

ANÁLISIS DINÁMICO DE LA HUELLA DE CARBONO DEL PROGRAMA MASIVO FOTOVOLTAICO PARA ZONAS AISLADAS NO CONECTADAS A RED UTILIZANDO MATLAB PARA REDUCIR LAS INCERTIDUMBRES EN LA EVALUACIÓN: CASO DE ESTUDIO PERÚ

Espinoza S.*, Palacios B.**

* Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Av. San Josemaría Escrivá de Balaguer, Chiclayo, 14012, Lambayeque, sespinoza@usat.edu.pe

** Área de Proyectos, ACMES Engineering, Construction & Maintenance, Calle San José, Chiclayo, 14000, Lambayeque, palaciosbady@gmail.com

<https://doi.org/10.34637/cies2020.2.1121>

RESUMEN

Esta investigación buscó identificar las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por la instalación de los sistemas fotovoltaicos en las zonas aisladas no conectadas a la red eléctrica del Programa Masivo Fotovoltaico en el Perú; para lo cual se utilizaron datos del Fondo de Inclusión Social Energético, desde el inicio del programa en el año 2017 hasta el primer semestre del año 2020. Se optó por utilizar un sistema dinámico para el tratamiento de variables y parámetros utilizados durante el análisis; como lo son la ubicación geográfica, la cantidad de usuarios beneficiados, y el tiempo en el que se dio la instalación; y la relación que guardan estos con la generación de gases de efecto invernadero. Los resultados obtenidos reflejaron el impacto del programa en el medio ambiente, expresado en toneladas de CO₂, y segmentado por años, siendo relevante para las decisiones de mitigación que deberá asumir el sector energético.

PALABRAS CLAVE: Huella de Carbono, Sistema dinámico, Energía Solar, Panel Fotovoltaico.

ABSTRACT

This research sought to identify the greenhouse gas emissions produced by the installation of photovoltaic systems in isolated areas not connected to the electricity grid of the Massive Photovoltaic Program in Peru; for which data from the Social Energy Inclusion Fund were used, from the beginning of the program in 2017 to the first semester of 2020. It was decided to use a dynamic system for the treatment of variables and parameters used during the analysis; such as the geographical location, the number of users benefited, and the time in which the installation took place; and the relationship that these have with the generation of greenhouse gas. The results obtained reflected the impact of the program on the environment, expressed in tons of CO₂, and segmented by years, being relevant for the mitigation decisions that the energy sector must assume.

KEYWORDS: Carbon Footprint, Dynamic System, Solar Energy, Photovoltaic Panel

INTRODUCCIÓN

En el Perú, a través de la Dirección General de Electrificación Rural (DGER) del Ministerio de Energía y Minas (MEM), y con el financiamiento del Fondo de Inclusión Social Energético (FISE), se busca mitigar la falta de energía eléctrica (FISE, 2019), en hogares, centros educativos y centros de salud ubicados en zonas rurales, a partir de la iniciativa nacional denominada “Programa Masivo Fotovoltaico para Zonas Aisladas No Conectadas a Red”. Este programa tiene por objetivo brindar energía eléctrica mediante paneles fotovoltaicos en áreas no conectadas a redes eléctricas (off-grid), instalando en las viviendas un panel fotovoltaico, un controlador de carga-batería, tres focos LED de 7 vatios, tres interruptores, tres tomacorrientes, y una toma USB para cargar teléfonos móviles, radios, entre otros. Asimismo, en centros de salud y centros educativos, un banco de paneles fotovoltaicos, un controlador de carga, un banco de baterías, un inversor de corriente, un tablero con un interruptor automático y dos diferenciales. Procurando que el uso de este Recurso Energético Renovable (RER) sea aprovechado en armonía con el medio ambiente, evitando generar emisiones de gases de efecto invernadero, es decir dejar una huella de carbono de baja intensidad, pudiendo compararse a la huella de carbono generada durante el consumo de energía eléctrica proveniente de las generadoras convencionales transmitida por las redes eléctricas interconectadas.

