

Greenhouse gas emissions from domestic electricity consumption and comparison with alternative solar electricity generation

Jesús Delgado M., Estudiante de Ing. Ambiental¹, Miguel Mejía A., Estudiante de Ing. Ambiental¹

Faculty Mentor: Maritza Chirinos M, Ms. en Ciencias¹

¹Universidad Católica San Pablo, Arequipa, Perú, jesus.delgado@ucsp.edu.pe, miguel.mejia@ucsp.edu.pe, mchirinos@ucsp.edu.pe

Abstract- The use of conventional energy sources represents a problem due to their high GHG emissions; therefore, the implementation of renewable energy resources represents a solution to this problem. The article was developed in the city of Arequipa taking into consideration the conditions present in the city, having as main objective the determination of kg of CO₂ eq that were not emitted through the use of photovoltaic panels. For this purpose, twenty-two students of the Universidad Católica San Pablo were sampled, thus the electrical consumption of each one was obtained, then the energy produced by each source presented in the Peruvian electrical matrix was calculated, which allowed determining the GHG emissions by each source working them in kg of CO₂ eq. Next, the electrical production of the photovoltaic panel was evaluated using NASA's POWER online program and the equations presented in the article. Finally, it was obtained as a result that the implementation of photovoltaic panels was able to satisfy the total electricity consumption for seven students, while for the other fifteen it was able to partially satisfy their consumption. Likewise, there was a significant reduction in GHG emissions from 287.17 kg of CO₂ eq to 119.74 kg of CO₂ eq, which represented a reduction of 39.77%.

Key words: photovoltaic panel, solar energy, electricity consumption, greenhouse gases.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

Emisiones de gases de efecto invernadero por consumo eléctrico doméstico y comparación con alternativa de generación eléctrica solar

Jesús Delgado M., Estudiante de Ing. Ambiental¹, Miguel Mejía A., Estudiante de Ing. Ambiental¹

Faculty Mentor: Maritza Chirinos M, Ms. en Ciencias¹

¹Universidad Católica San Pablo, Arequipa, Perú, jesus.delgado@ucsp.edu.pe, miguel.mejia@ucsp.edu.pe, mchirinos@ucsp.edu.pe

Resumen— La utilización de fuentes de energía convencionales representa una problemática por su alta emisión de GEI, por lo tanto, la implementación de recursos energéticos renovables manifiesta una solución ante tal problema. El artículo se desarrolló en la ciudad de Arequipa tomando en consideración las condiciones presentes en la ciudad, teniendo como objetivo principal la determinación de kg de CO₂ eq que se dejaron de emitir mediante el uso de paneles fotovoltaicos. Para ello se realizó el muestreo de veintidós estudiantes de la Universidad Católica San Pablo, de esta manera se obtuvo el consumo eléctrico de cada uno, posteriormente se calculó la energía producida por cada fuente presentada en la matriz eléctrica peruana, lo cual permitió determinar las emisiones de GEI por cada fuente trabajándolas en kg de CO₂ eq. Seguidamente, a esto se evaluó la producción eléctrica del panel fotovoltaico, haciendo uso del programa online POWER de la NASA y las ecuaciones planteadas en el artículo. Finalmente, se obtuvo como resultado que la implementación de paneles fotovoltaicos logró satisfacer el consumo eléctrico en su totalidad para siete estudiantes, mientras que para los otros quince se logró satisfacer de manera parcial su consumo. Así mismo, se evidenció una reducción significativa en la emisión de GEI pasando de 287.17 kg de CO₂ eq a 119.74 kg de CO₂ eq, lo cual representó una reducción del 39.77%.

Palabras claves— panel fotovoltaico, energía solar, consumo eléctrico, gases de efecto invernadero.

I. INTRODUCCIÓN

A. Problemática

Los suministros de energía hoy en día se producen en base de recursos energéticos no renovables, los cuales se caracterizan por tener un tiempo de formación muy extensa en comparación a la tasa de consumo de estas fuentes. Aquí destacan fuentes de energía tales como el petróleo, carbón, diesel, entre otros combustibles fósiles. Sin embargo, la utilización de estos combustibles genera la liberación de agentes contaminantes como el CO₂, NH₃, NO, NO₂, entre otros gases de efecto invernadero (GEI) [1].

Es por ello que la implementación de fuentes energéticas alternativas, que disminuyan las emisiones de GEI a la atmósfera y no representen un riesgo para la salud del ser humano, es una tarea vital que encamina a dar una solución a la crisis ambiental global.

El Perú es un caso distinto al de otras naciones, ya que el 43% de su matriz eléctrica proviene de generación en centrales hidroeléctricas, una fuente de menor impacto ambiental. Sin embargo, el 48% sigue siendo generación a base de gas natural, cifra significativamente alta y que libera grandes cantidades de

GEI. Los porcentajes restantes se reparten entre diésel, eólico, solar, carbón y biomasa [2].

Arequipa, una de las principales ciudades del sur del país, se ve obligada a importar gran parte de la energía que demanda. Este no solo es un caso particular de esta ciudad, sino que en general todas las regiones del sur del Perú están en un déficit energético que sobrepasa los 400 MW [3].

Por otro lado, la energía que se produce en la ciudad en gran parte proviene de centrales hidroeléctricas que son alimentadas del deshielo de los glaciares y nevados de las montañas y volcanes que pertenecen a la Cordillera de los Andes. El cambio climático ha ocasionado que en las últimas décadas se pierda parte de estos glaciares y su retroceso va en aumento, trayendo como consecuencia la afectación al suministro natural del agua y se estima una pérdida de billones de dólares en el sector hidroeléctrico por este mismo motivo [4].

