

Rendimiento de un Sistema Solar Fotovoltaico Mixto (Policristalinos y Amorfo) Usado como Suministro Energético en un Contexto de Tecnificación Cafetera¹

Hermes Leonardo Idrobo Pacheco², Walter Murillo Arango³, Juan David Lara Galvis⁴, Daniel Fernando Chávez Ruiz⁵

Resumen

Introducción. El aprovechamiento de fuentes renovables de energía, y en especial la fotovoltaica, se ha convertido en una herramienta clave en el campo de la producción más limpia, ayudando a promover el desarrollo sostenible en muchos sectores, entre ellos el agrícola, convirtiéndose en una oportunidad de impulso para el sector. **Objetivo.** Este estudio evaluó el rendimiento de una instalación de paneles fotovoltaicos con dos tecnologías diferentes a través del diseño y construcción de un dispositivo electrónico de adquisición

de datos comparador de curvas de potencia. **Materiales y Métodos.** Se consideraron dos tipos de tecnologías de paneles, (policristalinos y los amorfos) como suministro de energía eléctrica en el proceso de beneficio de café del Parque Tecnológico del Café – TECNICAFÉ-SUPRACAFÉ, Cauca, Colombia. Se diseñó un prototipo hardware con software libre, en una placa Arduino con un microcontrolador capaz de medir la irradiancia, potencia, y respuesta térmica de cada panel solar, y se calculó la energía generada con los tipos de instalaciones (paralelo y serie) Los datos de voltaje, corriente eléctrica y temperatura se almacenaron en el

- 1 Artículo original derivado del proyecto de investigación “Rendimiento de un sistema solar fotovoltaico mixto (Policristalinos y Amorfo) usado como suministro energético en un contexto de tecnificación cafetera”, financiado en convenio con el Parque Tecnológico del Café TECNICAFÉ- SUPRACAFÉ, realizado como tesis en la Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, Universidad de Manizales, ejecutado entre enero de 2019 a agosto de 2020.
- 2 Estudiante de Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente – Universidad de Manizales - Colombia, pregrado en Ingeniería Física. Correo: leophilys@gmail.com / ORCID: 0000-0002-1664-173X
- 3 Doctor en Ciencias Químicas, Afiliación, Profesor, Centro de Investigación en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (CIMAD), Universidad de Manizales, Manizales, Colombia. Correo: wmurillo@umanizales.edu.co. ORCID: 0000-0002-1482-070X
- 4 Ingeniero Mecatrónico, Facultad de Ingeniería, Corporación Universitaria Comfacaucá – Colombia. Correo: juanlara1996u@gmail.com / ORCID: 0000-0001-5376-2664
- 5 Ingeniero Mecatrónico, Facultad de Ingeniería, Corporación Universitaria Comfacaucá – Colombia. Correo: danifercho26@gmail.com / ORCID: 0000-0002-1457-0755

Autor para Correspondencia: Hermes Leonardo Idrobo Pacheco, correo: leophilys@gmail.com
Recibido: 10/11/2020 Aceptado: 26/11/2021

**Los autores declaran que no tienen conflicto de interés*

módulo micro SD de la tarjeta para luego graficarlas como curvas características entrega de potencia. Los **Resultados** sugieren la existencia de una relación directa entre la potencia entregada por los paneles con la variable de irradiancia.

Los paneles policristalinos entregaron mayor potencia que los amorfos, reportando

una eficiencia práctica de 11 % y 4.8 % respectivamente. **Conclusión.** El diseño logrado en esta investigación representa una oportunidad para mejorar el desempeño energético del sector cafetero.

Palabras clave: eficiencia, sistemas fotovoltaicos, suministro energético, irradiancia.

Performance of a Mixed Solar Photovoltaic System (Polycrystalline and Amorphous) used as Energy Supply in a Coffee Technification Context

Abstract

Introduction. The use of renewable sources of energy, and especially photovoltaics, has become a key tool in the field of cleaner production, helping to promote sustainable development in many sectors, including agriculture, becoming an opportunity for momentum for the sector. **Objective.** This study evaluated the performance of a photovoltaic panel installation with two different technologies through the design and construction of an electronic data acquisition device comparing power curves. **Materials and methods.** Two types of panel technologies were considered (polycrystalline and amorphous) as the supply of electrical energy in the coffee processing process of the Parque Tecnológico

del Café–TECNICAFÉ– SUPRACAFÉ, Cauca, Colombia. A hardware prototype with free software was designed on an Arduino board with a microcontroller capable of measuring the irradiance, power, and thermal response of each solar panel, and the energy generated with both types of installations (parallel and serial) was calculated. Voltage, electric current and temperature data were stored in the micro SD module of the card and then plotted as power delivery characteristic curves. The **Results** suggest the existence of a direct relationship between the power delivered by the panels and the irradiance variable. The polycrystalline panels delivered higher power than the amorphous ones, reporting a practical efficiency of 11% and 4.8% respectively. **Conclusion.** The design achieved in this research represents an opportunity to improve the energy performance of the coffee sector.

Keywords: Efficiency, photovoltaic systems, energy supply, irradiance.

Desempenho de um Sistema Solar Fotovoltaico Misto (Policristalino y Amorfo) Utilizado como Fonte de Energia num Contexto de Tecnologia de Café

Resumo

Introdução. O uso de fontes renováveis de energia, principalmente fotovoltaica, tem-se tornado uma ferramenta fundamental no campo da produção mais limpa, ajudando a promover o desenvolvimento sustentável em diversos setores, inclusive na agricultura, tornando-se uma oportunidade de impulso para o setor. **Objetivo.** Este estudo avaliou o desempenho de uma instalação de painel fotovoltaico com duas tecnologias diferentes por meio do projeto e construção de um dispositivo eletrônico de aquisição de dados comparando curvas de potência. **Materiais e métodos.** Foram considerados dois tipos de tecnologias de painel (policristalino e amorfo) como fonte de energia elétrica no processo de beneficiamento do café do

Parque Tecnológico do Café-TECNICAFÉ-SUPRACAFÉ, Cauca, Colômbia. Foi desenhado um protótipo de hardware com software livre, em uma placa Arduino com um microcontrolador capaz de medir a irradiância, potência e resposta térmica de cada painel solar, e foi calculada a energia gerada com os tipos de instalações (paralela e serial). A corrente elétrica e a temperatura foram armazenadas no módulo micro SD do cartão e, em seguida, plotadas como curvas características de fornecimento de energia. Os resultados sugerem a existência de uma relação direta entre a potência fornecida pelos painéis e a variável de irradiância. Os painéis policristalinos entregaram maior potência do que os amorfos, relatando uma eficiência prática de 11 % e 4,8 %, respectivamente. **Conclusão.** O desenho obtido nesta pesquisa representa uma oportunidade de melhorar o desempenho energético do setor cafeeiro.

Palavras-chave: Eficiência, sistemas fotovoltaicos, fornecimento de energia, irradiância.

Introducción

Uno de los principales desafíos de la humanidad, es garantizar el acceso a fuentes de energía limpia en un contexto de crecimiento exponencial de su demografía. La energía es primordial para el desarrollo de la sociedad, sin embargo, la economía mundial está soportada en el consumo de energías fósiles, siendo éstas una de las principales causantes del cambio climático (Conti et al., 2016; York & Bell, 2019). Los

avances hacia la consecución del Objetivo de Desarrollo Sostenible 7 (Energía asequible y no contaminante) son evidentes, la eficiencia energética y las energías renovables se han constituido en herramientas primordiales para alcanzar dicho fin (Bitar, 2014; Rodríguez-Ortega et al., 2017; C. M. Rodríguez et al., 2019). Los progresos en fuentes de energía limpia, como la solar, eólica, termal, han mejorado la productividad energética de manera sostenible ayudando al medio ambiente.

