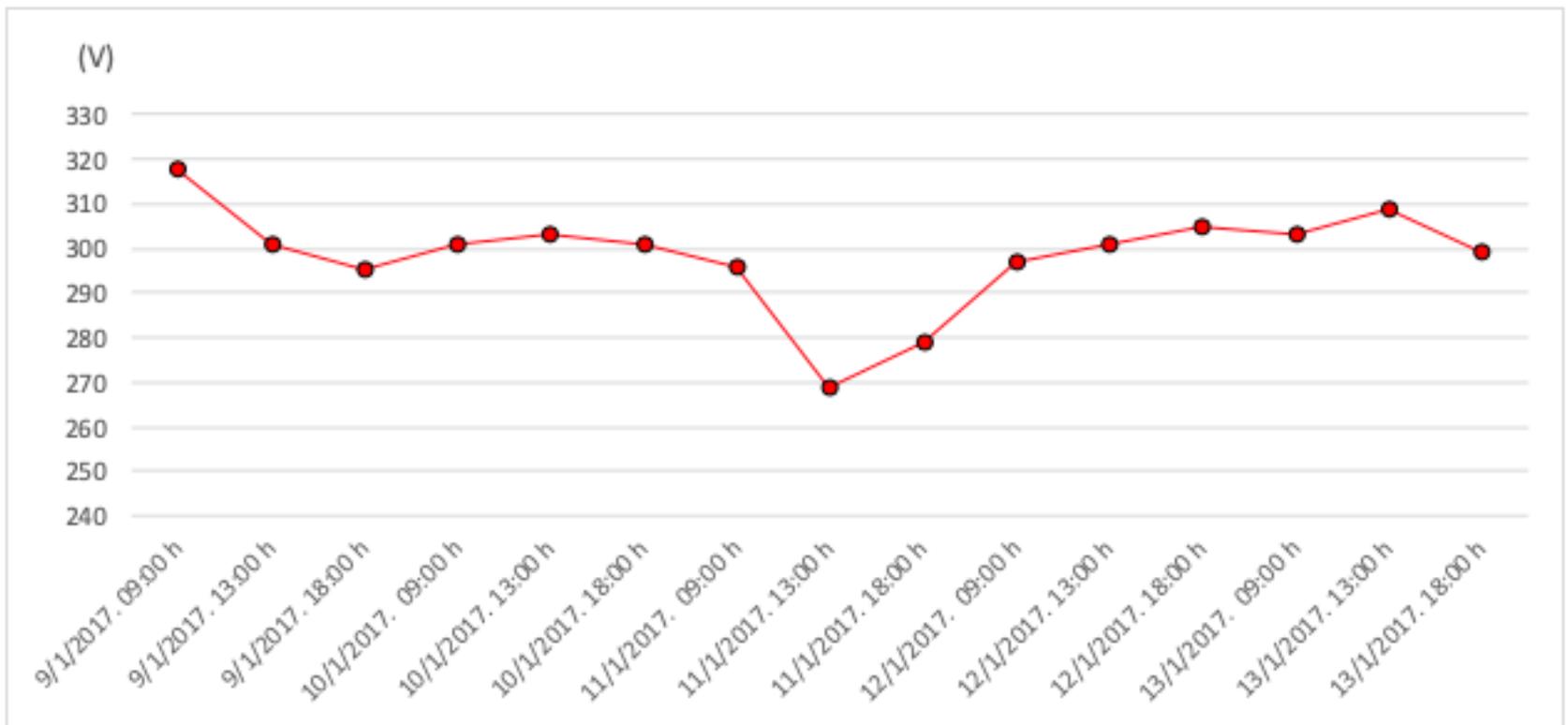


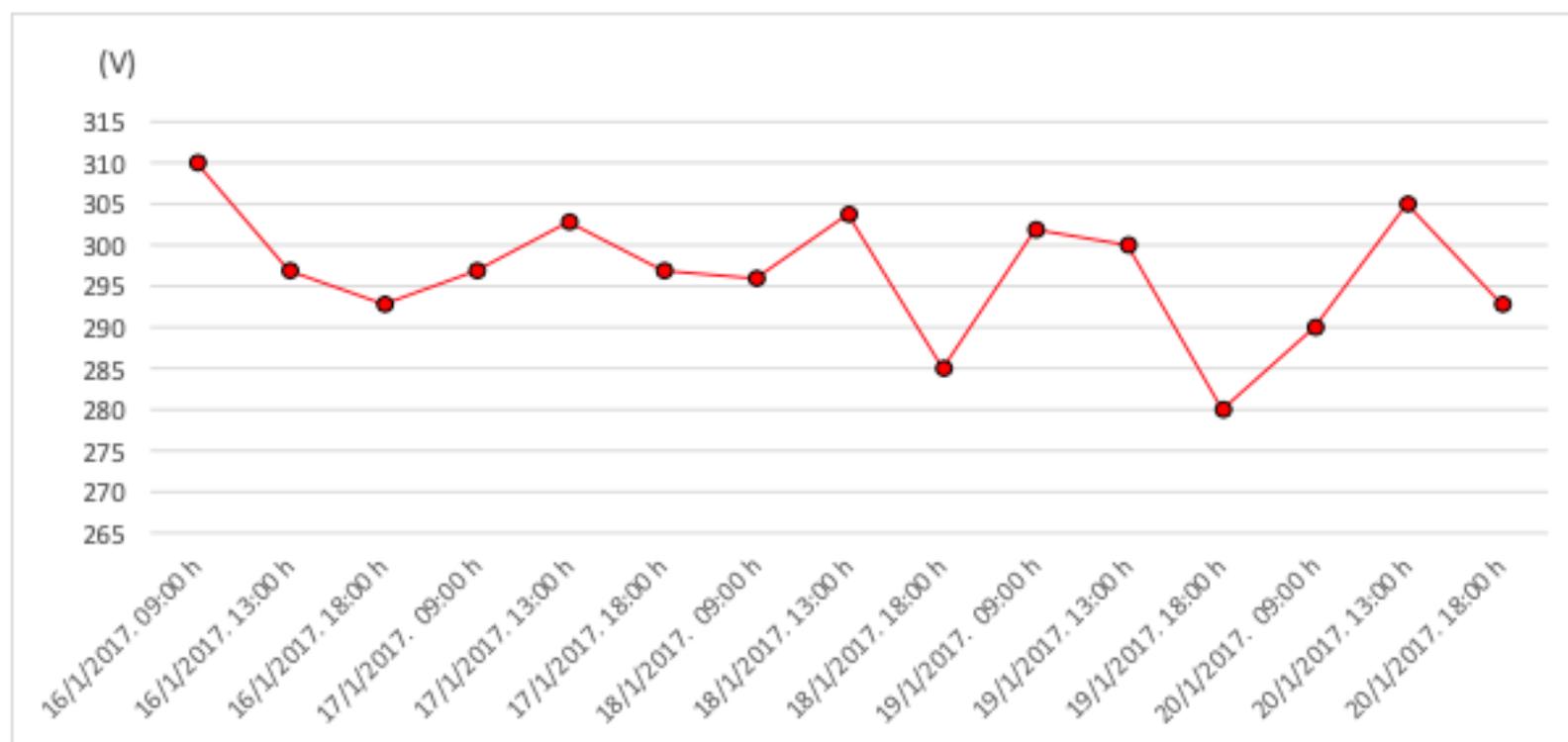
Tabla 8
Control periódico operacional
Semana IV- del 16 al 20 de enero de 2017

| Fecha | Hora | Potencia activa (W) | Tensión (V) | Lectura medidor (U) | Energía generada en la semana (kWh) | Promedio diario (kWh) |
|-----------|-------|---------------------|-------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| 16/1/2017 | 09:00 | 485 | 310 | 3644 | | |
| 16/1/2017 | 13:00 | 1225 | 297 | 3648 | | |
| 16/1/2017 | 18:00 | 283 | 293 | 3653 | | |
| 17/1/2017 | 09:00 | 482 | 297 | 3658 | | |
| 17/1/2017 | 13:00 | 1215 | 303 | 3661 | | |
| 17/1/2017 | 18:00 | 375 | 297 | 3664 | | |