Si bien el Programa, tiene como finalidad contribuir al coeficiente de electrificación rural del país; sólo está enfocando las preocupaciones del sector en dos problemas, por un lado, cuáles podrían ser los futuros proyectos para seguir reduciendo la brecha de acceso universal a la energía; y también, cómo garantizar la entrega de subsidios necesarios para cubrir esta brecha, ambos enfoques relacionados al factor técnico y económico. Sin embargo, existe una problemática que va más allá del mismo fin último del programa, relacionado a la huella de carbono generada por la instalación de estos sistemas fotovoltaicos distribuidos, incluyendo las actividades anteriores como la fabricación y suministro de los componentes del sistema, y posteriores como la utilización y el mantenimiento a lo largo de su periodo de vida útil.

Por lo tanto, se propuso realizar un análisis dinámico de la huella de carbono generada por el Programa Masivo Fotovoltaico para Zonas Aisladas No Conectadas a Red en el Perú, utilizando la metodología de sistemas dinámicos, para reducir las incertidumbres durante la evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por la instalación de los sistemas fotovoltaicos, y las actividades anteriores y posteriores relacionadas a esta acción.

Esta investigación se desarrolló mediante la identificación del avance histórico del Programa Masivo Fotovoltaico para Zonas Aisladas No Conectadas a Red en el Perú, el cual se obtuvo de los reportes semestrales emitidos por el Fondo de Inclusión Social Energético (FISE). Luego, gracias a la colaboración de la empresa ACMES, se obtuvieron las características técnicas y los protocolos de la instalación de los sistemas fotovoltaicos distribuidos, incluyendo las actividades anteriores como la fabricación y suministro de los componentes del sistema, y posteriores como la utilización y el mantenimiento desde su puesta en operación. Con esta información, se elaboró la cuantificación por unidad de la huella de carbono generada durante cada actividad. Posteriormente, de la revisión de investigaciones anteriores donde se realizaron, mediante un sistema dinámico IoT, análisis de la huella de carbono generada en un sistema fotovoltaico similar considerando el ciclo de vida, la fase de producción, de operación, y la logística (Tu *et al.* 2017), se generó una formulación matemática (Klee & Allen, 2016), el cual sigue una lógica capaz de calcular la huella de carbono total generada por la implementación del Programa Masivo Fotovoltaico para Zonas Aisladas No Conectadas a Red en el Perú.

El objetivo de esta investigación es identificar las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por la instalación de los sistemas fotovoltaicos para Zonas Aisladas No Conectadas a Red del Programa Masivo Fotovoltaico en el Perú, desde la implementación del programa, utilizando como fuente de datos los emitidos por la autoridad correspondiente FISE, y los parámetros como las cantidades de la huella de carbono por unidad generada, principalmente, durante la fabricación de los componentes como el panel fotovoltaico (Nugent & Sovacool, 2014), y el controlador de carga-batería (Liang *et al.* 2017), así como de la huella de carbono por unidad generada durante el transporte utilizado para el suministro de los componentes del sistema (European Automobile Manufacturers' Association, 2020); segmentando estos valores en relación con el tiempo y las zonas donde fueron instalados.

INSTALACIÓN DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DISTRIBUIDOS

El Programa Masivo Fotovoltaico para Zonas Aisladas No Conectadas a Red en el Perú del FISE estableció las características técnicas y los protocolos de la adquisición e instalación de los componentes de los sistemas fotovoltaicos, considerando la procedencia y fabricación, principalmente de los paneles fotovoltaicos y las unidades de control de carga-batería; estos son relevantes debido al valor económico que representan para el programa; por otro lado, también se dio importancia al sistema de transporte utilizado para el suministro de los mismos; y cómo posteriormente serán utilizados por los beneficiarios; así como determinar la responsabilidad del mantenimiento desde su puesta en operación.

Además, se observa que el programa beneficia en su mayoría a hogares, es decir, sistemas fotovoltaicos domiciliarios. Los centros educativos y centros de salud representan una minoría a comparación de los anteriores. Por lo tanto, se concentro el análisis de los componentes del tipo de sistema fotovoltaico domiciliario.

