

Analysis of a photovoltaic system and its influence on the carbon footprint of a University in Moche 2023

Maria Fernanda Tanta Castro, Ingeniera Ambiental¹, Fernando Arístides Saldaña Milla, Maestro en Investigación y Docencia Universitaria²

^{1,2}Universidad Católica de Trujillo, Perú, f.tantacastro@gmail.com, fsaldana@uct.edu.pe

Abstract– Energy expenditure in a Higher Education Institution represents an important environmental challenge on a global scale, due to its high contribution to the carbon footprint (CF), with CO₂ being the main by-product of the use of fossil fuels for electricity generation. Currently, we are going through a process of energy transition, and institutions, including universities, are looking for ways to employ renewable energies to cover their energy needs. Therefore, the objective of the present research was to analyze the influence of a grid-connected photovoltaic (PV) system on the CF sized by solar remote sensing at the Universidad Católica de Trujillo (UCT). In order to carry out the proposed objective, the maximum energy consumption per canopy, the CF per electric equivalent, some solar and geospatial parameters, as well as the installation and operation cost of the dimensioned systems were taken into account. At the end of the research, two photovoltaic systems were obtained, the first composed of 240 modules of 600 W and the second composed of 330 modules of 605 W; these systems allow mitigating a total of 3 862.8 T of CO₂ throughout the useful life of the photovoltaic system and satisfy an energy consumption of 809 MWh per year. The total cost for installation and operation is \$ 345 159.26, with an average payback period of 2.9 years, an average net present value (VPN) of \$ 1 024 665.77 and an average TIR of 33.6%.

Keywords-Photovoltaic System, Electric Carbon Footprint, Solar Energy, Solar Remote Sensing, Higher Level Institution.

Análisis de un sistema fotovoltaico y su influencia en la Huella de carbono en una Universidad en Moche 2023

Maria Fernanda Tanta Castro, Ingeniera Ambiental¹, Fernando Arístides Saldaña Milla, Maestro en Investigación y Docencia Universitaria²

^{1,2}Universidad Católica de Trujillo, Perú, f.tantacastro@gmail.com, fsaldana@uct.edu.pe

Resumen— El gasto de energía en una Institución de Nivel Superior representa un importante desafío ambiental a escala global, debido a su alta contribución con la huella de carbono (HC), siendo el CO₂ el principal derivado del uso de combustibles fósiles para la generación de electricidad. En la actualidad, estamos atravesando un proceso de transición energética, y las instituciones, incluyendo las universidades, están buscando formas de emplear energías renovables para cubrir sus necesidades energéticas. Por consiguiente, el objetivo de la presente investigación fue el análisis de la influencia de un sistema fotovoltaico (SF) conectado a red en la HC dimensionado por teledetección solar en la Universidad Católica de Trujillo (UCT). Para llevar a cabo el objetivo propuesto se tuvo en cuenta el consumo energético máximo por pabellón, la HC por equivalente eléctrico, algunos parámetros solares y geoespaciales, así como también el costo de instalación y operación de los sistemas dimensionados. Al término de la investigación, se obtuvo dos sistemas fotovoltaicos, el primero compuesto de 240 módulos de 600 W y el segundo compuesto de 330 módulos de 605 W; estos sistemas permiten mitigar un total de 3 862.8 T de CO₂ a lo largo de la vida útil del sistema fotovoltaico y logra satisfacer un consumo energético de 809 MWh al año. El costo total por instalación y operación es de \$ 345 159.26, con un periodo de recuperación promedio de 2.9 años y un Valor Actual Neto (VAN) promedio de \$ 1 024 665.77 y un TIR promedio de 33.6%.

Palabras Clave—Sistema Fotovoltaico, Huella de carbono eléctrica, Energía Solar, Teledetección Solar, Institución de Nivel Superior.

I. INTRODUCCIÓN

Desde el siglo XIX, las actividades económicas que implican un elevado uso de la energía eléctrica y que generan impacto en la calidad del medio ambiente son un tema de controversia a nivel mundial [1]. Alrededor del 85% al 93% de la energía a nivel mundial proviene de combustibles fósiles, específicamente de productos petrolíferos, gas natural y carbón [2], los cuales emiten gases de efecto invernadero (GEI) durante su elaboración, producción y consumo, siendo el CO₂ el gas que encabeza la lista de los principales contaminantes atmosféricos debido a la gran cantidad que se emite de este en la generación de electricidad [3][4].

En 2013 el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) informó que, de todo el

porcentaje de electricidad utilizada a nivel mundial, un 20% corresponde a la iluminación, lo que significa que un 6% de las emisiones de CO₂ corresponden al uso de la electricidad para iluminación y se estima que para el año 2060 el consumo de iluminación aumentara en un 60%, aumentando las emisiones de CO₂, la temperatura del planeta y cambios climáticos en el futuro [5].

Actualmente, se vienen implementando energías limpias a nivel mundial para la generación de energía eléctrica y la mitigación de los GEI, una de las energías renovables más usadas a nivel mundial en ciudades, empresas y domicilios es la energía solar a través de sistemas fotovoltaicos independientes o conectados a red. El sector educativo a nivel mundial también se está integrando en la transición energética, por ello las instituciones educativas están elaborando y publicando informes de sostenibilidad donde dan a conocer su impacto negativo y positivo que tienen con el medio ambiente [6][7] brindando un dato importante que es la estimación de CO₂ que emiten a la atmósfera. Un instrumento ambiental importante que también permite conocer la cantidad de GEI emitidos por actividad en una institución o empresa es la huella de carbono (HC), el sector educativo posee una marcada HC por tres razones fundamentales: uso de transporte, consumo energético y generación de residuos; pese a ello, en algunas instituciones la electricidad es el mayor contribuyente de las emisiones de CO₂ con un 59% [8] debido al elevado consumo de electricidad que se genera por el uso constante de equipo electrónicos, enchufes o sistemas de iluminación [9].

