

PROPUESTA PARA EL ANÁLISIS DE EFICIENCIA Y RETORNO DE
INVERSIÓN, PARA IMPLEMENTAR UNA SOLUCIÓN FOTOVOLTAICA
PARA UNA SUCURSAL BANCOLOMBIA UBICADA EN ENVIGADO
(ANTIOQUIA).



CARLOS ANDRES HINCAPIE PALACIO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN DE INNOVACIÓN TECNOLÓGICA
MEDELLÍN
2017

DECLARACION DE ORIGINALIDAD

1 de Febrero de 2017

CARLOS ANDRES HINCAPIE PALACIO

“Declaro que esta tesis (o trabajo de grado) no ha sido presentada para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o cualquier otra universidad” Art 82 Régimen Discente de Formación Avanzada.

Firma

A mi esposa y mi hijo, por todo el amor, apoyo, ayuda y el tiempo de familia que invertimos en mis estudios.

A mi profesor y director de proyecto por la paciencia para sacar este trabajo adelante.

Contenido

GLOSARIO	8
SIGLAS	9
RESUMEN	10
INTRODUCCION	11
1. GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	13
1.1 Principio de funcionamiento de un Sistema Solar Fotovoltaico (SSF)	14
1.1.1 Efecto Fotoeléctrico	14
1.1.2 Eficiencia De La Conversión Fotovoltaica	15
1.1.3 Comportamiento Corriente-Voltaje De Una Celda Solar	16
1.1.4 Influencia De La Radiación Solar	17
1.1.5 Influencia De La Temperatura	18
1.2 Componentes principales de un Sistema Solar Fotovoltaico (SSF)	19
1.2.1 Celda Fotovoltaica	19
1.2.2 Inversores.....	20
1.2.3 Dispositivos De Protección	21
1.2.3.1 Defectos En Una Instalación PV	23
1.2.4 Elementos De Anclaje Y Cables De Conexión.....	23
2. METODOLOGÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO	24
2.1 Selección de la ubicación y dimensionamiento del proyecto.....	25
2.1.1. Disponibilidad Del Recurso Energético	25
2.1.2. Información De Proveedores Y Equipos A Nivel Local.....	27
2.1.3. Dimensionamiento Técnico Y Diseño Del Sistema Fotovoltaico	27
2.1.3.1. Dimensionamiento Técnico	27
2.1.3.2. Evaluación Del Área Disponible	28
2.1.3.3. Selección De La Inclinação De Los Paneles	28
2.1.3.4. Evaluación De La Perdidas Del Sistema FV.....	29
2.1.3.5. Inversor	29
2.1.3.6. Eficiencia	30
2.1.3.7. Módulos Fotovoltaicos	30
2.2. Metodología Para El Cálculo Del SFV	32
2.2.1. Evaluación De Carga Instalada En La Sucursal Viva Las Palmas	32

2.2.1.1.	Día Solar En Envigado, Ant.....	32
2.2.1.2.	Calculo De La Carga Eléctrica Del Sistema	33
2.2.1.3.	Tensión Nominal Del SFV	33
2.2.1.4.	Calculo De Los Módulos Fotovoltaicos.....	34
2.2.1.5.	Calculo Del Inversor	34
2.2.1.6.	Calculo De Cableado De CA.....	36
2.2.1.7.	Calculo De Inclinación De Los Módulos.	36
2.2.1.8.	Distancia Entre Los Paneles	37
2.2.1.9.	Diagrama De Conexión De Los Módulos	38
2.3.	Diagrama Unifilar	39
2.4.	Energía Solar En Colombia	40
2.5.	Impacto Ambiental	44
2.6.	Metodología Para El Diseño De Sistemas Fotovoltaicos	45
3.	ANÁLISIS ECONÓMICO	46
3.1.	Evaluación Financiera	47
	CONCLUSIONES	53
	BIBLIOGRAFÍA	56

Lista de Tablas

Tabla 1. Proveedores de SFV	27
Tabla 2. Consumo mensual promedio y valor facturado de energía.....	27
Tabla 3. Latitudes de Envigado.....	29
Tabla 4. Irradiación Horizontal en Envigado.....	32
Tabla 5. Calculo de Carga	33
Tabla 6. Selección del nivel de tensión del SFV.....	34
Tabla 7. Sistemas Fotovoltaicos instalados en Colombia.....	42
Tabla 8. Presupuesto de Implementación	48
Tabla 9. Calculo de Productividad.....	48
Tabla 10. Rendimiento del SFV	49
Tabla 11. Resumen de Ahorros Energéticos del SFV	50
Tabla 12. Análisis de Rentabilidad	50
Tabla 13. Estimación Flujo Financiero.	51
Tabla 14. Indicadores Financieros	51

Lista de Figuras

Figura 1. Evolución de la potencia instalada acumulada mundial 2000-2011.....	14
Figura 2. Celda Fotovoltaica	15
Figura 3. Evolución de la eficiencia de las diferentes tecnologías de celdas solares	16
Figura 4. Respuesta típica (I - V) de una celda fotovoltaica	17
Figura 5. Variación de la potencia de las celdas solares en función de la radiación solar	18
Figura 6. Efecto de la temperatura en la potencia de las celdas solares	18
Figura 7. Esquema de un sistema solar fotovoltaico	19
Figura 8. Reducción y Purificación del Silicio para las Celdas FV	20
Figura 9. Conexión del Inversor	21
Figura 10. Instalación sistema FV	22
Figura 11. Proyección de la cubierta con los paneles solares.	23
Figura 12. Radiación Media Mensual en Medellin.....	24
Figura 13. Mapa de radiación solar global	26
Figura 14. Irradiación a lo largo de un día.....	26
Figura 15. Curva de carga contra la eficiencia del inversor	30
Figura 16. Características eléctricas de un módulo mono-cristalino.....	31
Figura 17. Características Mecánicas de un módulo típico.	32
Figura 18. Trayectoria Solar.....	37
Figura 19. Distancia mínima entre aristas de los paneles	37
Figura 20. Diagrama Módulos	38

Figura 21. Diagrama Unifilar del SFV.....	39
Figura 22. Diagrama unifilar Sucursal Bancolombia.....	39
Figura 23. Evolución de la demanda por energéticos principales.....	41
Figura 24. Mercado Eléctrico Nacional.....	42
Figura 25. Evolución de los sistemas Fotovoltaicos	43
Figura 26. Reducción Ambiental	44
Figura 27. Metodología Para El Diseño SFV.....	45

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1. Potencia a la salida del generador fotovoltaico.....	28
Ecuación 2. Calculo de Cableado CA	36
Ecuación 3. Calculo de inclinación.....	36
Ecuación 4. Distancia entre Modulos	38

GLOSARIO

Energía Limpia: es una energía en pleno desarrollo que excluye cualquier tipo de contaminación resultante de su obtención, desarrollo y uso.

Temperatura: magnitud física que hace referencia al movimiento de las partículas de un cuerpo, las cuales están directamente relacionadas con la sensación de calor y frío.

Batería Solar: es un dispositivo que consiste en una o más celdas electroquímicas que pueden convertir la energía almacenada proveniente de los rayos del sol en electricidad.

Panel Solar: dispositivo que aprovecha la energía de la radiación solar mediante energía solar térmica y son utilizados para generar electricidad.

Fuentes De Energía Renovables: Se consideran renovables debido a que son sostenibles y no ponen en riesgo de agotamiento futuro los recursos. Además de ser respetuosas con el medio ambiente, no ocasionan efectos negativos sobre el entorno y los impactos ambientales, cuando los hay, son mucho menores que los producidos por las energías no renovables.

INVERSOR: Equipo que es usado para cambiar el nivel de tensión eléctrica de la energía, su forma de onda o ambos. Usualmente un inversor (también conocido como unidad de acondicionamiento de potencia o sistema de conversión de potencia) es un dispositivo que cambia una entrada de c.c. a una salida de c.a.

SISTEMA AUTÓNOMO: Un sistema solar fotovoltaico que abastece energía en forma independiente de otras fuentes de energía.

SISTEMA INTERACTIVO: Un sistema solar fotovoltaico que opera en paralelo con otra fuente de producción de energía eléctrica conectada a la misma carga y que puede estar diseñado para entregar energía a dicha fuente. Para el propósito de esta definición, un subsistema de almacenamiento de energía de un sistema solar Fotovoltaico, tal como una batería, no es otra fuente de producción de potencia eléctrica.

SIGLAS

ASIF: Asociación de la Industria Fotovoltaica

CeRMAE: Centro de Referencia de Investigación y Desarrollo en Materiales Avanzados para la Energía

CINVESTAV: Centro de Investigación y de Estudios Avanzados

CIS: Seleniuro de Cobre e Índio

FV: Fotovoltaico(a)

ICMA: Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón

NREL: National Renewable Energy Laboratory

PSA: Plataforma Solar de Almería

QDs: Quantum Dots

SEIA: Solar Energy Industries Association

Si-a: Silicio amorfo

Si-c: Silicio cristalino

Si-mc: Silicio multicristalino

Si-sc: Silicio monocristalino

CRF: Capital Recovery Factor

RESUMEN

La presente investigación, responde a la pregunta de investigación: ¿es viable la instalación y aprovechamiento de un sistema fotovoltaico de pequeña escala ubicado en el municipio de Envigado Antioquia, para una sucursal Bancaria Viva las Palmas? Lo anterior implica satisfacer la curiosidad de la comunidad académica con respecto al principio físico que permite obtener electricidad a partir de la luz solar y al funcionamiento de este sistema para el suministro de energía eléctrica a los usuarios. De igual forma se realizara análisis técnico y económico de la implantación de tal sistema.

Hoy en día las tecnologías en energías renovables están en crecimiento debido a los objetivos que tienen varios países a nivel mundial por tener gran parte de su generación eléctrica a partir de estas energías verdes, pero por su alto costo inicial y los escasos incentivos de entidades públicas y privadas hacen inviable en muchos de los casos buscar este tipo de soluciones. Por tal motivo este proyecto se basara en la búsqueda de paneles solares comerciales de alta eficiencia, con el fin de encontrar un retorno de inversión (ROI) atractivo para la entidad que permita desarrollar este tipo de soluciones que aparte de generar un menor costo sobre la cuenta de energía, genera una aporte importante en temas de sostenibilidad.

PALABRAS CLAVES: Energía, Celda solar, fotovoltaico, potencia solar, factores térmicos, conversión eficiente, modelo eléctrico, producción limpia, células solares.

INTRODUCCION

Las pocas alternativas que se tienen hoy en el mundo para cambiar la energía que se obtiene de productos fósiles son notorias. Día a día el consumo de energía es excesivo, aun cuando se están utilizando nuevas ideas en el uso de este recurso finito. Sin embargo, gracias a este mundo, existen mejores ideas para dar un aporte al medioambiente y la sociedad en desarrollo. De acuerdo a lo anterior la Agencia Internacional de la Energía (AIE), en su informe mensual sobre el mercado petrolero, indico que para el 2016 se estima un consumo de 96,1 millones de barriles, lo que significa que el incremento respecto a 2015 será de 1,3 millones de barriles diarios y para 2017, el consumo será de 97,3 millones de barriles, es decir un alza interanual de 1,2 millones de barriles, lo que evidencia un consumo que ligeramente se ralentiza.

Es por ello que este proyecto se encamina en justificar la viabilidad de la utilización de paneles solares en las nuevas aperturas de oficinas bancarias, empezando por un piloto o prueba de concepto que se realizaría en Envigado, Antioquia. Lo anterior se logra destacando sus ventajas, el retorno de inversión y enfatizando que los sistemas fotovoltaicos no solo están dirigidos al sector rural, sino también al urbano y en especial a al segmento comercial. Uno de los casos de éxito que se tienen son con EPM (Empresas Públicas de Medellín) quien implemento 100 pendones de navidad que funcionaban con energía solar, de igual forma entrego más de 27 kit solares a familias de escasos recursos de veredas de Caceres y Caucasia.

El uso de fuentes alternativas o no convencionales dista mucho de mostrarse, en el corto plazo, como la solución definitiva a los inconvenientes de abastecimiento de energía o como el sustituto de las formas tradicionales de obtenerla, en particular en las zonas más densamente pobladas, sí se han logrado avances importantes en la construcción y en la operación de sistemas fotovoltaicos a gran escala que podrían implicar un desarrollo más acelerado de esta tecnología y una reducción más pronunciada en sus precios.

Como ejemplo de lo anterior, el Departamento de Energía de los Estados Unidos ha lanzado la iniciativa Sunshot¹ basada en la colaboración nacional para lograr que, a finales de la década, el costo de la tecnología fotovoltaica sea competitivo frente a otras tecnologías. En Colombia, el parque eólico Jepíachi² con una capacidad efectiva de 18.42 MW¹ es muestra del uso de fuentes alternativas de energía respecto a la electricidad generada con combustibles fósiles; en esta medida, la Universidad Escuela de Administración de Negocios (EAN) ha entendido su papel en el ámbito energético-ambiental y ha iniciado una serie de proyectos y actividades curriculares y de

¹ US Department of Energy (DOE). (s. f.). EERE: SunShot Initiative Home Page. [En línea] disponible en [http:// www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/](http://www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/).

² A. Pinilla, L. Rodríguez, y R. Trujillo. (2009). Performance evaluation of Jepirachi Wind Park. Vol. 34, n.º 1. [En línea] disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148108001481>

investigación sobre energías renovables y eficiencia energética, cuyo desarrollo es fundamental para la diversificación y mejor aprovechamiento de los recursos energéticos disponibles en Colombia.

De acuerdo a lo anterior se iniciara este análisis con la descripción general del principio físico de funcionamiento, luego se tratan los diferentes aspectos relacionados con la operación del sistema fotovoltaico y de cada uno de sus elementos constitutivos, para finalmente establecer la base sobre la cual ha de sustentarse el posterior análisis de viabilidad de un sistema como el que nos ocupa.