Urge la búsqueda e implementación de una fuente energética que sea de generación local, eficiente, segura y factible económicamente, y es aquí donde se puede ver la esperanza para la región, pues tiene un potencial increíble para la implementación de la energía solar, produciendo aproximadamente 5.3 kWh en cada metro cuadrado que reciba la radiación solar. Esto sería suficiente para el abastecimiento local, dando la posibilidad de poder introducir la energía a la red nacional para su distribución a otras regiones [5]. Además, la utilización de la energía proveniente del Sol se ha vuelto una solución al problema de la contaminación ambiental, ya que, al ser un recurso renovable, de fácil acceso y abundante en el planeta tierra, favorece y mitiga la generación de gases de efecto invernadero.

Para el aprovechamiento del potencial solar de Arequipa, y en busca de tener una matriz eléctrica independiente, segura y sostenible, se presentó el siguiente trabajo de curso que busca determinar las emisiones de GEI en el consumo eléctrico doméstico para la comparación con una alternativa de generación eléctrica solar. El objetivo del presente trabajo es determinar los kg de CO₂ eq que se dejarán de emitir con el uso de un panel fotovoltaico de 300 W.

B. Marco Teórico

Recursos Energéticos Renovables: Son aquellas formas de energía producidas a partir de una fuente renovable, las cuales pueden ser solares, hidráulicas, eólicas, etc. De esta manera, estos Recursos Energéticos llegan a ser sostenibles [6]. Estos

recursos son de gran importancia, puesto que su capacidad energética permite brindar una vía de solución al uso de recursos energéticos convencionales.

Irradiancia: El término Irradiancia se utiliza para expresar la magnitud que describe la incidencia por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética, Así mismo, la irradiancia indica la cantidad promedio de energía que incide por unidad de área, la unidad utilizada para expresar la irradiancia es el Wh m^{-2} [7].

Energía Solar: Es la energía proveniente del sol, esta la podemos percibir en formas de radiación electromagnética como rayos de luz, calor y radiación UV. Es por medio de esta forma de energía que se llevan a cabo una gran diversidad de procesos naturales como la fotosíntesis, generación de climas, etc. Sin embargo, su aprovechamiento también se aplica en la generación de energía aprovechable en sectores industriales y urbanos, permitiendo suplir otras fuentes de energía [8].

Energía Termosolar: La energía termosolar o solar térmica, consiste en el aprovechamiento de la energía proveniente del sol, de tal forma que transforma la energía en calor por medio de un captador. Dependiendo de la temperatura, la energía térmica se puede dividir en baja, media o alta temperatura, y es de acuerdo a esto que se definirá para que será empleada, así mismo, los usos que se le pueden dar a esta forma de energía son muy variados, pudiendo usarse como calefacción o refrigeración, producción de agua caliente, secadores agrícolas, generación de energía eléctrica entre otros [6].

Además, existen diferentes formas de implementar sistemas termo colectores, los cuales se pueden adecuar a las necesidades y las características del terreno. Los cuatro sistemas característicos son: Sistema de concentración lineal de Fresnel, Sistema de Torre central, Central disco Stirling y Canal Cilíndrico Parabólico [9].

Energía Fotovoltaica: La energía Fotovoltaica se basa en la transformación de los rayos de luz emitidos por el Sol en energía eléctrica, esto por medio de sus sistemas de captación, los paneles fotovoltaicos, los cuales están constituidos por módulos de igual denominación, en los que se encuentran materiales semiconductores que transforman los haces de luz que inciden sobre el panel en energía eléctrica [6].

Panel Fotovoltaico: Un panel fotovoltaico es un dispositivo de captación sobre el cual incide la radiación electromagnética en forma de haz de luz, es aquí donde los módulos fotovoltaicos compuestos por materiales semiconductores en los cuales por medio del efecto fotovoltaico logran producir una corriente continua [10].

Efecto Fotovoltaico: Es el principio que utilizan los paneles para poder producir la corriente eléctrica. Este efecto se da cuando un fotón impacta con el electrón de la última capa de un átomo de silicio, es este último electrón el que recibe la carga y posteriormente es liberado, dando origen a una corriente continua [11].

Gases De Efecto Invernadero: Los gases de efecto invernadero (GEI), son componentes gaseosos naturales que forman parte de nuestro mundo, es por medio de estos gases que

se produce el efecto invernadero, este es un proceso por el cual los GEI absorben la radiación infrarroja térmica, proveniente de la superficie terrestre, la atmósfera y el sol. De esta manera, la radiación se acumula en los GEI, dotando a la tierra de las condiciones esenciales para poder desarrollarse. Sin embargo, las emisiones en grandes cantidades, promueve una acumulación excesiva de la radiación, conllevando a un aumento anómalo de la temperatura terrestre [12].

Algunos de los GEI más conocidos son el dióxido de carbono (CO_2), el vapor de agua (H_2O), el metano (CH_4), el ozono (O_3), el óxido nitroso (N_2O), entre muchos otros. De los gases anteriormente mencionados el de mayor abundancia es el CO_2 el cual es producto de diversos procesos relacionados con la actividad humana, esta gran abundancia es la que lleva al aumento anómalo de la temperatura, sin embargo, su capacidad de retención de radiación no es de las más altas en comparación con otros gases [13].

Matriz Eléctrica: Cuando hablamos de matriz eléctrica nos referimos al conjunto de fuentes de las cuales podemos extraer energía para producir electricidad dentro de un país, de esta manera podemos identificar las fuentes de energía más importantes por su alto grado de utilización, así como, reconocer las fuentes de energía que emiten mayor cantidad de GEI [14].

C. Estado Del Arte

En el presente artículo se tomaron en consideración investigaciones anteriores para poder encaminar la metodología a emplear y poder llegar a una interpretación satisfactoria de los resultados obtenidos, a su vez, conocer antecedentes del trabajo presente permitió definir los objetivos a los que se desea llegar.