| | | | | | | |
|-----------|-------|------|-----|------|----|-----|
| 18/1/2017 | 09:00 | 524 | 296 | 3666 | | |
| 18/1/2017 | 13:00 | 1310 | 304 | 3669 | | |
| 18/1/2017 | 18:00 | 325 | 285 | 3672 | | |
| 19/1/2017 | 09:00 | 1135 | 302 | 3676 | | |
| 19/1/2017 | 13:00 | 1975 | 300 | 3678 | | |
| 19/1/2017 | 18:00 | 933 | 280 | 3680 | | |
| 20/1/2017 | 09:00 | 560 | 290 | 3682 | | |
| 20/1/2017 | 13:00 | 1255 | 305 | 3684 | | |
| 20/1/2017 | 18:00 | 903 | 293 | 3687 | 43 | 8.6 |

En la figura 7 se muestra un gráfico con el comportamiento del perfil de tensión inyectado a la red durante los días del 16 al 20 de enero de 2017, donde se puede apreciar inestabilidad en el perfil de tensión inyectado a la red, pudiendo comprobar que corresponde a días con un clima nublado y la ocurrencia de chubascos, siendo el día más crítico el 18 de enero a las 13:00 horas.

Figura 7
Comportamiento del perfil de tensión inyectado a la red



En la tabla 9 se ofrece un resumen comparativo con el comportamiento de la productividad energética en las cuatro semanas controladas. Las dos primeras luego de haber realizado un mantenimiento y limpieza a la superficie captadora de los módulos y las dos semanas siguientes sin la realización del mencionado mantenimiento. En La propia tabla se refleja la productividad normalizada que ha sido estimada para los meses de diciembre y enero, todo ello en función de la radiación solar promedio incidente en estos meses del año en la ciudad de Portoviejo. Los datos reflejados permiten evaluar el nivel de eficiencia con que se encuentra trabajando la central fotovoltaica en cada una de las situaciones señaladas anteriormente.

