

Selección de un Sistema Solar FV para la sede 3 de la Universidad Simón Bolívar, Barranquilla

Selection of a Solar PV System for Headquarters 3 of the Simón Bolívar University, Barranquilla

A. Navarro*, J. Leño*, K. Guzmán* K. Almanza & J. Romero*

{Angie Navarro, Juan Leño, Kevin Guzmán, Kevin Almanza y Jonathan Romero} @unisimon.edu.co – {apulido3} @unisimonbolivar.edu.co

*Estudiantes de Ingeniería mecánica **Vicente Leonel Martínez Díaz

Universidad Simón Bolívar, Barranquilla-Colombia

Resumen

Este artículo presenta la metodología de cálculo para el diseño de un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica a partir del uso paneles fotovoltaicos, los cuales captan la radiación solar y la transforman en energía eléctrica. Esto se realiza con el objetivo de satisfacer parte del consumo de la sede 3 de la USB, contribuir a disminuir los costos por concepto de consumo de energía eléctrica convencional y disminuir el impacto ambiental. Con el fin de definir el proyecto se utilizará una metodología en base a fuentes de información secundaria para dimensionar el alcance y generar la ingeniería de detalle que dé cumplimiento a sus objetivos e impactos esperados, ya sean, económicos, sociales y ambientales. Los valores de carga se obtienen a partir de las mediciones realizadas en el software Power Log 5.9, con el objetivo de realizar una configuración adecuada de módulos fotovoltaicos e inversor, dimensionamiento, arreglos e inclinación del panel, cabe resaltar, que estas variables tienen un impacto en la generación de energía total del sistema. Posterior a la implementación del sistema, se realizará monitoreo para comprobar la efectividad del mismo.

Palabras clave: Sistema fotovoltaico, energía solar, conectado a la red, inversor.

Abstract

This article presents the calculation methodology for the design of a photovoltaic system connected to the electrical grid through the use of photovoltaic panels, which capture solar radiation and transform it into electrical energy. This is done with the objective of satisfying part of the consumption of the USB's headquarters 3, contribute to reduce the costs of conventional electricity consumption and reduce the environmental impact. In order to define the project, a methodology based on secondary information sources will be used to size the scope and generate the detailed engineering that meets its objectives and expected economic, social and environmental impacts. The load values are obtained from the measurements made in the Power Log 5.9 software, with the objective of making a proper configuration of photovoltaic modules and inverter, sizing, arrangements and inclination of the panel, it should be noted that these variables have an impact on the total power generation of the system. After the implementation of the system, monitoring will be carried out to check its effectiveness.

Keywords: Photovoltaic system, solar energy, grid connected, inverter.

I. INTRODUCCIÓN

La energía es indispensable para el desarrollo económico de un país. El rápido crecimiento demográfico, la expansión del sector industrial, el acelerado crecimiento tecnológico, entre otros factores, han incrementado la demanda de energía, y, en consecuencia, el sistema eléctrico es cada vez más susceptible de no satisfacer el consumo de energía [1], es por ello que se crean los sistemas fotovoltaicos, estos permiten que la energía solar se

convierta en energía eléctrica que pueda utilizarse como corriente alterna; de manera limpia, sustentable y por supuesto rentable [2]. Por lo anterior, la energía solar se convierte en una de las fuentes renovables con mayor demanda a nivel internacional.

La energía eléctrica generada mediante paneles solares fotovoltaicos es inagotable y no contamina, por lo que contribuye al desarrollo sostenible, además de favorecer el desarrollo del empleo local. [3]

La Universidad Simón Bolívar de la ciudad de Barranquilla es una institución que no cuenta con una planta de generación eléctrica, por lo tanto, se ve obligada a comprar la electricidad de la empresa prestadora de servicios "Aire", dicha compra genera altos costos por los sistemas de climatización impactando de forma negativa el medio ambiente, por lo que es necesario la implementación de un sistema fotovoltaico conectado a la red que se encargue de optimizar los gastos producidos por los métodos tradicionales para la obtención de electricidad.

El presente artículo se centra en la aplicación de la metodología de cálculo de un sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica utilizada en el edificio 3 de la EZIME Zacatenco [4] a la sede 3 de la Universidad Simón Bolívar. Esta investigación se presenta como una propuesta a la USB para la implementación de un sistema fotovoltaico conectado a la red en el futuro.

II. ESTADOS DEL ARTE

Las energías renovables son fuentes de energía limpias, inagotables y crecientemente competitivas. Se diferencian de los combustibles fósiles principalmente en su diversidad, abundancia y potencial de aprovechamiento en cualquier parte del planeta, pero sobre todo en que no producen gases de efecto invernadero –causantes del cambio climático- ni emisiones contaminantes. Además, sus costes evolucionan a la baja de forma sostenida, mientras que la tendencia general de costes de los combustibles fósiles es la opuesta, al margen de su volatilidad coyuntural. [5]

Energías Renovables en Colombia

Según la Unidad de Planeación Nacional Minero Energética (UPME), las energías renovables cubren actualmente cerca del 20% del consumo mundial de electricidad. Entre los principales tipos de energía, se tienen: Energía solar, Energía de Biomasa, energía hidráulica, energía eólica, energía de los océanos, entre otras. [5]

Por su posición geográfica, Colombia cuenta con una radiación solar constante durante todo el año, especialmente en regiones como La Guajira, Atlántico, Antioquia y Valle del Cauca. Según Ramón Monras, presidente de ABB para Latinoamérica, este es uno de los elementos claves para que Colombia pueda convertirse en un importante generador de energía solar. "El efecto de la energía solar dura hasta 12 horas al día, registrando incluso los índices más altos a nivel mundial. Esto le permite al país desarrollar soluciones solares y granjas o parques solares que generen energía todo el año,

con una mayor eficiencia que en los países que tienen estaciones", señala.