Las universidades reconocen cada vez más la necesidad de mitigar y reducir sus emisiones de carbono y enfrentar los problemas con acciones que involucren la sostenibilidad, buscando convertirse en instituciones “Net Zero” [10][11]; sin embargo, es necesario contar con estrategias y acciones tangibles en un corto y largo plazo; es por ello que, para lograr una mejor delimitación de las fuentes indirectas y directas de emisiones de carbono se tiene una metodología de categorización [12]. La norma de protocolo de gases de efecto invernadero (GHGP) clasifica las emisiones de carbono en tres alcances, y son: Alcance 1 (fuentes propias o controladas por la empresa); Alcance 2 (energía consumida por la empresa) y Alcance 3 (transporte e insumos consumidos) [13][14].

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

En Perú son pocas las universidades que poseen tecnologías para mitigar la HC por consumo eléctrico [15], pese a que la emisión de dióxido de carbono por electricidad es elevada en las Instituciones de Estudios Superiores, como es el caso de la Universidad del Pacífico, que tuvo un consumo energético de 3 866 377 kW/h en el año 2016 [16]; por otro lado, también hay universidades que poseen una notable HC en el alcance 2, como la Universidad San Ignacio de Loyola, con una HC de 404.50 T de CO_{2e} [17] y la Universidad Nacional Agraria la Molina, con una HC de 443 T de CO_{2e} [18]. Por ello, es necesario que se implementen medidas, estrategias y acciones sostenibles en las instituciones de educación superior en el Perú; y aunque algunas universidades extranjeras y nacionales ya están implementando como: el dimensionamiento e implementación de paneles fotovoltaicos [19][20][21], jardines verticales, el uso de la teledetección solar para la obtención de datos robustos y exactos [22] [23], etc. para disminuir la HC de alcance 2 [24] [25], la gran mayoría de universidades en Perú todavía no han aplicado ninguna medida de mitigación de CO₂.

Algunas bases teóricas que facilitan el entendimiento de la presente investigación, son:

A. Dióxido de Carbono por Equivalente Eléctrico

El dióxido de carbono equivalente eléctrico (CO_{eq}) es una medida que se utiliza para indicar la generación de gases de efecto invernadero emitidos por el consumo de energía eléctrica en determinado espacio geográfico [24]. La fórmula que se emplea para calcular el CO_{2eq} por consumo energético se muestra en (1)[26]. Donde KWh es kilowatts hora de energía eléctrica consumida, F_{KWh} es factor oficial del IMN, 100 kg/T es factor de conversión de kilogramos a toneladas y T CO_{2e} es toneladas a dióxido de carbono equivalente.

$$T \text{ CO}_{2e} = \text{KWh} * F_{\text{KWh}} / 100 \text{ kg/T} \quad (1)$$

B. Balance de Carbono

Instrumento que posibilita estimar el ahorro de CO₂ previsto con la instalación del sistema fotovoltaico. Esta herramienta se centra en las Emisiones de Ciclo de Vida (ECV), que simboliza el impacto ambiental que genera la cantidad de emisiones de CO₂ vinculadas a un determinado producto o servicio a lo largo de su vida útil. Por tanto, el balance total de carbono (BTC) de un sistema fotovoltaico es la diferencia entre las emisiones de CO₂ producidas y las emisiones de CO₂ mitigadas, esto depende de cuatro factores principales, que se aprecian en (2).

$$\text{BTC} = E \text{ Red} * \text{vida del proyecto} * \text{LCE Red} - \text{Sistema LCE} \quad (2)$$

Donde:

E Red: energía suministrada a la red eléctrica

LCE Red: Cantidad de Emisiones de CO₂ por unidad de energía para la electricidad producida por la red.

Sistema LCE: Cantidad de emisiones de CO₂ causadas por la instalación y funcionamiento del SF.

C. Consumo Energético

Es la cantidad total de energía eléctrica que consume y necesita la institución durante un periodo de tiempo para llevar a cabo el correcto funcionamiento de un proceso determinado (iluminación de ambientes, funcionamiento de equipos eléctricos, etc. El cálculo del consumo energético para un mes se expresa en (3)

$$\text{Consumo energético} = (\text{Pr} * T_{\text{ud}} * 30 \text{ días}) / 1000 \quad (3)$$

D. Sistema Fotovoltaico Conectado a Red

Los Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red (SFCR) son un conjunto de componentes (modulo fotovoltaico, inversor DC/AC, etc.) cuya función primordial es generar electricidad en condiciones óptimas a través de la captación de rayos solares para poder ser inyectados en una red eléctrica convencional [27].

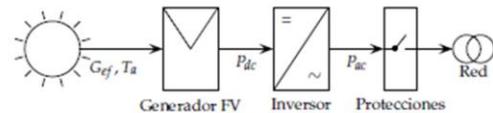


Fig. 1 Esquema de un Sistema Fotovoltaico Conectado a Red
Nota Tomado de Energía Solar Fotovoltaica (p. 65), por Perpiñán L. Oscar, 2020

Para hallar la energía generada en KWh por un panel solar, empleamos la (4)[21], donde se utiliza las horas de radiación solar (HRS) y la energía generada por el panel solar en W (EGS).

$$\text{Energía generada por un panel} = (\text{HRS} * \text{EGS}) / 1000 \quad (4)$$

Para el diseño de un sistema fotovoltaico existen algunos parámetros solares que ayudan a un óptimo funcionamiento del sistema fotovoltaico y son los que se detallan a continuación:

Radiación solar: es la energía que se capta del sol, la cual se desplaza por toda la superficie terrestre a través de ondas electromagnéticas [23].

