

# Metodología para la implementación de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento para pequeñas industrias

## Methodology for the implementation of photovoltaic systems with storage for small industries

Carlos Alberto Bolaños-Jiménez<sup>1</sup>, Gustavo Gómez-Ramírez<sup>2</sup>

---

*Fecha de recepción: 6 de agosto, 2021*

*Fecha de aprobación: 21 de marzo, 2022*

Bolaños-Jiménez, C.A., Gómez-Ramírez, G. Metodología para la implementación de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento para pequeñas industrias. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 1. Enero-Marzo, 2023. Pág. 18-32.


 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.5843>

1 Estudiante de Maestría en Administración de la Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

Correo electrónico: [carlosbj@selnetcr.com](mailto:carlosbj@selnetcr.com)

 <https://orcid.org/0000-0002-4934-5101>

2 Profesor Escuela de Electromecánica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: [ggomez@itcr.ac.cr](mailto:ggomez@itcr.ac.cr)

 <https://orcid.org/0000-0001-9195-072X>

## Palabras clave

Energía renovable; sistema fotovoltaico; panel solar; seguidor solar.

## Resumen

Hoy día los sistemas de generación renovables no convencionales a pequeña escala empiezan a tomar fuerza dentro de los sistemas eléctricos de potencia. La generación para autoconsumo puede beneficiar las pequeñas y medianas empresas a fin de volverlas más competitivas y atractivas hacia los clientes. Sistemas eólicos en pequeña escala, así como las instalaciones de sistemas solares son un ejemplo de cómo se ha masificado la tecnología, de manera que contar con un procedimiento explícito, simple y confiable para la implementación de sistemas renovables sería de gran utilidad. Este artículo presenta un procedimiento paso a paso a cerca de la implementación de sistemas fotovoltaicos en pequeñas industrias donde propone un diseño de una instalación incluyendo un análisis económico. Se toman en cuenta los sistemas de almacenamiento de energía. Los beneficios económicos y ambientales son cuantiosos, donde se demuestra una alta viabilidad de implementación de este tipo de aplicaciones en pequeñas industrias. Se logró concluir que la implementación de un sistema solar fotovoltaico en una pequeña empresa permite reducciones de costos de electricidad mayores al 90% con una pronta recuperación de la inversión.

## Keywords

Renewable energy; photovoltaic system; solar panel; solar tracker.

## Abstract

Today, small-scale non-conventional renewable generation systems are beginning to gain strength within electrical power systems. Generation for self-consumption can benefit small and medium-sized companies in order to make them more competitive and attractive to customers. Small-scale wind systems, as well as solar system installations, are an example of how technology has become widespread, so having an explicit, simple and reliable procedure for the implementation of renewable systems would be very useful. This article presents a step-by-step procedure about the implementation of photovoltaic systems in small industries where it proposes a design of an installation including an economic analysis. Energy storage systems are taken into account. The economic and environmental benefits are considerable, where a high viability of implementation of this type of applications in small industries is demonstrated. It was concluded that the implementation of a photovoltaic solar system in a small company allows reductions in electricity costs greater than 90% with a prompt recovery of the investment.

## Introducción

En muchos países, el comportamiento de los costos de la electricidad, en los últimos años, ha estado tendiendo al alza. Esta predisposición obliga a las organizaciones a la búsqueda de nuevas fuentes de energía que posibiliten la continuidad del negocio [1]. Además, el aumento de la temperatura global, producto de los gases de efecto invernadero, está provocando efectos negativos los cuales terminan afectando el diario vivir de las personas. Estos generan largos períodos de sequía que afectan las reservas de agua, las cuales son utilizadas en muchos casos para la producción de energía eléctrica. Por lo tanto, se pronostica una tendencia al alza en los costos de la electricidad [2] en el caso de los países que exista una fuerte dependencia de la generación de electricidad por fuente hidráulicas.

Una alternativa es la utilización de fuentes de energía no convencionales como las fuentes eólicas y fotovoltaicas, a fin de aumentar la variabilidad en la utilización de fuentes de generación. Los sistemas eólicos están compuestos de una turbina que aprovecha la energía del viento para generar electricidad por medio de un generador acoplado al sistema de potencia. Por otro lado, los sistemas fotovoltaicos están compuestos principalmente por: paneles solares, regulador, inversor, acumulador, centro de carga y medidor bidireccional. Su funcionamiento es posible gracias a los paneles solares, donde gracias al efecto fotoeléctrico, la energía solar se transforma en energía eléctrica de corriente continua, y luego convertida en corriente alterna para un uso regular [3]. Los sistemas fotovoltaicos posibilitan el aprovechamiento de la energía solar, una fuente renovable e inagotable, logrando ahorrar en la factura eléctrica desde un 80% en adelante según el consumo mensual [4], [5].

Uno de los tipos de sistema son los llamados conectados a la red (On-Grid), los cuales tienen la particularidad que se unen en un punto a la red eléctrica pública del proveedor de servicio. Esto con el fin de reinyectar a la red el excedente de energía generado, para posteriormente ser utilizado cuando no haya generación solar [6].

Para el año 2013, los análisis de factibilidad para el uso de paneles solares en generación fotovoltaica de electricidad no lograban obtener tasas de retorno atractivas debido a los altos costos de los equipos [7], [8]. Sin embargo, para el año 2014 la tecnología de celdas solares muestra signos de progresos en aspectos como la eficiencia, estabilidad y la comercialización [9]. Durante el 2016, organizaciones de renombre aseguran que la industria solar fotovoltaica es la energía renovable con más generación de empleos, y que además es uno de los factores que más colaborarán ante la problemática del cambio climático. También, reafirman que, en los años venideros, gracias a los avances en la investigación de la tecnología, se espera que el costo de los paneles solares disminuiría hasta en un 59% [10].

Incluso en el 2017, existen estudios de factibilidad para proyectos de autogeneración fotovoltaica con rentabilidades no atractivas para los inversionistas [11]. En los años posteriores, el desarrollo de la tecnología, cómo es el caso del posicionamiento de las células solares en cascada, celdas bifaciales, paneles nocturnos, están contribuyendo en aumentar la eficiencia y reducción de los costos [12], [13], [14]. Tal es el caso durante el 2020, donde un equipo científico logra un récord mundial de conversión de energía solar a electricidad mediante el uso de nano partículas en la que se tienen resultados con eficiencias cercanas al 25% a bajo costo [15], [16], [17].