Fabricación de los Componentes

En general, la etapa de extracción y fabricación representa la cantidad de actividades más amplia e incorpora la gama completa de extracción de materia prima, procesamiento de materiales y la fusión de estos. Aunque los detalles varían en función del tipo de panel fotovoltaico, los cuales son de película fina, mono, poli, o multicristalino, sensibilizado con colorante, punto cuántico, entre otros, la extracción de materiales abarca la minería, el refinado y la purificación de todos los metales, minerales, y cualquier otro material extraído y procesado necesario para crear el panel. Finalmente, incluye el cableado, empaçado, y cualquier otro proceso por el cual los paneles y sus componentes electrónicos son fabricados, terminados, y transportados hasta el punto de utilización. Las estimaciones de la Huella de Carbono por unidad en esta etapa dependen de cada fabricante, según los resultados obtenidos (Nugent & Sovacool, 2014) para la fabricación de un panel solar se tiene 49,9 gCO₂/kWh.

Por otro lado, el controlador de carga-batería consiste en un equipo electrónico que tiene varias funciones, cargar la batería, suministrar electricidad, y controlar los niveles de carga y descarga; pero de todas estas, la función de almacenar energía es la que caracteriza a este equipo como una batería, por lo tanto, la Huella de Carbono por unidad se consideró como si fuera una unidad de batería (Liang *et al.*, 2017), la cual es equivalente a 720,7 gCO₂/kWh.

Los demás componentes del programa, como lo son la iluminación y tomacorrientes, se obviaron en el análisis de la Huella de Carbono, debido que son elementos presentes tanto en sistemas eléctricos convencionales y no convencionales, y por ende su Huella de Carbono sería la misma utilizando paneles fotovoltaicos o la red eléctrica.

Transporte y Suministro

Esta es la segunda etapa la cual consiste en el transporte de los paneles, incluidas las estructuras de montaje, los componentes de cableado e interconexión, el controlador de carga-batería, y los elementos de consumo como iluminación y tomacorrientes. Para determinar la Huella de carbono por unidad se utilizaron los reportes (European Automobile Manufacturers' Association, 2020) que indican 56,5 gCO₂/T.km para unidades móviles como tracto camiones, y los resultados (Cefic & ECTA, 2011) en donde se obtuvo 0,086 gCO₂/T.km para aviones cargueros.

Instalación, Utilización y Mantenimiento

La instalación es una etapa simple en la que se interconecta todos los componentes, el panel fotovoltaico al controlador de carga-batería, y luego a los elementos de consumo. Luego, empieza la utilización, siendo esta etapa en la que menos operaciones existen. Sin embargo, durante el funcionamiento se incluye el mantenimiento del sistema, el cual consiste algunas veces en reemplazos mínimos según requerimiento, la limpieza de los paneles y cualquier otra actividad necesaria.

Para estas etapas, el programa consideró designar las actividades de instalación y mantenimiento a las empresas y concesionarias de cada zona (FISE, 2019), es decir, los encargados de realizar estas actividades se encuentran cercanos a la ubicación de cada módulo fotovoltaico, dejando fuera del análisis la Huella de Carbono de estas etapas finales.

ANÁLISIS DEL SISTEMA

El sistema considerado para identificar las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por la instalación de los sistemas fotovoltaicos, desde el inicio en el año 2017, hasta el primer semestre del 2020, se centra en las interrelaciones complejas entre los valores por unidad de emisiones de gases de efecto invernadero (gCO₂/por unidad) generados por la fabricación de los componentes, y el desarrollo de la cadena de suministro, tal como se muestra en la Figura 1.