La tecnología más explorada a nivel mundial en relación al aprovechamiento de fuentes renovables es la energía solar fotovoltaica (consiste en producir electricidad de origen renovable, obtenida directamente de la radiación solar) (Ghasemi-Mobtaker et al., 2020). Los paneles solares han sido ampliamente usados en campos como la industria (Mousa et al., 2019), las telecomunicaciones (MOSTAVAN, 1990; Xiao, 2018), el transporte (Oh et al., 2020), el uso doméstico (Akikur et al., 2013; Gutiérrez et al., 2018; Thinsurat et al., 2019), y la agricultura (Gao et al., 2019; Manrique et al., 2020). No obstante, en el contexto agrícola son más las oportunidades y brechas identificadas que vale la pena profundizarlas.

Por su parte, la sostenibilidad ambiental de la agricultura moderna impulsada por la investigación científica aplicada está fuertemente ligada a la implementación de diferentes estrategias para mejorar el ritmo y calidad de las cosechas, aumentar los índices de ingresos y producción orientadas a reducir el consumo de recursos productivos, incluido la energía (Cossu et al., 2020) y fomentar la optimización de procesos agroindustriales (Hoyos García, 2018; Krauter & Enciso, 2003). En relación al uso de paneles solares en el sector agrícola, se encuentran estudios sobre el dimensionamiento de sistemas de refrigeración autónomo fotovoltaico (Valderrama et al., 2016), aplicaciones como el bombeo de agua para riego, cercos eléctricos, automatización de sistemas de riego (Martínez et al., 2013), electrificación rural de predios en zonas aisladas o, incluso, con conexión a la red (Antúnez et al., 2016). Sin embargo, la comparación y cálculo del rendimiento de sistemas fotovoltaicos de distinta

tecnología que son usados como suministro energético en un contexto de sistemas de producción cafetera, es un tema que no ha sido ampliamente estudiado. Además, en este sector, que es tan importante para la economía rural de sus países productores, es necesario identificar valores asociados con los costos de insumos, incluidos los gastos energéticos. Buscando de esta manera, con alternativas y tecnologías como la fotovoltaica hacer estos sistemas más eficientes y sostenibles en el tiempo. La cuantificación de la eficiencia de un sistema fotovoltaico depende de parámetros tecnológicos como la composición o tipo de panel, la interfaz de adquisición de datos, además de factores medioambientales como la irradiancia y temperatura (Necaibia et al., 2018).

El objetivo de este estudio fue el de realizar un diagnóstico del grado de eficiencia de un sistema fotovoltaico mixto (policristalino y lámina delgada) que suministra energía a una planta de beneficio de café (etapa que consiste en un conjunto de operaciones para transformar los frutos de café (cerezo), en café pergamino (J. P. Rodríguez et al., 2020). La instalación fotovoltaica suministra energía al motor del tostador de café que funciona como carga para el cálculo de eficiencia, estimación en la reducción de costos de operación e impacto ambiental del sistema fotovoltaico. Para lo anterior, se estableció el diseño de un sistema híbrido de adquisición de datos y comparación de las siguientes variables: irradiancia (tomada de un sistema externo al dispositivo fotovoltaico), temperatura (respuesta térmica de cada panel), corriente, y voltaje (tomadas de la interconexión al sistema fotovoltaico)

Se comprobó y cuantificó la información de las fichas técnicas y bibliográficas que sugieren a los sistemas policristalinos con mayor rendimiento que los sistemas de lámina delgada (Guzmán Niño, 2017). Es así como el comparador de señales diseñado puede además de registrar el rendimiento, reportar el desgaste de un sistema en el tiempo mediante el almacenamiento de datos en la memoria de la interfaz (almacenamiento de registros de los rendimientos obtenidos) en intervalos temporales establecidos en las horas pico solar (Pareja Aparicio, 2010) que luego fueron graficados y comparados.

El estudio se enfocó en la cuantificación de variables como eficiencia dependiente de la irradiancia, que se tradujeron en reducción de costos energéticos para la industria por cuenta de la independencia en el suministro eléctrico fotovoltaico al hacer un aporte significativo en la reducción de emisiones de gases efecto invernadero. La caracterización y evaluación del impacto ambiental positivo generan un valor agregado al sello de calidad y sostenibilidad empresarial en la producción del café. Este estudio aportó información

importante en cuanto a la toma de decisiones y diseño en proyectos fotovoltaicos aplicados a la agricultura como soporte para el seguimiento, mantenimiento y adecuación de suministro.

Materiales y Métodos

Las etapas de caracterización y construcción del prototipo se enfocaron en la ubicación georreferenciada de la zona de estudio, diseño y construcción del hardware.

Zona de estudio

La agricultura fotovoltaica, la combinación de generación de energía fotovoltaica y actividades agrícolas, es una respuesta natural para suministrar electricidad verde y sostenible para la agricultura (Wang et al., 2019; Xue, 2017).

El presente estudio se desarrolló en el Parque Tecnológico de Innovación del Café (TECNICAFÉ), ubicado en Cajibío, Cauca, Colombia (21°35'08"N, 76°32'53"W) (Corrales et al., 2014) (ver Figura 1).

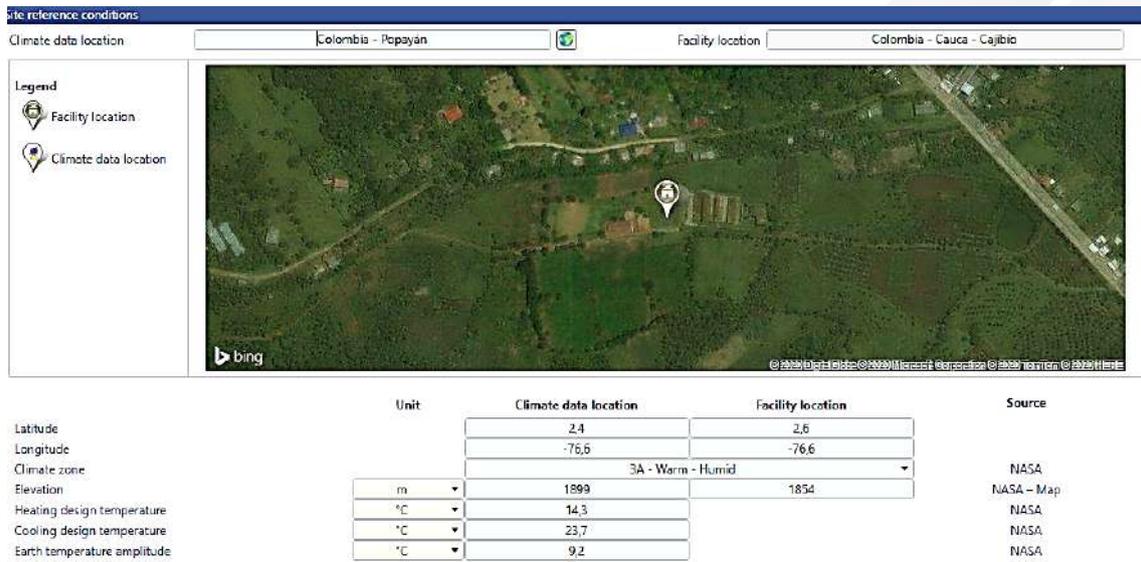


Figura 1. Georreferenciación Parque Tecnológico-TECNICAFÉ. Datos climatológicos.