Para Astrid Álvarez, presidenta del Grupo Energía de Bogotá, "el departamento de La Guajira y otros departamentos cercanos tienen las condiciones para que se produzca mucho interés en los inversionistas en la producción de energía eólica". [6]

Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red

Por otro lado, Los sistemas fotovoltaicos basan su producción de energía en el sol como fuente energética, en base a la radiación solar, mediante lo que se conoce como efecto fotovoltaico (FV) [7]. Por consiguiente, existe un tipo de sistema FV denominado, Sistema Fotovoltaico conectado a la red eléctrica, éstos sistemas operan enlazados a la red eléctrica existente, su diseño tiene como meta el suministro energético de la fase, si excede los valores necesarios del aprovisionamiento, la energía producida es inyectada a la red eléctrica. Su propósito principal es intensificar su producción anual para tener una disminución en el consumo eléctrico. [8] Cabe resaltar, que este sistema no necesita controladores de carga ni baterías. Su objetivo es producir energía y consumirla al instante. Si la energía no es consumida al instante, esta puede ser intercambiada con el operador de red. [9]

Las principales componentes de un sistema fotovoltaico conectado a la red son: el arreglo fotovoltaico, que es el elemento encargado de transformar la radiación del sol en electricidad; y un elemento acondicionador de la potencia producida, un inversor de corriente continua a corriente alterna, cuya función es adecuar la energía generada por el arreglo a las características eléctricas que la red a la cual se conectará demanda. [10]

En resumen, un sistema solar fotovoltaico conectado a red o de tipo de conexión de red, funciona de la siguiente manera: por medio de uno o varios paneles solares fotovoltaicos se genera electricidad en corriente continua, esta energía se transforma por medio de uno o varios inversores para conexión de red en corriente alterna y se inyecta en paralelo con la red pública la generación lograda. Los sistemas solares fotovoltaicos conectados a red permiten a los usuarios cogenerar electricidad o inyectar en paralelo la energía, ya sea para autoconsumo o para el despacho al sistema interconectado. A continuación, se presentan proyectos de sistemas fotovoltaicos desarrollados a nivel Internacional, nacional y regional: [10]

- Bhadla Solar Park. 2.245 MW. India: Hero Future Energies, una de las principales compañías privadas de energía renovable de la India, ultimó a finales de marzo de 2020 un proyecto de energía solar de 300 megavatios en el parque de energía solar de Bhadla en Rajasthan. Con este proyecto, el parque solar ahora está completo con una capacidad instalada de 2.245 megavatios y se convierte en el más grande del mundo. El parque solar registró varios precios récord durante algunas subastas altamente competitivas. Los proyectos en el parque solar fueron desarrollados por múltiples compañías a través de una asociación público-privada. [11].
- Granja solar en Yumbo, Valle del Cauca: En Colombia la primera granja fotovoltaica fue construida por Celsia. Las granjas solares generan grandes cantidades de energía limpia que se transporta a través de la red convencional y contribuyen a disminuir los impactos en el medio ambiente. Su construcción, que cuenta con 35.000 módulos fotovoltaicos instalados y 9 inversores que transforman la energía continua en energía alterna, marcó un hito en la historia de la electricidad del país: se levantó donde antes funcionaba Termoyumbo -a base de carbón- para dar paso a la energía renovable. Cabe resaltar, que tiene una capacidad instalada de 9,8 MW y generará cerca de 16,5 GWh de energía al año, equivalentes al consumo de 8 mil hogares. a meta de Celsia a mediano plazo es tener instalados 250 MW de energía fotovoltaica a través de granjas de generación solar en Colombia y Centroamérica. [12].
- Parque Solar Cuestecitas: El proyecto contempla la construcción de un parque fotovoltaico en Riohacha, en el departamento de La Guajira. La inversión general se estima en US\$128mn, según la base de datos de proyectos de BNamericas. El propietario de este proyecto es Sowitec Operation Colombia. Tiene una capacidad propuesta de 600MW. El proyecto se encuentra en estudios de viabilidad. [13]

Tendencias en la Construcción de Paneles Fotovoltaicos

Las tendencias en construcción de paneles fotovoltaicos cada vez más están en auge en todo el mundo. A continuación, se presentan algunas tendencias en la construcción de paneles fotovoltaicos.

Uso de paneles bifaciales: la tecnología bifacial ya ha comenzado a implementarse en proyectos fotovoltaicos a gran escala y está en camino de convertirse en una tecnología común para las centrales solares, ya que captan un 50% más de energía, debido a que están diseñados para absorber luz por ambas caras, aprovechando la radiación directa y también la reflejada. Se prevé que pueda llegar a representar más del 35% de los módulos para 2028, según la hoja de ruta International Technology Roadmap for Photovoltaics. [14]