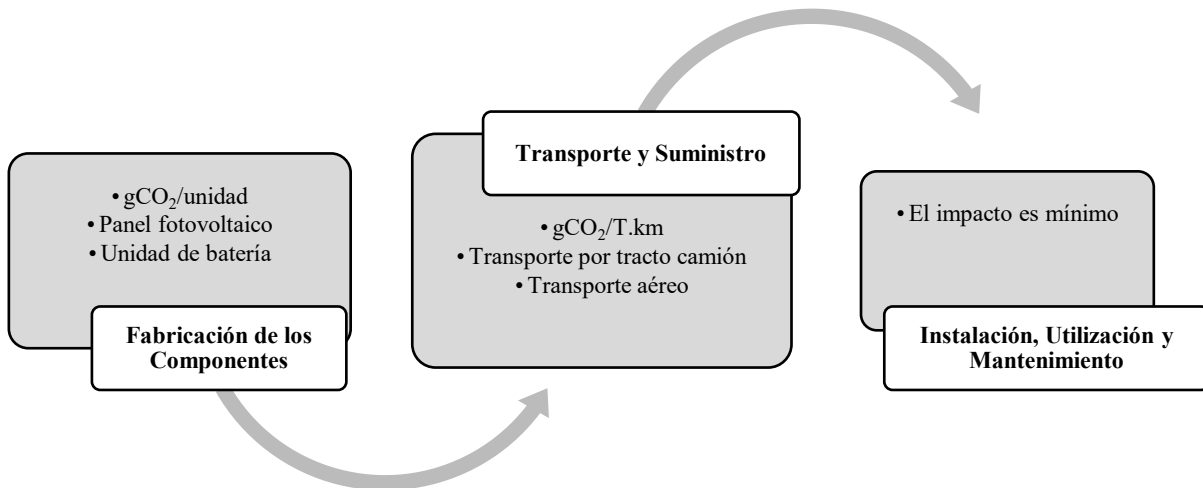


Figura 1. Ciclo del Programa Masivo Fotovoltaico para Zonas Aisladas No Conectadas a Red

Durante la fabricación de los componentes, la Huella de Carbono se relaciona directamente al número de módulos fotovoltaicos instalados. Sin embargo, la geografía variable del país, y como el mismo nombre del programa lo indica, las zonas aisladas donde se instalarán los módulos resultan en una red de suministro variable, en la cual se emplean medios de transportes terrestres, aéreos, y en algunos casos fluviales.

Adicionalmente, por ser un programa implementado en el tiempo, se debe segmentar el análisis por años, considerando la variación entre estos, para luego uniformizar los resultados en un valor global que determine la cantidad de gases de efecto invernadero o huella de carbono generada.

Por lo tanto, el sistema dinámico queda descrito por bucles de ubicación, cantidad de usuarios, y tiempo; y subvariables derivadas de los mismos, como lo son la distancia recorrida por zona, transporte utilizado, la cantidad de módulos fotovoltaicos, y la variación del número de instalaciones por año.

FORMULACIÓN MATEMÁTICA

El comportamiento dinámico de la cadena del programa se realiza mediante un conjunto de ecuaciones matemáticas. En los siguientes apartados presentamos las principales fórmulas utilizadas para calcular la Huella de Carbono.

De acuerdo con los principios de simulación de dinámica de sistemas (Klee & Allen, 2016), el modelo incluye tres tipos de elementos. El primer elemento es una variable de stock (o nivel) que es un depósito de un recurso determinado. El comportamiento dinámico de las variables de nivel viene dado por una integral de tiempo de las entradas netas menos las salidas netas. El segundo elemento es una variable de flujo que ajusta el nivel de existencias a través de flujos entrantes y salientes. El tercer elemento es una variable intermedia (auxiliar) que consta de funciones de stocks (y constantes o insumos exógenos). La formulación matemática general de las acciones es la siguiente:

$$Stock_{(t)} = \int_{t_0}^t [Entrada_{(t)} - Salida_{(t)}] dt + Stock_{(t_0)} \quad (1)$$

Donde t_0 es el año inicial y t es el año final considerado; el nivel o *Stock* es la acumulación de la Huella de Carbono por año para un periodo de 2017 al 2020 debido a la $Entrada_{(t)}$ y a la $Salida_{(t)}$.

$$Entrada_{(t)} = f(Stock_{(t)}, V_{(t)}, SB); \quad (2)$$

$$Salida_{(t)} = f(Stock_{(t)}, V_{(t)}, SB) \quad (3)$$

Donde V_t es una variable auxiliar en el tiempo t . Por ejemplo, puede representar la ubicación, o la cantidad de usuarios que dependen del año de instalación. SB representa parámetros como la distancia recorrida por zona, transporte utilizado, o la cantidad de módulos fotovoltaicos.