Ante este panorama es importante tener criterios para la utilización de estos sistemas ya que hoy día es posible combinarlos con sistemas de almacenamiento [18] y, de esta manera, maximizar su uso y aplicabilidad, por lo tanto, el uso de los sistemas fotovoltaicos podrá reducir los costos en la electricidad y de esta forma, lograr hacer un manejo eficiente de la energía eléctrica [19]. Es importante mencionar que la tendencia a futuro será hacer más distribuida la generación de electricidad y por lo tanto menos concentrada, a diferencia de los esquemas tradicionales de generación [20].

Primeramente, se expone el procedimiento a seguir para el análisis de un sistema fotovoltaico [21], [22]. Seguidamente se presenta un caso de estudio de una pequeña industria ubicada en Costa Rica al cuál se le aplica la metodología propuesta. El potencial solar teórico del país es de 10000 MWh, de los cuáles al 2018 el país contaba con 27 MWh instalados. Representando esto un 0.27% de aprovechamiento total, se detecta el gran potencial proveniente de la energía solar disponible en la zona [2], [23]. La región de Centroamérica y en particular Costa Rica presentan grandes condiciones para la utilización de sistema fotovoltaicos [18] de pequeña, mediana y gran escala.

Se trata de una pequeña industria con un consumo promedio de 5135 kWh mensuales. La aplicación de la metodología arroja un requerimiento fotovoltaico de 42.12 kW pico a instalar, para un costo total del proyecto de USD \$39,747.00.

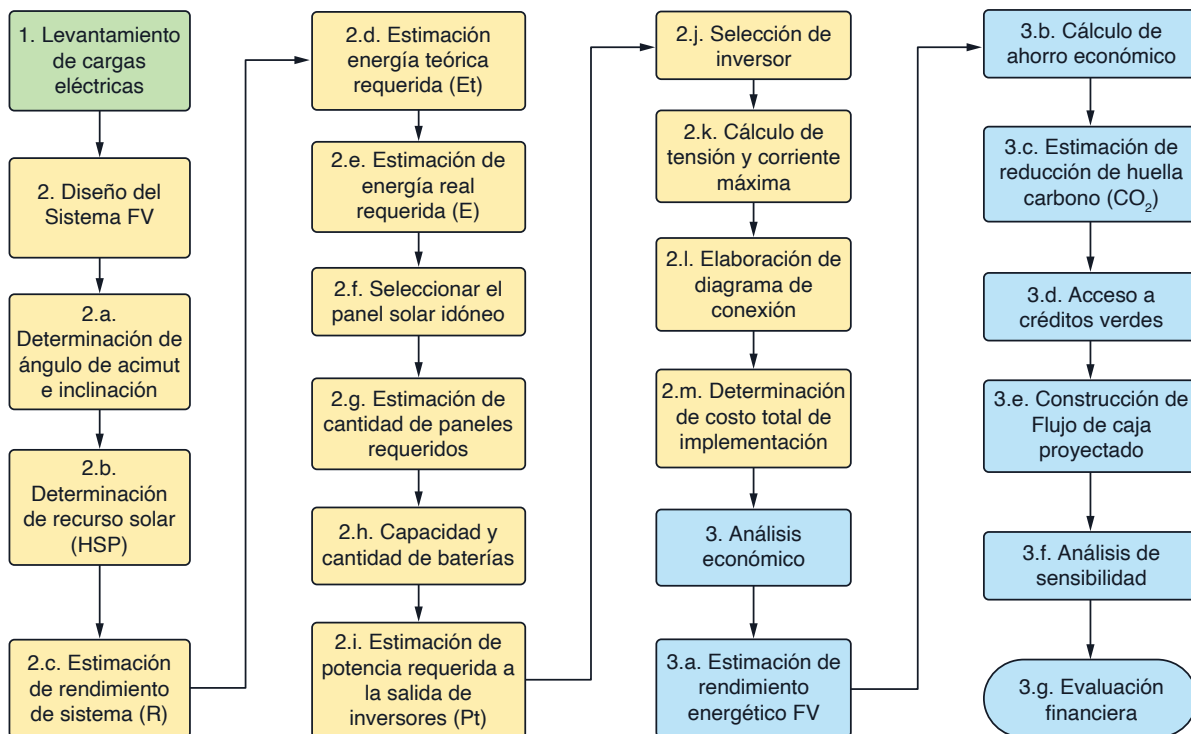
Finalmente, se logra comprobar la factibilidad técnica y financiera para el caso de estudio, mediante un ahorro en la factura eléctrica mensual de un 90% con periodos de recuperación entre 5 y 9 años, con una reducción de la huella de carbono en 3.43 toneladas de  $CO_2$  equivalentes anuales.

## Metodología

En la presente sección se muestra el desarrollo de la metodología para análisis de cargas, diseño, selección de equipos, posterior cálculo de rendimiento energético y análisis económico de un sistema fotovoltaico para una pequeña empresa [24]. El paso a paso se muestra en la figura 1 y se explica a continuación [25]:

### Levantamiento de cargas eléctricas

Primeramente, se procede a recolectar los datos de consumo eléctrico mensual. Un periodo de al menos 12 a 18 meses es suficiente para obtener resultados certeros con la información proporcionada por la compañía eléctrica [26]. Sin embargo, si se tiene una medición constante y por lo tanto un historial de consumos, se puede recurrir a la minería de datos para definir perfiles de las cargas instaladas.



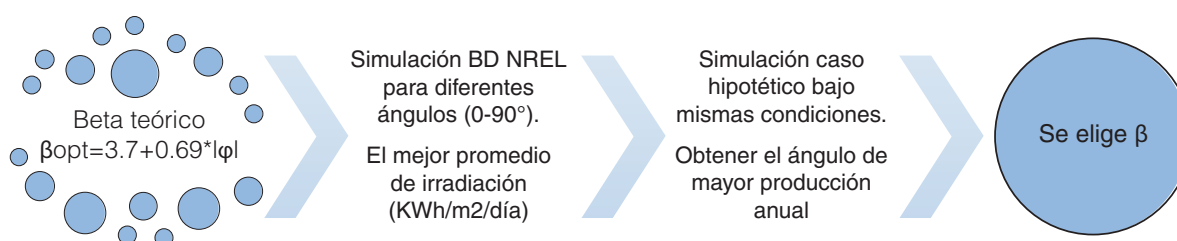
**Figura 1.** Esquema de metodología en la implementación de sistema fotovoltaico.