- Inteligencia Artificial & Big Data: a lo largo del día y a través de las estaciones del año, la posición del sol y las condiciones atmosféricas cambian, y esto hace que la luz que llega a los paneles tenga características diferentes. Por ejemplo, a mediodía la luz es más “azul”, mientras que por la tarde es más “roja”. En este sentido, los conjuntos de datos con miles de espectros solares pueden reducirse a unos pocos datos característicos utilizando técnicas de inteligencia artificial para predecir la eficiencia promedio anual. [14]
- Paneles Solares tipo Acordeón: Según informa US Green Technology, esta última alternativa para cosechar energía solar podría ser todo un éxito entre los clientes, lo que significa que más y más gente podría recurrir a estos dispositivos para la alimentación de sus hogares y oficinas. Los investigadores del Instituto de Tecnología de Massachusetts explicaron cómo estas innovadoras torres de energía pueden generar dos veces la cantidad de energía producida generalmente por los paneles solares regulares. Cabe señalar que, en condiciones ambientales adecuadas, estos paneles solares tipo acordeón pueden capturar 20 veces más energía del Sol que los paneles solares planos. [15]
- Paneles Fotovoltaicos Flotantes: El sol y el mar parecen haber encontrado la simbiosis energética perfecta en los sistemas fotovoltaicos flotantes. Según un informe del Banco Mundial y el Instituto de Investigación de Energía

Solar de Singapur, a finales de 2018, la capacidad instalada acumulada global de la fotovoltaica flotante era de 1,1 GW, 100 veces más que tan solo cuatro años antes. En palabras de Riccardo Puliti, director de Energía del Banco Mundial, “la tecnología solar flotante tiene enormes ventajas para los países donde la tierra es escasa o las redes eléctricas son débiles”. Además, su ubicación en el mar permite destinar la superficie terrestre a la producción de otros recursos y acercar estas centrales solares a áreas urbanas con alta densidad de población, pero cerca de zonas costeras. [16]

IV. METODOLOGÍA DE CÁLCULO

A partir de la información obtenida en el estado del arte, se procede a implementar la metodología de cálculo de un sistema fotovoltaico conectado a la red a la sede 3 de la universidad Simón Bolívar, partiendo de las mediciones obtenidas en el software Power Log 5.9. De lo anterior se tiene lo siguiente:

1. Obtención de la potencia activa máxima $P_{activa-max}$
2. Selección de módulo e inversor
3. Cálculo del número de módulo FV

Donde:

$P_{activa-max}$ = Potencia activa máxima

P_{panel} = potencia del panel

$$M = \frac{P_{activa-max}}{P_{panel}}$$

- ✓ Número de Paneles necesarios en la sede 3

Donde:

A = Área total

$$\text{Número de paneles necesarios} = \frac{A}{\text{Área de cada módulo FV}}$$

4. Cálculo porcentual del abastecimiento de la energía total consumida por los módulos FV

- ✓ Tensión de entrada promedio del inversor

Donde:

$V_{rango-inversor}$ = Voltaje nominal CA del inversor

$$V_{inv} = \frac{V_{rango-inversor}}{2}$$

- ✓ Obtención de número de filas en serie

Donde:

V_M = Tensión en máxima potencia del módulo

$$\frac{V_{inv}}{V_M}$$

- ✓ Obtención de número de columnas en paralelo.

Donde:

$I_{inversor}$ = intensidad del inversor

I_{panel} = intensidad del panel

$$\frac{I_{inversor}}{I_{panel}}$$

- ✓ Obtención del número de módulos por inversor

Donde:

M_{inver} = número de filas en serie

· número de columnas en paralelo

- ✓ Comprobación del arreglo para módulos en serie

Número de módulos en serie · V_M

- ✓ Comprobación del arreglo para módulos en paralelo

Número de módulos en paralelo · I_{panel}

- ✓ Cálculo del número de inversores

Donde:

$$\text{No de inversores} = \frac{\text{número de módulos necesarios}}{\text{número de módulos por arreglo}}$$

5. Dimensionamiento del sistema FV

6. Cálculo del área que abarcan los arreglos en paralelo

Donde:

$P_{max-inv}$ = Potencia máxima del inversor

P_{panel} = Potencia del panel

$$\frac{P_{max-inv}}{P_{panel}}$$

- ✓ Si el área de instalación no puede soportar la cantidad de paneles requeridos, es necesario hacer una redistribución de los paneles en serie y en paralelo, estos son los números de módulos

máximos en serie y en paralelo que abarca el inversor, entonces se tiene que:

$$\text{Número de módulos en serie} \cdot V_M$$

$$\text{Número de módulos en paralelo} \cdot I_{panel}$$

✓ Número de módulos FV por inversor

$$\frac{\text{Número de paneles necesarios}}{\text{Número de inversores}}$$

✓ Número de módulos totales en paralelo

$$\text{Número de inversores} \cdot \text{número módulos en paralelo}$$

✓ Comprobación del sistema de arreglos

Se multiplica el valor del número de módulos en paralelo que tiene cada inversor por el número de paneles en serie del inversor.

7. Cálculo de la inclinación

La trayectoria del sol durante el día es de este a oeste, pero durante el año es de norte a sur, por lo tanto, los paneles fijos deben ir inclinados hacia el sur.