La Huella de Carbono (HC) en el ciclo del programa se analiza siguiendo:

$$HC_{(t)} = HCU_{(t)} \times \sum_1^n \beta_{n(t)} \quad (4)$$

Donde $HC_{(t)}$ representa el flujo de Huella de Carbono generada durante el ciclo, en el año $t = 2017, \dots, 2020$. $HCU_{(t)}$ representa la Huella de Carbono por unidad según la actividad sea fabricación o suministro. β_n representa la cantidad de usuarios, en función del año, o según la zona donde se instaló el módulo fotovoltaico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las variables ubicación, cantidad de usuarios, y tiempo determinan la Huella de Carbono generada, y a su vez, su evolución histórica del valor global. Los factores que influenciaron fueron las cantidades por unidad de Huella de Carbono durante la fabricación, donde se consideró el panel fotovoltaico y la batería; y el suministro, mediante la cuantificación del recorrido realizado por los módulos fotovoltaicos desde la capital del país, Lima, hasta cada una de las zonas donde se encuentran los usuarios finales, así como del tipo de transporte utilizado.

En la Tabla 1 se presenta los datos obtenidos, para los años 2017 (FISE, 2017), 2018 (FISE, 2019), 2019 (FISE, 2019), y para el primer semestre del año 2020 (FISE, 2020), para cuantificar los paneles fotovoltaicos instalados, identificando la zona en la cual se ubican los mismos.

Tabla 1. Datos de los Paneles Fotovoltaicos instalados

Nº	Departamento	Zona	Área (km ²)	% superficie	Número de instalaciones	% de incidencia
1	Amazonas	NORTE	39249.13	3%	9649	5%
2	Áncash	NORTE	35914.81	3%	2825	2%
3	Apurímac	SUR	20895.79	2%	5598	3%
4	Arequipa	SUR	63345.39	5%	3046	2%
5	Ayacucho	CENTRO	43814.80	3%	4447	2%
6	Cajamarca	NORTE	33317.54	3%	5873	3%
7	Cusco	SUR	71986.50	6%	15242	8%
8	Huancavelica	CENTRO	22131.47	2%	2742	2%
9	Huánuco	CENTRO	36848.85	3%	18630	10%
10	Ica	CENTRO	21327.83	2%	3	0%
11	Junín	CENTRO	44197.23	3%	18544	10%
12	La Libertad	NORTE	25499.90	2%	4378	2%
13	Lambayeque	NORTE	14231.30	1%	1285	1%
14	Lima	CENTRO	34801.59	3%	530	0%
15	Loreto	NORTE	368851.95	29%	18474	10%
16	Madre de Dios	SUR	85300.54	7%	3440	2%
17	Moquegua	SUR	15733.97	1%	1172	1%
18	Pasco	CENTRO	25319.59	2%	5718	3%
19	Piura	NORTE	35892.49	3%	2495	1%
20	Puno	SUR	71999.00	6%	24679	14%
21	San Martín	NORTE	51253.31	4%	20622	11%
22	Tacna	SUR	16075.89	1%	507	0%
23	Tumbes	NORTE	4669.20	0%	0	0%
24	Ucayali	CENTRO	102410.55	8%	10210	6%

Luego, en la Figura 2, se muestra el porcentaje de incidencia según cada zona en el programa, es decir, el porcentaje de módulos fotovoltaicos instalados por zonas. Para identificar los módulos según cada zona se utilizaron los reportes desde el año 2017 hasta el primer semestre del 2020 del FISE. Estos resultados sirvieron para los análisis del recorrido para el suministro de los módulos fotovoltaicos.