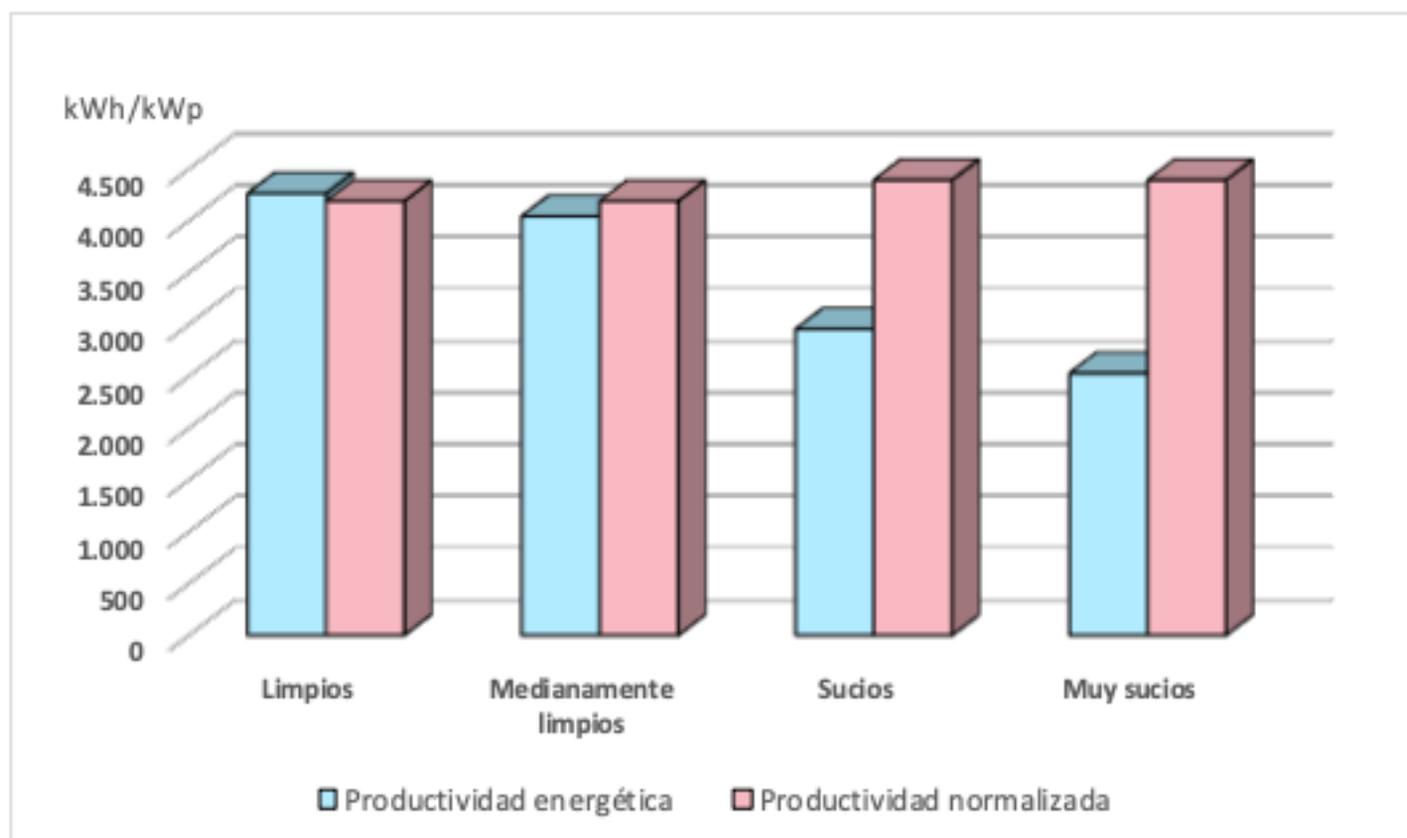
Tabla 9
Resumen comparativo

| | | Energía generada | | | Productividad normalizada | |
|--|--|------------------|--|--|---------------------------|--|
| | | | | | | |
| | | | | | | |

| Periodo del control | Estado de limpieza de los módulos | En la semana | Promedio diario | Generación diaria | estimada para la ciudad de Portoviejo | Diferencia |
|---|-----------------------------------|--------------|-----------------|-------------------|---------------------------------------|------------|
| | | (kWh) | (kWh) | (kWh/kWp) | (kWh/kWp) | (kWh/kWp) |
| Primera semana del 13 al 16 de dic. de 2016 | Limpios | 59 | 14.50 | 4.265 | 4.190 | 0.075 |
| Segunda semana del 19 al 22 de dic. de 2016 | Medianamente limpios | 55 | 13.75 | 4.044 | 4.190 | -0.146 |
| Tercera semana del 9 al 13 de enero de 2017 | Sucios | 52 | 10.04 | 2.953 | 4.394 | -1.441 |
| Cuarta semana del 16 al 20 de enero de 2017 | Muy sucios | 43 | 8.60 | 2.529 | 4.394 | -1.865 |

En la figura 8 se muestra gráficamente el efecto de la suciedad de los módulos en la productividad energética.

Figura 8
Efecto de la suciedad de los módulos en la productividad energética



La reducción del rendimiento energético motivado por la suciedad de la superficie de los módulos fotovoltaicos en las condiciones ambientales de la ciudad de Portoviejo, puede ser mayor al 50% en relación con la productividad energética nominal de la tecnología. Es por ello la importancia de observar con mucho cuidado el cumplimiento de un plan adecuado de mantenimiento y limpieza de la superficie captadora de los módulos fotovoltaicos (FARHAT, BARAMBONES, RAMOS, DURAN, ANDUJAR. 2015).

4. Conclusiones

Se comprobó que la central fotovoltaica se encuentra en buenas condiciones para aportar la

energía según lo estimado durante los estudios del proyecto. En la investigación se valoró que la mayor afectación al régimen operacional de la central y la productividad energética de la misma, está relacionado con el efecto de la contaminación ambiental sobre la superficie captadora de los módulos, que provoca un importante nivel de deposición de polvo y con ello la disminución de la productividad energética debido a la reducción de la capacidad de captación de la radiación solar por parte de las células fotovoltaicas.

Lo analizado anteriormente relacionado con la contaminación ambiental de las superficies captadoras de los módulos, y con el objetivo de lograr la más elevada productividad energética, implica que en las condiciones ambientales de la ciudad de Portoviejo, el trabajo de limpieza de la superficie captadora de los módulos deba realizarse como mínimo una vez por semana.