El cálculo de la inclinación se ve gobernado por la siguiente ecuación.

$$\text{Grado de inclinación} = \text{latitud} + 10$$

V. RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

1. Potencia Activa

Conocer las potencias activas, estas se pueden obtener por medio del Software Power Log 5.9, en el que se encuentran las mediciones de la Sede 3 de la USB con las respectivas potencias activas diarias. Cabe resaltar, que el valor a obtener debe ser la mayor potencia activa que se encuentre entre los días analizados (18-25 feb,2022).

$$P_{\text{activa-max}} = 296.07 \text{ kW}$$

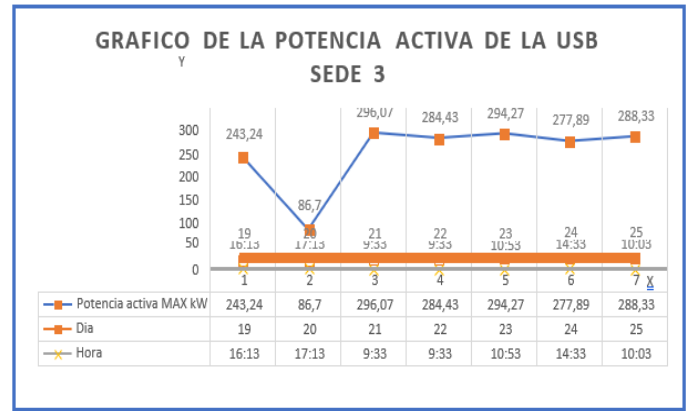


Figura 1. Se puede observar que la máxima potencia activa ($P_{\text{activa-Max}}$) que se detecta en el Software, es el día 21 de febrero a las 9:33am con un valor de 296.07kW. Creación Propia

2. Selección de los Módulos FV e Inversor

Se selecciona un proveedor de módulos FV, para la selección de módulos es necesario tener en cuenta su eficiencia y potencia pico, ya que, a mayor eficiencia y potencia, menor será el número de módulos y área a utilizar. En este caso se seleccionaron módulos 0.555kW (Tabla 1). A continuación, se muestran las dimensiones del panel (Figura 2).

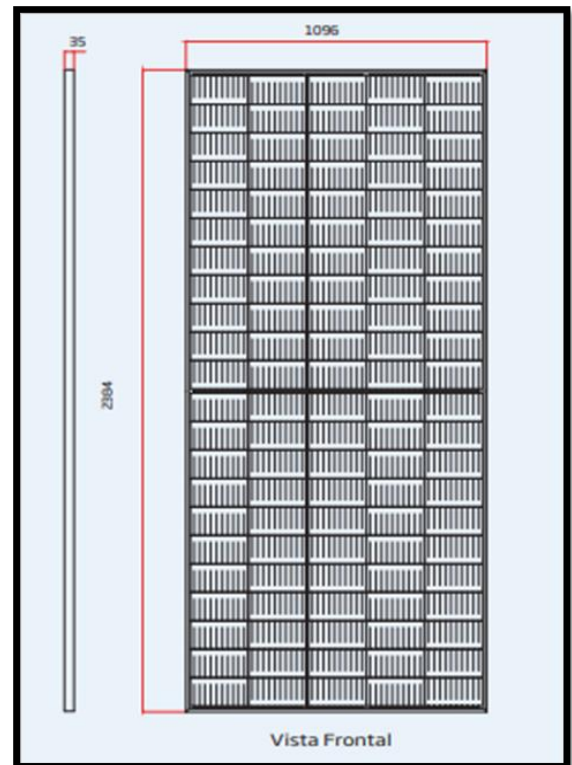


Figura 2. Dimensiones del módulo (mm). Tomado de [19]

Tabla 1. Datos eléctricos (STC) del panel. Tomado de [19]

DATOS ELÉCTRICOS (STC)					
Potencia Nominal-Pmax (Wp)*	535	540	545	550	555
Tolerancia de Potencia Nominal-Pmax (W)	0 ~ +5				
Tensión en Máxima Potencia-Vmpp (V)	31.0	31.2	31.4	31.6	31.8
Corriente en Máxima Potencia-Imp (A)	17.28	17.33	17.37	17.40	17.45
Tensión de Circuito Abierto-Voc (V)	37.3	37.5	37.7	37.9	38.1
Corriente de Corto Circuito-Isc (A)	18.36	18.41	18.47	18.52	18.56
Eficiencia η (%)	20.5	20.7	20.9	21.0	21.2

STC: Irradiación 1000W/m², Temperatura de Célula 25°C, Masa de Aire AM1.5
*Tolerancia de Medición: ± 3%

Considerando que el inversor se debe seleccionar con base a la potencia requerida para cubrir la necesidad y al voltaje de red, se selecciona un inversor para la conexión a red con una potencia máxima de salida de 70kW y una tensión nominal de 277/480V de corriente alterna, se debe tener en cuenta que el inversor sólo va a inyectar corriente alterna.



Figura 3. Inversor MAC 50-70KTL3-X MV.
Tomado de [20]

Tabla 2. Hoja de datos del inversor. Tomado de [20]

Hoja de datos	MAC 50KTL3-X MV	MAC 60KTL3-X MV	MAC 70KTL3-X MV
Datos de entrada (CD)			
Máxima potencia FV recomendada (STC)	75000W	90000W	105000W
Máximo voltaje CD		1100V	
Voltaje de arranque		250V	
Voltaje nominal		700V	
Rango de voltaje de MPPT		200V-1000V	
Número de MPPTs		3	
Cadenas por MPPT	3/4+3+3	3/4+4+4	3/4+4+4
Máxima corriente por MPPT		52A/52A/52A	
Corriente de corto circuito por MPPT		55A/55A/55A	
Datos de salida (CA)			
Potencia nominal de CA	50000W	60000W	70000W
Potencia aparente máxima	55500VA	66600VA	77700VA
Voltaje nominal CA (Rango*)		277V/480V(425-540V)	
Frecuencia de red CA (Rango*)		50/60Hz (45-65Hz/55-65Hz)	
Max. corriente de salida	66.9A	80.2A	93.6A
Factor de potencia nominal/ajustable		> 99 / +0.8 ... -0.8	
Distorsión armónica total		< 3%	
Tipo de conexión CA		3W+PE	

3. Cálculo del Número de Módulos Fotovoltaicos

Para calcular el número de módulos fotovoltaicos, se debe considerar la mayor potencia activa obtenida por medio del Software Power Log 5.9 y la máxima potencia ofrecida por el panel escogido. De lo anterior se tiene que:

Datos:

$$P_{\text{activa-max}} = 296,07kW$$

$$P_{\text{panel}} = 0,555kW$$

$$M = \frac{296,07}{0,555} = 533,45 = 534 \text{ módulos}$$

De acuerdo con el cálculo, se tienen que utilizar 534 módulos para cubrir la carga requerida de la sede 3.