Fuente: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/tools/data-analysis-software-modelling/retscreen/7465>

Caracterización

La utilización de paneles de distintas tecnologías en un proceso generó la pregunta sobre cómo medir la cantidad de energía entregada, es decir, de la potencia traducida en eficiencia de cada panel. Lo anterior es importante, ya que se pudo comparar las

condiciones reales de trabajo de estos dispositivos con las condiciones ideales dadas por la ficha técnica del fabricante. El parque solar cuenta con paneles solares amorfos y policristalinos, motivo por el cual se realiza el estudio en este tipo de tecnologías. Una celda solar se construye a

Unit	Climate data location		Facility location		Source	
Latitude	2,4		2,6		NASA	
Longitude	-76,6		-76,6		NASA - Map	
Climate zone	3A - Warm - Humid				NASA	
Elevation	1899	1854		NASA		
Heating design temperature	14,3			NASA		
Cooling design temperature	23,7			NASA		
Earth temperature amplitude	9,2			NASA		

Month	Air temperature °C	Relative humidity %	Precipitation mm	Daily solar radiation - horizontal kWh/m ² /d	Atmospheric pressure kPa	Wind speed m/s	Earth temperature °C	Heating degree-days 18 °C	Cooling degree-days 10 °C
January	16,9	83,8%	93,31	4,42	81,2	1,5	17,6	34	214
February	17,1	82,7%	97,44	4,54	81,2	1,5	17,8	25	199
March	17,2	82,9%	124,93	4,64	81,2	1,5	17,9	25	223
April	17,3	83,6%	134,40	4,44	81,2	1,4	17,9	21	219
May	17,1	82,8%	109,12	4,37	81,3	1,6	17,6	28	220
June	16,6	80,3%	76,50	4,46	81,3	2,2	17,0	42	198
July	16,5	77,6%	50,53	4,66	81,3	2,5	17,0	47	202
August	16,9	75,3%	44,33	4,70	81,3	2,3	17,6	34	214
September	17,2	76,2%	72,00	4,60	81,3	1,7	18,1	24	216
October	17,0	81,3%	135,16	4,41	81,2	1,5	17,9	31	217
November	16,7	84,8%	168,00	4,31	81,2	1,6	17,4	39	201
December	16,8	85,2%	108,50	4,27	81,2	1,6	17,4	37	211
Annual	16,9	81,4%	1.214,22	4,48	81,2	1,7	17,6	387	2.533
Source	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA
Measured at					m	10	0		

A partir de una oblea delgada de silicio, fabricada a partir de la unión de dos semiconductores p – n, y que por medio del efecto fotoeléctrico convierte la radiación solar en energía eléctrica de corriente directa. A continuación, son descritas las dos tecnologías analizadas:

Panel policristalino Deikko DKP 175/23. Silicio Policristalino: se fabrica a partir de restos de piezas de silicio monocristalino. Su rendimiento es algo inferior al monocristalino, pero su menor coste ha contribuido enormemente a aumentar su uso (Salas et al., 2018). Panel compuesto con 48 células policristalinas en serie, potencia máxima (Pm) 175 ± 3 %, Voltaje máximo (Vm) 23.5V, Corriente máxima (Im) 7.6 A, Voltaje de circuito abierto (Voc) 29.5V, Corriente de corto circuito (Isc) 8.2A, Eficiencia del módulo 13.2 %, Eficiencia de la célula 15.4 %. Dimensiones 1.35m². Rendimiento en el laboratorio 19-20 %, rendimiento directo 12-14 %.

Panel amorfo SCHOTT ASI TM81. Silicio Amorfo: se obtiene por la deposición de

capas delgadas sobre vidrio. El rendimiento es bastante menor de los anteriores, por lo que su uso se limita a aplicaciones de pequeña potencia como calculadoras, relojes, etc. Panel con potencia máxima (Pm) 98.8 ± 5 %, Voltaje máximo (Vm) 18.9V, Corriente máxima (Im) 5.03 A, Voltaje de circuito abierto (Voc) 23.7V, Corriente de corto circuito (Isc) 5.9A, Eficiencia del módulo (No reporta). Dimensiones 1.45m² (Pareja Aparicio, 2010). Rendimiento en el laboratorio 16 %, rendimiento directo <10 %.

Para esta investigación, las variables controladas fueron el voltaje, la corriente y la temperatura (respuesta térmica de cada panel), que permitieron estimar datos de potencia y de eficiencia. De esta manera, el modelo matemático de la celda se obtuvo a partir de su representación eléctrica, y se encuentra en función principalmente de la radiación solar y de la temperatura de la celda. El modelo matemático que describe la curva voltaje-corriente en una celda solar, generalmente se describe por medio de (1).

$$I = I_l - I_o \left[\exp \exp \left(\frac{q(V+IR_s)}{a} \right) - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{SH}} \quad (1)$$

Donde:

- I_l es la corriente foto generada
- I_o es la corriente de saturación inversa
- R_s es la resistencia en serie
- R_{SH} es la resistencia en paralelo
- V es el voltaje
- q es la carga de un electrón (1.6 x 10⁻¹⁹C)
- a es un parámetro dado por la ecuación: $a = kT_c/A$ siendo k la constante de Boltzman (1.38x10⁻²³J/K)
- T_c es la temperatura de la celda
- A es el factor de la idealidad. El factor de idealidad permite distinguir el

comportamiento entre una celda de silicio y una de germanio, dependiendo así de la tecnología de fabricación de la celda solar.

Las características típicas de una celda solar suelen representarse por medio de gráficas: voltaje – corriente y voltaje – potencia. En la Figura 2, se muestran las curvas características de cada panel seleccionado para el experimento. El panel

policristalino Deikko DKP 175/23 y el panel amorfo SCHOTT ASI™ 81 (Izard, 2020). También, se pueden observar puntos representativos de las curvas, tales como: la corriente de corto circuito (I_{sc}), el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), el punto de máxima potencia (M_{pp}), la corriente en el punto de máxima potencia (I_{MPP}), el voltaje en el punto de máxima potencia (V_{MPP}) y la potencia en el punto de máxima potencia (P_{MPP}).

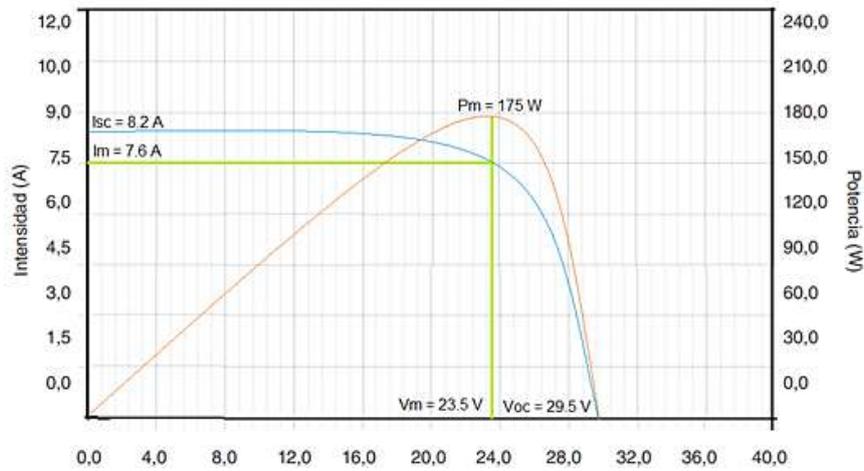


Figura 2. Curvas características de los paneles Policristalinos.