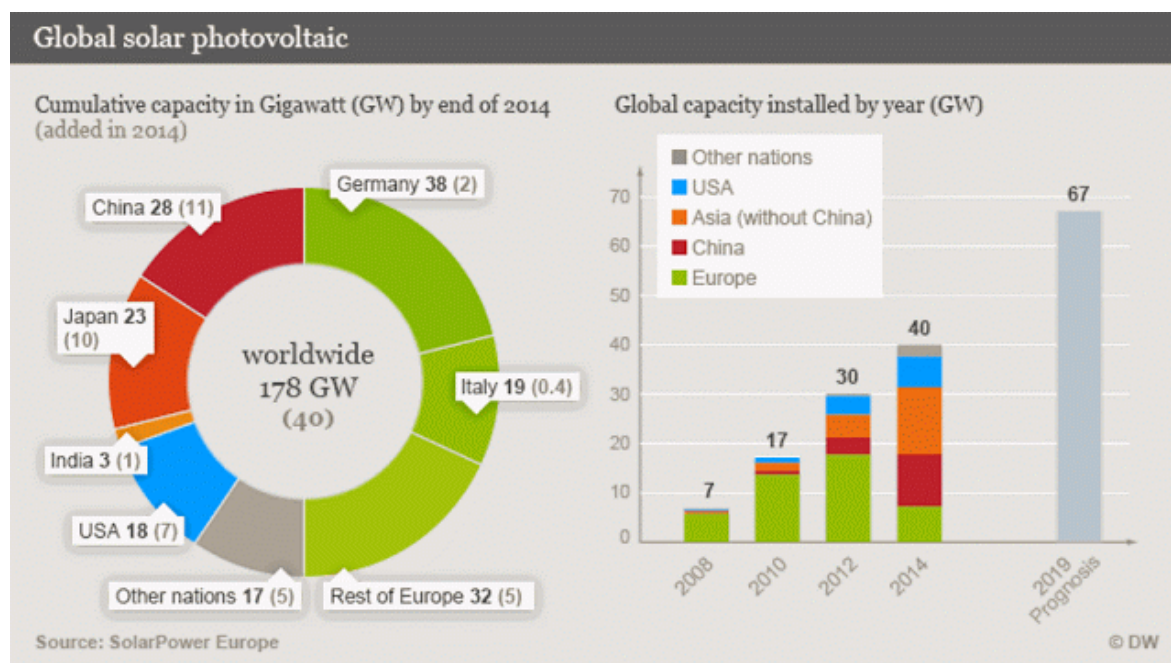
1. GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Los sistemas solares fotovoltaicos se han venido empleando en Colombia desde los años 60 para el suministro de electricidad a sistemas de telecomunicaciones. En 1979 la Empresa Nacional de Telecomunicaciones (Telecom) instaló para zonas no conectadas³. En 1996 se instaló en Colombia la primera central solar en La Venturosa, departamento del Vichada, con una potencia pico de 2.8 Kwp. A partir de entonces, ha crecido en Colombia el uso de esta tecnología principalmente en las zonas rurales y no conectadas a la red de energía nacional mediante el apoyo institucional que brinda el Estado. Respecto al recurso solar se debe tener presente el atlas de radiación solar en el que se representa la distribución espacial del potencial energético solar de Colombia⁴, el cual indica que el país tiene un buen potencial energético solar en todo el territorio, con un promedio diario multianual cercano a 4,5 kWh m².día. La figura 1, muestra el acelerado crecimiento mundial de la potencia instalada acumulada con tecnología solar fotovoltaica. De acuerdo con la European Photovoltaic Industry Association (EPIA), la energía solar fotovoltaica se ha convertido en la tercera fuente más importante de energía dentro del rango de las renovables, después de la hidráulica y la eólica, tomando como base la potencia instalada en el ámbito mundial. Europa sigue representando la parte predominante del mercado fotovoltaico mundial, seguida de Japón, Estados Unidos y China. Respecto a Centroamérica y América de Sur, se indica que aunque ambas regiones no han mostrado una gran actividad relacionada con la tecnología solar fotovoltaica hasta ahora, se espera conseguir una adecuada combinación de crecimiento económico, estabilidad política y disponibilidad de financiamiento para que se genere un mercado de rápido crecimiento en los próximos años.

³ M. H. Rodríguez. (2009). Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. [En línea] disponible en <https://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/a9%2028.pdf>.

⁴ Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) e Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2005). Mapas de radiación solar global sobre una superficie plana. [En línea] disponible en http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/2-Mapas_Radiacion_Solar.pdf.

Figura 1. Evolución de la potencia instalada acumulada mundial 2000-2011



FUENTE: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION

1.1 Principio de funcionamiento de un Sistema Solar Fotovoltaico (SSF)

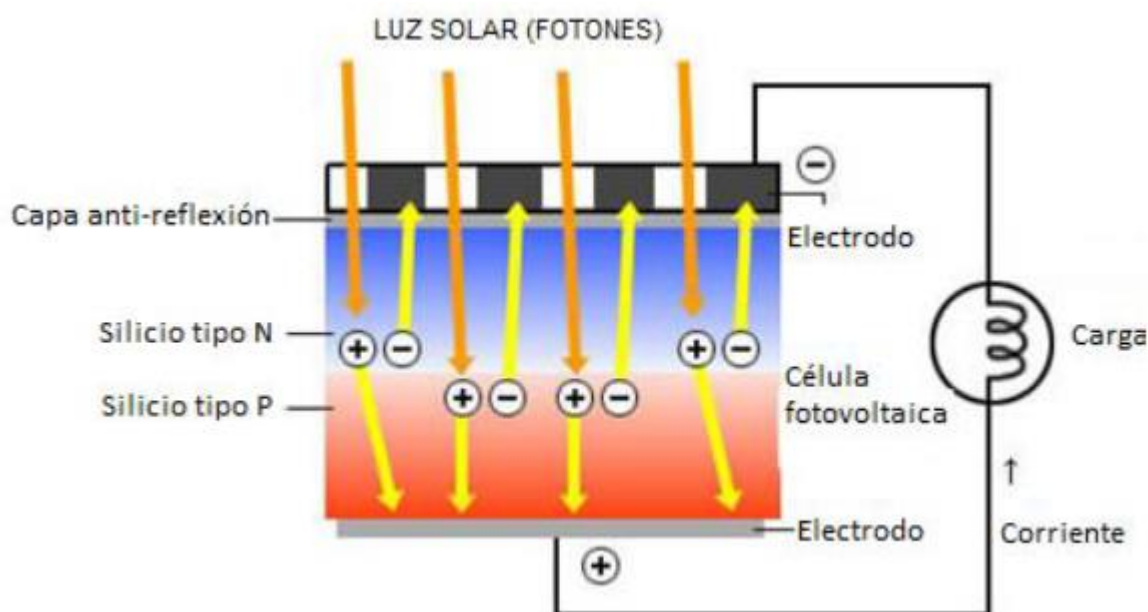
1.1.1 Efecto Fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico es el principio físico sobre el cual se ha basado el desarrollo de la tecnología de aprovechamiento directo de la radiación solar para producir electricidad. Este efecto consiste en la conversión directa de la energía solar en energía eléctrica lo cual se debe a un fenómeno físico de la interacción de la radiación luminosa con los electrones en los materiales semiconductores, fenómeno conocido como efecto FV. El objeto físico en el que este fenómeno tiene lugar es la celda solar, que es un diodo con la característica esencial de tener una superficie de unas decenas de cm². Para evidenciar el efecto FV se empleara conceptualmente el funcionamiento del diodo unión n-p, el elemento más utilizado para realización de las celdas solares es el silicio, debido a que este tiene 14 electrones de los que son 4 de valencia, disponibles para unirse con electrones de valencia de otros átomos. De acuerdo a lo anterior cuando un fotón ingrese a la zona "p" del material con una energía mayor que la barrera de potencial será absorbido y creara una pareja hueco-electrón. El electrón liberado se moverá hacia la derecha y el fotón que ingrese se moverá a la izquierda, ver figura 2. Este flujo producirá una acumulación de cargas positivas en la izquierda y de cargas negativas a la derecha, dando origen a un campo eléctrico. Cuanto más fotones lleguen a la unión, los campos

tienden a anularse el uno con el otro hasta llegar al punto que el campo desaparece cada dúo electrón hueco, por lo tanto esta sería la condición que determina la tensión a circuito abierto de cada celda FV. Finalmente, instalando unos electrodos sobre la superficie de la celda se puede utilizar el potencial creado.

Albert Einstein estableció que la emisión de electrones de la placa iluminada depende exclusivamente de la frecuencia de la luz y no de su intensidad. Por otra parte, aclaró que la cantidad de electrones emitidos es, esta sí, proporcional a la intensidad del haz. En consecuencia, lo ideal es una intensa radiación con la frecuencia adecuada para tener una abundante liberación de electrones en el material⁵.

Figura 2. Celda Fotovoltaica



FUENTE: TWIDELL, JOHN Y WEIR, TONY. RENEWABLE ENERGY RESOURCES.

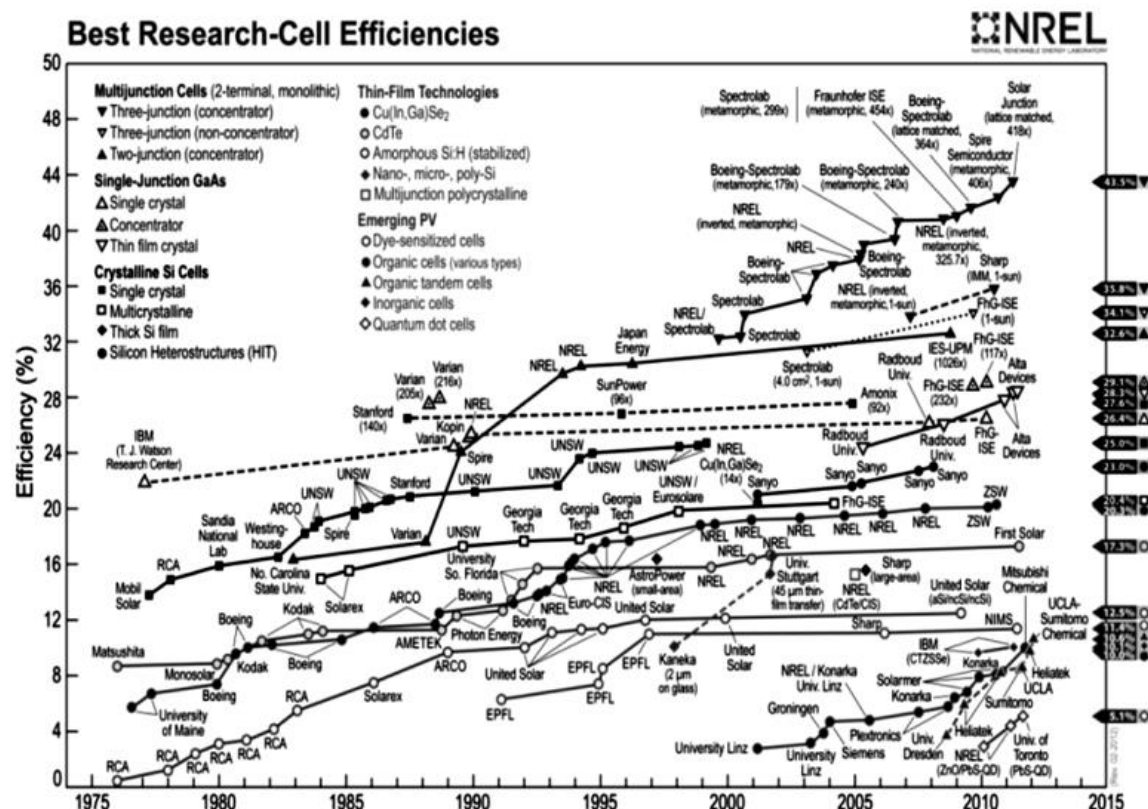
1.1.2 Eficiencia De La Conversión Fotovoltaica

La eficiencia de conversión de una célula fotovoltaica o celda solar se ha definido como el porcentaje de la energía solar incidente que un dispositivo fotovoltaico que es capaz de convertir en electricidad. Específicamente, la eficiencia de conversión puede tomarse ya sea como el porcentaje de la producción de energía con respecto a la energía recibida del sol o bien como el porcentaje de la potencia de salida con respecto a la potencia recibida del sol.

⁵ G. W. Castellan, Fisicoquímica. 2ed. México: Fondo Educativo Interamericano S. A., p. 450, 1974.

La figura 3, que registra los mayores logros a nivel de laboratorio, muestra de qué forma está mejorando la eficiencia de las celdas solares como resultado de las diversas investigaciones que se adelantan y de las diferentes tecnologías empleadas, y que en el corto plazo se espera reducir la barrera del 50 % en términos de eficiencia.

Figura 3. Evolución de la eficiencia de las diferentes tecnologías de celdas solares



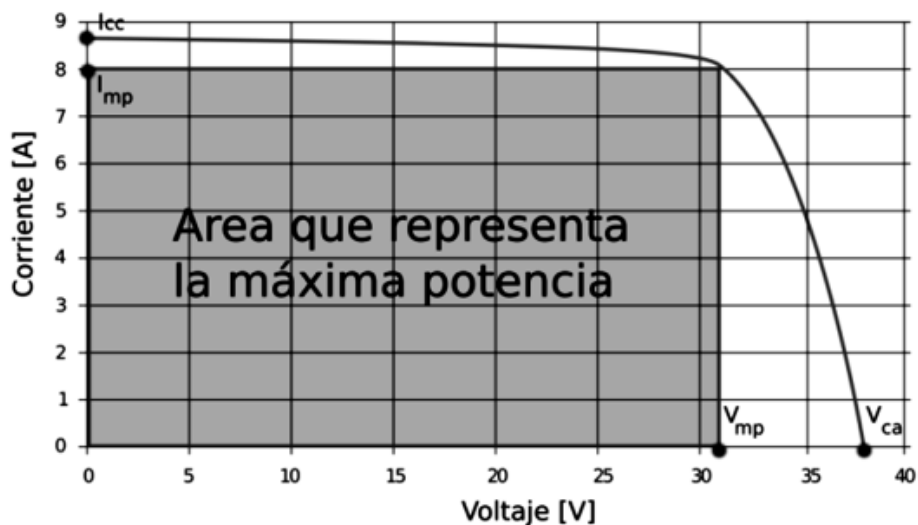
FUENTE: NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). (S. F.). BEST RESEARCH-CELLS EFFICIENCIES. [EN LÍNEA] DISPONIBLE EN [HTTP://WWW.NREL.GOV/NCPV/IMAGES/EFFICIENCY\ CHART.JPG](http://WWW.NREL.GOV/NCPV/IMAGES/EFFICIENCY\ CHART.JPG).

1.1.3 Comportamiento Corriente-Voltaje De Una Celda Solar

En términos generales pueden identificarse varios parámetros importantes en la figura 4: la corriente que la celda solar suministra cuando se conectan sus terminales en cortocircuito [I_{cc}], el voltaje entre terminales de la celda solar cuando no hay carga conectada o está en circuito abierto [V_{ca}], y la pareja voltaje-corriente para la cual se obtiene la máxima potencia [I_m , V_m], mostrada como área sombreada.

Para la identificación o selección técnica de los paneles solares se ha establecido la potencia pico (Wp) como el parámetro principal de identificación y selección.