En el ámbito nacional se tomó en cuenta la tesis realizada por Párraga et al. (2020), la cual planteó el análisis de la implementación de un sistema fotovoltaico (Kit Solar Gel 3000 W 12 V 750 Wh/día) en una vivienda en la zona rural de Cusco. Se tomó en consideración el modelo de vivienda Sumaq Wasi, y elaborando algunas modificaciones se decidió dividir la vivienda en cuatro ambientes, teniendo en un área total 25.15 metros cuadrados. Así mismo, se establecieron los aparatos electrónicos fundamentales para determinar el consumo energético que el panel plantea satisfacer. [10]

En la investigación presentada se concluye que el abastecimiento de energía eléctrica en condiciones óptimas fue de 0.75 kWh por día. Sin embargo, frente a determinadas condiciones relacionadas con el polvo y arcilla, la producción puede llegar reducirse a 0.43 kWh, por lo que el abastecimiento de energía eléctrica se presenta de manera deficiente, teniendo en cuenta que el abastecimiento de energía eléctrica necesaria es de 0.45 kWh por día. [10]

Así mismo, se consideró el trabajo realizado por Barreto P. (2017) el cual propone la implementación de un suministro alternativo de energía eléctrica mediante paneles solares, con el fin de proporcionar autoconsumo domiciliario en la zona urbana de Chimbote. Teniendo como objetivo principal el de reducir las emisiones de agentes contaminantes y descender los costes de la energía eléctrica. [15]

Para llevar a cabo el trabajo se realizaron una serie de pasos, empezando por delimitar la muestra a las viviendas de la zona urbana de Chimbote, luego determinar el promedio de consumo en determinada zona haciendo uso una muestra de recibos de pago del consumo eléctrico, seguidamente se obtuvo la irradiancia solar en la zona de estudio haciendo uso de la base de datos (Empresa mundial Meteororm), finalmente determinar las características requeridas para el sistema fotovoltaico. [15]

De esta manera se logró concluir que es una propuesta óptima para la disminución del pago por consumo eléctrico, llegando a reducir entre 43.31% y 81.72%, en adición, se pudo pronosticar que su implementación llegaría a desplazar centrales energéticas convencionales a base de combustibles fósiles, por consiguiente, en un lapso de 25 años se evitaría la emisión de 17.28 t CO₂ a 33.38 t CO₂. [15]

Por otro lado, se consideró el trabajo realizado por Ventura y Delgado (2020), el cual consistió en el diseño de un sistema fotovoltaico aislado para la demanda eléctrica de la posta médica en el centro poblado de Urakusa en la provincia de Condorcanqui, Amazonas [16].

La investigación presenta una serie de objetivos específicos que detallan el desarrollo que se tuvo para llevar a cabo la investigación, tomando como punto de partida la determinación de la radiación solar en la zona de interés, posteriormente determinar la demanda eléctrica en la posta médica de Urakusa, luego se procedió a realizar el dimensionamiento del sistema fotovoltaico y el costo de su implementación, finalmente se realizó la evaluación financiera del proyecto [16].

Respecto a las conclusiones que se obtuvieron de este trabajo, destaca la capacidad de satisfacer las necesidades energéticas, puesto que la producción de energía eléctrica se pronostica que será de 5.94 kW, en comparación a su valor original de 5 kW. Por otro lado, se infiere que el proyecto es rentable, ya que el capital invertido se lograría recuperar en un lapso de siete años a una tasa del 10% [16].

En cuanto al ámbito internacional, destacan dos proyectos, estos llevados a cabo en Colombia y en México.

El primero es de Rodríguez y Gutiérrez (2017) que consistió en la reducción de la huella de carbono mediante la implementación de un sistema fotovoltaico en el rubro hotelero, específicamente Anaira Hostel (Leticia-Amazonas-Colombia) [17].

El proceso que se llevó a cabo para la investigación comienza por la determinación de la huella de carbono generada por el hotel en el lapso de un año mediante el factor de conversión proporcionado por la ENAM (Empresa de energía para el Amazonas S.A. E.S.P.), posteriormente se evaluaron la característica que se deseaban satisfacer como la autonomía en caso de apagones, finalmente se valoró el costo-beneficio proporcionado por el sistema fotovoltaico [17].

A partir del proceso llevado a cabo se logró estimar que el sistema fotovoltaico que se acopla más a las necesidades del Hotel sería el presentado por Solar Green Energy Latin America el cual presenta una potencia de 320 W, lo que

nos permite pronosticar que la inversión se lograría recuperar en un tiempo de cinco años. [17]

Así mismo, se tomó en cuenta el trabajo de investigación realizado en México, presentado por Hernández (2017), el cual nos muestra un análisis de factibilidad para la instalación de un sistema fotovoltaico para la alimentación eléctrica del edificio cuatro en el Instituto Tecnológico Superior de Villa la Venta. [18]

El procedimiento que se realizó para este trabajo comenzó por determinar el consumo eléctrico del edificio, posteriormente se identificó el sistema fotovoltaico adecuado a las necesidades requeridas, seguidamente se realizó el cálculo para determinar la cantidad de paneles necesarios para abastecer al edificio cuatro, finalmente se modeló el sistema y se evaluó el costo-beneficio de la implementación. [18]

En cuanto a los resultados obtenidos, se determinó que el consumo de energía real máximo fue de, 1117 kW, de esta manera se logró identificar que el panel fotovoltaico adecuado sería un panel monocristalino de 320 W, siendo un total de 497 paneles a instalar para lograr un abastecimiento del 70% del consumo generado. En adición, el tiempo de vida de un panel es de 25 años aproximadamente, por lo que se pronosticó que el sistema contaría con un tiempo de amortización de 8.3 años, quedando 16.7 años de ganancias [18].

Como se ha podido observar, la investigación cuenta con una serie de antecedentes tanto nacionales como internacionales, los cuales comparten semejanza en algunos procedimientos tomados o las condiciones necesarias para la implementación de un sistema fotovoltaico. Es por ello que la investigación presentada cuenta con una base sobre la cual desarrollaremos el análisis correspondiente.

C. *Objetivo*

Objetivo General:

Determinar los kg de CO₂ eq que se dejarán de emitir con el uso de un panel fotovoltaico de 300 W

Objetivos Específicos:

Realizar una revisión bibliográfica para hallar factores de conversión y metodologías afines para la determinación de consumo eléctrico.