Hora solar pico (HSP): se define a las horas de pico solar (HPS) como las horas de irradiación diarias, cuyo valor varía de acuerdo al lugar y mes donde se diseñará el sistema fotovoltaico, variando entre 3 a 7 horas diarias [28]. La (5) permite la obtención de la HSP de un día expresada en KWh/m² [29].

$$\text{HSP} = H (\text{Kwh/m}^2\text{día}) / 1\text{Kw/m}^2 * I_{\text{sol}} = 1000 \text{ w/m}^2 = 1\text{Kw/m}^2 \quad (5)$$

Potencia fotovoltaica pico instalada (KWp): es la máxima potencia eléctrica que puede suministrar el sistema fotovoltaico en sus óptimas condiciones, teniendo en cuenta factores como la irradiación, la temperatura del módulo, su ángulo de inclinación, y las variaciones climáticas [32].

$$KWp = (1KW/m^2 * \text{área} * \text{eficiencia}) / 100 \quad (6)$$

Número de paneles: es la cantidad de paneles que necesita la institución o empresa para que su funcionamiento sea óptimo. La fórmula para calcular el número de paneles se aprecia en (7) [20][30], donde EN es energía necesaria, HSP es horas de sol promedio y KWp es potencia pico del módulo.

$$N^{\circ} \text{ de paneles} = EN / (\text{HSP} * \text{rendimiento de trabajo} * KWp) \quad (7)$$

II. METODOLOGÍA

El diseño metodológico de la investigación es experimental ya que se manipuló la variable independiente que es el sistema fotovoltaico para reducir la HC por electricidad que viene a ser la variable dependiente; la metodología que se empleó se puede apreciar en la Fig. 2

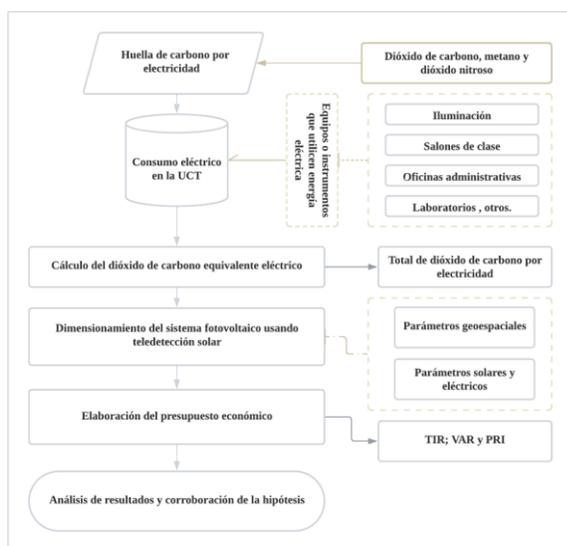


Fig. 2 Esquema metodológico empleado

A. Carga Eléctrica en la UCT

Se elaboró un inventario energético de los elementos que requieren energía eléctrica de acuerdo a sus parámetros eléctricos en el Pabellón Benedicto XVI y Pabellón Santo Toribio de Mogrovejo. Además, se dividieron en áreas cada pabellón de la universidad y se asignó un factor de simultaneidad [31] por ambiente y uso diario como se aprecia en las tablas I y II.

TABLA I
DIVISIÓN DE AMBIENTES POR CÁLCULO ENERGÉTICO POR PABELLÓN

| Pabellón Benedicto XVI |
|-------------------------------------|
| Iluminación |
| Salones de Clase |
| Oficinas Administrativas |
| Otros |
| Pabellón Santo Toribio de Mogrovejo |
| Iluminación |
| Salones de clase |
| Laboratorios |
| Oficinas administrativas |
| Comedor |
| Tecnología de la información |
| Otros |

TABLA II
FACTOR DE SIMULTANEIDAD POR AMBIENTE Y USO DIARIO

| Ambiente | Tiempo de uso diario (h) | Factor de Simultaneidad |
|---|--------------------------|-------------------------|
| Iluminación | | |
| Todas las iluminaciones | 10 | 0.9 a 1 |
| Luz LEDVANCE y foco reflector | <5 | 0.3 |
| Salones de clase | | |
| Computadoras de escritorio, laptop y proyector | 14 | 0.8 |
| Otros elementos | <10 | 0.3 |
| Oficinas administrativas | | |
| Aire acondicionado, impresora multifuncional, computadora de escritorio, laptop | 10 | 0.8 |
| Otros elementos | <10 | 0.2 a 0.3 |
| Otros | | |
| Detector de movimiento, detector de humo, cámara de seguridad, etc. | 24 | 1 |
| Tomacorrientes y conexiones de cable para internet | 3 | 0.1 a 0.2 |
| Otros elementos | <5 | 0.1 |
| Laboratorios | | |
| Refrigerador, congelador y aire acondicionado | 24 | 1 |
| Otros equipos | <9 | 0.3 |
| Comedor | | |
| Refrigerador | 24 | 1 |
| Otros elementos | <9 | 0.3 |
| Tecnología de la información | | |
| Aire Acondicionado | 24 | 1 |
| DATA CENTER | 24 | 0.2 |

B. Huella de Carbono por Consumo Energético

Para el cálculo de la huella de carbono de Alcance 2, se utilizó el dato de la carga eléctrica y se empleó los Factores de Emisión de GEI para consumo de energía eléctrica del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) reconocido por el Ministerio del Ambiente [32].

TABLA III
FACTORES DE EMISIÓN DE GEI PARA CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DEL SEIN

| Fuente de emisión | Dióxido de Carbono (CO2) [TCO2/MWH] | Metano (CH4) [TCH4/MWH] | Metano (CH4) [TCH4/MWH] |
|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Consumo de energía eléctrica del SEIN | 0.17325228304 | 0.0000097581 | 0.00000121264 |

C. Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico

Se llevó a cabo la recopilación de datos de un sistema fotovoltaico instalado en la Universidad Católica de Trujillo, este sistema estuvo compuesto de: dos paneles solares de

60 W, un controlador SOLAR CHARGE CONTROLLER de 12 V y 10 A, un foco de 7 W, un inversor y una batería RT1720. Los datos obtenidos del sistema fotovoltaico fueron los siguientes: Voltaje producido por el SF y consumo diario del foco.



Fig. 3 Sistema Fotovoltaico instalado en la UCT para recopilación de datos

En el dimensionamiento del sistema fotovoltaico realizado con el software PVsyst 7.3 y algunos datos obtenidos de PVGIS 5.2 para el Pabellón Benedicto XVI, se utilizó un panel solar monocristalino de 600 W fabricado en el año 2022 por la empresa JAM solar con una eficiencia del 21.6 %, una vida útil de 25 años y una huella de carbono de fabricación cero. Del mismo modo para el pabellón Santo Toribio de Mogrovejo se utilizó un panel solar monocristalino de 605 W fabricado por la empresa JAM solar con una eficiencia del 21.5 % y una vida útil de 25 años. En ambos sistemas fotovoltaicos también se empleó el uso de un inversor para sistemas conectados a red, su nombre técnico es CSI-66KTL-GS-B.