Aspectos operativos iniciales se deben de tomar en cuenta pues la identificación las coordenadas geográficas del sitio en cuestión son muy importantes de establecer para determinar el potencial de generación del sistema fotovoltaico. Del mismo modo, las condiciones del lugar a instalar los paneles deben ser tomados en cuenta.

## Diseño del sistema fotovoltaico

### Ángulo de acimut e inclinación

Dependiendo de la ubicación geográfica de la instalación se debe calcular el ángulo acimut óptimo. En el caso del ángulo de inclinación, se propone el siguiente el procedimiento mostrado en la figura 2 para determinar su valor óptimo.



**Figura 2.** Procedimiento para determinación del ángulo de inclinación óptimo beta ( $\beta$ ).

### Recurso solar

La determinación del recurso solar específico para el sitio elegido se definió mediante la investigación de bases de datos de NREL (siglas en inglés de N...) y la NASA (siglas en inglés de...) [27], [28]. El valor elegido de irradiación solar fue el promedio de ambas fuentes y se denota con las siglas  $G_{dm}$ . Se calcula mediante la ecuación 1, siendo  $G_{dm}$  la irradiación global diaria promedio.

$$HSP = \frac{G_{dm} \left[ \frac{Wh}{m^2/día} \right]}{1000 [W/m^2]} \quad (1)$$

### Estimación del rendimiento del sistema

Se utilizó como referencia el método recomendado por Vega et al. [25]. El primer paso fue obtener el rendimiento del sistema ( $R$ ), mediante la ecuación 2.

$$R = (1 - k_b - k_c - k_v) * \left( 1 - \frac{K_a * N}{P_d} \right) \quad (2)$$

Donde:

- $k_b$ : coeficiente de pérdidas debidas al rendimiento del acumulador. Se elige 0 porque el sistema no posee acumulador de energía. Un valor de 0.05 en sistemas que no producen descargas profundas y uno de 0.1 en caso de que los sistemas se diseñen con descargas profundas.

- $k_c$ : coeficiente de pérdidas del inversor. Se elige 0,05 por cuanto se trata de un inversor de onda sinusoidal pura con 96% de eficiencia. Un valor de 0.05 para inversor de salida sinusoidal pura en condiciones óptimas de operación y otro de 0.1 para condiciones de trabajo alejadas.
- $k_v$ : coeficiente de pérdidas varias. Se elige 0.1 contemplando pérdidas atmosféricas, de cableado, sombreado, suciedad, tolerancia de paneles, temperatura por lo que este valor debe estar en el siguiente rango:  $0.05 < k_v < 0.15$
- $K_a$ : coeficiente de auto descarga diaria de las baterías. Se elige 0, porque el sistema no posee acumulador de energía. Un valor de 0.002 para una batería de baja auto descarga (Ni-Cd), un valor de 0.005 para baterías de plomo-ácido y uno de 0.13 para batería de alta auto descarga (SLI).
- $N$ : días de autonomía de la instalación. Se elige 0 días de autonomía, porque el sistema no requiere operar con energía almacenada.
- $P_d$ : profundidad de descarga  $\leq 100\%$ . Se elige 100% puesto que el sistema no tiene pérdidas por almacenamiento de energía.

#### *Estimación energía teórica requerida ( $E_T$ )*

A partir del consumo de energía eléctrico promedio mensual, se obtiene la energía teórica requerida, dividiendo entre 30 días,  $E_T$  [kWh].

#### *Estimación de energía real requerida ( $E$ )*

mediante la ecuación 3 se calcula la energía requerida real diaria ( $E$ ).

$$E = \frac{E_T[\text{kWh/día}]}{R} \quad (3)$$

#### *Selección del panel solar idóneo*

Seguidamente, se debe seleccionar el panel solar que mejor se adecue a las condiciones técnicas y financieras. Se realiza un análisis de algunos paneles solares disponibles en la actualidad, de manera que se elige el que tenga la mejor relación costo/calidad.

#### *Estimación de cantidad de paneles requeridos*

Luego, se procede a estimar la cantidad de paneles solares necesarios ( $N_p$ ). Siendo  $W_p$  la potencia del panel elegido, HPS la hora solar pico.

$$N_p = \frac{E}{0.9 * W_p * HPS} \quad (4)$$

Se aumenta la cantidad de paneles al inmediato número par superior, para una correcta distribución en cada inversor. Con la cantidad de paneles calculada, se determina el área efectiva requerida en techos, mediante la multiplicación del área del panel elegido por la cantidad de paneles requeridos.

### *Capacidad y requerimiento de almacenamiento*

Se debe elegir la tensión del sistema entre 12VDC, 24VDC o 48VDC, según los siguientes criterios:

- De 1 a 2000 Wh de consumo diario, se recomienda hacer el sistema a 12VDC.
- De 2001 a 4000 Wh de consumo diario, se recomienda hacer el sistema a 24VDC.
- De 4001 Wh en adelante, se recomienda hacer el sistema a 48VDC.

El parámetro de la batería Ah/día se calcula de la siguiente manera:

$$C = \frac{E[\text{kWh/día}] * N[\text{días}]}{V_b[\text{V}] * P_d[\%]} [\text{Ah}] \quad (5)$$

Donde,

$E$ : energía real requerida.

$N$ : número de días de autonomía.

$V_b$ : tensión del banco de baterías.

$P_d$ : profundidad de descarga.

Seguidamente se calcula la cantidad de unidades requeridas:

$$N_o \text{ Baterías} = \frac{C[\text{Ah}]}{C_{\text{batería}}[\text{Ah}]} \quad (6)$$

De acuerdo con [29], la tecnología de almacenamiento de ion de litio representa en la actualidad, la opción de mayor atractivo financiero.