La generación fotovoltaica que se incorpora directamente al consumo, propicia una reducción directa del monto de la factura eléctrica que se paga a CNEEL por la universidad. Estos resultados son apropiados para esta tecnología en el modo de la generación distribuida conectada directamente de cara al usuario, asegurando con ello un nivel de eficiencia adecuado en el aprovechamiento del recurso solar, al propio tiempo que se contribuye con la reducción del subsidio que el estado asigna para el servicio eléctrico en la provincia de Manabí y propicia la disminución de las emisiones de CO₂ a la atmósfera (ACEVEDO, JIMÉNEZ, AGUDELO. 2018).

La radiación solar incidente en la ciudad de Portoviejo garantiza que por cada kWp de fotovoltaica instalada se puedan generar hasta unos 36 MWh de electricidad en del ciclo de vida de la tecnología, con un costo promedio estimado en 8 centavos dólar el kWh generado.

Referencias bibliográficas

- ACEVEDO Natalia., JIMÉNEZ Luis., AGUDELO Andrés. (2018). Evaluación de venta de certificados de emisiones reducidas en proyecto de generación de energía eléctrica por medio de opciones reales. *Espacios*, Vol. 39 (Nº 13) Año 2018 • Pág. 3.
- ACOSTA, Ivan. (2016). Caracterización y evaluación de un sistema híbrido fotovoltaico/térmico basado en un concentrador solar parabólico lineal. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Campus Monterrey. Escuela de Ingeniería y Ciencias. Trabajo presentado como un requisito parcial para obtener el grado académico de Maestro en Ciencias.
- ARRASTÍA, Mario., & LIMA, Manuel. (2011). *Energía y Cambio Climático*. La Habana: Editorial Academia. pp: 235.
- CEDEÑO, Gabriel. (2017). Estudio del Potencial Solar Como Estrategia de Mejoramiento de la Calidad del Servicio Eléctrico en las Zonas Rurales de la Parroquia Colón. Caso De Estudio Pachinche Adentro Y Maconta Adentro. Tesis de Grado de titulación Ingeniero Electricista. Repositorio de la biblioteca central de la Universidad de Manabí. Ecuador
- DOMINGUEZ, Hector. (2012). Diseño de un sistema fotovoltaico para la generación de energía eléctrica en el COBAEV 35 Xalapa. Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica. Maestría en Ingeniería Energética. Proyecto para obtener el grado de Maestría en Ingeniería Energética.
- FARHAT, Maissa., BARAMBONES, Oscar., RAMOS, Jose., DURAN, Eladio., ANDUJAR Jose. (2015). Diseño e Implementación de un Sistema de Control estable basado en Lógica Borrosa para optimizar el rendimiento de un sistema de Generación Fotovoltaico. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 12 (2015) 476–487.
- HERRERA, Roberto., PALOMINO, Kevin., REYES, Fabiola., VALENCIA, Guillermo. (2018). Análisis Estadístico Descriptivo e Inferencial de la Velocidad y Dirección del viento en la Costa Caribe Colombiana. *Espacios*, Vol. 39 (Nº 19) Año 2018 • Pág. 3.
- INTRIAGO, Gabriela., & SALVATIERRA, Susana. (2016). Implementación de tecnología fotovoltaica conectada a la red para suministrar energía eléctrica al segundo y tercer piso del edificio nº 3 de Docentes a Tiempo Completo de la Universidad Técnica de Manabí, el ahorro y la eficiencia energética. Proyecto de Titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico. Repositorio de la Biblioteca de la Universidad Técnica de Manabí.
- LALEMAN, Ruben., ALBRECHT, Johan., DEWULF Jo. (2011). Life Cycle Analysis to estimate the environmental impact of residential photovoltaic systems in regions with a low solar irradiation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 15, Issue 1, January 2011, Pages 267-281.