D. Presupuesto Económico

Para la elaboración del presupuesto se utilizaron datos públicos, como los costos de los componentes del SF conectado a red y el costo de la energía eléctrica en la ciudad de Trujillo, brindada por la empresa Hidrandina S.A. que es de \$ 0.19 por KWh en el año 2023. Se utilizó el software PVsyst 7.3, para el procesamiento del costo de instalación y operación de ambos sistemas fotovoltaicos, tanto para el Pabellón Benedicto XVI, como para el Pabellón Santo Toribio de Mogrovejo

III. RESULTADOS

El campus principal de la Universidad Católica de Trujillo Benedicto XVI, está situada en el Departamento de La Libertad, Provincia de Trujillo, Distrito de Moche; posee dos pabellones destacados, el Pabellón A1 “Benedicto XVI” y el pabellón A2 “Santo Toribio de Mogrovejo”, cuyas coordenadas son: latitud -8.160034, longitud - 79.011473.

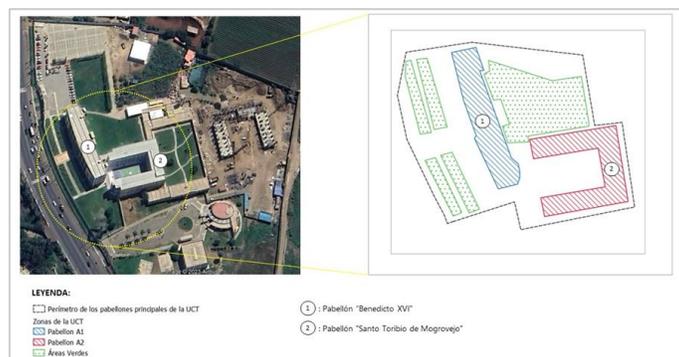


Fig. 4 Área de mapeo de Universidad Católica de Trujillo

A. Carga Eléctrica en la UCT

Los pabellones principales de la Universidad Católica de Trujillo en el campus de Moche tienen un consumo energético de 67 453 KWh/mes; del total, un 66.53% corresponde al Pabellón “Santo Toribio de Mogrovejo” con un consumo de 44 729 KWh/mes y un 33.47% al Pabellón “Benedicto XVI” con un consumo de 22 724 KWh/mes.

TABLA IV
Consumo Energético en el Pabellón Benedicto XVI

| | Potencia Requerida (W) | KWh/mes | KWh/año |
|--------------------------|------------------------|------------------|-------------------|
| Iluminación | 15 163.2 | 4 597.34 | 55 168.13 |
| Salones de Clase | 27 363.2 | 10 590.65 | 127 087.8 |
| Oficinas Administrativas | 20 789 | 5 353.95 | 64 247.4 |
| Otros | 11 992.05 | 2 182.01 | 26 184.13 |
| Total | 75 307.45 | 22 723.95 | 272 687.44 |

TABLA V
Consumo Energético en el Pabellón Santo Toribio de Mogrovejo

| | Potencia Requerida (W) | KWh/mes | KWh/año |
|------------------------------|------------------------|------------------|-------------------|
| Iluminación | 2 547.3 | 7 243.308 | 86 919.69 |
| Salones de Clase | 18 044 | 7 037.16 | 84 445.92 |
| Laboratorios | 20 100.28 | 4 647.73 | 55 772.78 |
| Comedor | 2 970 | 1 087.2 | 13 046.4 |
| Oficinas Administrativas | 25 801 | 7 740.3 | 92 883.6 |
| Tecnología de la Información | 19 682.4 | 14 171.3 | 170 055.9 |
| Otros | 20 813.6 | 2 801.59 | 33 619.1 |
| Total | 132 884.28 | 44 728.62 | 536 743.44 |

B. Huella de Carbono por Electricidad

El volumen total de emisiones de CO₂, CH₄ y NO₂ que emiten los pabellones principales de la Universidad Católica de Trujillo en el campus de Moche por consumo energético son de 141.21 T CO₂, 0.8 Kg CH₄ y 0.1 Kg NO₂ al año. La HC del Pabellón Benedicto XVI es de 47.26 T CO₂ representando el 33.47 % y el pabellón Santo Toribio de Mogrovejo tiene una huella de 93.95 que representa el 66.53 % del total.

El sistema fotovoltaico dimensionado por teledetección en el software PVsyst 7.3 para el Pabellón Benedicto XVI permite ahorrar a lo largo de la vida útil del sistema que son 25 años un total de 1 598.92 T de CO₂.

Por otro lado, el sistema fotovoltaico dimensionado por teledetección en el software PVsyst 7.3 para el Pabellón Santo Toribio de Mogrovejo permite ahorrar a lo largo de la vida útil

del sistema que son un total 25 años un total de 2 263.980 T de CO₂.

TABLA VI
HUELLA DE CARBONO POR CONSUMO ENERGÉTICO EN LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE TRUJILLO

| | Ambiente | T CO ₂ | Kg CH ₄ | Kg NO ₂ |
|-------------------------------------|------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| PABELLÓN BENEDICTO XVI | Iluminación | 9.56 | 0.05406 | 0.00669 |
| | Salones | 22.02 | 0.12455 | 0.01542 |
| | Oficinas Administrativas | 11.13 | 0.06296 | 0.00779 |
| | Otros | 4.54 | 0.02566 | 0.00318 |
| | Iluminación | 9.56 | 0.05406 | 0.00669 |
| | Total | 47.26 | 0.2672 | 0.0331 |
| PABELLÓN SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO | Iluminación | 16.00 | 0.0905 | 0.0112 |
| | Salones de Clase | 14.63 | 0.0828 | 0.0102 |
| | Oficinas Administrativas | 16.10 | 0.0910 | 0.0113 |
| | Laboratorios | 9.67 | 0.0547 | 0.0068 |
| | Comedor | 2.26 | 0.0128 | 0.0016 |
| | Tecnología de la Información | 29.47 | 0.1667 | 0.0206 |
| | Otros | 5.83 | 0.0329 | 0.0041 |
| | Iluminación | 16.00 | 0.0905 | 0.0112 |
| | Salones de Clase | 14.63 | 0.0828 | 0.0102 |
| | | Total | 93.95 | 0.5313 |
| TOTAL | | 141.21 | 0.80 | 0.10 |