Para calcular los módulos necesaria de la sede 3 de la universidad Simón Bolívar utilizaremos el área total/área de cada módulo FV. Se debe tener en cuenta que el cálculo anterior de módulos no poder ser el mismo que se muestra a continuación debido a que el área que se necesita no va a ser suficiente. De lo anterior se tiene que:

$$\begin{aligned} \text{número de módulos necesarios} \\ &= \frac{440m^2}{2,612864m^2} \\ &= 168,39 \text{ módulos} \end{aligned}$$

Para aproximarlos se toma la unidad más cercana, es decir, 168 módulos.

4. Cálculo porcentual del abastecimiento de la energía total consumida por los módulos FV

Si los 533,459 abastecen el 100% de la energía total consumida y solo se pueden instalar 168 paneles, por la restricción del área, por lo que se realiza la siguiente regla de tres.

$$100 - 533,459$$

$$x - 168,39$$

Ahora se despeja el valor de x que es porcentaje igual a la energía consumida por 168 paneles.

$$x = (100)(168,39)(533,49)$$

Los 168 paneles abastecen el 31% de energía total consumida, es decir la universidad se ahorra un poco menos de la tercera parte de la energía total consumida.

$$x = 31,565\%$$

✓ Panel Seleccionado

$$P_{panel} = 555W$$

$$I_{panel} = 17,45 \text{ (A)}$$

$$V_M = 31,8V$$

✓ Inversor

$$V_{rango-inversor} = 277V - 480V$$

$$I_{inversor} = 93,6A$$

$$P_{max-inv} = 105000W$$

$$V_{max_{inv}} = 1100V$$

Se considera un promedio de tensión de entrada del inversor entre el intervalo de 277 V y 480 V de las especificaciones para tomar un solo valor de tensión de entrada.

$$V_{inv} = \frac{277V + 480V}{2} = 378,5V$$

Aplicando la ecuación, se obtiene el número de filas en serie.

$$\frac{V_{inv}}{V_M} = \frac{378,5V}{31,8V} = 11,9 = 12 \text{ filas}$$

Aplicando la ecuación, se obtiene el número de columnas en paralelo

$$\frac{93,6A}{17,45A} = 5,36 = 5 \text{ columnas}$$

Con las filas y columnas calculadas, el arreglo quedaría como se muestra (Tabla 3). Tomando el total de módulos FV en el arreglo y el número de módulos que necesita el sistema FV para cubrir la carga, el número de módulos por inversor se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} M_{inver} &= (12 \text{ módulos})(5 \text{ módulos}) \\ &= 60 \text{ módulos por inversor} \\ (12 \text{ módulos})(31,8V) &= 381V \end{aligned}$$

El valor de la tensión de los módulos se encuentra dentro del intervalo de tensión del inversor que es entre 277 V y 480 V, por lo que el arreglo es correcto.

Al igual que los módulos en serie, se hace la misma comprobación para los módulos en paralelo, en este caso se multiplica la corriente de salida del módulo por el número de módulos en paralelo.

$$(5 \text{ módulos})(17,45A) = 87,25$$

El valor de la corriente de los módulos se encuentra dentro del valor de corriente de entrada del inversor que es de 93,6A, por lo que es correcto el arreglo.

Es importante mencionar que el arreglo fotovoltaico no necesariamente tiene que tener la configuración ni el número de módulos, esto solo se refiere a las conexiones en serie y paralelo entre los módulos para tener las condiciones necesarias de entrada del inversor.

$$\begin{aligned} \text{No de inversores} &= \frac{168 \text{ módulos}}{60 \text{ módulos}} = 2.8 \text{ inversores} \\ &\approx 3 \text{ inversores} \end{aligned}$$

Tabla 3. Arreglo de los paneles FV. Creación propia

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1												
2												
3												
4												
5												

Paneles en paralelo

Paneles en serie

En la tabla 3, se observa que la fila está integrada por 5 módulos y la columna por 12 módulos, por lo que se tiene 60 módulos conectados por inversor.

5. Dimensionamiento del sistema FV

Los módulos FV se pueden dimensionar de muchas formas, en este caso se va a depender del área que se tenga disponible en el techo de la sede 3 de la Universidad Simón Bolívar, las dimensiones del espacio disponible se muestran en la Figura 4.

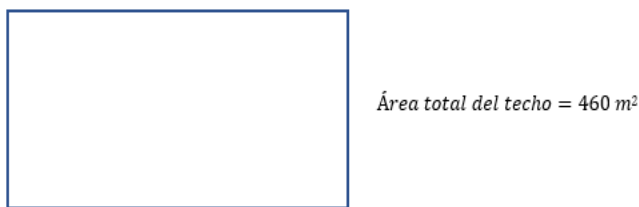


Figura 4. Representación del techo de la sede 3 de la USB.