Fuente: Elaborado por los autores.

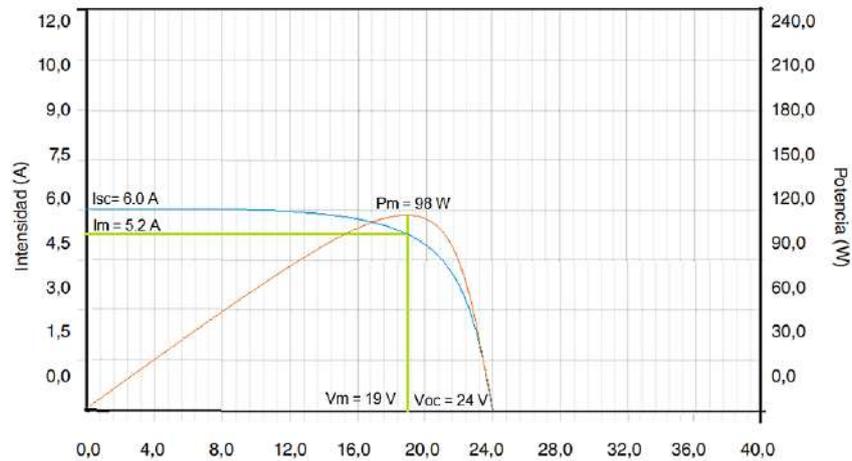


Figura 3. Curvas características de los paneles de lámina delgada.

Fuente: Elaborado por los autores.

Descripción del Sistema Diseñado

En la Figura 4, se presenta el esquema del sistema diseñado para analizar el comportamiento de los dos tipos de paneles solares, y medir su eficiencia en condiciones reales. Para la adquisición de datos se utilizó una tarjeta Arduino Mega, sensores de voltaje, corriente y temperatura. El sistema requiere de una etapa de acondicionamiento de señal para extrapolar los valores de voltaje que se generan, ya que, el sistema solo lee valores de 0 a 5 V. Por esta razón, se debe hacer un conversor proporcional de 0 a 24 voltios del panel para adecuarlo a la señal de Arduino. Los anteriores datos son mostrados en una pantalla LCD que está acoplada a un módulo de conexión fácil.

El hardware para la configuración del trazador de curvas de potencia está compuesto por una tarjeta Arduino

Leonardo (Artero, 2013), que posee un microcontrolador: ATmega2560 con voltaje operativo: 5V y voltaje de entrada: 7-12V; Sensor de temperatura LM35 para monitorear y comprobar la dependencia de la corriente del panel ante la temperatura generada por la irradiancia. Además, un sensor de corriente (El ACS712) de alterna como continua, que permite medir la intensidad eléctrica que atraviesa un conductor.

La entrada de voltaje se procesa mediante un divisor de 0-24V a 0-5V por entrada analógica al microcontrolador y luego por software de nuevo se convierte a 0 -24V. Así, con este dato de Voltaje y de Intensidad, fue posible estimar la potencia. También se usó un módulo SD que permite guardar información en una memoria extraíble, así como un módulo reloj RTC DS3231 que nos ayuda a mantener actualizada fecha y hora para el temporizador del microcontrolador.

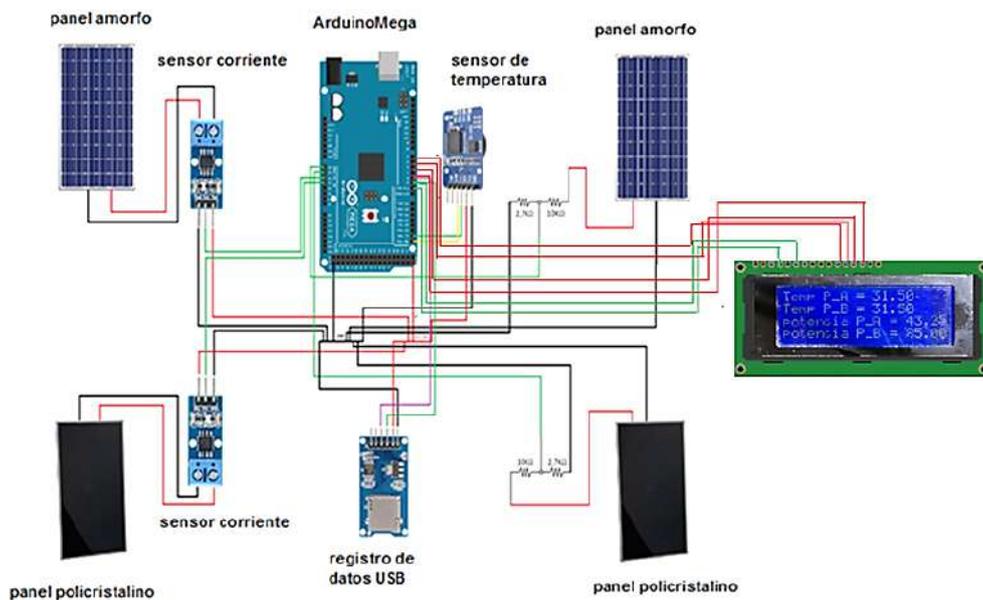


Figura 4. Prototipo esquemático de conexión Hardware, sensores y módulos Arduino.

Fuente: Elaborado por los autores.

Resultados

Irradiancia, Potencia, y Temperatura.

En las Figura 5 se muestra la medida de la irradiancia incidente y los picos solares diarios, y en la figura 6 se muestra la comparación entre paneles de la respuesta temporal a la potencia por cada uno de los paneles, y la figura 7 se presentan los resultados obtenidos por el prototipo

diseñado a la respuesta térmica dependiente de la irradiancia. En la primera de ellas, se observa la evolución de la irradiancia con respecto al tiempo, datos que son registrados en intervalos de tiempo coincidentes con las Hora Pico Solar (HPS) que para este caso se tomó $HPS = 4.5$ como promedio para el Cauca (IDEAM, 2020) que se ajusta al promedio de irradiancia en gráfica 1 columna 4 realizada durante los meses de agosto y septiembre de 2020.

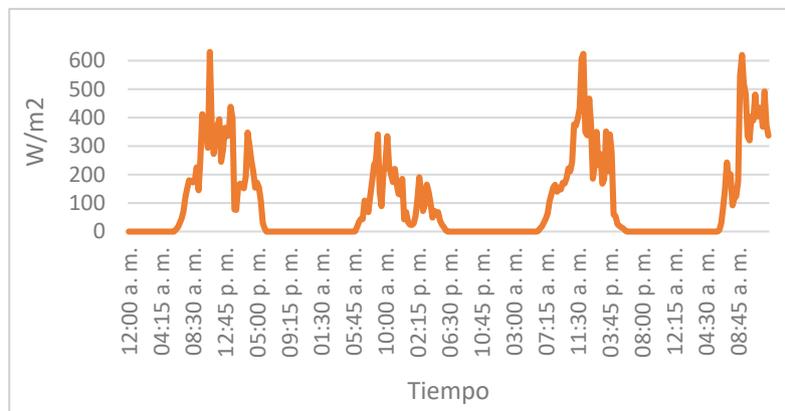


Figura 5. Medidas de la Irradiancia en HPS.