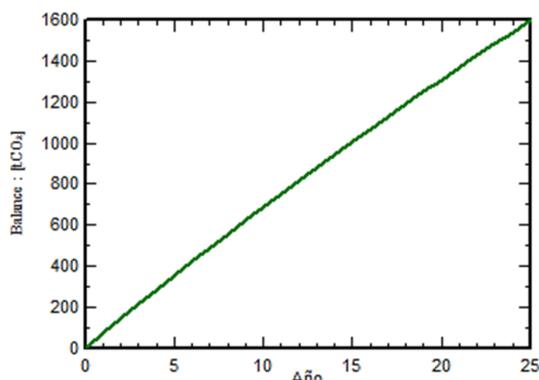


Fig. 5 Balance de carbono por año en el Pabellón Benedicto XVI

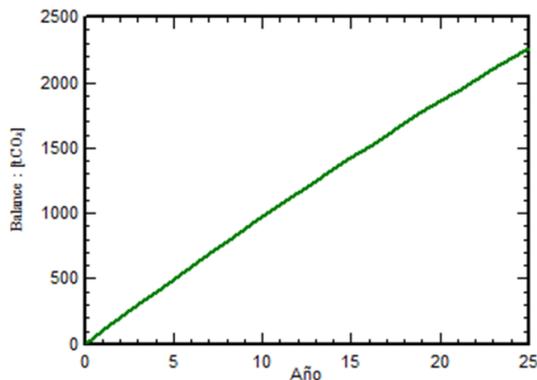


Fig. 6 Balance de carbono por año en el Pabellón Santo Toribio de Mogrovejo

C. Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico

El sistema fotovoltaico compuesto de dos paneles solares, un controlador, una batería y un foco instalado en la Universidad Católica de Trujillo, tuvo una energía consumida

final de 2.5 KWh durante 30 días en un espacio de 0.76 m², lo que significa que el foco consumió una energía diaria de 0.1 KWh.

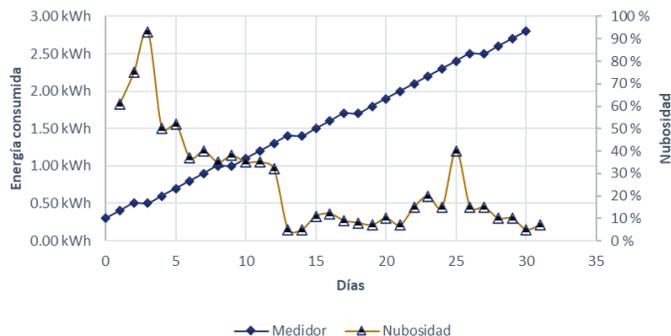


Fig. 7 Energía consumida del sistema fotovoltaico instalado en un periodo de 30 días.

El sistema fotovoltaico diseñado para el Pabellón Benedicto XVI, tuvo total de 240 módulos, ocupando un área de 671 m², la conexión es de 16 cadenas x 15 paneles en serie y se necesitan 2 inversores de 66 KW. La energía proporcionada por el SF es de 276 MWh/año, con una producción específica de 1 915 KWh/KWp/año y un rendimiento del 85.7 %.

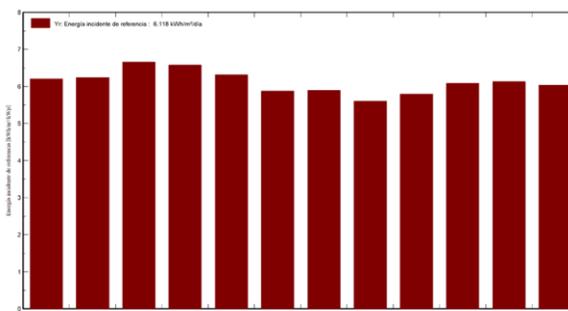


Fig. 8 Energía incidente de referencia en el plano colector – Pabellón Benedicto XVI

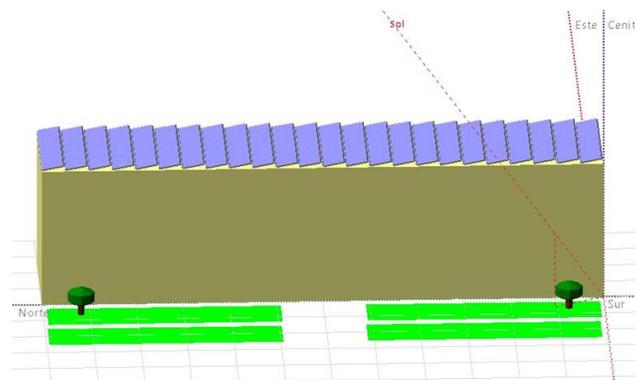


Fig. 9 Modelo 3D del SF dimensionado en el Pabellón Benedicto XVI - Hora: 1:00 pm

TABLA VII
RESULTADOS PRINCIPALES DEL SF DIMENSIONADO PARA EL
PABELLÓN BENEDICTO XVI

| Sistema FV Pabellón Benedicto XVI | |
|-----------------------------------|-------------------|
| Producción del sistema | 276 MWh/año |
| Producción específica | 1 915 KWh/KWp/año |
| Producción normalizada | 5.25 KWh/KWp/día |
| Proporción de rendimiento | 0.857 % |
| Pérdidas del conjunto | 0.79 KWh/KWp/día |
| Pérdidas del sistema | 0.09 KWh/KWp/día |

El sistema fotovoltaico diseñado para el Pabellón Santo Toribio de Mogrovejo, tuvo un total de 330 módulos ocupando un área de 922 m², la conexión es de 22 cadenas x 15 paneles en serie y se necesitan 3 inversores de 66 KW. La energía proporcionada por el SF es de 390 MWh/año, con una producción específica de 1 956 KWh/KWp/año y un rendimiento del 87.6 %.