Figura 4. Respuesta típica (I - V) de una celda fotovoltaica

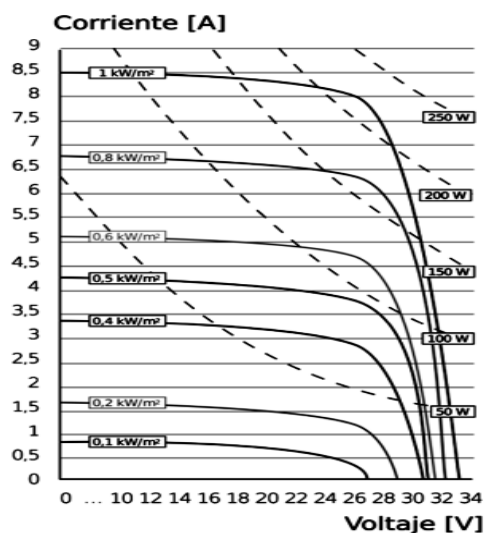


FUENTE: [HTTP://WWW.ENERGETIKA.COM.AR/CURVA%20I-V.HTML](http://www.ENERGETIKA.COM.AR/CURVA%20I-V.HTML)

1.1.4 Influencia De La Radiación Solar

La corriente generada por las celdas solares es función de la irradiancia² incidente sobre la misma. A medida que aumenta la irradiancia aumenta también la corriente producida por la celda solar, como se muestra esquemáticamente en la figura 5. Esta característica obliga a que las celdas solares se mantengan la mayor cantidad de tiempo de cara al sol.

Figura 5. Variación de la potencia de las celdas solares en función de la radiación solar

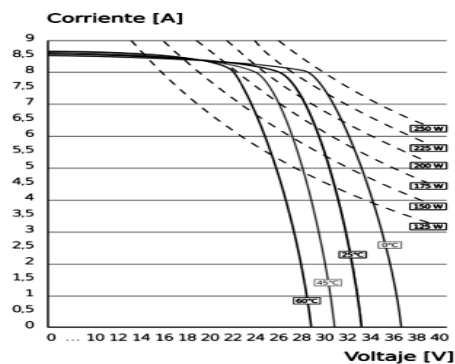


FUENTE: [HTTP://WWW.PHOTOWATT.COM/DOCUMENTS/PRODUITS/PW2050_EN.PDF](http://www.photowatt.com/documents/PRODUITS/PW2050_EN.PDF).

1.1.5 Influencia De La Temperatura

Las células solares funcionan mejor a bajas temperaturas, según las propiedades de sus materiales. Todos los materiales pierden eficiencia a medida que aumenta su temperatura de funcionamiento, como puede apreciarse por la disminución del área bajo las curvas de la figura 6. Puesto que gran parte de la energía de la luz incidente sobre las células solares se convierte en calor, es recomendable hacer coincidir las características del material de las células con la temperatura de operación o, en su defecto, proveer un sistema de enfriamiento.

Figura 6. Efecto de la temperatura en la potencia de las celdas solares

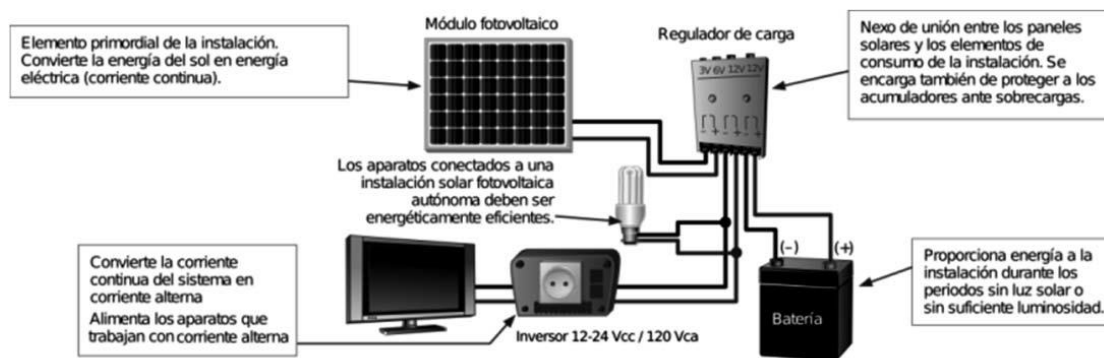


FUENTE: [HTTP://WWW.PHOTOWATT.COM/DOCUMENTS/PRODUITS/PW2050_EN.PDF](http://www.photowatt.com/documents/PRODUITS/PW2050_EN.PDF).

1.2 Componentes principales de un Sistema Solar Fotovoltaico (SSF)

El funcionamiento del sistema que la figura 7 representa es, someramente, el siguiente: la radiación electromagnética proveniente del sol incide sobre el módulo o panel solar, en este elemento se transforma la radiación solar recibida en electricidad unipolar o continua y se entrega al regulador/cargador que, a su vez, la lleva a la batería y al inversor. La batería almacena la energía recibida para utilizarla cuando no se disponga de la luz solar y el inversor se encarga de transformar la electricidad continua en electricidad alterna para los equipos o electrodomésticos que la requieran.

Figura 7. Esquema de un sistema solar fotovoltaico



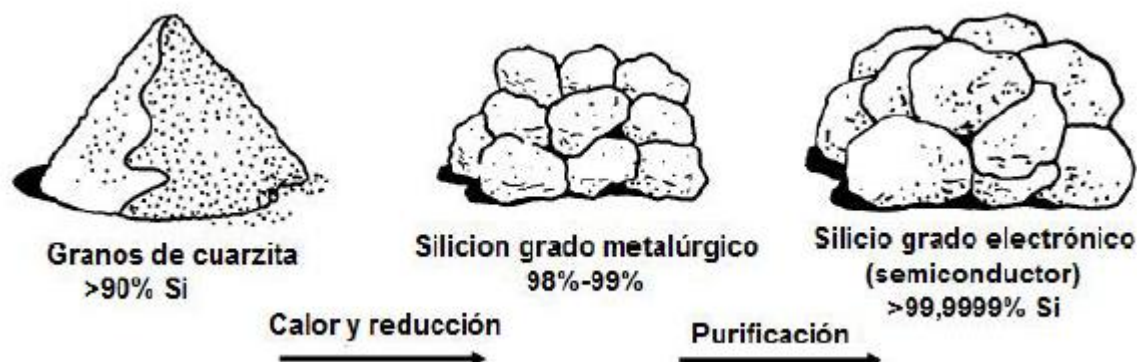
FUENTE: [HTTP://WWW.MCGRAW-HILL.ES/BCV/GUIDE/CAPITULO/8448171691.PDF.](http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf)

1.2.1 Celda Fotovoltaica

La celda FV es un dispositivo formado por una lámina de material semiconductor, con espesores que están entre 0.25mm y 0.35mm, con superficies aproximadas de 120 cm². El Silicio es el elemento más utilizado, cuyos procesos de fabricación son de altos costos por la purificación que requiere.

Actualmente el material más eficiente es el mono-cristalino que presenta características de duración y especificación superior a otro material. El rendimiento para el silicio Monocristalino está alrededor del 17% y para el policristalino de un 14%.

Figura 8. Reducción y Purificación del Silicio para las Celdas FV



FUENTE: MENDEZ MUÑOZ, JAVIER Y GARCIA CUERVO, RAFAEL, ENERGIA SOLAR FV.

Las características eléctricas principales de un módulo FV son las siguientes:

- **Potencia Pico:** Potencia suministrada por el modulo en condiciones normalizadas de prueba.
- **Radiación Solar:** 1000W/m².
- **Temperatura:** 25°C
- **Corriente Nominal:** Corriente máxima suministrada por el modulo.
- **Tensión Nominal:** Tensión máxima suministrada por el modulo.

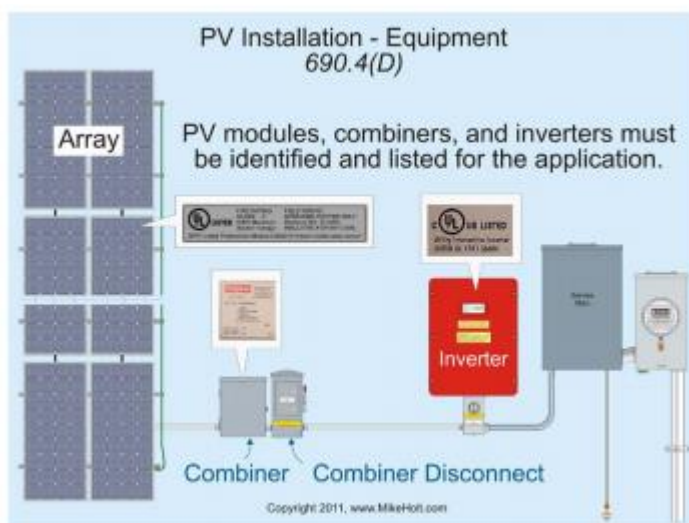
Los Módulos FV por lo general están generando mientras tengan radiación solar, no obstante dependen de gran medida de varios factores como la inclinación y temperatura entre otros. En días nublados también se genera electricidad, aunque su eficiencia se ve afectada. La vida útil de los paneles esta entre 20 y 30 años, debido a que estos componentes NO dejan de generar porque año tras año se pierde eficiencia, donde por especificaciones de algunos de los fabricantes la pérdida de los paneles inicia a los 10 años con un 10%

1.2.2 Inversores

El inversor Juega un papel muy importante en este proyecto, debido a que este sistema estará conectado a la red, también es un elemento que maximiza la producción de corriente del dispositivo FV y optimiza el paso de energía entre el modulo y la carga. Este equipo transforma la energía continua producida por los módulos (12V, 24V o 48V) en energía alterna que para este caso sería 208V bifásicos, para alimentar el sistema y/o introducirla en la red interna de la oficina. El inversor se instala entre el SFV y el punto de conexión a la red.

Dentro de las características principales que debe tener un equipo inversor se encuentran: voltaje de alimentación o de entrada, potencia máxima de salida y la eficiencia. El voltaje de operación o de entrada del inversor debe seleccionarse con base en el voltaje de suministro de panel solar fotovoltaico. Además de esto, los inversores deben actuar como elemento seleccionador del punto de potencia máxima del panel o paneles solares. De igual manera, han de estar adecuadamente protegidos contra cortocircuitos y sobrecargas, contar con la función de conexión y desconexión automática cuando no se requiera alimentación de corriente alterna, soportar demandas instantáneas de hasta el 200 % de su potencia nominal y cumplir, naturalmente, con los requisitos del Reglamento Técnico para Instalaciones Eléctricas (RETIE) y la normatividad Icontec.

Figura 9. Conexión del Inversor



FUENTE: NEC 2014, FIGURA 690-25

1.2.3 Dispositivos De Protección

La función básica de los elementos de protección es la de reaccionar de la forma más adecuada ante la ocurrencia de un defecto o falla.

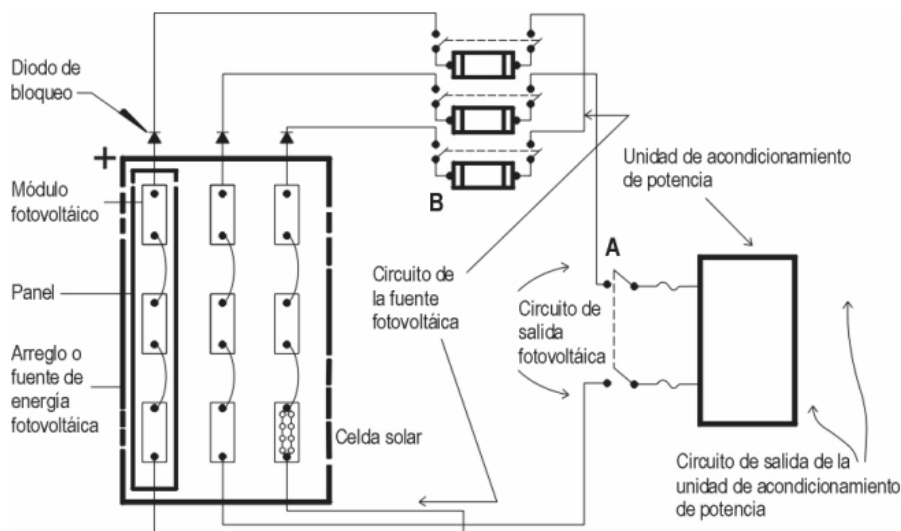
Debe ser muy estricto el cumplimiento normativo tanto RETIE como NEC 2014 y las normas Icontec respectivas. Como principio general debe garantizarse un grado mínimo de aislamiento eléctrico para equipos y materiales; también se debe incluir los elementos necesarios que garanticen la seguridad de las personas frente a contactos críticos, especialmente donde el nivel de voltaje de la instalación supere los 50 V de corriente alterna o 120 V de corriente continua; y debe contarse con todas las protecciones

necesarias para la instalación contra cortocircuitos, sobrecargas y sobretensiones (internas y externas).

Según la norma NTC 2050, en todas las fuentes fotovoltaicas debe tener un conductor de un sistema bifilar de más de 50 V nominales y el conductor neutro de un sistema trifilar que estén sólidamente puestos a tierra. Se debe colocar un punto de conexión de puesta a tierra lo más cercano posible de la fuente fotovoltaica, así el sistema quedará mejor protegido contra las posibles subidas de tensión producidas por los rayos. Las estructuras metálicas de los equipos que componen el sistema también deberán estar aterrizadas a tierra.

El tablero de distribución general representa el punto de acople común (PCC) donde se realiza la conexión en paralelo entre el sistema fotovoltaico a la red, las protecciones de corriente y los medidores de energía. Según la norma NTC 2050, la capacidad de los conductores y la corriente nominal o ajuste de disparo de los dispositivos de protección contra sobrecorriente en el punto en que estará ubicada la protección, no debe ser menor al 125 % de la corriente nominal a la salida del inversor.

Figura 10. Instalación sistema FV



FUENTE: NEC 2014, FIGURA 690-1 (DIAGRAMA SIMPLIFICADO, NO SE MUESTRA EL CIRCUITO DE PUESTA A TIERRA DEL SISTEMA)

1.2.3.1 Defectos En Una Instalación PV

A continuación, se indica los posibles efectos que pueden producirse en una instalación fotovoltaica y los aparatos de maniobra necesarios en la misma, con el objetivo de garantizar unas condiciones mínimas de seguridad y su correcto funcionamiento.

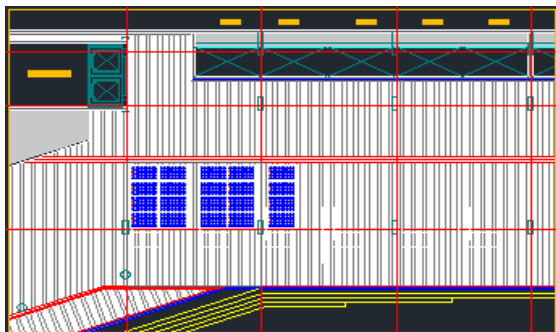
- a. Contactos directos e indirectos
- b. Sobretensiones
- c. Sobreintensidades
- d. Cortocircuitos

1.2.4 Elementos De Anclaje Y Cables De Conexión

Los paneles FV deben instalarse en una estructura estable y duradera que además de soportar la matriz o el campo fotovoltaico resista los embates del viento, la lluvia, el granizo y otras condiciones adversas. No obstante, en sistemas de pequeña escala como este resulta más económico el uso de estructuras estacionarias inclinadas a un ángulo fijo determinado por la latitud del sitio, los requisitos de la carga y la disponibilidad de la luz solar.