Recopilar información de consumo de la población de análisis.

Utilizar los resultados de consumo eléctrico para la determinación de emisiones de GEI por kWh según la matriz eléctrica actual del Perú.

Calcular la energía generada por un panel solar de 300 W en la ciudad de Arequipa.

Calcular las emisiones de GEI con la utilización del panel solar en la muestra de estudio.

E. *Justificación*

Ambiental: El presente trabajo pretende analizar la producción de un panel fotovoltaico como alternativa al consumo eléctrico tradicional, en busca de la reducción de GEI generados por el uso de energía no renovable para la producción de electricidad.

Académica: La presente investigación ha permitido afianzar los conocimientos de los autores en los temas de energías renovables y cálculos de gases de efecto invernadero, mediante la aplicación de conceptos físicos. Además, se hizo una aproximación a la realidad nacional peruana, analizando su matriz eléctrica y ratificando el potencial de la región sur del país para el desarrollo de energía solar.

II. METODOLOGÍA

A. Tipo De Investigación

La presente investigación, bajo la normativa que rige al Departamento de Ingenierías de la Industria y el Ambiente de la UCSP, es de tipo Aplicada o Tecnológica física. Esta tiene el fin de consolidar los conocimientos mediante una aplicación directa, surgiendo frente a la necesidad de producción eléctrica sostenible en la sociedad de Arequipa.

B. Diseño de la investigación

Población: La población fueron los estudiantes de la UCSP de la carrera de Ing. Ambiental que estaban cursando el curso de Física I o Física II en el semestre 2022–2, siendo un total de 35 estudiantes.

Muestreo: El muestreo fue realizado por conveniencia, de manera que los estudiantes que proporcionaron los datos solicitados fueron quienes han conformado la muestra teniendo una cantidad de 22 estudiantes.

Muestra: Es de 22 estudiantes y tiene nivel de confianza del 95% y un margen de error del 13%. Estos estudiantes representan el 63% de la población.

C. Delimitaciones

Delimitación temporal: los datos recolectados para la investigación en cuanto al consumo de energía eléctrica fueron en los meses desde agosto de 2022 a octubre de 2022. Por otro lado, los datos usados para el cálculo de la producción del panel fotovoltaico datan del año 2021.

Delimitación geográfica: El estudio fue realizado en base de las condiciones nacionales de la matriz eléctrica peruana. Además, la producción del panel fotovoltaico fue en base de las condiciones climáticas de la ciudad de Arequipa.

Delimitación temática: La investigación se limita al análisis de la energía eléctrica producida con el panel fotovoltaico en hogares arequipeños.

E. Pasos de investigación

E.1 Cálculos de Consumo Eléctrico

A fin de realizar los cálculos del consumo eléctrico en los hogares de la muestra seleccionada, se procedió a solicitar los recibos de consumo de energía eléctrica (kWh) de los meses de agosto a octubre (ver Tabla III).

E.2 Cálculos para GEI

Como primer paso se buscó información sobre la matriz eléctrica del Perú, y así identificar las fuentes utilizadas en la producción de energía eléctrica, siendo esta la que se presenta en Tabla II.

El Segundo paso consistió en buscar factores de emisión (FE) para las fuentes de producción de: carbón, diesel, gas natural, biomasa, hidráulica, solar y eólica. Se encontró en Ref. [19] que para estas 4 primeras fuentes existe la emisión de 3 principales gases de efecto invernadero (GEI): dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), los cuales se trabajarán en kg de CO₂ eq, realizando las conversiones correspondientes. En la Tabla I se muestran los FE y la cantidad de cada GEI emitido y el FE en términos de CO₂ eq.

TABLA I
FACTORES DE EMISIÓN [19]

| Fuente | FE – GEI (kg/kJ) | | | FE en CO ₂ eq (kg/kWh) | Ref. |
|-------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------------------------|------|
| | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | | |
| Carbón | 9.46E-04 | 1.00E-09 | 1.5E-09 | 3.4073 | [10] |
| Gas Natural | 5.62E-06 | 1.00E-09 | 1E-10 | 0.0204 | |
| Diesel | 7.41E-05 | 3.00E-09 | 6E-10 | 0.2677 | [11] |
| Biomasa | 9.46E-04 | 1.00E-09 | 4E-10 | 3.4061 | |
| Hidráulica | | - | | 0.039 | [21] |
| Eólica | | - | | 0.0154 | [22] |
| Solar | | - | | 0.0298 | [23] |

Tercer paso, se realizó una sumatoria de todos los promedios de consumo de energía eléctrica (\bar{x}_1) de la muestra (ver Tabla III) para conocer el consumo de energía total. Considerando que la energía eléctrica de Perú tiene una distribución proporcional de fuentes, se realizó cálculos para conocer la energía producida a partir de cada fuente aplicando (1), en donde Energía_{Fuente} es la cantidad de energía generada por cada fuente, % Fuente en la matriz eléctrica es el valor del porcentaje presentado en la Tabla II y $\Sigma \bar{x}_1$ es la sumatoria de los promedios presentados en la Tabla III.

$$Energía_{Fuente} = \frac{(\%Fuente \text{ en la matriz eléctrica}) \times (\Sigma \bar{x}_1)}{100} \quad (1)$$

TABLA II
PROPORCIONALIDAD DE LA MATRIZ ELÉCTRICA PERUANA [2]

| Fuente | Gas natural | Diesel | Carbón | Biomasa | Hidráulica | Eólica | Solar |
|----------------|-------------|--------|--------|---------|------------|--------|-------|
| Porcentaje (%) | 48.00 | 3.00 | 2.00 | 1.00 | 43.00 | 1.50 | 1.50 |

Cuarto paso, con la Energía_{Fuente} se calculó la cantidad de GEI emitidos (en kg CO₂ eq) para cada fuente haciendo uso del FE correspondiente tal como se muestra en (2)

$$GEI = Energía_{Fuente} \times FE \quad (2)$$

Por último, se realizó una sumatoria para conocer la cantidad total que emite toda la muestra.