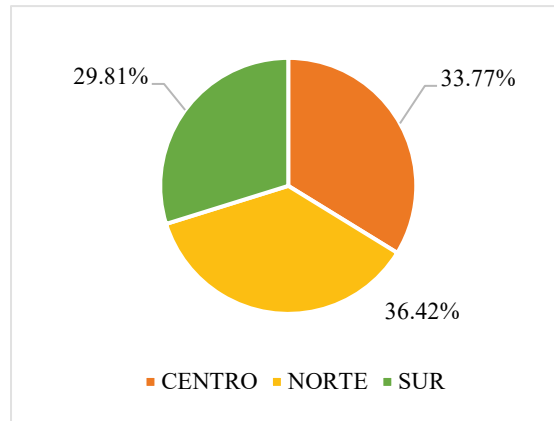


Figura 2. Incidencia por zona del Programa Masivo Fotovoltaico

De los resultados obtenidos mediante la aplicación del sistema dinámico a los datos mostrados en la Tabla 1, y con el análisis de incidencia por zonas mostrado en la Figura 2; se presenta en la Figura 3 la evolución histórica de la Huella de Carbono, en miles de toneladas de CO₂, por zonas. Se puede apreciar que desde el año 2017 hasta el año 2019 los resultados son crecientes, sin embargo, en el año 2020 decrece la cantidad de gases de efecto invernadero, esto se debe a que para el año 2020 solo se tiene información hasta el primer semestre; por lo tanto, se deduce que este año la cantidad de CO₂ superará al anterior.

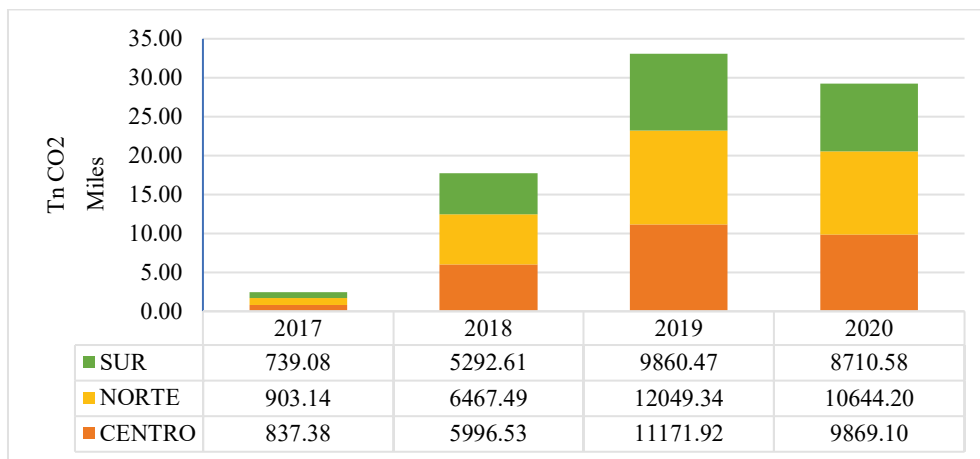


Figura 3. Huella de Carbono del Programa Masivo Fotovoltaico para zonas aisladas no conectadas a red por año (Tn CO₂)

Por último, se proyectó la cantidad de gases de efecto invernadero en toneladas de CO₂ del “Programa Masivo Fotovoltaico para Zonas Aisladas No Conectadas a Red” hasta el año 2022, a modo de observar cómo se comportaría la Huella de Carbono hasta el año en el que se supone la brecha de acceso universal a la energía tienda a desaparecer.