Por su parte, los cables y conectores deben ser resistentes a los rayos UV, al ozono, a las exigencias mecánicas y a las variaciones extremas de temperatura. Por otro lado, no debe descuidarse la regulación (caída de voltaje) entre la matriz fotovoltaica y el inversor. Los conductores para corriente continua deben tener doble aislamiento y ser alambres de cobre de acuerdo con las especificaciones del fabricante si no se cuenta con normatividad al respecto. De acuerdo a lo anterior los cables deben ser especificados para soluciones FV, debido a que soportaran temperaturas extremas, humedad y hasta acciones químicas que puedan aplicar a las cubiertas. Todo ello garantizando las máximas prestaciones de seguridad en caso de incendio, de igual forma teniendo presente que pueden manejar hasta 1800V.

Figura 11. Proyección de la cubierta con los paneles solares.



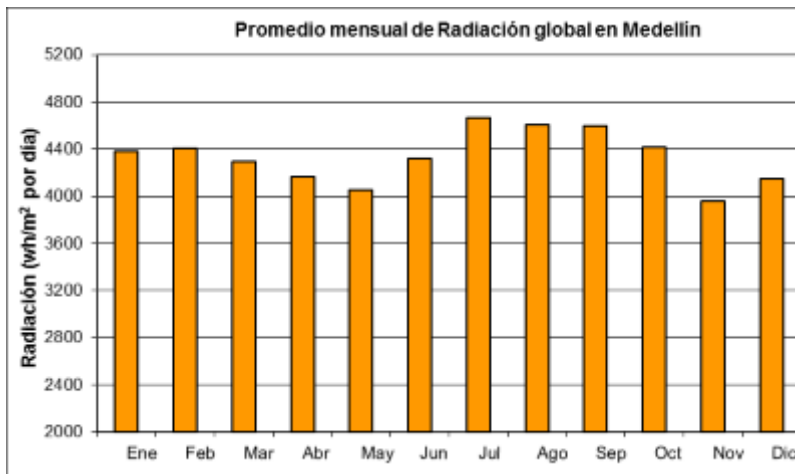
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA ACAD

2. METODOLOGÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO

En este trabajo se pretende, evaluar la viabilidad técnica y económica de implementar un sistema fotovoltaico en una sucursal bancaria; De igual forma sensibilizar a los constructores y operadores de red sobre la posibilidad de adelantar proyectos demostrativos de introducción de energía fotovoltaica en el mercado colombiano.

Colombia⁶ cuenta con niveles importantes de radiación solar, el promedio multianual de la radiación solar global es de 4,5 kWh/m², destacándose la Guajira con un valor promedio de 6,0 kWh/ m² y la Orinoquía con un valor un poco menor. En Medellin la radiación global está entre 4.5 kWh/m² y 5 kWh/m², lo que significa que las horas de sol estándar son superiores a 4.5

Figura 12. Radiación Media Mensual en Medellin



FUENTE: [HTTP://ATLAS.IDEAM.GOV.CO/VISORATLASRADIACION.HTML](http://atlas.ideam.gov.co/visoratlasradiacion.html)

En el caso de Colombia, además del alto costo de la inversión, habría que eliminar otra barrera, regulatoria, para posibilitar la venta de electricidad a la red. Hay un mercado mayorista y un mercado minorista de electricidad en el país. El mercado de generación eléctrica en Colombia tiene 4 formas de transar la energía: un mercado spot, un mercado

⁶ www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/2-Mapas_Radiacion_Solar.pdf

de contratos bilaterales, un mercado de confiabilidad y un mercado de reservas. La producción se realiza mediante un despacho de generación centralizado, en el que participan plantas en su mayoría hidráulicas y térmicas (gas y carbón) mayores de 10 o 20 MW, que hacen sus ofertas de disponibilidad y precio y producen según su mérito o competitividad⁷. Las energías alternativas tienen dificultad para competir por sus mayores costos de inversión, como se dijo; y las intermitentes no podrían contar con un cargo por confiabilidad, la señal que busca garantizar la expansión en el país. El mercado minorista está muy poco desarrollado, y se anticipa que la masificación de medidores inteligentes, muy avanzada en otros países, facilite la participación de la demanda y operaciones de compraventa de energía.

En este trabajo se evalúan distintos escenarios para identificar la viabilidad y factibilidad técnica y económica de una instalación fotovoltaica que supla energía eléctrica una oficina bancaria, más específicamente la sucursal las Palmas en el municipio de Envigado. Para comenzar se evalúan diferentes tecnologías, así como los incentivos a nivel nacional. Los resultados indican que los aún altos costos de inversión no facilitan una penetración amplia de estos sistemas y se propone la realización de proyectos demostrativos impulsados por constructores y operadores de red como mecanismo para introducir la energía fotovoltaica al mercado colombiano y mostrar su factibilidad para alimentar consumos residenciales e intercambiar energía con la red de distribución eléctrica.

2.1 Selección de la ubicación y dimensionamiento del proyecto

Con el fin de cumplir con los objetivos propuestos en el proyecto, fue necesario seleccionar una ubicación específica para el desarrollo del mismo. El lugar escogido para tal fin fue el municipio de Envigado, aprovechando su cercanía con la oficina principal para así facilitar tanto las investigaciones relacionadas con las mediciones de radiación solar en la zona como la atención de posibles fallas del sistema.

Para el desarrollo de este proyecto fue necesario identificar previamente la disponibilidad energética de la zona y el comportamiento de la red eléctrica.

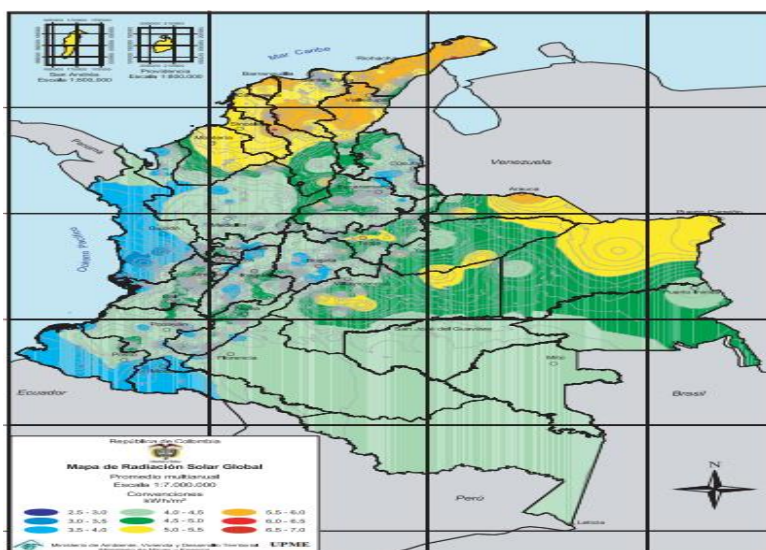
2.1.1. Disponibilidad Del Recurso Energético

En esta primera etapa se investigó el recurso energético solar disponible en el alto de las palmas. Para esto fue necesario acudir al Atlas de Radiación Solar de la UPME⁸ en donde se evidencia que el promedio multianual de la radiación solar global es de 4 kWh/m² (ver figura 13).

⁷ www.eafit.edu.co/.../Articulo%20poder%20de%20mercado%20en%20mercados%20e...

⁸ http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/2-Mapas_Radiacion_Solar.pdf

Figura 13. Mapa de radiación solar global



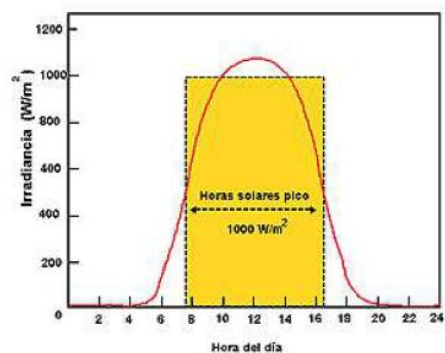
FUENTE: [HTTP://WWW.UPME.GOV.CO/DOCS/ATLAS_RADIACION_SOLAR/2-MAPAS_RADIACION_SOLAR.PDF](http://www.upme.gov.co/DOCS/ATLAS_RADIACION_SOLAR/2-MAPAS_RADIACION_SOLAR.PDF)

Para simplificar el cálculo de la energía eléctrica generada diariamente (ver grafica 14) por un panel fotovoltaico, se define el día solar promedio para el lugar a instalar. De acuerdo a la radiación obtenida da los mapas de radiación solar de Medellín el día solar equivale a:

$$\text{Dia. Solar} = \frac{4\text{kWh/m}^2}{1\text{kWh/m}^2} = 4\text{horas}$$

Este valor brinda una aproximación del recurso solar energético en Envigado, Antioquia.

Figura 14. Irradiación a lo largo de un día



FUENTE: [HTTP://CALCULATIONSOLAR.COM/BLOG/](http://CALCULATIONSOLAR.COM/BLOG/)

2.1.2. Información De Proveedores Y Equipos A Nivel Local.

Luego de realizar una búsqueda en la base de datos de industrias locales tanto distribuidores como instaladores de sistemas FV, se efectúa una recopilación y una breve vigilancia tecnológica donde se consolida la siguiente tabla 1. .

Tabla 1. Proveedores de SFV

PROVEEDORES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN COLOMBIA			
EMPRESA	FABRICANTE	PAGINA WEB	TELEFONO
GAMMA - CORONA	HYNDAI	www.gamma.com.co	57(4) 305 80 03
ERCO	YINGLI	www.ercoenergia.com.co	57 (4)266 3218
DATECSA	KYOCERA	www.datecsa.com	57(4)695 7070
HYBRYTEC	SOLARCENTURY	www.hybrytec.com	57 (4) 444 05 20

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

2.1.3. Dimensionamiento Técnico Y Diseño Del Sistema Fotovoltaico

Esta es una de las Hitos más importantes del proyecto, pues en esta se definen la carga del sistema y los elementos a instalar. También se analiza el impacto que tiene la instalación fotovoltaica sobre la construcción.

2.1.3.1. Dimensionamiento Técnico

Existen dos maneras de estimar o dimensionar el sistema fotovoltaico: la primera, partiendo de la disponibilidad económica para determinar la capacidad de potencia del sistema y la otra partiendo de la demanda de energía para conocer el costo total de la instalación.

Para llevar a cabo el dimensionamiento técnico de este proyecto, se partió de la demanda energética promedio de una oficina en estrato comercial, ubicado en Envigado.

Tabla 2. Consumo mensual promedio y valor facturado de energía.

Estrato	No. Usuarios	Equipos	Consumo kWh	Valor Facturado
Comercial	10	HVAC	4250	\$2.337.500

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

La tabla 2 muestra los consumos para una oficina ubicada en Envigado, el cual promedia en un valor aproximadamente de 4250 kWh-mes. Con este dato se puede encontrar la potencia que debe generar el generador fotovoltaico (módulos fotovoltaicos) para suplir la carga de la oficina.

Ecuación 1. Potencia a la salida del generador fotovoltaico

$$P_{GFV} = \frac{E}{HSS * N * PR}$$

Con la ecuación 1 se puede encontrar la potencia que deberá suplir el generador fotovoltaico a partir del consumo promedio mensual investigado anteriormente, donde:

E: energía consumida mensualmente (kWh-mes).

HSS: horas de sol estándar de la zona (para este caso 4h).

N: número de días en el que consume la energía E (30 días).

PR: factor de rendimiento del sistema (0,7 a 0,8).

2.1.3.2. Evaluación Del Área Disponible

Un aspecto fundamental en la localización de los paneles es asegurar que no se tendra sombra, en especial en las horas centrales del dia. Estas características determinan la ubicación del sistema fotovoltaico, su ubicación con respecto al sur geográfico, la mayor inclinación sobre el plano horizontal y las características de las estructuras de soporte. La Instalación de los paneles en la oficina edificación debe tener presente varios puntos tales como climatología que asegure que la temperatura de los paneles no se incremente significativamente debido a que afecta directamente el rendimiento, también el análisis de vientos.

2.1.3.3. Selección De La Inclinación De Los Paneles

En las latitudes de Envigado, mostradas en la tabla 2, la orientación óptima de los paneles es hacia el sur. De igual forma la ubicación de los paneles depende de la latitud. Para observar el diseño de los paneles fotovoltaicos instalados en la oficina, se utilizó el programa SketchUp, el cual permite ubicar la construcción diseñada en Google Earth y hacer simulaciones de sombras para la estructura según su localización.

Tabla 3. Latitudes de Envigado

Datos de la Estación Meteorológica		
Latitud	Longitud	Altitud
6° 10' 19"	75° 35' 09'	2500

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

La inclinación normalmente es igual a la latitud del lugar, lo que es posible de lograr cuando no se tienen impedimentos arquitectónicos.