Fuente: Elaborado por los autores

En la Figura 6, se observa el cálculo de la potencia de los dos tipos de paneles, evidenciando que hay una relación directa entre la potencia de los paneles con la irradiancia. Es decir, en las HPS donde se presentan los mayores picos de irradiancia,

es donde mayor potencia entregan las dos tecnologías de paneles usados. No obstante, la potencia del panel Policristalino, es mayor en todo momento comparada con la del panel Amorfo.

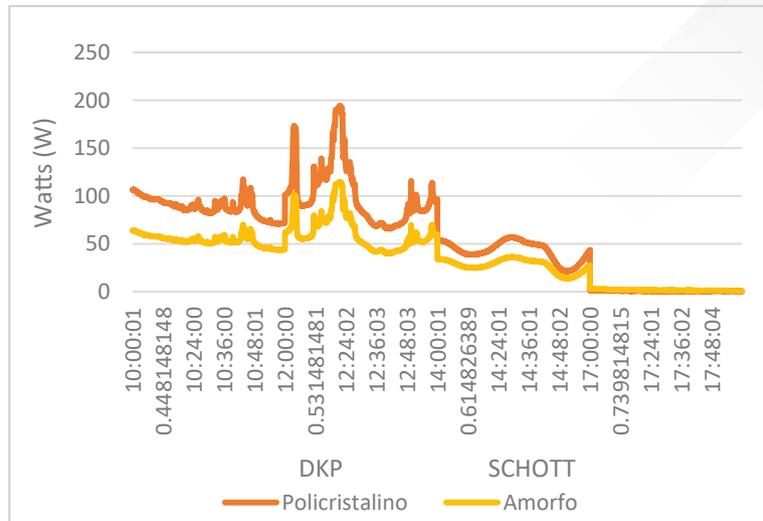


Figura 6. Estimación de la potencia de las dos tecnologías de paneles solares.

Fuente: Elaborado por los autores

En la Figura 7, se presenta la respuesta térmica de cada tecnología de paneles solares estudiados, donde se logró observar que el panel Amorfo presenta en general (a

lo largo del tiempo) una menor temperatura, ocasionando menores pérdidas de potencia, y menos cambios abruptos en la entrega de la misma (Figura 6).

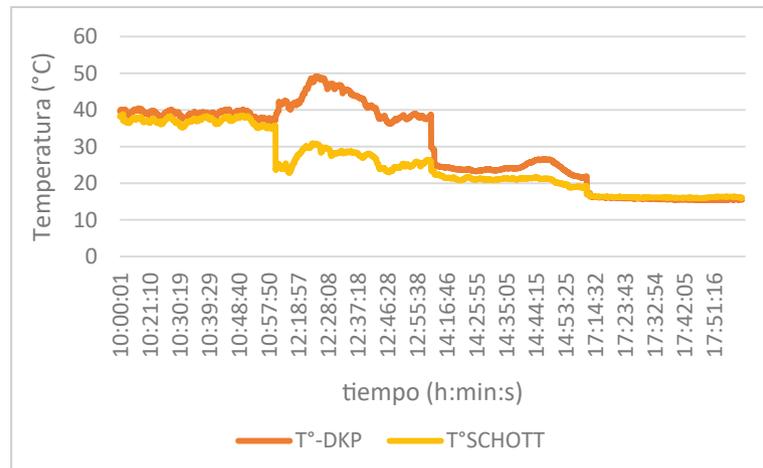


Figura 7. Respuesta térmica de cada panel solar.

Fuente: Elaborado por los autores.

Los resultados obtenidos para las variables de irradiancia, potencia, y temperatura (respuesta térmica de cada panel solar), en los intervalos de tiempo analizados, mostró que se ajustan a lo expuesto en la literatura (Flores Rivera & Ramírez Domínguez, n.d.; Izard, 2020; Pincay Lozada, 2017). En la tabla 1 se verifica la temperatura de la Tierra para cada mes del año que luego será comparada con la temperatura de operación de los paneles indicada en la ficha técnica de cada panel DEIKKO y SCHOTT que son $46 \pm 2^\circ\text{C}$ y 49°C respectivamente. Además, se verificó la incidencia que tiene la variable ambiental (irradiancia) en los datos medidos de potencia y temperatura.

Cálculo de Eficiencias y Energía Entregada por el Generador Fotovoltaico

- *Eficiencia o Rendimiento*

La eficiencia de conversión energética (η) o rendimiento de un panel solar, puede expresarse por la relación entre la potencia eléctrica entregada por la célula solar, y la potencia de la radiación que incide sobre ella (P_i). Con respecto a lo anterior, es importante estimar el valor teórico y práctico (ver (2) y (3))

$$\eta = \frac{FF * Voc * Isc}{G * \text{Área}} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{PM}{PL} = \frac{IM * VM}{PL} = \frac{FF * Isc * Voc}{PL} \quad (3)$$

Donde

η : eficiencia o rendimiento (%)

FF: factor de forma

G: nivel de radiación solar en la superficie del panel (W/m^2)

Voc: voltaje circuito abierto (V)

Isc: corriente de corto circuito (I)

Pm: potencia máxima (W)

Pl: potencia recibida por el panel (W)

A: área del panel (m^2)

Im: intensidad máxima de corriente (A)

Vm: tensión máxima (V)

Cálculos de eficiencia teórica

Panel Amorfo

$$\eta = \frac{0,6 * 24V * 6A}{1000W/m^2 * 1,44m^2} = 6 \%$$

Panel Policristalino

$$\eta = \frac{0,78 * 29,5V * 8,2A}{1000W/m^2 * 1,35m^2} = 13,2 \%$$

Cálculos de eficiencia práctica

Panel Amorfo

$$\eta = \frac{0,6 * 110W}{1000W/m^2 * 1,44m^2} = 4,8 \%$$

Panel Policristalino

$$\eta = \frac{0,78 * 190W}{1000W/m^2 * 1,35m^2} = 11 \%$$

Constatamos pues que la eficiencia del panel policristalino real es de 11 % y la eficiencia del panel amorfo es de 4,8 %

Los resultados de eficiencia obtenidos para cada panel solar son presentados en la Tabla 1. Constatando así, que los paneles policristalinos tienen una mayor eficiencia

tanto teórica como práctica en el contexto aplicado (etapa de beneficio de café, proceso de TECNICAFÉ, Cauca, Colombia).

Tabla 1: Cálculos de eficiencia teórica y práctica.

Panel	Eficiencia Teórica	Eficiencia Practica
Panel Amorfo (SCHOTT ASITM81)	6 %	4,8 %
Panel Policristalino (DKP175/23)	13,2 %	11 %

- *Energía generada por cada panel y por la instalación fotovoltaica*

Para que la instalación funcione correctamente se debe tener en cuenta el rendimiento del inversor, que según el catálogo es del 97,2 % y la potencia máxima del inversor es de 1600W. Para estimar la energía generada por cada panel se considera la siguiente expresión:

$$E_{\text{panel}} = I_{\text{panel}} * V_{\text{panel}} * \text{HPS} * 0,9 \text{ [Whd]} \quad (4)$$

E_{panel} : Energía generada por el panel

I_{panel} : corriente generada por el panel

V_{panel} : tensión generado por el panel

HPS: Hora Pico Solar

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en relación a la energía generada por cada una de las tecnologías de paneles solares analizados, observando que el panel policristalino genera un poco más del doble de energía que el panel Amorfo.