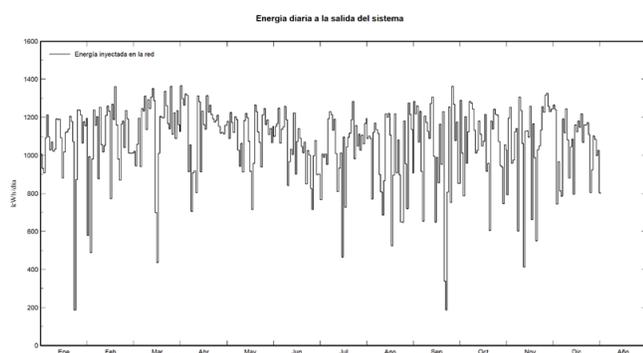


Fig. 10 Energía diaria a la salida del sistema – Pabellón Santo Toribio de Mogrovejo

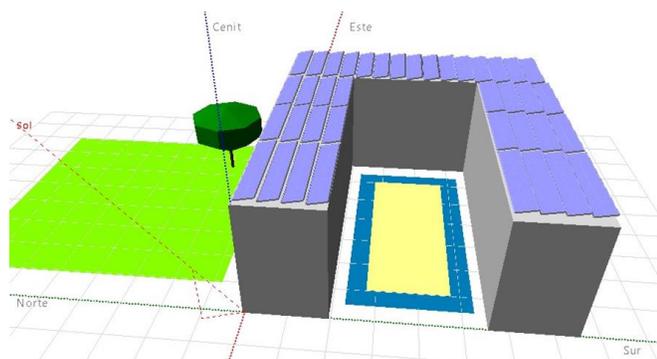


Fig. 11 Modelo 3D del SF dimensionado en el Pabellón Santo Toribio de Mogrovejo - Hora: 1:00 pm.

TABLA VIII
RESULTADOS PRINCIPALES DEL SF DIMENSIONADO PARA EL
PABELLÓN SANTO TORIIBO DE MOGROVEJO

| Sistema FV Pabellón Santo Toribio de Mogrovejo | |
|--|-------------------|
| Producción del sistema | 390 MWh/año |
| Producción específica | 1 956 KWh/KWp/año |
| Producción normalizada | 5.36 KWh/KWp/día |
| Proporción de rendimiento | 0.876% |
| Pérdidas del conjunto | 0.67 KWh/KWp/día |
| Pérdidas del sistema | 0.09 KWh/KWp/día |

D. Presupuesto de Instalación del Sistema Fotovoltaico

El costo de instalación y operación del sistema fotovoltaico dimensionado para el Pabellón Benedicto XVI se puede apreciar de manera resumida en la Tabla VIII.

TABLA IX
RESUMEN FINANCIERO Y RETORNO DE LA INVERSIÓN DEL
SISTEMA FOTOVOLTAICO EN EL PABELLÓN BENEDICTO XVI

| Resumen Financiero | |
|-------------------------------|---------------|
| Costes de instalación | \$ 123,056.27 |
| Costo de Operación | \$ 4,840.80 |
| Retorno de la inversión | |
| Valor Actual Neto (VAN) | \$ 886,229.20 |
| Tasa Interna de Retorno (TIR) | 37.22 % |
| Período de recuperación | 2.6 años |

En la figura 12 se observa el periodo de recuperación monetaria invertida durante la instalación y operación, donde se observa que el año de ganancia es a partir del cuarto y al término de los 25 años de vida útil del SF se ha logrado acumular un total de \$ 886,229.20.

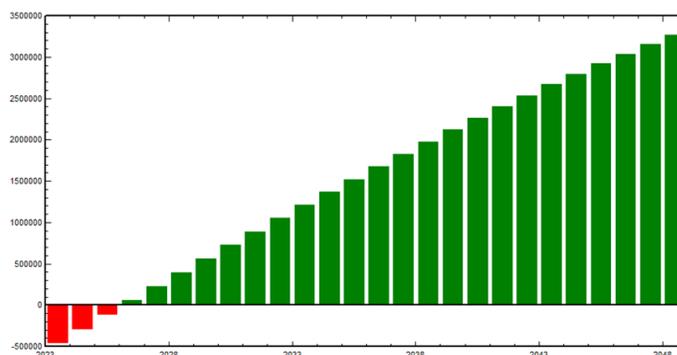


Fig. 12 Flujo de caja acumulativo del SF dimensionado en el Pabellón Benedicto XVI

El costo de instalación y operación del sistema fotovoltaico dimensionado para el Pabellón Santo Toribio de Mogrovejo se puede apreciar de manera resumida en la Tabla IX.

TABLA X
RESUMEN FINANCIERO Y RETORNO DE LA INVERSIÓN DEL
SISTEMA FOTOVOLTAICO EN EL PABELLÓN SANTO TORIBIO DE
MOGROVEJO

| Resumen Financiero | |
|-------------------------------|-----------------|
| Costes de instalación | \$ 209,453.92 |
| Costo de operación | \$ 7,803.15 |
| Retorno de la inversión | |
| Valor Actual Neto (VAN) | \$ 1,163,102.33 |
| Tasa Interna de Retorno (TIR) | 30.17 % |
| Período de recuperación | 3.2 años |

En la figura 13 se observa el periodo de recuperación monetaria invertida durante la instalación y operación, donde se observa que el año de ganancia es a partir del quinto y al término de los 25 años de vida útil del SF se ha logrado acumular un total de \$ 1,163,102.33