2.1.3.4. Evaluación De La Perdidas Del Sistema FV

Es vital para la evaluación y retorno del proyecto, evaluar las perdidas/caídas de tensión introducidas por los componentes, calidad solar, calidad ambiental y porcentaje de eficiencia de los paneles. Para ello se debe considerar que la sumatoria de todas las perdidas debe estar alrededor del 30%, por tal motivo se debe aumentar en el mismo porcentaje la potencia pico del sistema fotovoltaico. De igual forma los SFV están limitados por diferentes perdidas y alguna de ellas son mitigables y otras intrínsecas al sistema. Algunas de ellas son:

- ✚ Obstrucción por el contacto superior de la superficie (3%).
- ✚ Reflexión (1%)
- ✚ Energía del fotón menor que la energía de la banda prohibida (23%)
- ✚ Exceso de energía del fotón (33%)

2.1.3.5. Inversor

Este elemento debe garantizar la calidad de la forma de onda y la frecuencia en de voltaje en CA. Para el caso de este proyecto se seleccionó un inversor sinusoidal para evitar recalentamiento en motores de corriente alterna o suministrar energía en equipos que son sensibles a los armónicos. Los parámetros que se deben tener presente para seleccionar un inversor son:

- ✚ Potencia máxima
- ✚ Sobrecarga máxima
- ✚ Eficiencia
- ✚ Forma de onda
- ✚ Marguen de frecuencia

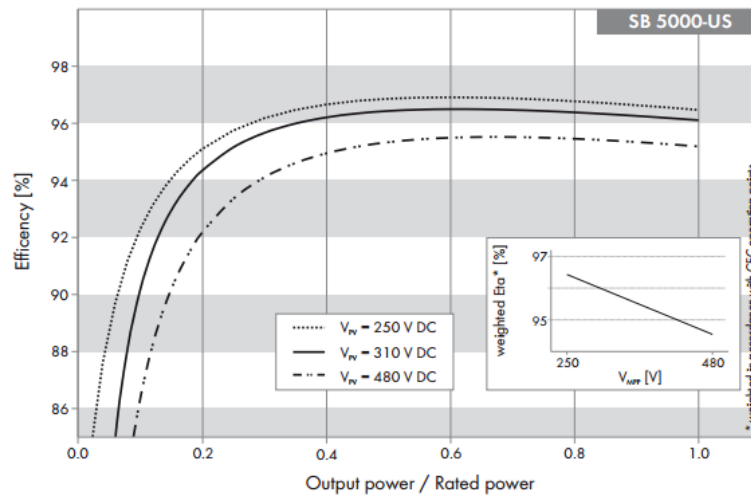
Según la ecuación 1, la potencia que debe producir el generador fotovoltaico es de 5,3 kW, es decir, esta es la potencia que debe haber a la salida del inversor. Conociendo esta potencia, se puede iniciar la búsqueda del inversor en el mercado. Una vez se ha seleccionado un inversor, los parámetros de más importancia a tener en cuenta son la potencia de entrada del mismo y su punto máximo de potencia (MPP). Para este proyecto

se realizó el dimensionamiento con un inversor Sunny Boy 5000US 208Vac, el cual necesita a la entrada una potencia máxima de 6,2 kW y tiene un punto máximo de potencia de 250 a 480 V (tabla 3).

2.1.3.6. Eficiencia

La eficiencia varía con la carga y es por ello que cuando el consumo es muy bajo o muy alto la eficiencia decrece. Para el caso del inversor seleccionado el fabricante proporciona la curva que relaciona estos dos valores como se ilustra en la siguiente figura.

Figura 15. Curva de carga contra la eficiencia del inversor



FUENTE: [HTTP://FILES.SMA.DE/DL/4752/SB50US-80US-IA-EN-37.PDF](http://files.sma.de/dl/4752/SB50US-80US-IA-EN-37.PDF)

2.1.3.7. Módulos Fotovoltaicos

Las Celdas son elementos formados por un semiconductor, que tienen de espesor entre 0.25mm y 0.35mm. Para realizar estos módulos se requiere del silicio para el caso que nos aplica, pero la purificación de este material es costoso o contaminante.

Las celular fotovoltaicas son elementos que proporcionan unos valores de corriente y tensión limitados, en comparación a lo requerido por los equipos convencionales. Los módulos actualmente manejan comercialmente potencias entre 150 Wp y 350 Wp, según el tipo y la eficiencia de las celdas que lo componen. El Peso de los Módulos se considera de 15 Kg/m², más una estructura de soporte de 10 Kg/m². Para este caso se despreciara la carga de viento, a que debido a que están inmersos en una cubierta no se excederán velocidades de 20 Km/h. Estos módulos generan electricidad durante casi todo el año,

siempre y cuando se tenga radiación solar, en especial en las épocas de verano y esto combinado con la inclinación de los módulos. La vida de los Módulos esta entre 20 y 25 años y en el mercado se encuentra con garantías que van desde los 10 años hasta los 25 años. Se requieren muchos años para que estos elementos captadores dejen de generar electricidad, debido a que a sus 10 años solo ha perdido 10% de su potencia.

Actualmente el material más eficiente es el silicio Mono-cristalino con eficiencias hasta del 18%, no obstante también está el Silicio Poli-cristalino que tiene eficiencia hasta del 15% y los amorfos hasta el 10%.

Figura 16. Características eléctricas de un módulo mono-cristalino

| Mono-crystalline Type |

		HIS-5000RG		
		275	280	285
Nominal output (Pmpp)	W	275	280	285
Voltage at Pmax (Vmpp)	V	31.6	31.7	31.8
Current at Pmax (Impp)	A	8.7	8.8	8.9
Open circuit voltage (Voc)	V	38.4	38.5	38.7
Short circuit current (Isc)	A	9.3	9.4	9.5
Output tolerance	%	+3/-0		
No. of cells & connections	pcs	60 in series		
Cell type	-	6" Mono-crystalline silicon with PERL technology (Hyundai cell, Made in Korea)		
Module efficiency	%	16.8	17.1	17.4
Temperature coefficient of Pmpp	%/K	-0.45	-0.45	-0.45
Temperature coefficient of Voc	%/K	-0.33	-0.33	-0.33
Temperature coefficient of Isc	%/K	0.032	0.032	0.032

※ All data at STC (Standard Test Conditions). Above data may be changed without prior notice.

FUENTE: HYUNDAI HEAVY INDUSTRIES CO. LTDA.

De igual forma es importante considerar algunas normas internacionales que aprueban el uso de Módulos fotovoltaicos tales como:

- ✓ IEC 61215 (Ed.2) y IEC 61730 por TÜV Rheinland, VDE
- ✓ Listado en UL (UL1703), Clasificación Fuego Clase C
- ✓ Tolerancia de Potencia +3/-0 %
- ✓ Certificaciones ISO 9001:2000, ISO 14001:2004 y 50001:2011 Certified
- ✓ IEC 61701 (Ensayo de corrosión niebla salina)
- ✓ UL listed (UL 1703), Type 1 for Class A Fire Rating
- ✓ Output power tolerance +3/-0 %
- ✓ OHSAS 18001:2007 Certified
- ✓ Advanced Mechanical Test (8,000 Pa) Passed (IEC)
- ✓ Mechanical Load Test (40 lbs/ft2) Passed (UL)

Figura 17. Características Mecánicas de un módulo típico.

Dimensiones	983 mm (An.) × 1,645 mm (Lo.) × 35 mm (Al.)
Peso	18.5 kg aprox.
Células Solares	60 células en series (6 × 9 matriz)
Cables de Rendimiento	Cables 4mm ² con conectores polarizados y resistentes a condiciones ambientales, certificación TÜV, longitud 1.0 m
Caja de Juntas	IP65, a prueba de condiciones ambientales, certificación TÜV
Diodos Bypass	3 diodos bypass para prevenir disminución de potencia por sombra parcial.
Construcción	Frente: Cristal temperado bajo en hierro, de 3.2 mm y alta eficiencia de transmisión Encapsulante: EVA Posterior: Película a prueba de condiciones ambientales extremas
Estructura	Aluminio anodizado

FUENTE: HYUNDAI HEAVY INDUSTRIES CO. LTDA.

2.2. Metodología Para El Cálculo Del SFV

La metodología que se desarrolló para realizar el cálculo de los sistemas fotovoltaicos, se inició por una caracterización de los proveedores y equipos a nivel nacional, seguido se recopiló la información correspondiente al recurso solar disponible en Envigado, posteriormente se dimensionó el sistema y por último con la mayor importancia la evaluación económica.

2.2.1. Evaluación De Carga Instalada En La Sucursal Viva Las Palmas

2.2.1.1. Día Solar En Envigado, Ant.

Para el diseño del sistema solar en Envigado, se trabajó con la irradiancia solar (W/m²) que se obtuvo de la estación Fundadores. Estos datos suministrados por el IDEAM corresponden a la irradiancia para cada hora del día para el año 2015.

Tabla 4. Irradiación Horizontal en Envigado

MES	IRRADIACION (kW/W2)
	PROMEDIO
ENERO	4300
FEBRERO	4400
MARZO	4350
ABRIL	4200
MAYO	3800
JUNIO	4300
JULIO	4750
AGOSTO	4500

SEPTIEMBRE	4300
OCTUBRE	3900
NOVIEMBRE	4000
DICIEMBRE	4100

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

2.2.1.2. Cálculo De La Carga Eléctrica Del Sistema

Para calcular la carga total del sistema se debe analizar la potencia consumida por cada equipo o dispositivo y la tensión de operación, con esto se procede al cálculo de potencia total del sistema.

Para facilitar dicha metodología, se registraron todos los valores en una tabla de Excel, donde se evidenciara las características de los equipos.

Tabla 5. Cálculo de Carga

DISEÑO SISTEMA FOTOVOLTAICO SUC. LAS PALMAS							
Cálculo de Carga Eléctrica							
Descripción	Potencia (W)	Cantidad	Uso Hr/día	Eficiencia DC-AC	Potencia Total (W)	Energía Total (Wh/Día)	Energía Total (Wh/Mes)
Iluminación	35	13	12	0.89	511.2	6134.8	184044.9
Tomas N	180	33	2	0.89	6674.2	13348.3	400449.4
UPS	1572	1	24	0.89	1766.3	42391.0	1271730.3
HVAC	3472	1	6	0.89	3901.1	23406.7	702202.2
Total					12852.8	85280.9	2558427.0

Consumo Calculado de la Carga del Sistema	
Tensión Nominal	48
Potencia Inversor (W)	6426
Energía Corregida	87021

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

2.2.1.3. Tensión Nominal Del SFV

Se debe seleccionar un voltaje de acuerdo a las cargas que se van a manejar y una corriente total. Para ello se debe tener presente que las cargas que se manejarán son de corriente alterna y se debe seleccionar un sistema que maneje entre 30 y 120 amperios, con lo anterior se puede seleccionar el cableado. En la tabla 6 se evidencia el parámetro a tener en cuenta para selección del sistema.

Tabla 6. Selección del nivel de tensión del SFV

Potencia [W]	Vn [V_{dc}] Voltaje de entrada al inversor
<1500	12
1500-5000	24-48
>5000	48-120

FUENTE: KREITH, FRANK Y WEST, RONALD, CRC HANDBOOK OF ENERGY EFFICIENCY.

2.2.1.4. Cálculo De Los Módulos Fotovoltaicos

Uno de los principales puntos de la selección es el proveedor, la eficiencia del módulo y la potencia pico, debido a que a mayor eficiencia y potencia, menor número de módulos y área se requieren por instalación.

Para este proyecto se consideraron módulos monocristalinos de 285W, ya que su potencia es una de las más altas en su clase y el material mayor eficiencia a comparación de otros, adicional este módulo permite operar en múltiples configuraciones sin afectación alguna.

El número de horas del día solar es utilizado en los cálculos de las dimensiones del arreglo fotovoltaico para determinar la potencia del diseño y de acuerdo al cálculo se deben utilizar al menos 20 módulos en un arreglo de dos filas

El módulo irá laminado en estructura tipo sándwich, estando formada la capa frontal por vidrio templado de alto coeficiente de transmisión y no menos de 3 mm de grosor, la capa posterior por Tedlar (fluoruro de polivinilo) y el relleno a base de sendas láminas de EVA (acetato de vinilo-etileno) transparente, asegurando así su durabilidad en exposición a intemperie. Cada módulo tendrá una caja de conexión impermeable y resistente a la radiación ultravioleta, los microbios y la temperatura, situada en la parte trasera del mismo, con una protección IP65 y contará con diodos de bypass. De la misma saldrán dos cables claramente marcados con + (positivo) y – (negativo), de 4 mm² de diámetro, resistentes a la abrasión y el desgaste, e irán rematados por conectores, también claramente marcados con + (positivo) y – (negativo) y de tipo encapsulado, preservando las uniones de la intemperie a la vez que asegurando la conexión.

2.2.1.5. Cálculo Del Inversor

Con base al número de módulos FV y al arreglo, se obtiene tanto la potencia como el número de inversores. De igual forma se obtiene con el cálculo de potencia máxima

consumida simultáneamente por las cargas de todo el sistema. Se debe tener precaución para no sobredimensionarlo o subdimensionarlo, debido a que la eficiencia del inversor depende directamente de la potencia nominal de trabajo.

Para este caso se selecciona un inversor de la mitad de la potencia máxima consumida, debido a que es un sistema concebido de inyección directa o Grid Tied, trabajar en paralelo con la red de distribución para suministrar energía eléctrica en corriente alterna a 208VAC Trifásica a 60Hz y de esa forma evitar excedentes de energía a la red.

El sistema de distribución deberá contar con su sistema de inversión de tensión y debe ser capaz de soportar la capacidad del circuito de alumbrado, circuito de comunicaciones, cargas de los equipos de cómputo y demás sistemas conectados al ML principal de la sucursal. Los equipos inversores deberán ser de onda sinusoidal pura tipo MPPT, de alta eficiencia de conversión (superior al 95 % y THD en Corriente menor al 5%) e incluir la función de sincronismo automático (tensión y frecuencia) con la red eléctrica a la cual se conecta.

Inversor a Utilizar:

- ✓ Potencia: 3000W (2)
- ✓ Eficiencia: 89%
- ✓ Numero de inv: 2
- ✓ Voltaje Nominal: 208 Vac
- ✓ I Max: 25 amperios
- ✓ Armónicos: <5%

Las partes fundamentales en un inversor son:

- ✚ Control principal. Incluye todos los elementos de control general, los sistemas de generación de onda basados en sistemas de modulación de anchura de pulsos (PWM) y parte del sistema de protecciones.
- ✚ Etapa de potencia. Esta etapa puede ser única o modular en función de la potencia deseada. Se opta por la tecnología en baja frecuencia ya que ofrece buenos resultados con una alta fiabilidad y bajo coste. Además, debe incorporar un filtro de salida (LC), para filtrar la onda y evitar el rizado en la tensión procedente de los módulos.
- ✚ Control de red. Es la interfase entre la red y el control principal. Proporciona el correcto funcionamiento del sistema al sincronizar la forma de onda generada a la de la red eléctrica, ajustando tensión, fase, sincronismo, etc.
- ✚ Seguidor del punto de máxima potencia (MPPT). Es uno de los factores más importantes en un inversor. Su función es acoplar la entrada del inversor a los valores de potencia variables que produce el generador, obteniendo en todo momento la mayor cantidad de energía disponible, la máxima potencia.

- 🔧 Protecciones. De manera general, los inversores deben estar protegidos ante tensión de red fuera de márgenes, frecuencia de red fuera de márgenes, temperatura de trabajo elevada, tensión baja del generador, intensidad del generador fotovoltaico insuficiente, fallo de la red eléctrica y transformador de aislamiento, además de las protecciones pertinentes contra daños a personas y compatibilidad electromagnética.
- 🔧 Monitorización de datos. Los inversores dispondrán de microprocesadores que les facilite una gran cantidad de datos tanto de los parámetros habituales (tensión, corriente, frecuencia, etc.) como de parámetros externos (radiación, temperatura ambiente, etc.) e internos (p.e. temperaturas de trabajo).