E.3 Cálculo de la Producción Eléctrica del Panel Fotovoltaico

Para conocer la producción eléctrica de un panel solar en la ciudad de Arequipa se hizo uso del programa online “Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER)” de la NASA, que es una base de datos solares y meteorológicos para la investigación de energía renovable y eficiencia energética. Se obtuvo el valor de irradiancia (I), con unidades de kWh m⁻²d⁻¹,

para Arequipa respecto a los meses de agosto, septiembre y octubre del año 2021, la salida obtenida se ve en la Fig. 1.

Seguidamente, estos resultados se transformaron a horas sol pico (HSP) respecto a cada uno de los meses en estudio. A seguir en (3) se relaciona esta proporcionalidad de días por mes, en donde HSP_{mes} son las horas sol pico en función del mes evaluado, I es la irradiancia obtenida de POWER, $dias_{mes}$ es la cantidad de días correspondientes al mes que se está calculando.

$$HSP_{mes} = I \times dias_{mes} \quad (3)$$

Finalmente, se calculó la producción del panel de 300 W en cada mes (5), en donde $Energía_{mes}$ es la cantidad de energía producida por el panel fotovoltaico con respecto a cada mes y HSP_{mes} son los valores de HSP hallado para cada respectivo mes; y a continuación se promedió el valor de los 3 meses (\bar{X}_2)

$$Energía_{mes} = 300 \times HSP_{mes} \quad (4)$$

E.4 Comparación y Análisis de Resultados

La pregunta de análisis y punto de comparación fue ¿Cuántos kg de CO₂ eq se dejará de emitir con el uso de un panel fotovoltaico de 300 W? Para responderla se procedió a hacer una diferencia entre \bar{x}_1 y \bar{x}_2 (energía consumida menos la producida por el panel fotovoltaico, ver Tabla V) para posteriormente hacer el cálculo de los kg de CO₂ eq correspondientes siguiendo el paso E.2 nuevamente pero solo para el resultado de la cantidad de energía eléctrica necesaria. Finalmente, se procederá a hacer una comparación porcentual de los kg de CO₂ eq emitido con y sin el panel fotovoltaico de 300 W (Ver Tabla VII).

Cabe resaltar que se hará el cálculo propio de la emisión de kg de CO₂ equivalente emitido por el panel solar con respecto a la energía que produce, y este se incluirá en la sumatoria realizada para el caso en el que se utilizan dichos paneles.

III. RESULTADOS

A. Cálculos de Consumo Eléctrico

A seguir, en la Tabla III se muestra en la segunda, tercera y cuarta columna el consumo mensual de los hogares de los 22 alumnos de la muestra. Luego, en la quinta columna se calcula el promedio simple del consumo de los tres meses de estudio.

Se encontró que los estudiantes evaluados consumen en total, 2765 kWh mes⁻¹ de energía eléctrica, dando un promedio muestral de 125.68 kWh mes⁻¹ para los 22 estudiantes.

B. Cálculos de GEI

Los cálculos de GEI se realizaron para el caso actual de los estudiantes, es decir, sin el uso de un panel fotovoltaico. También se realizó para el caso contrario (con uso de panel fotovoltaico). Ambos casos siguen los pasos del punto E.2 de la metodología propuesta. La Tabla IV a continuación muestra el resultado del cálculo de $Energía_{Fuente}$ siguiendo (1), usando la proporcionalidad de la matriz eléctrica plasmada en la Tabla II y $\Sigma \bar{x}_1$ de la Tabla III. En las columnas 3, 4 y 5 se observan las emisiones para cada gas, y en la 6 se observa el total de emisión en CO₂ eq.

TABLA III
DATOS DE CONSUMO ELÉCTRICO (KWH) DE LA MUESTRA

| Nº | Agosto | Septiembre | Octubre | Promedio (\bar{X}_1) |
|----|--------|------------|---------|--------------------------|
| 1 | 88 | 82 | 87 | 85,67 |
| 2 | 127 | 128 | 138 | 131,00 |
| 3 | 86 | 87 | 77 | 83,33 |
| 4 | 174 | 164 | 138 | 158,67 |
| 5 | 76 | 92 | 138 | 102,00 |
| 6 | 145 | 152 | 148 | 148,33 |
| 7 | 77 | 87 | 53 | 72,33 |
| 8 | 195 | 151 | 179 | 175,00 |
| 9 | 70 | 78 | 15 | 54,33 |
| 10 | 99 | 200 | 271 | 190,00 |
| 11 | 302 | 366 | 384 | 350,67 |
| 12 | 77 | 76 | 71 | 74,67 |
| 13 | 61 | 48 | 69 | 59,33 |
| 14 | 154 | 213 | 229 | 198,67 |
| 15 | 61 | 48 | 25 | 44,67 |
| 16 | 117 | 138 | 134 | 129,67 |
| 17 | 167 | 167 | 172 | 168,67 |
| 18 | 222 | 229 | 231 | 227,33 |
| 19 | 33 | 60 | 37 | 43,33 |
| 20 | 72 | 85 | 95 | 84,00 |
| 21 | 143 | 137 | 133 | 137,67 |
| 22 | 49 | 40 | 48 | 45,67 |

TABLA IV
ENERGÍA Y GEI PRODUCIDOS POR CADA FUENTE (SIN PANEL)

| Fuente | Energía (kWh) | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | Emisión (kg CO ₂ eq) |
|--------------|----------------|-----------------|-----------------|------------------|---------------------------------|
| Hidráulica | 1188,96 | 46,37 | - | - | 46,37 |
| Eólica | 41,49 | 0,63 | - | - | 0,63 |
| Solar | 41,49 | 1,25 | - | - | 1,25 |
| Gas Natural | 1327,2 | 26,87 | 0,11945 | 0,1424 | 27,1 |
| Carbón | 55,29 | 22,01 | 0,02236 | 0,05348 | 188,42 |
| Diesel | 82,95 | 188 | 0,004978 | 0,0886 | 22,23 |
| Biomasa | 27,66 | 1,1 | 0,04978 | 0,01187 | 1,19 |
| Total | 2765,01 | 286,23 | 0,196568 | 0,29635 | 287,17 |

B.1. Sin Panel Solar

Se observa de la Tabla anterior que existe una emisión total de 287.17 kg de CO₂ eq mes⁻¹ debido al consumo eléctrico de los 22 estudiantes.