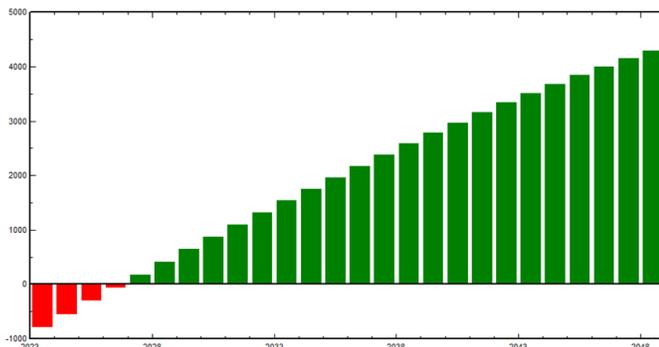


Fig. 13 Flujo de caja acumulativo del SF dimensionado en el Pabellón Santo Toribio de Mogrovejo

IV. DISCUSIÓN

La división por áreas o ambientes en la universidad, permitió obtener datos exactos de los elementos eléctricos que se usan y la cantidad de uso diario por ambiente, permitiendo brindar un factor de simultaneidad de acuerdo a la actividad académica de cada área. Esta metodología aplicada es similar a la de algunos trabajos de investigación donde también separan el consumo energético de la universidad en ambientes o áreas, teniendo en cuenta los equipos que se usan y las horas de uso. Por otro lado, algunas investigaciones utilizan los datos de consumo energético mensual a través de sus recibos, donde ya no necesitan elaborar un consumo energético detallado.

La huella de carbono de la UCT se calculó teniendo en cuenta el consumo energético de la universidad y el factor de emisión oficial CO₂ – MINAM, que es de 0.1733 Kg CO₂/KWh, este factor varía de acuerdo al país y año donde se realiza el estudio; en otras investigaciones el factor de emisión por consumo energético es mayor, como en las investigaciones que se llevaron a cabo en las universidades de Pakistán, donde el factor energético es de 0.617 Kg CO₂/KWh.

El dimensionamiento del sistema fotovoltaico elaborado mediante la teledetección solar facilitó el análisis y obtención de datos (parámetros solares y geoespaciales), logrando así la obtención de un sistema fotovoltaico específico para la Universidad Católica de Trujillo, con datos robustos y precisos, como la irradiación, orientación, azimut, radiación, horas solar pico, temperatura, etc., datos que permiten aprovechar al máximo la radiación solar por espacio geográfico. Esta técnica aplicada también se ha empleado para el estudio, diseño e implementación de sistemas fotovoltaicos en otras investigaciones, logrando una mejor robustez en el dimensionamiento del sistema fotovoltaico.

En otros estudios donde evalúan la parte económica y la rentabilidad de la implementación de sistemas fotovoltaicos, también se obtuvieron resultados óptimos, donde la inversión por implementación es muy elevada, pero es una inversión a

futuro, que con el paso de los años genera ingresos y ahorro de emisión de CO₂, como es en el caso de la Universidad de Jordania donde la implementación del SF se recupera en 3 años con un TIR del 32% o la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Mu 'tah, que logra recuperar lo invertido en 5.5 años, mitigando 85 T CO₂ al año.

V. CONCLUSIÓN

El consumo energético total de los pabellones principales en el campus de Moche de la Universidad Católica de Trujillo es de 67 453 KWh/mes y 809 MWh/año, teniendo el Pabellón Benedicto XVI un consumo de energía de 272 MWh/año y el Pabellón Santo Toribio de Mogrovejo un consumo de energía de 537 MWh/año. Los ambientes que tienen un mayor consumo energético en ambos pabellones son: Los salones de clase, oficinas administrativas, iluminación y laboratorios.

La huella de carbono de Alcance 2 en los pabellones principales en el campus de Moche de la Universidad Católica de Trujillo es de 141.21 T CO₂ al año, siendo el Pabellón Santo Toribio de Mogrovejo el que tiene la mayor huella de carbono con 93.95 T CO₂ al año que representa el 66.53 % del total.

El dimensionamiento de un sistema fotovoltaico a través de teledetección solar influye de manera significativa en la HC por consumo de energía eléctrica en la Universidad Católica de Trujillo, ya que permite el ahorro total de 3 862.9 T CO₂ a lo largo de la vida útil de los sistemas fotovoltaicos dimensionados en ambos pabellones, contribuyendo con la disminución de los GEI y la mitigación del cambio climático.

El costo total por la instalación de ambos sistemas es de \$ 332,510.19 y el costo de operación es de \$ 12,649.06, con un periodo de recuperación promedio de 3 años y una ganancia por ambos sistemas de \$ 2 049 331.53.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este estudio. En primer lugar, agradecemos a la Universidad Católica de Trujillo por brindarnos el apoyo logístico y los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación. Finalmente, extendemos nuestro agradecimiento a nuestros patrocinadores por su generoso apoyo financiero que ha hecho posible la realización y publicación de este importante análisis sobre la huella de carbono

REFERENCIAS

- [1] BBVA Communications. (2022). ¿Qué es el combustible fósil? La energía que se obtiene de la materia orgánica. BBVA. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-el-combustible-fosil-la-energia-que-se-obtiene-de-la-materia-organica/>