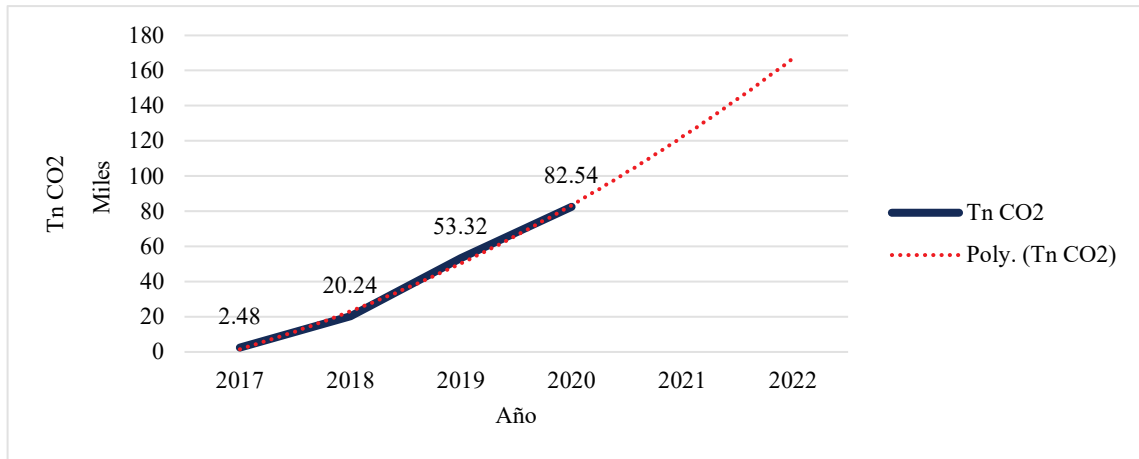


Figura 4 Proyección de la Huella de Carbono del Programa Masivo Fotovoltaico para zonas aisladas no conectadas a red (Tn CO₂)

CONCLUSIONES

Mediante un sistema dinámico se identificó las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por la instalación de los sistemas fotovoltaicos para Zonas Aisladas No Conectadas a Red del Programa Masivo Fotovoltaico en el Perú, el cual representa un acumulado de 82 mil toneladas de CO₂ al año 2020, y según la proyección llegaría a 160 mil toneladas de CO₂ al año 2022. A pesar de lo positivo del programa lo cual es el cierre de la brecha energética mediante la electrificación de las zonas aisladas, indirectamente se está afectando al medio ambiente. Esto no debería ser un obstáculo para el desarrollo del programa, sino debería servir como una reflexión para implementar medidas de mitigación de los gases de efecto invernadero generados. Además, en esta investigación no se consideró los beneficios ambientales que se obtendrían por usar este tipo de energía renovable como lo es la solar, por lo tanto, se recomienda el tratamiento de estas condiciones adicionales en futuras investigaciones.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa ACMES Engineering, Construction & Maintenance por brindar la información técnica y los protocolos necesarios para el desarrollo de esta investigación.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo por permitirnos utilizar sus equipos de cómputo e instalaciones, en las cuales cuentan con la licencia del software Matlab.

REFERENCIAS

Cefic & ECTA. (2011). Guidelines for Measuring and Managing CO₂ Emission from Freight Transport Operations. ISSUE.

European Automobile Manufacturers' Association. (2020). CO₂ emissions from heavy-duty vehicles – Preliminary CO₂ baseline (Q3-Q4 2019). Europa: ACEA Paper.

FISE. (2017). Revista Semestral FISE 2017-I. Lima: OSINERGMIN - Proyecto FISE.

FISE. (2018). Revista Semestral FISE 2017-II. Lima: OSINERGMIN - Proyecto FISE.

FISE. (2018). Revista Semestral FISE 2018-I. Lima: OSINERGMIN - Proyecto FISE.

FISE. (2019). Revista Semestral FISE 2018-II. Lima: OSINERGMIN - Proyecto FISE.

FISE. (2019). Revista Semestral FISE 2019-I. Lima: OSINERGMIN - Proyecto FISE.

FISE. (2020). Revista Semestral FISE 2019-II. Lima: OSINERGMIN - Proyecto FISE.

Klee, H., & Allen, R. (2016). Simulation of dynamic systems with MATLAB and Simulink. New York: Crc Press.

Liang, Y., Su, J., Xi, B., Yu, Y., Ji, D., & Sun, Y. (2017). Life cycle assessment of lithium-ion batteries for greenhouse gas emissions. *Resources, conservation and recycling*, 285-293.

Nugent, D., & Sovacool, B. (2014). Assessing the lifecycle greenhouse gas emissions from solar PV and wind energy: A critical meta-survey. *Energy Policy*, 229-244.

Tu, M., Chung, W. H., Chiu, C. K., Chung, W., & Tzeng, Y. (2017). A Novel IoT-Based Dynamic Carbon Footprint Approach to Reducing Uncertainties. 4th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), 249-254.