Tabla 2: Energía generada por cada panel

Características del panel	Panel Amorfo (SCHOTT ASI™81)	Panel Policristalino (DKP175/23)
Voc	24 V	29,5 V
Vmpp	19V	23,5 V
Isc	6 A	8,2 A
Impp	5,2 A	7,6 A
Energía generada por el panel	0,378 KWh	0,780 KWh

*Coeficiente de rendimiento del panel 0,9 (típicamente 85 – 90 % al descontar ya las pérdidas). La energía resultante es expresada en Whd.

Tensión de circuito abierto: Voc

Tensión máxima: Vmpp

Corriente de cortocircuito: Isc

Corriente máxima: Impp

De igual manera, y con el objetivo de analizar el comportamiento de las dos tecnologías en el contexto estudiado (etapa de beneficio de café, TECNICAFÉ), fue necesario estimar la energía generada por cada instalación fotovoltaica instalada. Inicialmente, es importante recordar, que la instalación fotovoltaica se compone de 30 paneles, de los cuales 10 son policristalinos conectados en serie y 20 de silicio amorfo, conectados en dos ramales de 10 paneles (la generación de potencia en una instalación

fotovoltaica depende de la configuración (Fernández Salgado, 2008)).

- *Policristalina serie*

$E_{\text{generadorFVS}}$: Energía del generador fotovoltaico serie

I_{gFVS} : Intensidad de corriente del generador fotovoltaico serie

V_{gFV} : Tensión o voltaje del generador fotovoltaico

$$E_{\text{generadorFVS}} = I_{\text{gFVS}} * V_{\text{gFVS}} * \text{HPS} * 0,9 \quad (5)$$

- *Amorfo paralelo*

$E_{\text{generadorFVP}}$: Energía del generador fotovoltaico paralelo

I_{gFVP} : Intensidad de corriente del generador fotovoltaico paralelo

V_{gFV} : Tensión o voltaje del generador fotovoltaico

$I_{\text{generadorFVP}}$: Corriente máxima de cada panel * Número de ramas en paralelo

$V_{\text{generadorFVP}}$: Tensión máxima de cada panel * Número de paneles en serie en cada rama

$$I_{\text{generadorFV}} = \text{Corriente máxima de cada panel} * \text{Número de ramas en paralelo} \quad (6)$$

La tabla 3 presenta los resultados obtenidos, sobre la energía generada por cada una de las instalaciones que se tienen en el sitio de estudio. Observando que en total toda la instalación produce aproximadamente 3,7 KWh, de los cuales 1,976 kWh están siendo generados por la instalación de paneles en paralelo (Amorfo), y los restantes 1,786 kWh son generados por la instalación en serie (paneles policristalinos).

Tabla 3. Energía producida por el generador fotovoltaico

Panel	IgFV	VgFV	EgFV
Panel Amorfo (SCHOTT ASITM81)	10,4 A	190 V	1,976 kWh
Panel Policristalino (DKP175/23)	7,6 A	235 V	1,786 kWh

En total se producen aproximadamente **3,7 KWh**

Discusión

El proceso tecnológico de construcción del prototipo comparador de curvas de potencia proporciona una herramienta de apoyo en primera instancia de caracterización y diseño la instalación fotovoltaica aplicada al campo de la industria cafetera y en segunda, de diagnóstico de eficiencia. En este estudio se cuantificó el suministro energético para el funcionamiento de un horno en el proceso de tostión del grano y que, basado en las mediciones, está en capacidad de reportar la eficiencia energética y llevar a la estimación del impacto ambiental y costo monetario de esta implementación.

El prototipo registró las señales de las variables físicas, obteniendo así las curvas de potencia/tiempo, temperatura, e irradiancia, insumos necesarios para estimar la eficiencia de cada panel solar. Igualmente, se evidenció que la placa Arduino base para el diseño del dispositivo comparador de curvas, es una herramienta versátil para ejecutar proyectos de baja exigencia a bajo costo. Sin embargo, si a futuro se requiere una mayor potencia de cálculo y robustez en proyectos más complejos, se tendría que recurrir a una herramienta como Raspberry Pi (Patnaik Patnaikuni, 2017).

Las gráficas obtenidas mostraron que los niveles de irradiancia incidente sobre los paneles determinan proporcionalmente la potencia generada por ellos (Flores Rivera & Ramírez Domínguez, n.d.). Para el estudio realizado se comprobó con dos tecnologías, paneles de lámina delgada y policristalino.

Además, la respuesta térmica de cada panel en la figura 7, evidenció el efecto negativo del calor sobre la potencia generada en las placas solares. Este efecto se compensa de mejor manera en el panel amorfo, el cual no registra variaciones o pérdidas de potencia considerables por los gradientes de temperatura. Lo anterior, se debe a las propiedades físicas del material (panel amorfo), que permite una mayor absorción de la radiación (Checa et al., 2015), también ofreciendo grandes ventajas con relación a los efectos ambientales no controlables, como por ejemplo, la velocidad del viento, masa de aire, humedad, nubosidad.

Con respecto al anterior análisis sobre la respuesta térmica de los paneles, fue posible establecer que en verano los niveles de radiación son altos, al igual que la temperatura, de esta manera la placa solar del panel tiene menos eficiencia instantánea debido a los efectos térmicos. Sin embargo, a lo largo del día (verano) la producción solar es mayor que en los días de invierno, así, tan solo se podrá desarrollar el mayor rendimiento y generación del campo solar instalado en días soleados de invierno donde la temperatura es baja con alta irradiancia (Baba et al., 2011).

La energía solar fotovoltaica, es una de las principales herramientas para promover el desarrollo sostenible en diferentes contextos, para ello en esta investigación fue pertinente hacer una valoración del impacto (aporte) ambiental y económico que ocasiona la instalación fotovoltaica en el contexto del proceso de beneficio de café.

Cálculo de la Energía Eléctrica Consumida por un Dispositivo Eléctrico (Motor Vinculado al Proceso de Beneficio de Café)

En el caso de estudio el sistema fotovoltaico está alimentando un motor eléctrico de 0,55 kW de potencia, con una velocidad de giro de 1500 rev/min a una tensión de 220 V y a 50 Hz de frecuencia, de esta manera, la energía consumida estimada es de 99 kWh/mes ($E_{\text{consumida}} = (\text{kW por cada aparato}) * (\text{cantidad}) * (\text{horas}) * (\text{días de uso})$). Según datos tomados de CELSIA (empresa generadora y comercializadora de energía en Colombia) para el año 2019 bajo las características de tipo de consumidor, el costo del kWh es cercano a \$590 COP (pesos colombianos). De esta manera, el costo económico por el consumo de energía eléctrica es equivalente a \$58.509 COP mensual.

Además, se ha sugerido a los tomadores de decisiones del sistema productivo de café, que no hay un aprovechamiento óptimo de la energía generada por la instalación fotovoltaica con que cuenta actualmente TECNICAFÉ, cuya capacidad de generación es de aproximadamente 3 kWh. Esta producción de electricidad equivale en dinero a \$318.600 COP, y representaría un ahorro anual de aproximadamente \$3.823.200 COP. (El anterior escenario se da, ya que actualmente la instalación fotovoltaica que se tiene, no está conectada constantemente al proceso de beneficio de café). También, se propuso una posible aplicación, en la luminaria en zonas de tránsito que tiene el Parque, ya que

hay un excedente energético desaprovechado el cual se traduce en pérdidas monetarias.