B.2. Cálculo de GEI del Consumo con Panel Solar

- Cálculo de la Producción Eléctrica del Panel Fotovoltaico

El valor de irradiancia en Arequipa usando POWER en los meses de agosto, septiembre y octubre del año 2021, se muestra en la Fig. 3, obteniéndose los siguientes valores de Irradiancia.

Aplicando (3) se halló las HSP_{mes} y se muestra en la Tabla V Asimismo, también se encuentra el resultado de la $Energía_{mes}$ producida por el panel fotovoltaico de 300 W en cada uno de los meses junto con el promedio de la energía (\bar{X}_2) producida en unidades de kWh mes⁻¹

TABLA V
VALORES DE HSP Y ENERGÍA PRODUCIDA POR MES

| Variable | Agosto | Setiembre | Octubre | (\bar{X}_2) (kWh mes-1) |
|------------------------------|--------|-----------|---------|-----------------------------|
| HSP _{mes} (h) | 278,69 | 252 | 281,17 | - |
| Energía _{mes} (kWh) | 83,607 | 75,6 | 84,351 | 81,186 |

```

-BEGIN HEADER-
NASA/POWER CERES/MERRA2 Native Resolution Climatology Climatologies
2-year Meteorological and Solar Monthly & Annual Climatologies (January 2020 - December 2021)
Location: Latitude -16.4007 Longitude -71.5368
Elevation from MERRA-2: Average for 0.5 x 0.625 degree lat/lon region = 3330.29 meters
The value for missing source data that cannot be computed or is outside of the sources availability
range: -999
Parameter(s):
ALLSKY_SFC_SW_DNI SRB V4/CERES SWV1deg All Sky Surface Shortwave Downward Direct Normal Irradiance
(kWh-hr/m^2/day)
-END HEADER-
PARAMETER JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC ANN
ALLSKY_SFC_SW_DNI 5.21 5.08 5.02 8.10 8.38 8.68 9.08 8.99 8.40 9.07 8.34 6.29 7.56

```

Fig. 1 Valores de irradiancia obtenidos en POWER

Por otro lado, se notó que en la ciudad de Arequipa la irradiancia en los meses evaluados de agosto, setiembre y octubre hay una media de 8.82 kWh m⁻²d⁻¹ lo cual supera la media global en más del doble, indicando que existe un gran potencial para la energía solar en esta región.

- Cálculo de GEI

TABLE VI

DIFERENCIA ENTRE CONSUMO ELÉCTRICO Y PRODUCCIÓN DEL PANEL SOLAR

| Nº | \bar{X}_1 Promedio de consumo eléctrico mensual | \bar{X}_2 Producción promedio mensual del panel | $\bar{X}_1 - \bar{X}_2$ Consumo mensual de la matriz eléctrica (kWh) |
|--------------|--|--|---|
| 1 | 85,67 | 81,186 | 4,484 |
| 2 | 131 | | 49,814 |
| 3 | 83,33 | | 2,144 |
| 4 | 158,67 | | 77,484 |
| 5 | 102 | | 20,814 |
| 6 | 148,33 | | 67,144 |
| 7 | 72,33 | | 0 |
| 8 | 175 | | 93,814 |
| 9 | 54,33 | | 0 |
| 10 | 190 | | 108,814 |
| 11 | 350,67 | | 269,484 |
| 12 | 74,67 | | 0 |
| 13 | 59,33 | | 0 |
| 14 | 198,67 | | 117,484 |
| 15 | 44,67 | | 0 |
| 16 | 129,67 | | 48,484 |
| 17 | 168,67 | | 87,484 |
| 18 | 227,33 | | 146,144 |
| 19 | 43,33 | | 0 |
| 20 | 84 | | 2,814 |
| 21 | 137,67 | | 56,484 |
| 22 | 45,67 | | 0 |
| TOTAL | | | 1152,89 |

Para el cálculo de los GEI en unidades de CO₂ eq se sigue el paso E.4 de la metodología, haciendo una resta del promedio de consumo eléctrico de los estudiantes por mes (\bar{x}_1) menos el promedio de producción eléctrica del panel fotovoltaico por mes (\bar{x}_2). Una vez realizada la diferencia se plasmaron los resultados en la Tabla XII, en donde se observa que en el caso de 7 estudiantes (en negrita) se puede satisfacer el consumo eléctrico con esta fuente de energía renovable sin la necesidad de consumo de energía de la matriz eléctrica peruana. A partir

de la sumatoria de esta diferencia se comienza nuevamente con los pasos de E.2 para la cuantificación de las emisiones.

El consumo total de los estudiantes que proviene de la matriz eléctrica es de 1152.89 kWh mes⁻¹. Este consumo implica una emisión total de 119.74 kg de CO₂ mes⁻¹ debido a las diferentes fuentes de producción de la matriz eléctrica, tal como lo muestra la Tabla VI. Agregando la emisión de los 22 paneles fotovoltaicos que producen 1786.09 kWh mes⁻¹, lo cual implica una liberación de 53.23 kg de CO₂ eq mes⁻¹. Todo esto nos da un total de 172.97 kg de CO₂ eq mes⁻¹ debido al consumo eléctrico de los estudiantes con el uso del panel fotovoltaico.