2.2.1.6. Cálculo De Cableado De CA

La selección debe ser en base al criterio térmico, para ello se debe calcular la corriente máxima, de acuerdo a la ecuación 2 y una vez obtenida dicha corriente se procede a seleccionar el cable que cumpla con los rangos de corriente de la intensidad máxima.

Ecuación 2. Cálculo de Cableado CA

$$I_{max} = \frac{P}{\sqrt{3} * V * \cos\theta} * V$$

Dónde:

I_{max} = Intensidad máxima (A)

P = Potencia en Watios (W)

V= tensión en Voltios (300V)

$\cos\theta$ = Factor de potencia

2.2.1.7. Cálculo De Inclinación De Los Módulos.

Teniendo presente que la trayectoria del sol durante un día es de oriente a occidente, pero la trayectoria durante un año es de norte a sur (figura 18), se requiere que los módulos fijos se coloquen inclinados hacia el sur.

Ecuación 3. Cálculo de inclinación

$$\beta_{opt} = 3,7 + 6|\phi|$$

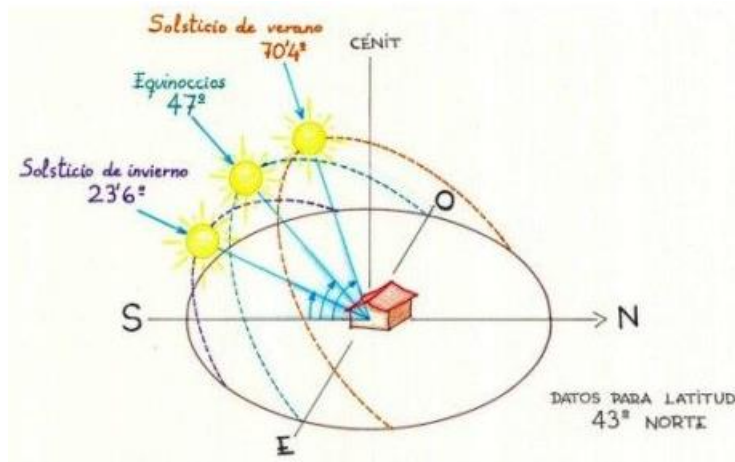
Dónde:

β_{opt} = Angulo de inclinación óptimo.

$|\phi|$ = Latitud de la instalación fotovoltaica

De acuerdo a la ecuación anterior, para este proyecto la inclinación ideal es 6° hacia el sur, lo cual obedece a la latitud de la ubicación de la instalación, pero no será del alcance de este análisis demostrar dicha inclinación.

Figura 18. Trayectoria Solar

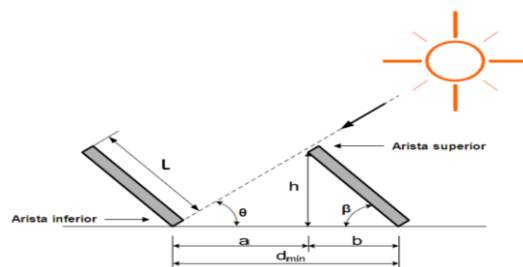


FUENTE: <http://www.arqhys.com/arquitectura/fotos/arquitectura/Trayectoria-solar.jpg>

2.2.1.8. Distancia Entre Los Paneles

La distancia entre los paneles o arreglo de módulos se establece de tal forma que al medio día, la sombra de la arista superior del panel se proyecte, como máximo sobre la arista inferior del panel siguiente, de acuerdo con la figura 19.

Figura 19. Distancia mínima entre aristas de los paneles



FUENTE: <HTTP://EDII.UCLM.ES/~ARODENAS/SOLAR/FIG3.3.BMP>

L: Longitud del Panel

h: Altura solar al medio día.

β : Grado de inclinación del panel respecto a la horizontal

θ : Angulo de la sombra respecto a la horizontal.

a: Distancia de la arista inferior, a la arista inferior del otro.

b: Distancia de la arista inferior, a la arista superior con respecto a la horizontal.

Como datos base se tendrá la longitud del arreglo o módulos FV y el ángulo de inclinación, con lo anterior se procede a calcular el resto de componentes de la ecuación.

Ecuación 4. Distancia entre Modulos

$$h = \sin \beta * L$$

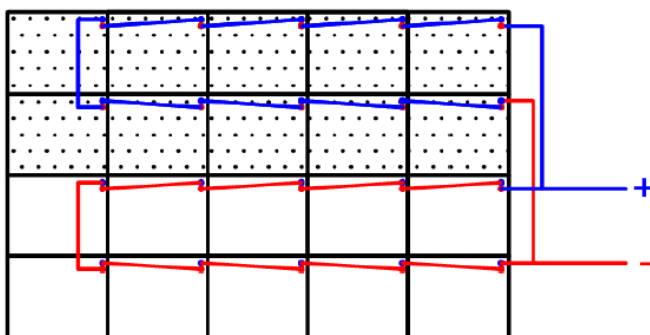
$$b = \cos \beta * L$$

$$a = \frac{h}{\tan \theta}$$

2.2.1.9. Diagrama De Conexión De Los Módulos

Se tendrán dos secciones de módulos, cada una con 10 módulos que se conectan en serie y así mismo estará en paralelo, por lo que el panel se encuentra en conexión mixta como se muestra en la siguiente figura.

Figura 20. Diagrama Módulos

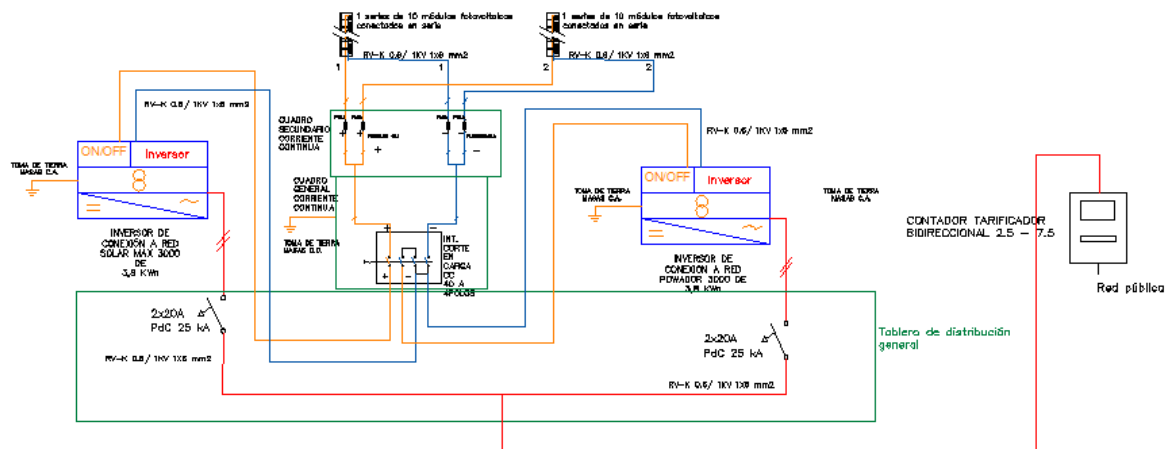


FUENTE: [HTTP://WWW.MPPTSOLAR.COM/ES/PANELES-SOLARES-PARALELO.HTML](http://www.mpptsolar.com/es/paneles-solares-paralelo.html)

2.3. Diagrama Unifilar

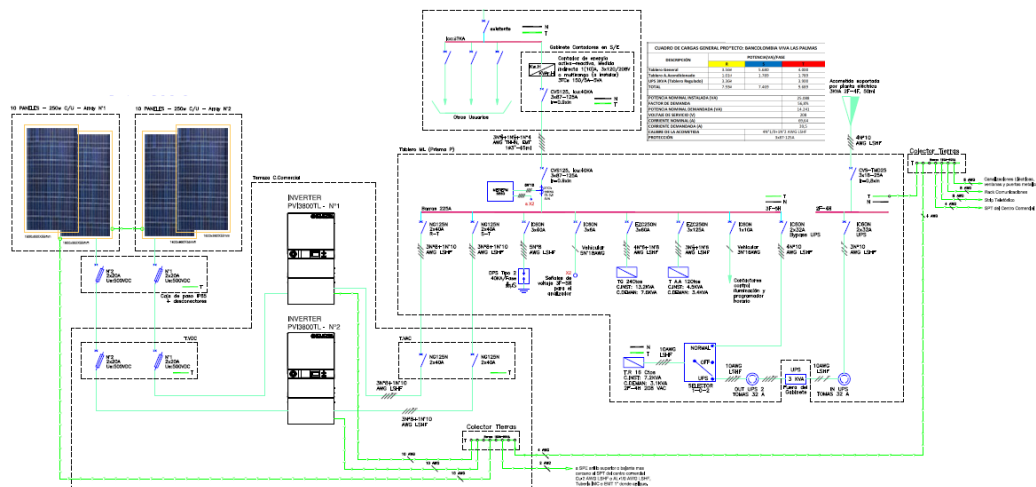
Para esta instalación se cuenta con un diagrama unifilar en donde se muestran los equipos que contienen el sistema fotovoltaico, tales como acometida, contador, seccionador, interruptores de transferencia, tablero principal de protecciones, inversores y paneles solares.

Figura 21. Diagrama Unifilar del SFV



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA ACAD

Figura 22. Diagrama unifilar Sucursal Bancolombia



2.4. Energía Solar En Colombia

Al 2035 el mundo estará consumiendo un poco más de un tercio más de la energía que consume actualmente. Es por ello que se espera que la demanda eléctrica aumente en dos terceras partes. El centro de gravedad del consumo energético cambiará a países como China, India y Brasil. Entre los tres acumularán más del 90% del crecimiento de la demanda. Mil millones de personas no tendrán acceso a la electricidad, y 2700 millones no tendrán acceso a combustibles limpios para cocción y calentamiento, principalmente en Asia y África sub-sahariana

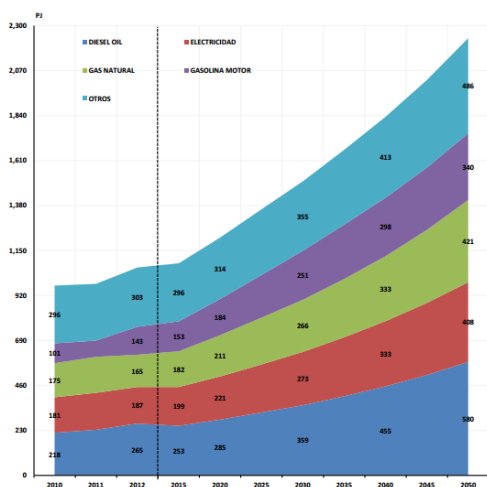
Si bien cambiar el sistema energético actual es una labor de largo plazo y que genera resultados a veces marginales, la actividad económica año a año es impactada fuertemente por la tendencia a invertir en tecnologías renovables dadas las metas de reducción de impacto ambiental, los apoyos gubernamentales y el gasto en I&D que ha resultado en costos decrecientes para todas las tecnologías. De igual forma el aumento de los precios de la energía, por situaciones climáticas, panorama del petróleo, efectos de la inflación, mayor restricción presupuestal por parte del gobierno, reducción en flujos de inversión extranjera, aumento de tasas de interés, efecto de hojas de balance, entre otras.

Actualmente, las energías solar y eólica en Colombia tienen una participación marginal en la canasta de generación eléctrica. En paneles fotovoltaicos se estima hay actualmente entre unos 10 y 12 MWp instalados en sistemas aislados o aplicaciones profesionales, mientras que en energía eólica se cuenta con 19.5 MW del parque eólico Jepírachi. Ante esta situación, la Ley 1715 de 2014 busca promover la inclusión de este tipo de tecnologías. Para promover la inversión en tecnologías de generación con fuentes renovables, la Ley contempla una serie de incentivos fiscales. En primer lugar, se establece una reducción del impuesto de renta por hasta el 50% de la inversión, que puede ser aplicada de manera distribuida en el transcurso de los 5 años siguientes a su realización. Adicionalmente se exime del pago de IVA a todos los equipos y servicios, acotados por la UPME, que se destinen al proyecto. Como tercera medida, se determina que todos aquellos equipos, maquinaria, materiales e insumos que sean importados para los proyectos de FNCE, y no sean producidos por la industria nacional, estarán exentos del pago de aranceles. Finalmente, se estipula la posibilidad de depreciar aceleradamente los activos del proyecto, con una tasa anual de depreciación máxima del 20%.

De acuerdo con la Ley 1715 de 2014, el país debe trabajar en la integración de las FNCE al Sistema Energético Nacional, que se encuentra compuesto no solo por el Sistema interconectado Nacional, sino igualmente por las Zonas No Interconectadas, las fuentes, los mecanismos y los medios de transformación que hacen posible el uso de la energía

para fines útiles dentro de todas las actividades realizadas a nivel nacional. Dada la extensión del territorio, la complejidad del sistema y la diversidad y dispersión de recursos renovables disponibles en las diferentes regiones, el aprovechamiento de aquellos recursos más abundantes en cada región representa oportunidades por ser potencializadas como medio para fomentar el desarrollo de nuevas actividades económicas y mejorar la calidad y la sostenibilidad de la prestación de servicios básicos energéticos.

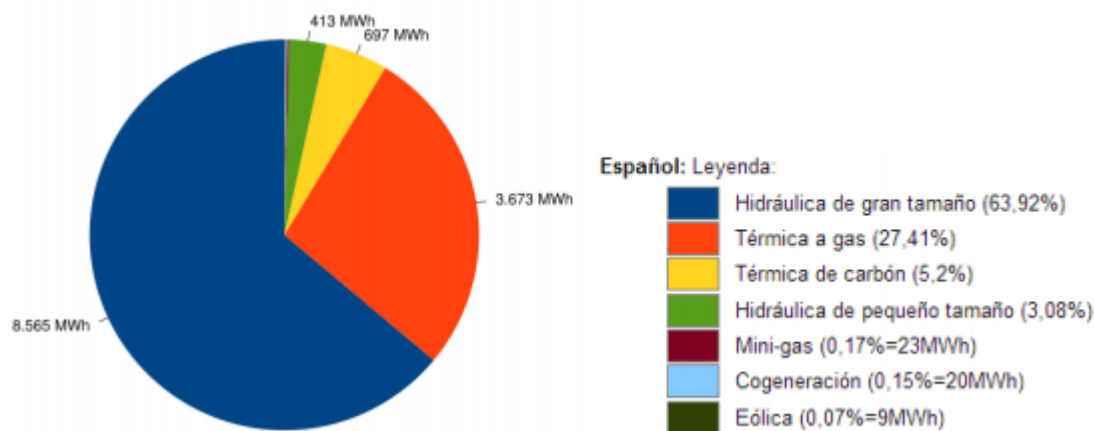
Figura 23. Evolución de la demanda por energéticos principales



FUENTE: BALANCE ENERGÉTICO NACIONAL (2010 – 2012) – UPME, 2015.