Cálculo del Impacto Ambiental y Económico

La implementación de sistemas APV (Agrofotovoltaicos) mejora el valor económico de la agricultura y puede contribuir a la electrificación descentralizada y fuera de la red en áreas rurales y en desarrollo, mejorando así aún más la productividad agrícola. Como tal, APV puede ser un enfoque técnico valioso para una agricultura más sostenible, ayudando a satisfacer las necesidades actuales y futuras de producción de energía y alimentos y al mismo tiempo ahorrando recursos de la tierra (Weselek et al., 2019).

La implementación de proyectos fotovoltaicos a nivel nacional como el desarrollado por EPSA, filial de Celsia, tiene una capacidad instalada equivalentes al consumo de 8 mil hogares, aspecto que reduce considerablemente la huella de carbono por la reducción en el uso de combustibles fósiles y su aporte energético, siendo este de interés para calcular el impacto ambiental. Además, la relación costo beneficio garantiza en la etapa de diseño establecer los requerimientos técnicos y márgenes de error.

La producción de CO₂ en Colombia tiene varios precursores, entre ellos, la variabilidad climática que propicia la ocurrencia de fenómenos climáticos de sequía o fenómenos de lluvia. Se puede observar que, durante fenómenos de El Niño, el indicador ha subido hasta 400 gCO₂/kWh, y durante los fenómenos de La Niña ha bajado hasta 50

gCO₂/kWh, aspecto que es mensurable y traducible en costo monetario (CEPAL, 2018).

De los diferentes indicadores definidos en los Modelos de Desarrollo Limpio – MDL, el correspondiente a las emisiones de dióxido de carbono (resultado de la producción de una unidad de energía eléctrica (kWh)), representa la huella que está dejando en el medio ambiente la generación de energía eléctrica para un país determinado (Camargo et al., 2013). Es así como a nivel mundial un número cada vez mayor de empresas (que le apuestan a una productiva sin conciencia ambiental) se preparan para un mundo con un costo más elevado de emisiones de CO₂ con costos para 2020 entre 40USD y 80USD por TonCO₂ (CEPAL, 2018).

Según datos del Parque Tecnológico, la generación de energía aportada por la instalación fotovoltaica es de 7.200 kWh/año (considerando la capacidad de generación de 3 kWh, 8 horas de trabajo al día, 25 días hábiles al mes, 12 meses). Bajo esta consideración, las emisiones de CO₂ que se estarían dejando de generar gracias a la instalación fotovoltaica, serían equivalentes a aproximadamente 0,9Ton al año.

$$\begin{aligned} \text{Emisiones de CO}_2 &= 7.200 \text{ kWh/año} * 120 \\ \text{g de CO}_2/\text{kWh} &= 864.000 \text{ g CO}_2 \text{ año} = \\ &0,9\text{TonCO}_2 \text{ año} \end{aligned}$$

El uso de energía renovables en el sector agroindustrial es una herramienta muy importante que promueve procesos de producción más limpia, disminución de emisiones de CO₂, y contribuye al desarrollo sostenible de este sector. Igualmente, contar con instrumentos que evalúen la eficiencia de sistemas fotovoltaicos de diferentes

tecnologías en el sector agrícola, permite optimizar el rendimiento en posibles instalaciones de paneles solares que se requieran.

Conclusiones

El desarrollo e implementación de un sistema comparador de curvas de potencia a través de la interfaz electrónica de adquisición de datos, permitió estimar y registrar la eficiencia de dos tecnologías de paneles solares, los policristalinos y los amorfos con los que se contaba en el parque solar. Estos datos obtenidos fueron comparados y validados frente a la literatura existente. Además, el prototipo logrado (de bajo costo), representa una gran ventaja y oportunidad en el contexto de la agroindustria. Esto por cuanto los sectores interesados en usar fuentes alternativas y limpias de energía (fotovoltaica), podrían contar con el sistema diseñado en esta investigación para optimizar el rendimiento de sus instalaciones de paneles solares.

La tendencia en el comportamiento de los paneles en respuesta a la irradiancia, donde la eficiencia o rendimiento individual del panel policristalino reporta 0,780KWhd, siendo mayor que el de lámina delgada con 0,378KWhd (Gráfica 5), valores que permitieron comprobar mediante la revisión de literatura el cumplimiento de dichas premisas donde se demuestra que el rendimiento del sistema depende de la irradiancia incidente. Los datos de irradiancias aportadas por la estación meteorológica afirman la dependencia y proporcionalidad de los paneles con las

variaciones de temperatura. También se identifica en comparación de la gráfica 7 y la tabla 1, que la temperatura superficial del panel supera en más de un 50% la temperatura ambiente, además en la tabla se identifica la dependencia de variables de datos climatológicos como temperatura ambiente, radiación solar, velocidad del viento, entre otras, que influyen en el rendimiento del panel (Torres, 2020).

La instalación fotovoltaica mixta donde el arreglo de paneles policristalinos es en serie reporta 1,786 kWhd y el arreglo de paneles amorfos es en paralelo reporta 1,986 kWhd, dado que el sistema paralelo requiere más paneles fotovoltaicos para lograr dicha potencia, además se comprueba el dato teórico de la energía del generador es equivalente al calculado mediante los datos recolectados, 3 kWh/día. Sin embargo, esta instalación puede generar más energía dependiendo de la disposición de los paneles y el requerimiento. Como hallazgo se conoció que la energía generada por el campo fotovoltaico ubicado en Tecnicafé genera un ahorro en emisiones equivalentes a 0,9 TonCO₂.

Basado en esta experiencia se perfilan aplicaciones en prototipado en diferentes campos de la producción agrícola industrial como monitoreo de variables físicas usadas ampliamente a nivel agrícola como la humedad, acidez, nivel o de impacto ambiental como emisiones de gas o caudal, entre otras, que, apoyadas por el suministro energético alternativo proporcionado por una estación fotovoltaica, generan sostenibilidad empresarial e impacto ambiental positivo. La implementación de sistemas

agrofotovoltaicos supone la realización de estudios de caso multidisciplinario donde se favorece la producción de energía fotovoltaica para producción de alimentos, además reviste gran potencial como sistemas de energía renovable coproductivo y eficiente en áreas terrestres limitadas. Lo anterior, propicia condiciones que permiten reducir los costos de operación, independencia energética y calidad de vida.