TABLE VII
ENERGÍA Y EMISIÓN DE GEI POR FUENTE (CON PANEL)

| Fuente | Energía (kWh) | Emisión (kg CO2 eq) |
|-------------------|----------------|---------------------|
| Hidráulica (43%) | 495.7427 | 19.3339653 |
| Eólica (1.5%) | 17.29335 | 0.26631759 |
| Solar (1.5%) | 17.29335 | 0.51534183 |
| Gas Natural (48%) | 553.3872 | 11.30663483 |
| Carbón (2%) | 23.0578 | 78.56482349 |
| Diesel (3%) | 34.5867 | 9.257949268 |
| Biomasa (1%) | 11.5289 | 0.49054455 |
| Total | 1152.89 | 119.7355769 |

E. Comparación y Análisis de Resultados

Para cerrar con los resultados, al realizar la comparación de emisiones GEI (en kg de CO₂ eq) en los casos sin y con panel fotovoltaico, se logró observar que en la primera situación las emisiones de GEI son de 287.17 kg de CO₂ eq mes⁻¹. Por otro lado, en el caso del uso de un panel fotovoltaico se obtiene que las emisiones de GEI son de 119.74 kg de CO₂ eq mes⁻¹, logrando apreciar que existe una reducción de 39.77% en las emisiones de GEI en comparación al primer caso. Estos resultados están presentados en la Tabla XV

TABLE VIII
COMPARACIÓN PORCENTUAL DE EMISIONES DE GEI (CO₂ EQ)

| | Matriz Eléctrica | Panel Fotovoltaico | Total | Porcentaje (%) |
|---------------------|------------------|--------------------|--------|----------------|
| Emisiones Sin Panel | 287.17 | 0 | 287.17 | 39.77 |
| Emisiones Con Panel | 119.74 | 53.23 | 172.97 | |

IV. DISCUSIÓN

Tomando como punto de referencia los trabajos realizados por Ventura & Delgado y Barreto, se determinó que los resultados de consumo eléctrico mensual de la muestra de (2765.01 kWh mes⁻¹) obtenidos son óptimos y no presentan ningún conflicto con la literatura planteada [15], [16].

Así mismo, el análisis realizado sobre las emisiones de GEI por las fuentes de producción eléctrica presentadas en la matriz peruana y el resultado obtenido, 287.17 kg de CO₂ eq mes⁻¹, proporcionan relación con la metodología empleada en el trabajo de Rodríguez & Gutiérrez, así como, los resultados obtenidos en dicho trabajo, siendo que la huella de carbono promedio de las instalaciones del área de estudio fue de 909.789 kg de CO₂ eq mes⁻¹, dejando en evidencia una gran diferencia de emisión en ambos casos, lo cual se debe a la muestra de estudio [17].

Además, el presente trabajo calculó la producción del panel mediante la irradiancia en la ciudad de Arequipa cuyos valores fueron 8.99, 8.40 y 9.07 kWh m⁻² d⁻¹ para los meses estudiados obtenidos de POWER. Barreto aplicó lo mismo para la ciudad de Chimbote, en donde los meses de agosto, septiembre y octubre presentan una irradiancia de 4.81, 5.81 y 6 kWh m⁻² respectivamente mediante el uso de Meteonorm 7.1. Además, Ventura y Delgado encontraron que en Urakusa-Amazonas la irradiancia encontrada fue de 4.67, 5.33 y 5.98 kWh m⁻² d⁻¹ con el uso de la base de datos del aplicativo NASA [15], [16].

Se logró pronosticar una suministración completa para siete estudiantes solo con el uso del panel, mientras que los otros quince presentan una complementación energética parcial. Así mismo, dejar en claro que este trabajo emplea una muestra pequeña, por lo que para replicarlo a una mayor escala demandaría una recopilación de datos y una evaluación de condiciones más exhaustiva como los trabajos presentados por Barreto, el cual emplea una muestra mayor escala siendo para el sector urbano de la ciudad de Chimbote, también en el trabajo de Rodríguez & Gutiérrez, el cual plantea la implementación de un sistema fotovoltaico en las instalaciones de un hotel ubicado en Colombia, o en el trabajo de Ventura & Delgado, que su área de aplicación fue la posta médica de Urakusa en el Amazonas [15]–[17].

Finalmente, se apreció en los resultados que la implementación de este tipo de sistema llegaría a reducir la emisión en 114.2 kg de CO₂ eq mes⁻¹, lo cual equivale al 39.77%, siendo esta una cifra significativa. Y con relación al trabajo presentado por Barreto se concluye que se lograría evitar la emisión de 1.181 t CO₂ en el lapso de un año con un sistema fotovoltaico. De esta manera se logra afirmar que existe un beneficio ambiental en la investigación presente. Asimismo, se lograría un beneficio económico para los usuarios de este tipo de sistemas, como los casos presentados en los trabajos de Hernández o Rodríguez & Gutiérrez, en los que el retorno de la inversión se recuperaría en un tiempo de cinco a siete años, dejando una ganancia de acuerdo a la vida útil del sistema fotovoltaico instalado [15], [17], [18].

V. CONCLUSIONES

1. El consumo eléctrico total de la muestra de los 22 estudiantes es de 2765.01 kWh mes⁻¹, lo cual también indica que el promedio muestral es de 125.68 kWh mes⁻¹.
2. Debido a este consumo eléctrico, se emiten GEI equivalentes a 287.17 kg de CO₂ mes⁻¹, proveniente de las distintas fuentes de la matriz eléctrica peruana.
3. El panel fotovoltaico de 300 W es capaz de producir un promedio de 81.186 kWh mes⁻¹, producción que sería suficiente para satisfacer totalmente a siete estudiantes.
4. La comparación muestra que con el uso de un panel fotovoltaico de 300 W la emisión de GEI baja a 119.74 kg de CO₂ eq, lo cual representa una disminución del 39.77% en emisiones.