El área del panel (A) que se va a ocupar, se muestra (Figura 2). Teniendo las dimensiones de los módulos y los arreglos del inversor, se distribuye el arreglo de tal manera que no rebase el área utilizada, se debe tomar como recomendación que los módulos a conectar en serie son 12 o más, por lo que las dimensiones de los tipos paneles FV que se van a utilizar quedan de la siguiente manera (Figura 2).

Para asegurar que el área del techo es adecuada para la instalación de los paneles FV se hace la siguiente comprobación, utilizando las dimensiones de la edificación y las áreas de los tipos de paneles.

Datos

Área de cada panel = $2.6112m^2$

Área total del techo = $460m^2$

6. Cálculos del área que abarcan los arreglos en paralelo

Para realizar el arreglo en serie, se calcula el número de paneles que puedan alcanzar la potencia máxima del inversor, para ello, se

divide el valor de la potencia máxima del inversor entre la potencia de cada módulo. De lo anterior, se tiene que:

$$\frac{105000W}{555W} = 189,19 \text{ paneles, máximo 189 paneles}$$

Esto quiere decir, que un inversor puede abarcar los 189 módulos como máximo, pero como el área de instalación de los paneles no es lo suficiente para que abarque los 189 módulos se realizan una serie de cálculos para distribuir los paneles en serie y en paralelo.

En serie se pueden conectar 24 módulos debido a que el V_M del módulo es de 31,8V y el voltaje de rango del inversor es de 277-780V. Se tiene que:

$$(24)(31,8V) = 763,2V$$

Este valor de 763,2V se encuentra dentro del rango del voltaje del inversor seleccionado (rango de voltaje de 277V-780V).

Para realizar el arreglo en paralelo se pueden conectar 5 módulos debido a que la (A) del módulo es de 17,45(A) y la corriente máxima es de 93,6A del inversor por lo que:

$$(5)(17,45A) = 87,25A$$

Este valor, se encuentra por debajo de la corriente máxima del inversor.

Los valores mencionados anteriormente, de 24 módulos en serie y 5 módulos en paralelo son el número de módulos máximos que abarca un inversor en este sistema, para realizar un arreglo equitativo de número de módulos por cada inversor.

Se tiene que son 3 inversores y 168 módulos los que se necesitan en este sistema, se dividen los 168 módulos entre el número de inversores y eso da como resultado 56 módulos fotovoltaicos por cada inversor, por lo que resulta más fácil reducir los módulos en serie que en paralelo. Para cada inversor se tiene que:

$$\text{Número de módulos en paralelo} = 5$$

$$\text{Número de módulos en serie} = 11$$

Este último valor se adecua a que cada inversor tenga los mismos módulos en serie y en paralelo y sigan manteniéndose dentro del rango de voltaje y la corriente máxima de cada inversor. Teniendo que:

Como son 3 inversores y cada inversor tiene 5 módulos en paralelo esto da como resultado:

$$\begin{aligned} \text{Número de inversores} \times 5 \text{ módulos en paralelo} \\ = 15 \text{ módulos en paralelo en total} \end{aligned}$$

Para saber si este sistema de arreglos es el adecuado, multiplicamos el valor del número de módulos en paralelo que tiene cada inversor por el número de paneles en serie del inversor, Como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} 11 \text{ módulos en serie} \times 5 \text{ módulos en paralelo} \\ = \#55 \text{ módulos por inversor} \end{aligned}$$

Como son 3 inversores los que tiene el sistema, el número de módulos por inversor lo multiplicamos por los 3 inversores, como se muestra a continuación:

$$3 \text{ inversores} \times 55 \text{ módulos} = 165 \text{ módulos}$$

De la ecuación anterior, se tiene que 165 módulos se repartirían entre 3 inversores de 55 módulos cada uno para así abarcar los módulos máximos que se necesitan en este sistema, que son 168 módulos.

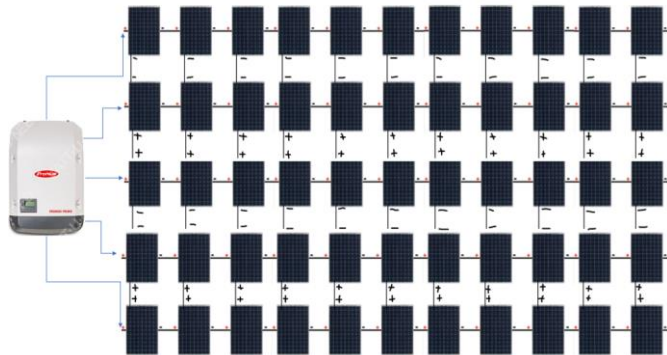


Figura 6. Arreglo FV. Creación propia

En la figura 6, se puede observar 55 módulos por inversor. Se debe tener en cuenta que son 3 inversores y cada inversor tiene 11 módulos en serie y 5 en paralelo.