### *Estimación de potencia requerida a la salida de inversores ( $P_I$ )*

Mediante la ecuación 7 se calcula la potencia total requerida a la salida de los inversores ( $P_I$ ).

$$P_I = \frac{E_T[\text{kWh/día}]}{HSP [\text{h/día}]} [\text{kW}] \quad (7)$$

### *Selección de inversor*

Con el dato anterior y las condiciones eléctricas necesarias, se elige un inversor disponible en el mercado actual con la mejor relación costo/eficiencia.

### *Cálculo de tensión y corriente máxima*

La tensión máxima de un sistema fotovoltaico en la salida de corriente directa se calculó mediante la suma de la tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) de los módulos fotovoltaicos conectados en serie, multiplicada por un factor de corrección según la temperatura ambiente más baja esperada. Este valor se calculó con el objetivo de determinar la tensión nominal de los cables, desconectores, dispositivos de protección contra sobre corriente y otros equipos, así como los factores de corrección por temperatura en conductores entre otros [30].

Con respecto a la corriente máxima, se tiene que su valor máximo se calcula mediante la suma de las corrientes nominales de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo, y multiplicado por el 125%. Para el caso del valor nominal ( $I_{nom}$ ) de los dispositivos contra sobre-corrientes, se calculará mediante la multiplicación de la corriente máxima por el 125%. Seguidamente, se calcula mediante la ecuación 8 y 9 la cantidad mínima y máxima de paneles a conectar, para que el inversor opere de manera óptima. Donde  $V_{mp}$  es la tensión a máxima potencia del panel.

$$\text{máxima cantidad de Paneles}_{serie} = \frac{\text{Rango de tensión superior [V]}}{V_{mp}[V]} \quad (8)$$

$$\text{mínima cantidad de Paneles}_{serie} = \frac{\text{Rango de tensión inferior [V]}}{V_{mp}[V]} \quad (9)$$

La tensión máxima se calcula mediante la ecuación 10 y 11.

$$V_{max} = V_{OC \text{ arreglo}} * \text{factor de corrección} \quad (10)$$

$$V_{OC \text{ arreglo}} = V_{OC \text{ Panel}} * \text{cantidad de Paneles}_{serie} \quad (11)$$

Para la corriente máxima se utiliza la ecuación 12.

$$I_{max} = I_{sc}(A) * 1.25 \quad (12)$$

Además, mediante la ecuación 13 se calcula la corriente nominal para la determinación de las protecciones por sobre corriente,

$$I_{nom} = I_{max}(A) * 1.25 \quad (13)$$

#### *Elaboración de diagrama de conexión*

En este punto, ya se conocen todos los elementos que conforman el sistema, por lo tanto, se procede a diagramar el conexionado del mismo.

#### *Determinación de costo total de implementación*

Además, se define el costo de la implementación de este con referencias del mercado local. Se recomienda esto último para subsanar el tema de garantías.

### **Análisis económico**

#### *Rendimiento energético estimado*

Posterior al diseño del sistema, se procede, mediante una simulación, a la estimación de la producción de energía eléctrica del sistema fotovoltaico.



### *Análisis de ahorro*

Para tasar el ahorro anual al implementar el proyecto, se simula la puesta en marcha de la solución y se compara mediante una tabla, los costos anuales actuales vs los costos con el sistema FV.

### *Estimación de reducción de huella carbono*

Se calcula el  $CO_2$  equivalente evitado en toneladas al año. Este último se calcula mediante la ecuación 12. Donde el factor se obtiene de [31].

$$CO_2[TON] = \frac{\text{Consumo anual eléctrico evitado [kWh]} * \text{Factor de emisión (Kg de } CO_2 \text{ eq/kWh)}}{1000} \quad (12)$$

### *Acceso a Financiamiento mediante créditos verdes*

Mediante la magnitud calculada anterior, se realiza una revisión de los tipos de créditos disponibles según el área de ejecución. Donde se elige aquella que represente mayor atractivo económico.

### *Construcción de Flujo de caja proyectado*

En este punto ya se cuenta con información suficiente para proyectar un flujo de caja financiero del proyecto. Se elige un plazo de años según sea la menor garantía de los elementos que conforman el sistema.

### *Análisis de sensibilidad*

Opcionalmente se recomienda elaborar un estudio de sensibilidad el cual permita visualizar el comportamiento del sistema en casos hipotéticos que sean de interés para el lugar del emplazamiento.

### *Evaluación financiera*

Finalmente, se eligen y calculan los criterios económicos determinantes para la toma de decisiones, según criterios establecidos por la organización.

## **Caso de estudio**

La aplicación de la metodología propuesta se aplica en una pequeña industria ubicada en Costa Rica.

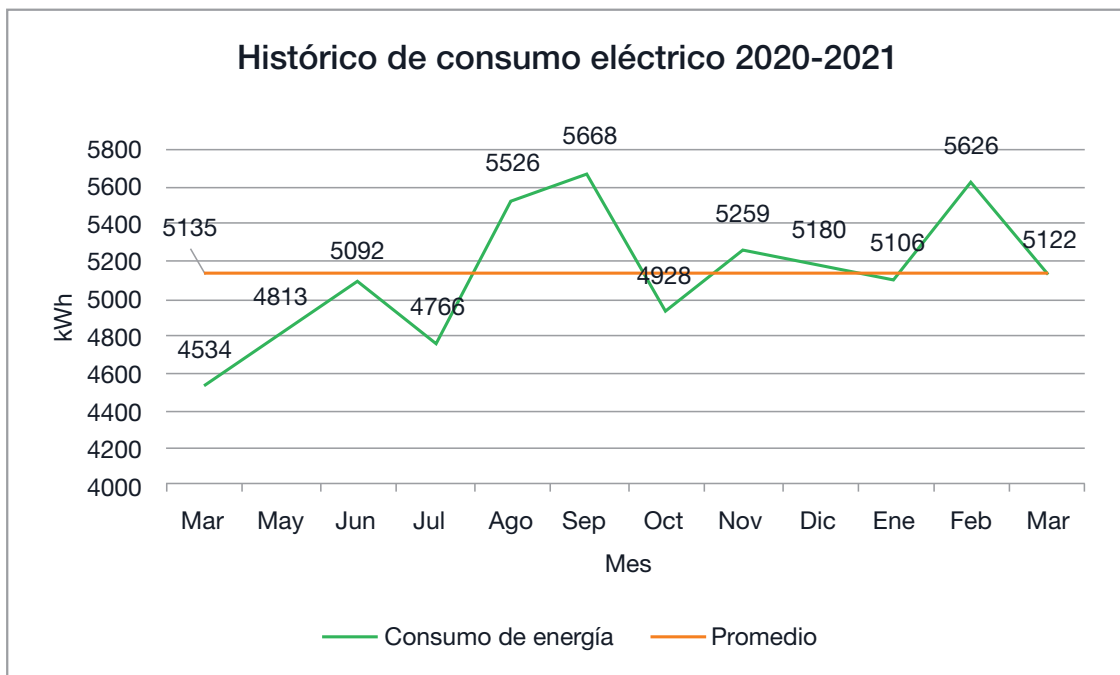
La empresa cuenta con un área de 500 metros cuadrados de construcción, y una tensión monofásica de alimentación en 120/240 VAC. Asimismo, con un área de 370 m<sup>2</sup> de área efectiva disponible para la instalación de paneles solares. El sistema fotovoltaico estimado requerirá 200 mts (102 paneles) de área efectiva, para un potencial total de 42.12 kW, mediante paneles fotovoltaicos de 405W cada uno. Se seleccionaron 4 inversores de 8200 W de potencia cada uno.