- [1] Y. Xu *et al.*, “Optimal renewable energy export strategies of islands: Hydrogen or electricity?,” *Energy*, p. 126750, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.126750.
- [2] D. García, “¿Estamos avanzando en la transición energética en América Latina?: Análisis y Consideraciones,” *Boletín Política Comercial y Ambiental*, Jan. 2021, Accessed: Jan. 17, 2023. [Online]. Available: www.kas.de/energie-klima-lateinamerika/
- [3] Tinta Verde, “Urge diversificación energética para Arequipa - Revista Tinta Verde,” *Revista Tinta Verde*, Apr. 25, 2019. <http://www.revistatintaverde.com/hidrocarburos/urge-diversificacion-energetica-para-arequipa/> (accessed Jan. 17, 2023).
- [4] J. A. Marengo, G. O. Obregón, and M. C. Valverde, “Cambio Climático en Arequipa: impactos, evaluaciones de vulnerabilidad y medidas de adaptación,” *CCST/INPE*, 2008, Accessed: Jan. 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/328615247>
- [5] Rumbo Minero, “Arequipa tiene el mejor potencial solar para generar energía eléctrica | Rumbo Minero,” May 26, 2017. <https://www.rumbominero.com/peru/noticias/energia/arequipa-tiene-el-mejor-potencial-solar-para-generar-energia-electrica/> (accessed Jan. 17, 2023).
- [6] OSINERGMIN, “ENERGÍAS RENOVABLES EXPERIENCIA Y PERSPECTIVAS EN LA RUTA DEL PERÚ HACIA LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA,” 2019.
- [7] A. Lira, A. Guevara, L. Lopez, and J. Barajas, “IRRADIANCIA Y RADIANCIA COMPRESIÓN DE LOS CONCEPTOS DE IRRADIANCIA Y RADIANCIA PARA LOS ESPACIOS ARQUITECTÓNICOS ASÍ CÓMO LAS UNIDADES RADIOMÉTRICAS Y FOTOMÉTRICAS PRÁCTICA 15,” 2017.
- [8] E. Poclin Alvis, “Diseño y análisis de un sistema de paneles fotovoltaicos para la alimentación eléctrica de extractores helicocentrífugos en una de las instalaciones del Nuevo Hospital de Moquegua,” 2021.
- [9] M. J. Blanco and S. Miller, “Introduction to concentrating solar thermal (CST) technologies,” in *Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology*, Elsevier Inc., 2017, pp. 3–25. doi: 10.1016/B978-0-08-100516-3.00001-0.
- [10] A. Parraga, J. Mamani, A. Chavez, N. Raymundo, and J. Gallegos, “ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO EN UNA VIVIENDA RURALEN CUSCO,” 2020.
- [11] O. Planas, “¿Qué es el efecto fotovoltaico?,” May 2015, Accessed: Feb. 20, 2023. [Online]. Available: <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/efecto-fotovoltaico>
- [12] SCOTIABANK, “Inventario de Gases de Efecto Invernadero,” 2019.
- [13] E. Barlasina, G. Benitez, and L. Condori, “Boletín Gases de Efecto Invernadero,” 2022.
- [14] Polyexcel, “Matriz Eléctrica: Qué Es YCuál Es La Diferencia Entre Ella Y La Matriz Energética,” Jul. 2021, Accessed: Feb. 20, 2023. [Online]. Available: <https://polyexcel.com.br/es/productos/matriz-electrica-que-es-y-cual-es-la-diferencia-entre-ella-y-la-matriz-energetica/>
- [15] P. Barreto, “SUMINISTRO ALTERNATIVO DE ENERGIA ELECTRICA MEDIANTE PANELES SOLARES, PARA AUTOCONSUMO DOMICILIARIO EN EL SECTOR URBANO DE CHIMBOTE,” 2017.
- [16] E. Ventura and L. Delgado, “UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN ‘DISEÑO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO AISLADO PARA LA DEMANDA ELÉCTRICA DE LA POSTA MEDICA, CENTRO POBLADO URAKUSA PROVINCIA CONDORCANQUI, AMAZONAS-PERÚ’ TESIS PARA OBTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA Autor (es),” Jun. 2020.
- [17] A. Rodríguez and F. Gutiérrez, “Reducción de la huella de carbono por medio de la implementación de un sistema fotovoltaico en el sector hotelero. caso de estudio anaira hostel (Leticia-Amazonas - Colombia),” 2017.

- [18] R. Hernández, “ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD PARA LA INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE ENERGÍA LIMPIA MEDIANTE CELDAS FOTOVOLTAICAS PARA LA ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA DEL EDIFICIO 4 EN,” 2017.
- [19] GRA, “Informe sobre las estimaciones de emisiones y/o absorciones de GEI,” 2014. Accessed: Sep. 30, 2022. [Online]. Available: <https://www.proyectoapoyocambioclimatico.pe/wp-content/uploads/2020/10/INFORME-DE-LAS-EMISIONES-Y-ABSORCIONES-DE-GEI-AREQUIPA-2014.pdf>
- [20] J. Luis, S. Balboa, F. Javier, R. Rodríguez, and G. Rey González, “CONTRIBUCIÓN LOCAL AL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL. APLICACIÓN AL MUNICIPIO DE VIGO,” 2016. [Online]. Available: www.conama2016.org
- [21] R. M. Almeida *et al.*, “Reducing greenhouse gas emissions of Amazon hydropower with strategic dam planning,” *Nat Commun*, vol. 10, no. 1, Dec. 2019, doi: 10.1038/s41467-019-12179-5.
- [22] S. Joshi, M. Karamta, and B. Pandya, “Small scale wind & solar photovoltaic energy conversion system for DC microgrid applications,” *Mater Today Proc*, vol. 62, no. P13, pp. 7092–7097, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.01.461.
- [23] I. Arnabat, “¿Cuál es la huella de carbono de un captador solar térmico y de un panel fotovoltaico?,” <https://www.caloryfrio.com/energias-renovables/energia-solar/cual-huella-dcarbono-de-un-captador-solar-termico-y-de-un-panel-fotovoltaico.html#top>, Dec. 05, 2019. <https://www.caloryfrio.com/energias-renovables/energia-solar/cual-huella-dcarbono-de-un-captador-solar-termico-y-de-un-panel-fotovoltaico.html#top> (accessed Feb. 17, 2023).