Referencias

- Akikur, R. K., Saidur, R., Ping, H. W., & Ullah, K. R. (2013). Comparative study of stand-alone and hybrid solar energy systems suitable for off-grid rural electrification: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 738–752.
- Antúnez, A., Martínez, M., & Schmidt, R. (2016). *Aplicaciones de energía solar fotovoltaica en la agricultura de zonas áridas*.
- Artero, Ó. T. (2013). *Arduino. Curso práctico de formación*. RC libros.
- Baba, A., Aoki, N., Shinbo, K., Kato, K., & Kaneko, F. (2011). Grating-coupled surface plasmon enhanced short-circuit current in organic thin-film photovoltaic cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 3(6), 2080–2084.
- Bitar, S. (CEPAL). (2014). *Las tendencias mundiales y el futuro de América Latina* (Vol. 78). <https://doi.org/ISSN1680-8827>

- Camargo, L. A., Arboleda, M. N., & Cardona, E. (2013). Producción de energía limpia en Colombia, la base para un crecimiento sostenible. *Boletín Virtual XM. Compañía Expertos En Mercados, Filial de ISA, Colombia*.
- CEPAL, N. U. (2018). *Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. CEPAL.
- Checa, F. J. E., de la Cruz, O. F. E., & Rosero, E. E. (2015). Study of the relationship between irradiance and power generated by PV panels based on different silicon technologies in the city of Pasto. *2015 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*, 1–6.
- Conti, J., Holtberg, P., Diefenderfer, J., LaRose, A., Turnure, J. T., & Westfall, L. (2016). *International energy outlook 2016 with projections to 2040*. USDOE Energy Information Administration (EIA), Washington, DC (United States
- Corrales, D. C., Ledezma, A., Peña, A. J., Hoyos, J., Figueroa, A., & Corrales, J. C. (2014). A new dataset for coffee rust detection in Colombian crops base on classifiers. *Sistemas & Telemática*, 12, 9–23.
- Cossu, M., Yano, A., Solinas, S., Deligios, P. A., Tilocca, M. T., Cossu, A., & Ledda, L. (2020). Agricultural sustainability estimation of the European photovoltaic greenhouses. *European Journal of Agronomy*, 118, 126074.
- Fernández Salgado, J. M. (2008). *Compendio de energía solar: Fotovoltaica, Térmica y Termoeléctrica*.
- Flores Rivera, N. R., & Ramírez Domínguez, M. Á. (n.d.). “Medición de la eficiencia energética de los paneles solares de silicio.””
- Gao, Y., Dong, J., Isabella, O., Santbergen, R., Tan, H., Zeman, M., & Zhang, G. (2019). Modeling and analyses of energy performances of photovoltaic greenhouses with sun-tracking functionality. *Applied Energy*, 233, 424–442.
- Ghasemi-Mobtaker, H., Mostashari-Rad, F., Saber, Z., Chau, K., & Nabavi-Pelesaraei, A. (2020). Application of photovoltaic system to modify energy use, environmental damages and cumulative exergy demand of two irrigation systems—A case study: Barley production of Iran. *Renewable Energy*, 160, 1316–1334.
- Gutiérrez, C., Carreño, G., Morón, A., Tobón, Y., & López, G. (2018). Energía solar fotovoltaica en la Isla de San Andrés, Colombia Propuesta para viviendas unifamiliares. *Letras Con* Ciencia Tecno* Lógica*, 48–53.
- Guzmán Niño, C. A. (2017). *Análisis del impacto ambiental de diferentes tipos de paneles solares según los materiales utilizados y los componentes tóxicos generados*. Fundación Universidad de América.
- Hoyos García, J. (2018). *Diseño de una estrategia para la implementación de*

un clúster de cafés de alta calidad, en el corregimiento la venta de Cajibío-Cauca-Colombia.

- Izard, M. G. (2020). *Diseño e implementación de un sistema de energía solar fotovoltaica aplicado a un tostador de café*. UPM.
- Krauter, S. K., & Enciso, E. A. L. (2003). La agricultura en Colombia entre 1950 y 2000. *Revista Del Banco de La República*, 76(912), 11–68.
- Manrique, R., Vásquez, D., Chejne, F., & Pinzón, A. (2020). Energy analysis of a proposed hybrid solar–biomass coffee bean drying system. *Energy*, 202, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117720>
- Martínez, G. A. L., Moreno, F. G., & Fierro, J. B. (2013). Modelo a escala de un sistema de riego automatizado, alimentado con energía solar fotovoltaica: nueva perspectiva para el desarrollo agroindustrial colombiano. *Tecnura*, 17, 33–47.
- MOSTAVAN, A. (1990). EXPERIENCES IN ENCOURAGING THE USE OF SOLAR PHOTOVOLTAICS IN INDONESIA. In *Energy and the Environment* (pp. 575–578). Elsevier.
- Mousa, O. B., Taylor, R. A., & Shirazi, A. (2019). Multi-objective optimization of solar photovoltaic and solar thermal collectors for industrial rooftop applications. *Energy Conversion and Management*, 195, 392–408.
- Necaibia, A., Bouraiou, A., Ziane, A., Sahouane, N., Hassani, S., Mostefaoui, M., Dabou, R., & Mouhadjer, S. (2018). Analytical assessment of the outdoor performance and efficiency of grid-tied photovoltaic systems under hot dry climate in the south of Algeria. *Energy Conversion and Management*, 171, 778–786.
- Oh, M., Kim, S.-M., & Park, H.-D. (2020). Estimation of photovoltaic potential of solar bus in an urban area: Case study in Gwanak, Seoul, Korea. *Renewable Energy*, 160, 1335–1348.
- Pareja Aparicio, M. (2010). *Energía solar fotovoltaica: Cálculo de una instalación aislada* (Issue 621.31244 P227e). Marcombo Ed.,.
- Patnaik Patnaikuni, D. R. (2017). A Comparative Study of Arduino, Raspberry Pi and ESP8266 as IoT Development Board. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 8(5).
- Pincay Lozada, J. L. (2017). *Análisis experimental de la relación de la temperatura de operación de un módulo fotovoltaico y su voltaje de circuito abierto*. Universidad Autónoma de Occidente.
- Rodríguez-Ortega, T., Bernués, A., Olaizola, A. M., & Brown, M. T. (2017). Does intensification result in higher efficiency and sustainability? An energy analysis of Mediterranean sheep-crop farming systems. *Journal of Cleaner Production*, 144,

- 171–179. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.089>
- Rodríguez, C. M., Rodas, C. F. R., Muñoz, J. C. C., & Casas, A. F. (2019). A multi-criteria approach for comparison of environmental assessment methods in the analysis of the energy efficiency in agricultural production systems. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1464–1471. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.388>
- Rodríguez, J. P., Corrales, D. C., Aubertot, J.-N., & Corrales, C. (2020). A computer vision system for automatic cherry beans detection on coffee trees. *Pattern Recognition Letters*.
- Salas, O. N., García, R. A. P., & Padilla, J. E. V. (2018). La eficiencia de los nuevos materiales fotosensibles usados en la fabricación de paneles solares. *ITECKNE: Innovación e Investigación En Ingeniería*, 15(1), 7–16.
- Thinsurat, K., Bao, H., Ma, Z., & Roskilly, A. P. (2019). Performance study of solar photovoltaic-thermal collector for domestic hot water use and thermochemical sorption seasonal storage. *Energy Conversion and Management*, 180, 1068–1084.
- Valderrama, J. J. G., Yara, O. D. C., & Ballesteros, M. J. E. (2016). Sistema de Refrigeración Autónomo Alimentado con Energía Solar. *Revista Sennova: Revista Del Sistema De Ciencia, Tecnología E Innovación*, 2(2), 94–109.
- Wang, Q., Ma, Z., Ma, Q., Liu, M., Yuan, X., Mu, R., Zuo, J., Zhang, J., & Wang, S. (2019). Comprehensive evaluation and optimization of the agricultural system: An emergy approach. *Ecological Indicators*, 107(August), 105650. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105650>
- Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Högy, P. (2019). Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(4), 35.
- Xiao, J. (2018). *Technoeconomic analysis of perovskite photovoltaic manufacturing for powering telecommunications Towers*. Massachusetts Institute of Technology.
- Xue, J. (2017). Photovoltaic agriculture—New opportunity for photovoltaic applications in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1–9.
- York, R., & Bell, S. E. (2019). Energy transitions or additions?: Why a transition from fossil fuels requires more than the growth of renewable energy. *Energy Research & Social Science*, 51, 40–43.