- [2] Sharma, R., Shahbaz, M., Kautish, P., y Vo, X. V. (2021). Does energy consumption reinforce environmental pollution? Evidence from emerging Asian economies. *Journal of Environmental Management*, 297, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113272>
- [3] Kanat, O., Yan, Z., Asghar, M. M., Ahmed, Z., Mahmood, H., Kirikkaleli, D., y Murshed, M. (2021). Do natural gas, oil, and coal consumption ameliorate environmental quality? Empirical evidence from Russia. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(3), 4540–4556. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15989-7>
- [4] Rasheed, M. Q., Haseeb, A., Adebayo, T. S., Ahmed, Z., y Ahmad, M. (2022). The long-run relationship between energy consumption, oil prices, and carbon dioxide emissions in European countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(16), 24234–24247. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17601-4>
- [5] Hong, W. Y., y Rahmat, B. N. N. N. (2022). Energy consumption , CO2 emissions and electricity costs of lighting for commercial buildings in Southeast Asia. *Scientific Reports*, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18003-3>
- [6] Filimonau, V., Archer, D., Bellamy, L., Smith, N., y Wintrip, R. (2021). Science of the total environment the carbon footprint of a UK University during the COVID-19 lockdown. *Science of the Total Environment*, 756. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143964>
- [7] University of Cambridge. (2022). *Environmental Sustainability Report 2020-21*. https://www.environment.admin.cam.ac.uk/files/environmental_sustainability_report_2020-21.pdf
- [8] Haseeb, M., Tahir, Z., Batool, S. A., Majeed, A., Ahmad, S. R., y Kanwal, S. (2022). The carbon footprint of a public sector University before and during the COVID-19 lockdown. *Global NEST*, 24(1), 29–36.
- [9] Hermosilla, A. (2014). *Huella de Carbono en la Universidad Politécnica de Cartagena: En Busca de la Ecoeficiencia* [Universidad Politécnica de Cartagena, Tesis de maestría]. <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/5043/tfm384.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [10] Ma, B., Bashir, M. F., Peng, X., Strielkowski, W., y Kirikkaleli, D. (2023). Analyzing research trends of universities' carbon footprint: An integrated review. *Gondwana Research*, 121, 259–275. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.05.008>
- [11] Rasheed, M. Q., Haseeb, A., Adebayo, T. S., Ahmed, Z., y Ahmad, M. (2022). The long-run relationship between energy consumption, oil prices, and carbon dioxide emissions in European countries. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(16), 24234–24247. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17601-4>
- [12] Climate Partner ID. (2019). Emisiones De Alcance 1, 2 Y 3. Climate Partner ID. <https://www.climatepartner.com/es/guia-completa-para-entender-las-emisiones-de-alcance-1-2-y-3#explicacin-del-alcance-1-2-y-3>
- [13] Clabeaux, R., Carbajales-Dale, M., Ladner, D., y Walker, T. (2020). Assessing the carbon footprint of a university campus using a life cycle assessment approach. *Journal of Cleaner Production*, 273, 122600. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122600>
- [14] Cooper, J., Bird, M., Acha, S., Amrit, P., y Chachuat, B. (2023). ScienceDirect The Carbon Footprint of a UK Chemical Engineering Department - The Case of Imperial College London. *Procedia CIRP*, 116, 444–449.
- [15] Barreda, M., y Polo, J. (n.d.). Evaluación de la huella de carbono en una institución educativa de nivel superior . Estudio de caso. *Universidad Católica San Pablo*.
- [16] Shwalb Helguero, M., Molina Ruzicanin, A., y Torres Jáuregui, S. (2016). Reporte de Sostenibilidad 2014-2015.
- [17] Universidad San Ignacio de Loyola. (2021). Reporte de huella de carbono organizacional. <https://huellacarbonoperu.minam.gob.pe/huellaperu/#/listadoInscritos/99>
- [18] Universidad Nacional Agraria La Molina. (2020). Reporte de huella de carbono organizacional. <https://huellacarbonoperu.minam.gob.pe/huellaperu/#/listadoInscritos/99>
- [19] Ayadi, O., Al-Assad, R., y Al Asfar, J. (2018). Techno-economic assessment of a grid connected photovoltaic system for the University of Jordan. *Sustainable Cities and Society*. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.011>
- [20] Rodríguez, A. M., y Gutiérrez, F. (2017). 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). *Revista de Tecnología*, 16(1), 169–182. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6546154>
- [21] Ulloa, B., y Samaniego, O. (2021). Reducción de la huella de carbono por medio de la implementación de un sistema fotovoltaico en el edificio de posgrados y CIIT de la UCACUE [Universidad Católica de Cuenca, Tesis de Pre grado]. <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/7954>
- [22] Al-Najideen, M. I., y Alrwashdeh, S. S. (2017). Design of a solar photovoltaic system to cover the electricity demand for the faculty of Engineering- Mu'tah University in Jordan. *Resource-Efficient Technologies*, 3(4), 440–445. <https://doi.org/10.1016/j.refit.2017.04.005>
- [23] Jiang, H., Yao, L., Lu, N., Qin, J., Liu, T., Liu, Y., y Zhou, C. (2022). Geospatial assessment of rooftop solar photovoltaic potential using multi-source remote sensing data. *Energy and AI*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2022.100185>
- [24] Ridhosari, B., y Rahman, A. (2020). Carbon footprint assessment at Universitas Pertamina from the scope of electricity, transportation, and waste generation: Toward a green campus and promotion of environmental sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 246, 119172. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119172>
- [25] Gu, Y., Wang, H., Xu, J., Wang, Y., Wang, X., Robinson, Z. P., Li, F., Wu, J., Tan, J., y Zhi, X. (2019). Quantification of interlinked environmental footprints on a sustainable university campus: A nexus analysis perspective. *Applied Energy*, 246(March), 65–76. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.015>
- [26] Chavarría-Solera, F., Molina-León, Ó. M., Gamboa-Venegas, R., y Rodríguez-Flores, J. (2016). Medición de la huella de carbono de la Universidad Nacional de Costa Rica para el periodo 2012-2014. Rumbo a la carbono neutralidad. *Uniciencia*, 30(2), 47. <https://doi.org/10.15359/ru.30-2.4>
- [27] Perpiñan Lamigueiro, O. (2020). Energía Solar Fotovoltaica. <http://procomun.wordpress.com/documentos/libroesf>
- [28] Pareja Aparicio, M. (2015). Energía solar fotovoltaica: cálculo de una instalación aislada (3a ed.). Marcombo.
- [29] Rodríguez Mas, F., Ruiz Gómez, A., y Valiente García, D. (2022). Apuntes sobre la energía fotovoltaica. Universidad Miguel Hernández.
- [30] Ladrón de Guevara, J. A. (2018). Diseño y Cálculo de una Instalación Fotovoltaica Aislada [Universidad Politécnica de Madrid, Tesis de Pre grado]. http://oa.upm.es/52204/1/PFC_JORGE_ALVARADO_LADRON_DE_GUEVARA.pdf
- [31] IEC international Standars. (2016). Electrical Installation Guide. In Schneider Electric S.A. (Laurent MI).
- [32] Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2018). Huella De Carbono Perú. Huella de Carbono. <https://huellacarbonoperu.minam.gob.pe/huellaperu/#/inicio>