7. Cálculo de inclinación

Teniendo en cuenta que la trayectoria del Sol durante un día es de Este a Oeste, pero la trayectoria durante un año es de Norte a Sur se requiere que los paneles fijos se coloquen inclinados hacia el Sur. [4] El ángulo óptimo del panel que garantice su mejor aprovechamiento varía de acuerdo con el lugar, por lo que el

cálculo de inclinación del panel FV se obtiene de acuerdo con la ecuación y el valor de la latitud de Barranquilla. [17] De lo anterior se tiene lo siguiente:

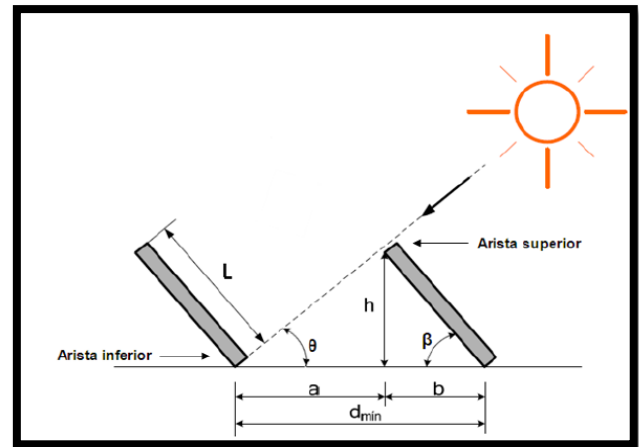


Figura 5. Distancia mínima entre aristas. Tomado de [4]

Donde:

d_{min} = Distancia mínima entre aristas de paneles para evitar sombras, (unidades en metros).

L = Longitud del panel (columna de módulos en paralelo), (unidades en metros).

h = Altura solar al medio día, (unidades en metro).

β = Grado de inclinación del panel respecto a la horizontal, (unidades en grados °)

θ = Ángulo de la sombra respecto a la horizontal, (unidades en grados °)

a = Distancia de la arista inferior de un panel a la arista inferior del otro, (unidades en metros).

b = Distancia de la arista inferior del panel a la arista superior del mismo con respecto a la horizontal (unidades en metros).

El grado de inclinación está dado por la siguiente ecuación:

$$\text{Grado de inclinación} = \text{latitud} + 10$$

Para una latitud de 11° en la ciudad de Barranquilla. Dada en coordenadas decimales, la cifra exacta es 10.96854° , pero se puede aproximar a 11° . [17] reemplazando valores en la ecuación anterior, queda de esta manera:

$$\text{Grado de inclinación } 11 + 10^\circ = 21^\circ \beta$$

$$h = (\sin \beta)(L) = \sin 21^\circ(7,152m) = 2,56304$$

$$b = (\cos \beta)(L) = \cos 21^\circ(7,152m) = 6,67696m$$

$$a = \frac{2,566304m}{\tan 69} = 0,9851$$

$$d_{min} = a + b = 0,9851m + 6,6796$$

$$d_{min} = 7,6620m$$

VI. ANÁLISIS AMBIENTAL

La implementación de un SFCR en la USB disminuiría el impacto ambiental provocado por los sistemas convencionales de energía.

Como resultado del trabajo conjunto entre el Ministerio de Minas y Energía, la Unidad de Planeación Minero-Energética (Upme) y XM, el país cuenta con un valor unificado del factor de emisión de energía para inventarios de Gases de Efecto Invernadero (GEI). [18]

Precisamente, de acuerdo con XM, en Colombia el factor de emisión de CO₂ por generación eléctrica del Sistema Interconectado es de 164,38 gramos de CO₂ por kilovatio hora (KWh). [18]

Este nuevo factor de emisión de la matriz energética colombiana permitirá que las empresas calculen su huella de carbono asociada al consumo de energía eléctrica. [18]

Entre otros aspectos, el nuevo factor de emisión del Sistema Interconectado Nacional incorpora los lineamientos definidos por la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Cmnucc).

“Unificar criterios para la obtención del factor de emisión de energía aporta un valor para cuantificar la huella de carbono por concepto del consumo de energía eléctrica en los inventarios de GEI. De esta manera, XM ratifica su compromiso con la entrega de información de calidad para una gestión efectiva del cambio climático”, destacó María Nohemí Arboleda, gerente general de XM.

Para calcular el factor de emisión de CO₂ se tiene que:

1. De acuerdo con las mediciones realizadas en el software PowerPoint Log 5.9, tomar la primera energía activa del día 18 de febrero y la última energía activa del día tal.

Energía activa día 18: 38,40kWh

Energía activa día tal 25: 17870,82kWh

2. Restar las energías activas:

$$17870kWh - 38,40kWh = 17832,40kWh$$

3. Multiplicar el resultado obtenido anteriormente por 20%, que es el porcentaje que se quiere reducir con el sistema FVCR.

$$17832,40kWh \times 20\% = 3566,484kWh$$

4. El resultado anterior se multiplica por el factor unificado de emisión de CO₂ por generación eléctrica en Colombia que es de 164.38grCO₂/kWh.

$$3566,484 kWh \times \frac{0,164kgCO_2}{kWh} = 584,903376kgCO_2.$$

De lo anterior, se tiene que la huella de carbono asociada a energía eléctrica en sistemas interconectados es de 584,9037kgCO₂.

VII. CONCLUSIONES

Por su ubicación geográfica, la Universidad Simón Bolívar, tiene unos valores de radiación solar bastante buenos para la implementación de un sistema solar fotovoltaico, cuyo costo de inversión es un poco elevado, pero a lo largo de unos meses se verá reflejada la ganancia en cuanto al aspecto económico, porque también la ubica a la vanguardia en innovación por ser de las primeras universidades en la costa colombiana en utilizar energías limpias para cumplir con su requerimiento energético.

Por otro lado, con ayuda del software Power Log 5.9 se pudo conocer el valor de la potencia activa máxima que es de 296.07 kW, el cual es necesario para realizar el cálculo del número de módulos fotovoltaicos. Adicionalmente, se hizo la selección del inversor que tiene una potencia máxima de salida de 70 kW y una tensión nominal de 277/480V de corriente alterna. Tanto los módulos como el inversor tenían como requisito poder suministrar un poco más que la potencia total calculada.