La capacidad efectiva neta del SIN al finalizar el 2015 fue 16,420 MW. Al comparar la capacidad con la registrada en 2014 se observa un crecimiento en 931 MW, equivalentes al 6%. Este aumento obedece principalmente a la entrada en operación de las centrales hidroeléctricas El Quimbo 396 MW, Carlos Lleras 78 MW, Cucuana 58 MW, San Miguel 44 MW, Bajo Tulua 19.9 MW y PROVIDENCIA 4.9 MW y las centrales térmicas Gecelca 3 164 MW y Tasajero 2 160 MW y a la actualización en térmicas de los combustibles principales que respaldan las obligaciones de energía firme para la vigencia diciembre 1 de 2015 a noviembre 30 de 2016 para el cargo por confiabilidad.

Figura 24. Mercado Eléctrico Nacional



FUENTE: ANDESCO.

Con respecto a la generación fotovoltaica, son pocos los proyectos que están ya instalados o registrados y en funcionamiento en regiones apartadas del país. A pesar de esto, hay un proyecto que por su naturaleza y similitud a lo que concierne a este proyecto, vale la pena ser mencionado: El proyecto de energía solar que el gobierno nacional, junto con el IPSE, llevaron a cabo en la Sierra Nevada de Santa Marta, y por medio del cual se vieron beneficiados siete comunidades que forman parte de las etnias Wiwa, Kogui y Arhuacos. Con este proyecto, se está garantizando la prestación del servicio las 24 horas del día, y se está ayudando a que la población se beneficie con luz eléctrica para escuelas y centros médicos, esto último es de vital importancia puesto que el acceso a un flujo continuo de electricidad permite conservar vacunas y medicamentos en refrigeradores.

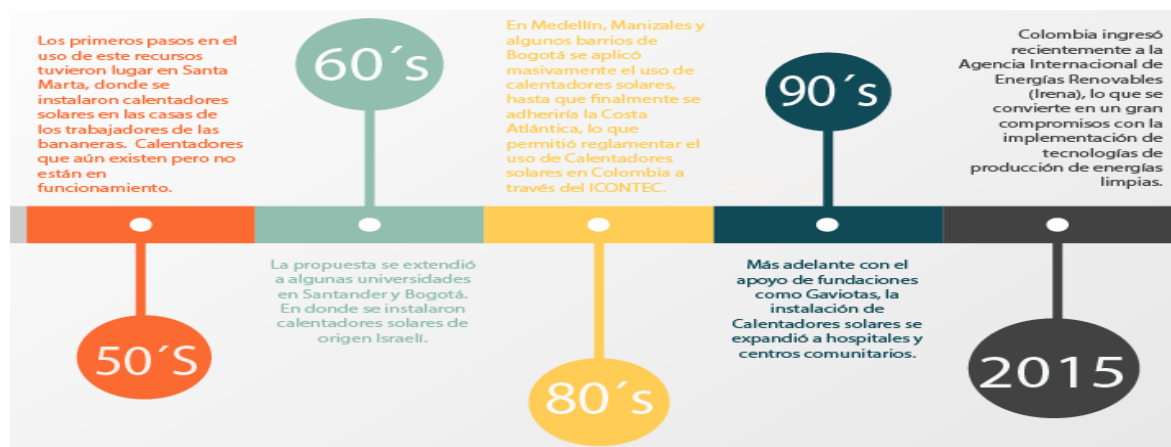
Tabla 7. Sistemas Fotovoltaicos instalados en Colombia.

Proyecto	Potencia Pico Wpico	Energía diaria W	Radiación KWh/d	F. Utilización Adimensional	Horas Día
Tel. Prim. Etap	31.81	89.95	4.3	0.118	2.83
T. Caribe I	26.46	89.37	5.1	0.141	3.38
T. Arauca-Casanare	96.9	318.01	5.0	0.137	3.28
T. Magdalena Medio	160	498.84	4.8	0.130	3.12
T. Cordillera Nororiental	35.7	111.3	4.7	0.130	3.12
T. Macizo Colombiano	185.206	547.03	4.5	0.123	2.95
T. Plan Sabana	55	162.45	4.5	0.123	2.95
T. 100.000 líneas	30.49	95.06	4.8	0.130	3.12
BP- Casanare	26	85.33	5.0	0.137	3.28

FUENTE: INSTITUTO DE ESTUDIOS REGIONALES INER, UDEA, UPME.

La generación de electricidad con energía solar empleando sistemas fotovoltaicos en un inicio ha estado dirigida al sector rural propiamente en Colombia, en donde los altos costos de generación originados principalmente en el precio de los combustibles, y los costos de Operación y Mantenimiento en las distantes zonas remotas, hacen que la generación solar resulte más económica en el largo plazo y confiable. Estas actividades surgieron con el Programa de Telecomunicaciones Rurales de Telecom a comienzos de los años 80, con la asistencia técnica de la Universidad Nacional. En este programa se instalaron pequeños generadores fotovoltaicos de 60 Wp (Wp: vatio pico) para radioteléfonos rurales y ya en 1983 habían instalados 2950 Wp de tales sistemas. El programa continuó instalando estos sistemas y pronto se escaló a sistemas de 3 a 4 kWp para las antenas satelitales terrenas. Muchas empresas comenzaron a instalar sistemas para sus servicios de telecomunicaciones y actualmente se emplean sistemas solares en repetidoras de microondas, boyas, estaciones remotas, bases militares, entre otras aplicaciones. Estos sistemas son hoy esenciales para las telecomunicaciones rurales del país. Según un estudio realizado, entre 1985 y 1994 se importaron 48499 módulos solares para una potencia de 2.05 MWp. De estos 21 238 módulos con una potencia de 843.6 kW en proyectos de telecomunicaciones y 20829 módulos con 953.5 kWp en electrificación rural. El estudio anterior también indicó, sobre una muestra de 248 sistemas (con 419 módulos), que 56% de los sistemas funcionaban sin problemas, 37% funcionaban con algunos problemas y 8% estaban fuera de servicio. Como principal fuente de problemas se encontraron la falta de mínimo mantenimiento, suministro de partes de reemplazo (reguladores y lámparas) y sistemas sub-dimensionados. En total se estiman 9MW, partiendo de una base instalada por año de 300KW/año durante los 36 años anteriores

Figura 25. Evolución de los sistemas Fotovoltaicos

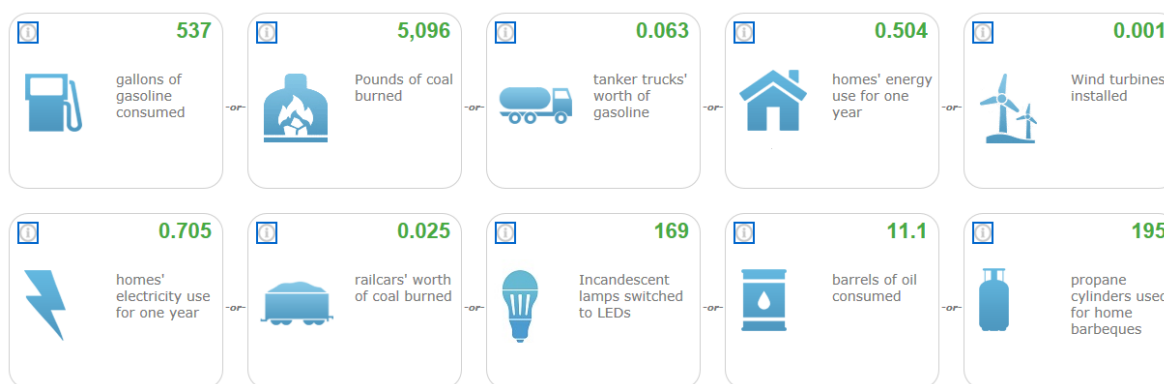


FUENTE: [HTTP://WWW.LAGUIASOLAR.COM/ENERGIA-SOLAR-EN-COLOMBIA/](http://www.laguiasolar.com/energia-solar-en-colombia/)

2.5. Impacto Ambiental

Desde el punto de vista de la viabilidad medioambiental, la planta solar que se proyecta, es segura, limpia, silenciosa, fiable, inagotable, no genera residuos ni contaminantes, es respetuosa con el medio ambiente y evita la emisión a la atmósfera de gases de efecto invernadero que sí se emiten con otros tipos de generación de energía eléctrica. Los impactos positivos que reducirá la planta solar fotovoltaica son:

Figura 26. Reducción Ambiental



FUENTE:

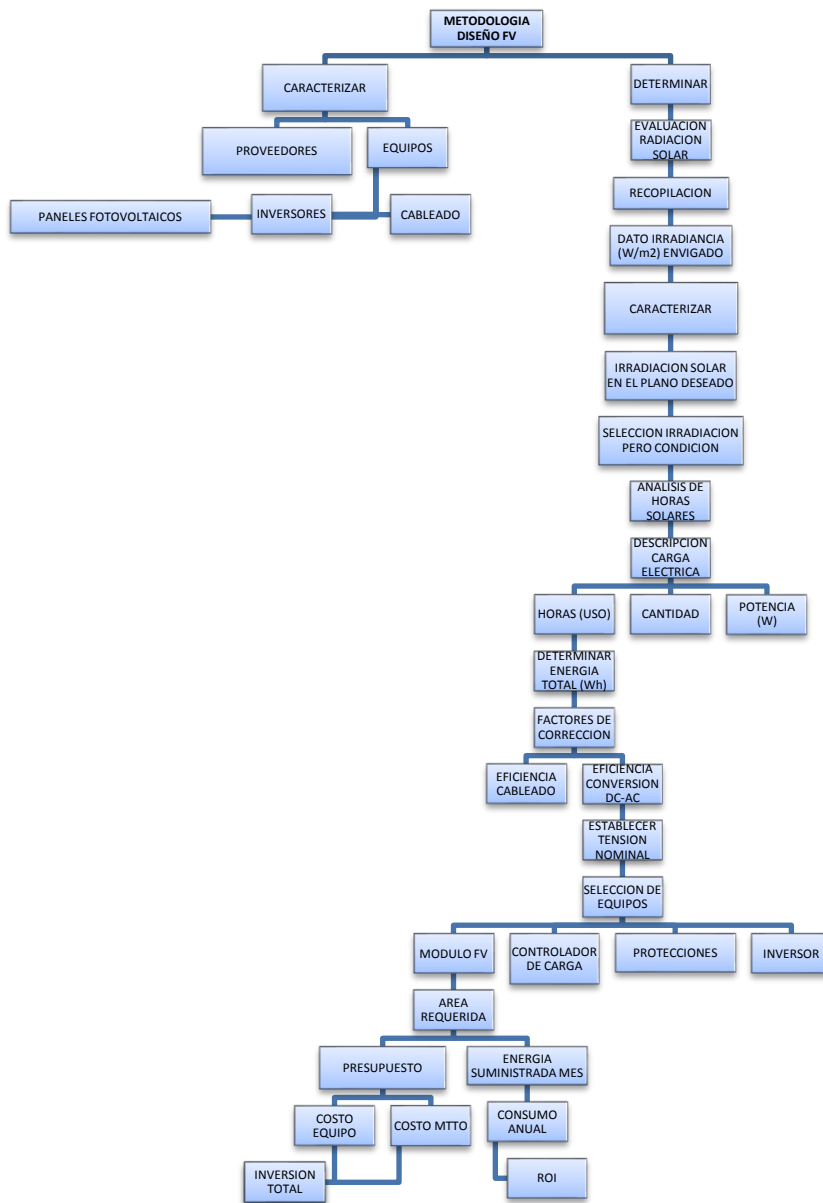
[HTTPS://WWW.EPA.GOV/SITES/PRODUCTION/FILES/WIDGETS/GHG_CALC/CALCULATOR.HTML#RESULTS](https://www.epa.gov/sites/production/files/widgets/ghg_calc/calculator.html#RESULTS)

Para el caso particular de Colombia no hay un organismo que regule dicho impacto ambiental de los sistemas en cuestión. En el caso de Sistemas Fotovoltaicos con capacidades de instalación menores a 100 kWp, en instalaciones y/o edificaciones ya existentes, se considera que los sistemas que se desean instalar tienen un BAJO POTENCIAL DE IMPACTO AMBIENTAL. En el caso de instalaciones sobre techos, siempre y cuando no sean considerado como Patrimonio Cultural, se minimiza aún más el posible impacto, pues no es necesaria la tala de árboles más que aquellas ramas que producen sombras. Para evitar que dichas sombras afecten la eficiencia de los equipos, se recomienda hacer un plan de organización de la vegetación de la instalación y programa de podas continuas en las zonas donde serán instalados los Sistemas.

2.6. Metodología Para El Diseño De Sistemas Fotovoltaicos

La metodología que se aplicó tanto para para llegar a las conclusiones como a los cálculos se muestra en la figura 27, donde se caracterizaron los proveedores, se seleccionaron equipos y se analizó la radiación solar de la zona, para obtener un presupuesto final.

Figura 27. Metodología Para El Diseño SFV



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EXCEL

3. ANÁLISIS ECONÓMICO

El correcto análisis de viabilidad económica de un proyecto es fundamental, no solo para determinar la conveniencia de efectuar una inversión, sino también para predecir el posible comportamiento de la misma, pudiendo así evitar o limitar perjuicios económicos importantes para los inversores. Es más, las entidades financieras como esta exigen este tipo de estudios antes de aprobar los créditos que se requieran para la ejecución de cualquier tipo de actividad emprendedora.

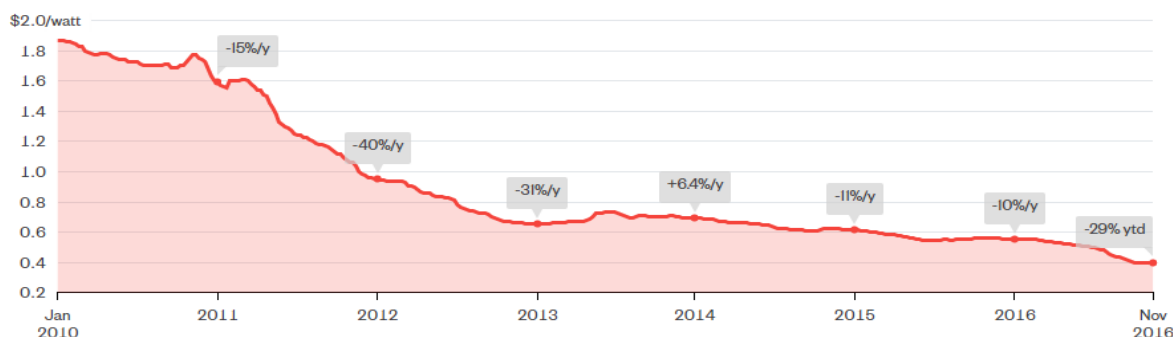
En dicho análisis se mostrará una previsión de la cuenta de resultados de la instalación durante los 25 años de vida útil estimada, se simula el flujo de caja anual y se estimarán los parámetros VAN, TIR y PR, indicadores utilizados habitualmente para el análisis de viabilidad de inversiones.