Según [32] los costos de las baterías de iones de litio estará por debajo de \$100/kWh para 2024. Este índice arroja a su vez costos para sistemas fotovoltaicos con almacenamiento de \$2/W, los cuales, mediante cálculos rápidos proyectan índices económicos no convenientes (TIR 1%) con períodos de recuperación de inversión mayores a los 11 años. Por lo tanto, la solución del sistema no incluye el elemento acumulador debido a que por temas de costo representaría una solución inviable económicamente. Sin embargo, la tendencia es que conforme pasen los años

los sistemas con almacenamiento empiecen a ser rentables. De igual manera, se menciona la cantidad y el tipo de batería a valorar para un futuro próximo. A continuación, se explica el paso a paso de la aplicación de la metodología para ser aplicada en una pequeña industria:

### Paso 1. Levantamiento de cargas eléctricas

En la figura 3 se muestra el comportamiento de consumo eléctrico de la planta, basado en un historial de los últimos 12 meses en el momento de la aplicación de la metodología, de los cuales se tiene un valor promedio de 5135 kWh mensuales.

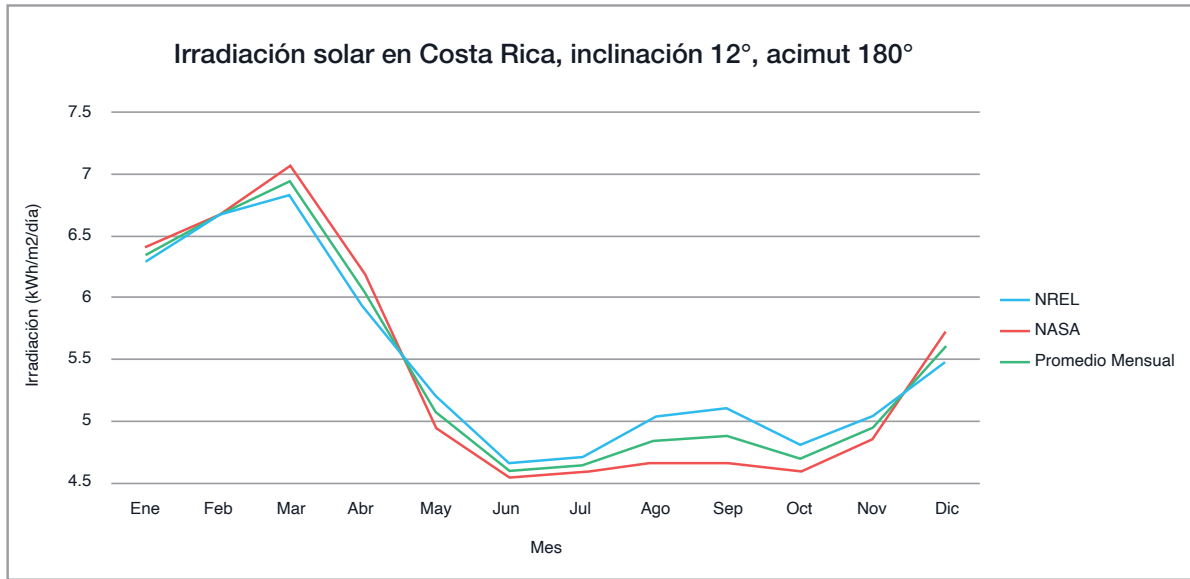


**Figura 3.** Comportamiento de consumo de energía eléctrica mensual para la empresa bajo estudio basado en [10].

Respecto a la demanda máxima de potencia, se obtuvo un valor promedio de 14.5 kW, suministrado por un histórico de consumo de parte del proveedor de servicio [33].

### Paso 2. Diseño de sistema fotovoltaico

Las figuras 4 muestra el potencial solar real según [27], [28].