Además, el cálculo de los arreglos de los paneles fotovoltaicos se ve gobernado por la necesidad energética a suplir, es decir la carga, lo que nos impulsa a estudiar si la manera como se instalan los paneles y los inversores ya sean en serie o en paralelo podrán soportar la carga instalada. Se estableció que se necesitaban 168 módulos que abastecen el 31% de la energía total consumida, lo cual se traduce en ahorro de 1/3 de la energía total consumida por la sede 3 de la universidad Simón Bolívar.

El arreglo fotovoltaico lo que nos traduce no es necesariamente el número de módulos, sino referenciar las conexiones en serie y en paralelo que debe tener el arreglo para obtener las condiciones necesarias para la entrada del inversor.

Conociendo el área total del techo de la sede 3 de la universidad Simón Bolívar, además de las dimensiones de los inversores y los módulos es posible calcular el área de trabajo útil, teniendo en cuenta el espacio que se debe dejar libre para la circulación de los técnicos al momento de realizar el mantenimiento a dicho sistema. Se estableció que se necesitaban 12 columnas y 5 filas. Es necesario un inversor por cada 60 módulos que producen 381 voltios para cubrir la carga total.

Finalmente, para obtener un mejor aprovechamiento de la energía solar se debe hacer el cálculo de la inclinación, las sombras y la distancia entre paneles, con el objetivo de tener un fluido de energía constante aprovechando la posición del sol.

La Universidad Simón Bolívar impactará positivamente el medio ambiente con la instalación de un sistema fotovoltaico interconectado a la red. Con ayuda de entidades como el Ministerio de Minas y Energía, la Unidad de Planeación Minero-Energética, entre otros podrá ser cuantificado el factor de emisión de dióxido de carbono al ambiente; el cual se especifica mediante una serie de pasos o ecuaciones por los que se ve gobernada esta variable. A carácter general, se puede observar que con la instalación del sistema solar fotovoltaico se reducirán las emisiones de efecto invernadero en un 20%, lo que hace este proyecto tentador a la implementación masiva con el fin de preservar el planeta en el que vivimos.

La ciudad de Barranquilla posee recursos hídricos abundantes que son utilizados para la generación de energía, a pesar de esto las facturas por el servicio son bastante elevadas. Dicho caso es el de la

universidad Simón Bolívar, que mejorará sus gastos de energía con la implementación de este nuevo sistema de abastecimiento energético.

VIII. REFERENCIAS

- [1] A. A. L. Simón Cortés, «Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía,» *Ciencias Estratégicas*, vol. 25, n° 38, pp. 375-390, 2017.
- [2] Solarama, «Solarama,» 2019. [En línea]. Available: <https://solarama.mx/blog/que-son-los-sistemas-fotovoltaicos>.
- [3] «Acciona,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.acciona.com>. [Último acceso: 1 Junio 2022].
- [4] C. C. J. T. C. Francisco Loaeza Salcedo, *Metodología de un sistema fotovoltaico conectado a la red (SFCR) para uso en luminarias del edificio de la 3 de la ESIME Zacatenco*, México, D.F, 2012.
- [5] Á. metropolitana, «Área metropolitana,» [En línea]. Available: <https://www.metropol.gov.co>.
- [6] PROCOLOMBIA, «PROCOLOMBIA,» 21 12 2018. [En línea]. Available: <http://www.procolombia.co>. [Último acceso: 4 Noviembre 2021].
- [7] A. G. Orozco, *DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED*, Bogotá, 2020.
- [8] A. C. Carlos Buele, *Modelación del Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red Eléctrica en la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca*, Cuenca, Ecuador, 2019.
- [9] L. B. Alejandro Rueda, «engi,» 2012. [En línea]. Available: <https://engi.co>.
- [10] Renova-energía, «Renova-energía,» [En línea]. Available: <https://www.renova-energia.com>.
- [11] J. A. Roca, «EL periódico de la energía,» 18 Mayo 2020. [En línea]. Available: <https://elperiodicodelaenergia.com>.
- [12] CELSIA, «Celsia.com,» 21 Junio 2018. [En línea]. Available: <https://www.celsia.com>.
- [13] Bnamerica, «bnamerica,» 9 Julio 2020. [En línea]. Available: <https://www.bnamerica.com>.

- [14] J. ZARCO, «Pv magazine,» 11 Febrero 2020. [En línea].
Available: <https://www.pv-magazine-mexico.com>.
- [15] A. Soluciones, «Ambiente Soluciones,» [En línea]. Available:
<https://www.ambientesoluciones.com>.
- [16] D. Cascueña, «OpenMind,» 19 Junio 2020. [En línea].
Available: <https://www.bbvaopenmind.com>.
- [17] «Geodatos,» [En línea]. Available:
<https://www.geodatos.net/coordenadas/colombia/barranquilla>.
[Último acceso: 2 junio 2022].
- [18] X. González, *En Colombia el factor de emisión de CO2 por generación eléctrica es de 164,38 gramos por kWh*, Bogotá, 2020.
- [19] «Trina solar,» [En línea]. Available:
<https://www.trinasolar.com>. [Último acceso: 1 Junio 2022].
- [20] «Ginverter,» [En línea]. Available: <https://www.ginverter.com>.
[Último acceso: 1 junio 2022].