LOU, Siwei., LI, Danny., CHAN, Wilco., LAM, Joseph. (2017). Life-cycle analysis of photovoltaic systems in Hong Kong. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* > Volume 9, Issue 4 > 10.1063/1.4999596

OROSCO, Mayra J., VARELA Gregory D., SALCEDO Virgilio., VEGA Cristhian. (2018). Alternativas para la reducción de los residuos urbanos y agropecuarios: potencial bioenergética en la provincia de El Oro (Ecuador). *Espacios*, Vol. 39 (Nº 14) Año 2018 • Pág. 17.

ORTIZ, José. (2013). Viabilidad técnico-económica de un sistema fotovoltaico de pequeña escala. *Revista Visión Electrónica* año 7 número 1 pp. 103 - 117 enero - junio de 2013.

PEREDA, Isidro. (2005). Celdas fotovoltaicas en la generación distribuida. Santiago de Chile. Disponible en: <http://web.ing.puc.cl/power/paperspdf/pereda.pdf>:

PEREZ Jaime. (2018). Cuantificación del potencial energético undimotriz en las costas del Caribe colombiano. *Espacios*, Vol. 39 (Nº 03) Año 2018. Pág. 8.

QUIJIJE, Wilsón., & REINA, Jefferson. (2016). Implementación de una microrred fotovoltaica conectada a la red, para suministrar energía eléctrica al primer piso del edificio no. 3 de Docentes a Tiempo Completo de la Universidad Técnica de Manabí, el ahorro y la eficiencia energética. Informe escrito del trabajo de titulación para obtener el Título de Ingeniero Eléctrico. Modalidad de Trabajo Comunitario y Cambio de la Matriz Energética. Repositorio de la Biblioteca de la Universidad Técnica de Manabí.

RODRÍGUEZ, María. (2015). *Sistema de Información Geográfica para el Desarrollo Sostenible (SIGDS)*. Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas de la Universidad Técnica de Manabí.

RODRIGUEZ, María., & VAZQUEZ, Antonio. (2018). La energía fotovoltaica en la provincia de Manabí. Ediciones UTM-Unidad de Cooperación Universitaria. Repositorio de la Universidad Técnica de Manabí.

SALAMANCA-AVILA, Sebastian. (2017). Propuesta de diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica. Caso de aplicación en la ciudad de Bogotá. *Revista Científica*. Vol. 3, Núm. 30 (2017). Disponible en: <https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/revcie/article/view/12213>.

VANEGAS Marley., CHURIO Oscar., VALENCIA Guillermo., VILLICAÑA Eunice., OSPINO Adalberto. (2017). Cálculo de las radiaciones total, directa y difusa a través de la transmisibilidad atmosférica en los departamentos del Cesar, La Guajira y Magdalena (Colombia). *Espacios*, Vol. 38 (Nº 07) Año 2017. Pág. 3.

VAZQUEZ, Antonio., SANTOS, Rainel., RODRIGUEZ, María., & ESPINO, Raúl. (2013). *Normas técnicas y sistemas fotovoltaicos conectados a red*. Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, Cuba. Empresa de Hidroenergía, La Habana, Cuba.

YES, Luís A. (2014). *Energía solar, una propuesta para generar energía eléctrica*.. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos94/energia-solar-propuesta-generar-energia-electrica/energia-solar-propuesta-generar-energia-electrica.shtml#ixzz4b3Q1mIqX>

1. Universidad Técnica de Manabí, Ecuador. Departamento de Construcciones Civiles. Universidad. Abogado, docente e investigador. Antoniov5506@gmail.com

2. Universidad Técnica de Manabí, Ecuador. Facultad de Ciencias Matemáticas Físicas y Químicas. PhD en Ordenación Energética del Territorio, Docente e investigadora. Taliangel270557@gmail.com

3. Universidad Técnica de Manabí, Ecuador. Carrera de Ingeniería Eléctrica. Ingeniero electricista. Docente e investigador. wsaltos@utm.edu.ec

4. CORPOELEC, Venezuela. Jefe de Facturación, Lectura y Reparto. Profesora Universidad del Zulia, Venezuela, PhD. rodriguezciaddy@gmail.com

5. Universidad Técnica de Manabí Ecuador. Carrera de Ingeniería Eléctrica. Ingeniero electricista. Docente e investigador. Lcuenca1968@gmail.com