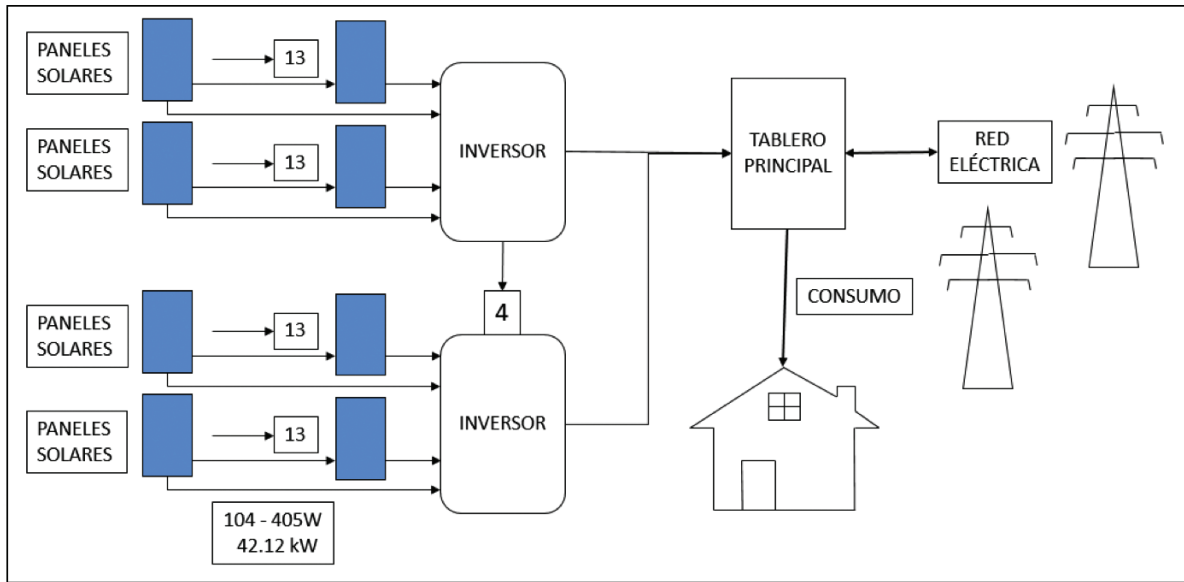


**Figura 4.** Irradiación solar en Costa Rica para una inclinación 12°y un ángulo acimut 180° basado en [27], [28].

En el cuadro 1 se muestra el resultado de acuerdo con el paso a paso del diseño del sistema fotovoltaico, mientras la figura 5 se observa el diagrama esquemático del diseño propuesto de acuerdo con el paso a de la metodología.

**Cuadro 1.** Resultado de diseño para sistema fotovoltaico caso de estudio.

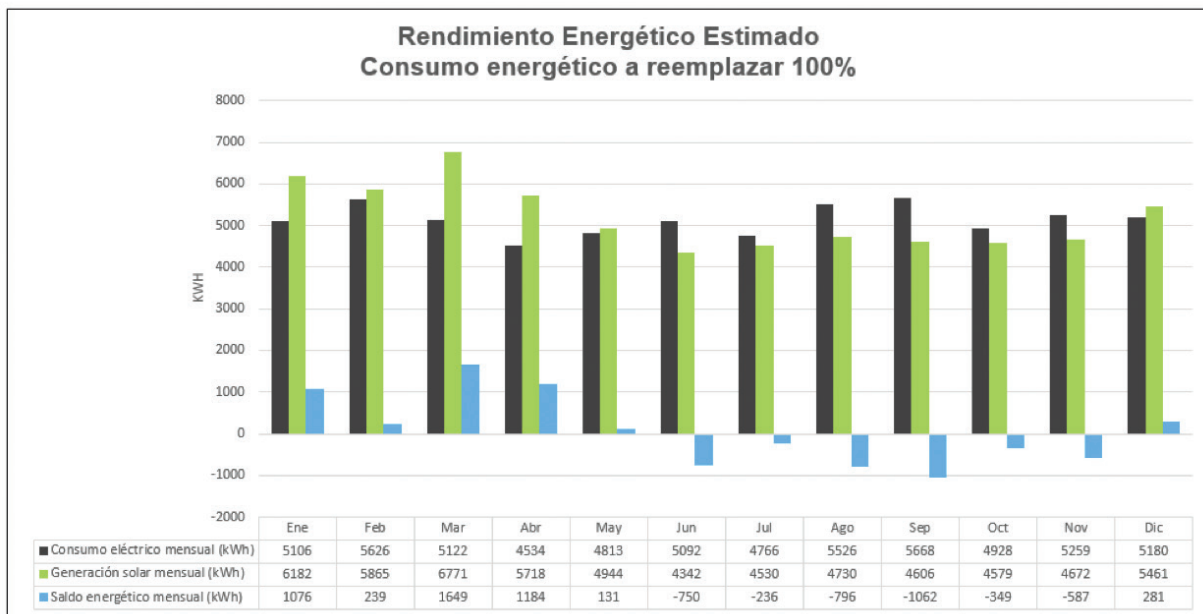
Paso 2. Diseño de sistema fotovoltaico			
Paso	Parámetro	Valor	Descripción
a	Ángulo acimut (°)	180.0	Sur
a	Ángulo inclinación (°)	12.0	De los paneles
b	Hora solar pico (horas)	5.4	HSP al día
c	Rendimiento (R[%])	85.0	Pérdidas
d	Energía teórica requerida (Et [kWh])	171.2	Requerimiento teórico
e	Energía real requerida (E [kWh/día])	201.4	Requerimiento real
f	Panel solar elegido (W)	405.0	Eficiencia 21.1%
g	Cantidad de paneles	102.0	42.12 kW pico
h	Capacidad de baterías (Ah)	3876.6	Para implementación futura
h	Cantidad de baterías	20.0	De 10 kWh cada una
i	Potencia requerida (Pt[kW])	31.4	En la salida de los inversores
j	Potencia inversores (kW)	32.8	4 inversores de 8 kW
k	Tensión máxima (V)	560	Máxima tensión de soporte
k	Corriente máxima (A)	20	Interruptor termomagnético
m	Costo Total (USD)	39747	Costo Final



**Figura 5.** Esquema de solución para el sistema solar fotovoltaico On-Grid.

### Paso 3. Análisis económico

En la figura 6 se muestra la producción energética esperada vs el consumo actual. Se observa un mínimo de generación en junio de 4342 kWh y un máximo de 6771 kWh en marzo. Representaría un ahorro anual de CO<sub>2</sub> equivalente de 3.43 toneladas.



**Figura 6.** Paso a. Rendimiento energético esperado del sistema On-Grid vs consumo actual.

Se procedió a simular la implementación del sistema propuesto mediante el programa de generación distribuida para autoconsumo con medición neta sencilla disponible en el país, con el objeto de estimar el ahorro anual tal y como se muestra en el cuadro 2. La implementación del proyecto sin financiamiento lograría un ahorro mensual en la factura eléctrica de 825 USD con una recuperación de la inversión en 9 años. En el caso de recurrir a financiamiento, se obtendrían ahorros mensuales de 428 USD con una recuperación de la inversión en 5 años. Se espera que la vida útil del proyecto sea de 25 años.

**Cuadro 2.** Paso b y c. Ahorro anual mediante la implementación del sistema fotovoltaico On-Grid.

Facturación con sistema fotovoltaico		Antes	Después
Demanda de factura anual		14.5 kW	0 kW
Consumo de energía anual		61620 kWh	61620 kWh
Generación anual de energía	101%	0 kWh	62401 kWh
Inyectado (<49%)		0%	7.3%
Inyectado (kWh)		0 kWh	4561 kWh
Consumo anual de energía descubierto		61620 kWh	0 kWh
Cargo anual por energía <3000 kWh	\$0.172	\$0	\$0
Cargo anual por energía >3000 kWh	\$0.1029	\$6,342	\$0
Cargo anual por demanda	\$17	\$2,970	\$0
Cargo por tarifa de acceso	\$0.0418	\$0	\$191
TOTAL		\$10,957	\$231
Ahorro anual		98%	\$ 10,726
Ahorro ambiental		3.43 Ton de CO <sub>2</sub> eq.	

## Discusión

Mediante el procedimiento para la implementación de sistemas fotovoltaicos se logró analizar un caso de estudio de una pequeña industria ubicada en Costa Rica. La investigación permitió establecer los parámetros iniciales para el diseño del sistema fotovoltaico y de esta manera hacer un uso racional de la energía eléctrica. También permitió estimar los ángulos de acimut y de inclinación de manera óptima para el sitio bajo estudio. El dimensionamiento elaborado demostró la viabilidad técnica del sistema de energía renovable propuesto. Además, el procedimiento logró estimar ahorros en los costos de electricidad entre 428 y 825 USD y periodos de recuperación entre 5 y 9 años respectivamente. Asimismo, su implementación significaría la reducción de la huella de carbono en 3.43 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes anuales; lo que facilitaría el acceso a créditos verdes. Estos representan opciones crediticias más rentables.

## Conclusiones

La metodología presentada permitió calcular efectivamente el dimensionamiento de una planta fotovoltaica. Los resultados permitieron estimar la cantidad de paneles solares necesarios, inversores, tensiones e intensidades máximas permitidas, como también el rendimiento del sistema y el análisis económico. Además, permitió visualizar el valor posible de reducción en la huella de carbono asociada. Mediante la implementación de la metodología en un caso de estudio se comprobó la factibilidad técnica y financiera para la implementación de sistemas fotovoltaicos con inyección a la red sin la utilización del almacenamiento de energía. Esto fue

importante pues a través de la metodología se lograron tomar decisiones basadas en criterios técnicos y económicos no incurriendo en gastos innecesarios, ya que considerar el uso del almacenamiento en este momento no traería beneficios a la industria analizada debido a los consumos presentados, no obstante, en otras aplicaciones puede ser completamente viable y positivo. Los costos del almacenamiento en este caso son altos a pesar de que esta tecnología hoy día es más económica que antes. Los sistemas fotovoltaicos son una buena herramienta para reducir los costos eléctricos para pequeñas industrias en valores superiores al 90% como en este caso. De manera paralela, contribuyen a la reducción de la cantidad de dióxido de carbono emitido a la atmósfera y con ello combatir de manera sistemática la problemática del cambio climático. Un proyecto de este tipo contribuye a fomentar el autoconsumo para maximizar los recursos disponibles como el sol y de esta manera minimizar el impacto que otras tecnologías han ocasionado al ambiente.

## Agradecimientos

Se agradece al Consejo de Unidad de Posgrados de la Escuela de Ingeniería Electromecánica del Tecnológico de Costa Rica, por el apoyo brindado durante la elaboración del proyecto, por los conocimientos adquiridos para obtener el grado de maestría.

## Referencias

- [1] Autosolar Energy Solutions SLU, «Paneles solares nocturnos ¿es posible?,» 10 02 2020. [En línea]. Available: <https://autosolar.es/blog/energia-solar-fotovoltaica/paneles-solares-nocturnos-es-posible>. [Último acceso: 18 Marzo 2021].
- [2] T. d. J. Guzmán Hernández, F. Araya Rodríguez, J. M. Obando Ulloa, M. Rivero Marcos, G. Castro Badilla, G. Quiroz Vinda, D. A. Rodríguez Rojas, N. Arce Hernández, J. M. Ortega Castillo, S. Oviedo Ortega, G. García Castro, C. Moreira Segura, V. Arguelles Ulloa, J. Ortiz Martínez y M. Fernández Rodríguez, «Uso de tecnología solar en actividades agropecuarias de la Región Huetar Norte de Costa Rica (Parte I y II),» 2021. [En línea]. Available: <https://hdl.handle.net/2238/12473>. [Último acceso: 26 Marzo 2021].
- [3] SDE México, «¿Qué Es Un Sistema Fotovoltaico?,» s.f.. [En línea]. Available: <http://www.sde.mx/que-es-un-sistema-fotovoltaico/>. [Último acceso: 13 Mayo 2021].
- [4] F. Katiraei y J. R. Agüero, «Solar PV Integration Challenges,» *Power and Energy Magazine*, vol. 9, n° 3, pp. 62-71, May-June 2011, doi: 10.1109/MPE.2011.940579.
- [5] D. A. Contreras Cerón, N. Aguirre Carranza y C. A. Cajamarca Montes, «Repositorio Institucional-Análisis de un Sistema Fotovoltaico para el Ahorro de Energía para una Empresa Procesadora de Alimentos en el Barrio Las Ferias en Bogotá,» UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS., 2017. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/11349/6094>. [Último acceso: 20 Abril 2022].
- [6] S. Santiago, «Energías renovables: ¿Qué es un sistema solar fotovoltaico?,» Junio 2020. [En línea]. Available: <https://redkopora.com/energia-renovable/que-es-un-panel-solar-fotovoltaico/>. [Último acceso: 23 Febrero 2021].
- [7] R. Best y S. Trück, «Capital and policy impacts on Australian small-scale solar installations,» *Energy Policy*, n° 111082, p. 136, 2020.
- [8] Cambio Energético, «¿CUÁL ES LA ÚLTIMA TECNOLOGÍA EN MÓDULOS FOTOVOLTAICOS?,» 24 Junio 2021. [En línea]. Available: <https://www.cambioenergetico.com/blog/ultima-tecnologia-placas-solares/>. [Último acceso: 29 Junio 2021].
- [9] E. Rocha, P. Carbo, J. Rodríguez, E. Martínez y E. Armendáriz, «Avances recientes y monitoreo de celdas solares fotoelectroquímicas,» Universidad Politécnica de Victoria, Ciencias de la Ingeniería y Tecnología. Guanajuato: Ramos y Aguilera, Guanajuato, 2014.
- [10] D. Gielen, R. Kempener, M. Taylor, F. Boshell y A. Seleem, «Letting in the light: how solar photovoltaics will revolutionise the electricity system,» *IRENA: Abu Dhabi, UAE*, 2016.
- [11] L. H. Higuera Aguilar y H. Carmona Valencia, «Análisis de factibilidad de un proyecto de autogeneración eléctrica fotovoltaica en Colombia para áreas productivas menores de 10.000 m<sup>2</sup>,» 2017. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/10784/11690>. [Último acceso: 24 Mayo 2021].

- [12] The World Bank, «Solar resource maps of Costa Rica,» 2020. [En línea]. Available: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/costa-rica>. [Último acceso: 22 Abril 2021].
- [13] International Renewable Energy Agency, «Future of solar photovoltaic: deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects,» *A Global Energy Transformation*, 2019.
- [14] R. Best, P. J. Burke y S. Nishitaten, «Evaluating the effectiveness of Australia's Small-scale Renewable Energy Scheme for rooftop solar,» *Energy Economics*, n° 104475, p. 84, 2019.
- [15] M. A. Chávez Guerrero, «Proyecto de Factibilidad para uso de Paneles Solares en Generación Fotovoltaica de Electricidad en el Complejo Habitacional "San Antonio" de Riobamba.,» 08 Julio 2013. [En línea]. Available: <http://dspace.espace.edu.ec/handle/123456789/2478>. [Último acceso: 16 Abril 2021].
- [16] E. O'Shaughnessy, G. F. Nemet, J. Pless y R. Margolis, «Addressing the soft cost challenge in US small-scale solar PV system pricing,» *Energy Policy*, n° 110956, p. 134, 2019.
- [17] G. L. Barbose, N. R. Darghouth, K. M. D. LaCommare y J. Rand, «Tracking the sun: Installed price trends for distributed photovoltaic systems in the United States-2018 edition,» *Lawrence Berkeley National Lab.(LBNL), Berkeley, CA (United States)*, 2018.
- [18] G. A. Gómez Ramírez, C. Meza y S. Morales Hernández, «Oportunidades y desafíos para la integración de almacenamiento electroquímico en las redes eléctricas centroamericanas,» *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 34, n° 3, pp. 70-82, 2021.
- [19] B. Bollinger y K. Gillingham, «Learning-by-doing in solar photovoltaic installations,» *Available at SSRN 2342406*, 2019.
- [20] N. N. Opiyo, «Impacts of neighbourhood influence on social acceptance of small solar home systems in rural western Kenya,» *Energy Research & Social Science*, vol. 52, pp. 91-98, 2019.
- [21] C. Ho, H. W. Lee y J. A. Gambatese, «Application of Prevention through Design (PtD) to improve the safety of solar installations on small buildings,» *Safety science*, n° 104633, p. 125, 2020.
- [22] T. M. John y S. T. Wara, «A Tutorial on the Development of a Smart Calculator to Determine the Installed Solar Requirements for Households and Small Businesses,» *2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, pp. 319-323, 2018, doi: 10.1109/PowerAfrica.2018.8521000.
- [23] J. F. Lara, «Costa Rica desaprovecha potencial para generación de energía solar,» *La Nación*, 05 Abril 2018.
- [24] LA PRESIDENTA DE LA REPÚBLICA Y LA MINISTRA DE ECONOMÍA, INDUSTRIA Y COMERCIO, «Procuraduría General de la República de Costa Rica,» 22 Junio 2015. [En línea]. Available: [http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm\\_texto\\_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=72517&nValor3=102335&strTipM=TC](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=72517&nValor3=102335&strTipM=TC). [Último acceso: 20 Abril 2022].
- [25] K. Vega Carranza, J. F. Piedra Segura y G. Richmond Navarro, «Dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos mediante una interfaz gráfica,» *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 32, n° 3, pp. 66-78, 2019.
- [26] INTECO, *INTE/ISO 50002:2018-Auditorías energéticas — Requisitos con orientación para su uso*, ©INTECO, 2018.
- [27] NASA, «The Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER),» 2021. [En línea]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. [Último acceso: 19 Mayo 2021].
- [28] NREL, «NREL's PVWatts® Calculator,» 2021. [En línea]. Available: <https://pvwatts.nrel.gov/>. [Último acceso: 11 Febrero 2021].
- [29] Energías Renovables, «Nuevo avance para convertir la energía solar en electricidad mediante puntos cuánticos,» 02 Marzo 2020. [En línea]. Available: <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/nuevo-avance-para-convertir-la-energia-solar-20200302>. [Último acceso: 08 Enero 2021].
- [30] NFPA, «Código Eléctrico Nacional,» 2014. [En línea]. Available: [https://www.academia.edu/42674546/C%C3%B3digo\\_El%C3%A9ctrico\\_Nacional\\_2014\\_NFPA\\_70\\_Espa%C3%B1ol](https://www.academia.edu/42674546/C%C3%B3digo_El%C3%A9ctrico_Nacional_2014_NFPA_70_Espa%C3%B1ol). [Último acceso: 26 Junio 2021].
- [31] S. A. Guadamuz Arias, «Inventario de gases efecto invernadero de diez instalaciones de una institución pública costarricense,» 2018. [En línea]. Available: <https://hdl.handle.net/2238/10089>. [Último acceso: 20 Mayo 2021].
- [32] J. Moore, «Bloomberg Finance L.P.,» 22 Abril 2020. [En línea]. Available: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://data.bloomberglp.com/promo/sites/12/678001-BNEF\\_2020-04-22-Executive-Factbook.pdf?link=cta-text](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://data.bloomberglp.com/promo/sites/12/678001-BNEF_2020-04-22-Executive-Factbook.pdf?link=cta-text). [Último acceso: 27 Abril 2022].
- [33] INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD, «Tarifas actuales - ICE,» 30 Junio 2021. [En línea]. Available: <https://www.grupoice.com/wps/wcm/connect/669c79e9-84c9-4682-b63b-136238ebc7e2/Tarifas+actuales.pdf?MOD=AJPERES>. [Último acceso: 17 Julio 2021].