Dado que los paneles son todos importados, los aspectos económicos que más afectan la cadena de suministro en Colombia son:

- 🚩 Tasa representativa del mercado: Las importaciones de los paneles no se negocian en Pesos colombianos, pero los sistemas fotovoltaicos sí son negociados en Pesos colombianos, lo cual hace la tasa de cambio sea un aspecto relevante en la cadena de suministro. Lo más probable es que los negocios de importación se lleven a cabo en Dólares, ya que es la moneda más común a la hora de los negocios internacionales. Un cambio en la tasa representativa del mercado puede tener un gran impacto en el precio final al consumidor del sistema de energía fotovoltaica, lo cual puede llevar a un cambio en la demanda de los sistemas debido al cambio de precio. Si el distribuidor decide no cambiar los precios de los sistemas fotovoltaicos, se afecta entonces el margen de utilidad de la empresa con cada sistema, lo que a la final afecta sus balances económicos. Esta variable es importante para la cadena de suministro, mas no se considera clave.
- 🚩 Costo mundial de los paneles solares: El gran problema que tiene el sistema solar fotovoltaico es su alto costo, lo cual ha sido el gran impedimento para su implementación a nivel mundial. Aunque el costo por watt de la energía fotovoltaica ha ido disminuyendo considerablemente durante los últimos años, el precio sigue siendo mayor que el de las energías convencionales. Para hablar de cifras, se dice que el costo (\$/watt) de la energía solar fotovoltaica ha disminuido un 99% desde 1977, donde pasó de costar \$76.67/watt a 0.40/watt (Romm, 2016). Esto muestra que a medida que la tecnología solar fotovoltaica aumenta, esta se vuelve más competitiva y más accesible para el público en general, a continuación

se muestra la gráfica que representa la disminución del costo de la energía solar fotovoltaica. Esta variable se considera clave en la cadena de suministro, pues es la que puede volver competitivo a la energía solar fotovoltaica con las otras formas de energía tradicionales.

Figura 28. Disminución del precio (\$/watt) de la energía solar fotovoltaica los últimos años.



FUENTE: PVINSIGHTS, BLOOMBERG.

3.1. Evaluación Financiera

La evaluación financiera del proyecto tiene como objetivo determinar los flujos de efectivo resultantes de la implementación de un sistema solar fotovoltaico para inyección a red y la rentabilidad en el largo plazo, así como obtener indicadores de rentabilidad que justifiquen la viabilidad financiera de la inversión. Los resultados que acá se muestran, más de venir a ser una “interpretación final” financiera del proyecto en estudio, tiene el fin de generar una “herramienta financiera”.

Tabla 8. Presupuesto de Implementación

ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD	VALOR TOTAL (USD)
1	Paneles solares referencia HISS250MG de Marca Hyundai	24	5000
2	Inversores Solares tipo Grid Tied	2	6000
3	Tablero de Proteccion DC, Supresor de Picos, Medidor Bidireccional y Materiales Varios electricos Importados y Nacionales	GI	2000
4	Estructuras Metalicas para cubiertas	GI	2000
5	Instalacion, supervision y Puesta en Marcha	1	1120
	Subtotal		16120
	Total USD		18699

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EXCEL

La generación de energía del sistema fotovoltaico es producto de la simulación realizada en herramientas especializadas (PVWatts) que consideran las variables de clima, orientación, inclinación, pérdidas de conversión, factor de suciedad, disponibilidad del sistema, desajuste de comportamiento eléctrico de los módulos, conexiones y diodos, eficiencia de paneles e inversores, sombreado, entre otras variables; haciendo un factor de conversión de DC a AC de aproximadamente 0.896.

Tabla 9. Calculo de Productividad

MES	DIAS	Radiación en kWh/m ² I=0º		Radiación en kWh/m ² I=6º Az 30º		PRG	Producción en kWh/kWp		Prod Global kWh
		GDM Día	GDM Mes	GDM Día	GDM Mes		Ep/día	Ep/mes	
Ene	31	4.450	137.95	4.640	143.85	0.819	3.80	117.9	707.2
Feb	28	4.570	127.96	4.681	131.06	0.819	3.84	107.4	644.4
Mar	31	4.630	143.53	4.654	144.26	0.819	3.81	118.2	709.3
Abr	30	4.340	130.20	4.292	128.75	0.819	3.52	105.5	633.0
May	31	4.460	138.26	4.355	135.01	0.819	3.57	110.6	663.8
Jun	30	4.630	138.90	4.502	135.07	0.819	3.69	110.7	664.1
Jul	31	4.970	154.07	4.870	150.97	0.819	3.99	123.7	742.2
Ago	31	4.930	152.83	4.862	150.71	0.819	3.98	123.5	741.0
Sep	30	4.630	138.90	4.599	137.96	0.819	3.77	113.0	678.3
Oct	31	4.370	135.47	4.448	137.89	0.819	3.64	113.0	677.9
Nov	30	4.250	127.50	4.403	132.08	0.819	3.61	108.2	649.4
Dic	31	4.160	128.96	4.349	134.82	0.819	3.56	110.5	662.9
Promedio	365	4.533	1654.4	4.555	1662.4	0.819	3.73	1,362.2	8,173.3

FUENTE: SIMULACIÓN EN PVWATTS

Asimismo se considera un factor de depreciación o degradación del equipo; es decir una disminución anual en la capacidad de generación de los módulos asociada a la tecnología que ofrece el fabricante. Por lo general el fabricante asegura que en el año 25 los módulos aún son capaces de producir un 70% de la energía que producían al inicio de su operación.

Se han realizado modelaciones en el software especializado Ecotect para determinar el porcentaje de sombreado de las superficies analizadas y considerar como esta afecta la generación de energía de las Alternativas evaluadas. Los porcentajes de sombreado han sido calculados para el día que se proyectan las sombras más largas lo cual ocurre para el hemisferio norte en el solsticio de invierno.

Tabla 10. Rendimiento del SFV

Tabla de estimación de rendimientos por diversos factores									
MES	DIAS	FS	Fpol	FCcc	FCca	FD	Finv	FT	PR
Ene	31	0.990	0.970	0.980	0.980	0.990	0.965	0.930	0.819
Feb	28	0.990	0.970	0.980	0.980	0.990	0.965	0.930	0.819
Mar	31	0.990	0.970	0.980	0.980	0.990	0.965	0.930	0.819
Abr	30	0.990	0.970	0.980	0.980	0.990	0.965	0.930	0.819
May	31	0.990	0.970	0.980	0.980	0.990	0.965	0.930	0.819
Jun	30	0.990	0.970	0.980	0.980	0.990	0.965	0.930	0.819
Jul	31	0.990	0.970	0.980	0.980	0.990	0.965	0.930	0.819
Ago	31	0.990	0.970	0.980	0.980	0.990	0.965	0.930	0.819
Sep	30	0.990	0.970	0.980	0.980	0.990	0.965	0.930	0.819
Oct	31	0.990	0.970	0.980	0.980	0.990	0.965	0.930	0.819
Nov	30	0.990	0.970	0.980	0.980	0.990	0.965	0.930	0.819
Dic	31	0.990	0.970	0.980	0.980	0.990	0.965	0.930	0.819
Promedio	365	0.990	0.970	0.980	0.980	0.990	0.965	0.930	0.819

FUENTE: SIMULACIÓN EN ECOTECT

Dónde:

FS es el factor de Sombras, Fpol: el Factor de polución ambiental, FC los factores de pérdidas en lado de continua y de alterna, FD una estimación de pérdidas por la dispersión de valores de los módulos, Finv el factor de pérdidas por el inversor y FT el factor de pérdidas debido a la temperatura. El resultado de multiplicar todos estos factores nos presenta el denominador (PRG), el Performance Ratio ó rendimiento global el sistema, que se define como la relación entre la energía anual Ac efectivamente entregada a la red y la que entregaría en un sistema ideal sin pérdidas ni en el inversor ni en el generador con las células de este último operando a 25°.

Se asume una tasa de inflación de 1.5% anual para el costo de la energía a lo largo de los 25 años del proyecto. Considerando que es un sistema de generación de energía mayormente para autoconsumo y una menor proporción para inyección a red, se tiene la ventaja que existe ahorro por demanda asociado, es decir la planta fotovoltaica reducirá la potencia pico que el banco demanda de la red a ciertas horas del día y tendría un ahorro económico por ello.

Para el caso de los costos de mantenimiento los mismos han sido asumidos como un costo de 3.55 \$/m² por área de módulos a instalar. Dicho costo considera operaciones frecuentes de mantenimiento asociadas a la limpieza, labores de chequeo y monitoreo de la planta fotovoltaica. Se asume una tasa de inflación de 2% anual para el costo del mantenimiento a lo largo de los 25 años del proyecto.

A pesar que los inversores tienen una vida útil más corta que los paneles fotovoltaicos y que por ende es recomendable que sean cambiados en su totalidad a la mitad de la vida útil del sistema fotovoltaico (es decir aproximadamente en el año 12) no se ha considerado dicho costo en la presente corrida financiera, esto debido a que típicamente este tipo de inversiones a futuro suelen ser por el proyecto de reposiciones que maneja el banco, a fin de no impactar la rentabilidad de un proyecto a desarrollar. Se asume que el IVA asociado a la compra de equipos puede ser exonerado, ya sea por las ventas anuales del banco o por la solicitud de un incentivo fiscal por tratarse de un proyecto de energías renovables.

Tabla 11. Resumen de Ahorros Energéticos del SFV

Capacidad (kWp)	Produccion Total (kWh)	% Ahorro con respecto a consumo base	Consumo Anual Sucursal (kWh)	Ahorro por Autoconsumo (\$)	Radio de Productividad kWh/kWp
5	6795	31%	21600	\$ 2,819,925.00	\$ 1,359.00

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EXCEL

Tabla 12. Análisis de Rentabilidad

% de energía Autoconsumida	90.0%		
Degradación instalación	0.40%		
Operación & Mantenimiento anual	6.0%		
Prima Seguro contra riesgo	1.3%		
IPC interanual (estimación)	3.50%		
IPC Energético (últimos 10 años en Colombia)	10.00%		
kW que han utilizado la red	1.00%	TIR Bruto 25	12.38%
Importe peajes (COP/KW)	50	TIR Neto 25	14.08%

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EXCEL

Tabla 13. Estimación Flujo Financiero.

	Producción (kWh)	(COP/kWh) Energía sustituida	(COP/kWh) Energía Excedentaria	Ahorro (COP)	Ventas excedentes	O&M	Seguro	Cash Flow Bruto	Variación renta líquida	Cash Flow Neto (*)	Cash Flow Neto Acum
Año 0								-40,300,000		-40,300,000	-40,300,000
Año 1	6,795	415	100	2,537,933	67,950	156,353	32,574	2,416,956	-1,209,000	3,625,956	-36,674,044
Año 2	6,768	457	110	2,780,559	74,446	171,300	35,688	2,648,017	-1,209,000	3,857,017	-32,817,027
Año 3	6,741	502	121	3,046,380	81,563	187,677	39,099	2,901,167	-1,209,000	4,110,167	-28,706,860
Año 4	6,714	552	133	3,337,614	89,360	205,618	42,837	3,178,519	-1,209,000	4,387,519	-24,319,340
Año 5	6,687	608	146	3,656,690	97,903	225,276	46,932	3,482,385	-1,209,000	4,691,385	-19,627,955
Año 6	6,660	668	161	4,006,270	107,263	246,812	51,419	3,815,302	-1,209,000	5,024,302	-14,603,653
Año 7	6,634	735	177	4,389,269	117,517	270,407	56,335	4,180,044	-1,209,000	5,389,044	-9,214,609
Año 8	6,607	809	195	4,808,883	128,752	296,258	61,720	4,579,657	-1,209,000	5,788,657	-3,425,953
Año 9	6,581	890	214	5,268,612	141,061	324,580	67,621	5,017,472	-1,209,000	6,226,472	2,800,519
Año 10	6,554	979	236	5,772,292	154,546	355,610	74,085	5,497,142	-1,209,000	6,706,142	9,506,661
Año 11	6,528	1,076	259	6,324,123	169,321	389,607	81,168	6,022,669		6,022,669	15,529,330
Año 12	6,502	1,184	285	6,928,709	185,508	426,853	88,928	6,598,436		6,598,436	22,127,766
Año 13	6,476	1,302	314	7,591,094	203,242	467,660	97,429	7,229,246		7,229,246	29,357,013
Año 14	6,450	1,433	345	8,316,802	222,672	512,368	106,743	7,920,362		7,920,362	37,277,375
Año 15	6,424	1,576	380	9,111,889	243,960	561,351	116,948	8,677,549		8,677,549	45,954,924
Año 16	6,399	1,734	418	9,982,985	267,282	615,016	128,128	9,507,123		9,507,123	55,462,047
Año 17	6,373	1,907	459	10,937,358	292,834	673,812	140,377	10,416,004		10,416,004	65,878,050
Año 18	6,347	2,098	505	11,982,970	320,829	738,228	153,797	11,411,774		11,411,774	77,289,824
Año 19	6,322	2,307	556	13,128,542	351,500	808,803	168,501	12,502,739		12,502,739	89,792,563
Año 20	6,297	2,538	612	14,383,630	385,104	886,124	184,609	13,698,001		13,698,001	103,490,564
Año 21	6,272	2,792	673	15,758,705	421,920	970,838	202,258	15,007,530		15,007,530	118,498,094
Año 22	6,246	3,071	740	17,265,238	462,255	1,063,650	221,594	16,442,250		16,442,250	134,940,344
Año 23	6,221	3,378	814	18,915,794	506,447	1,165,334	242,778	18,014,129		18,014,129	152,954,473
Año 24	6,197	3,716	895	20,724,144	554,863	1,276,740	265,988	19,736,280		19,736,280	172,690,753
Año 25	6,172	4,088	985	22,705,373	607,908	1,398,797	291,416	21,623,068		21,623,068	194,313,821

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EXCEL

Se obtiene que el Valor Actual Neto (VAN), descontando a la tasa WACC es positiva, con una VAN de \$40,300.000, el Plazo de Recuperación de la Inversión (PAYBACK) es de 10.15 años y un Relación Beneficio-Costo R(B/C) de 1.44. Bajo el Criterio de Flujo de Caja Neto se puede apreciar un valor resultante de 4.53, valor que al ser mayor a 1 indica que se está obteniendo ganancia de la inversión realizada. De igual manera bajo el Criterio del flujo neto de caja medio anual por unidad monetaria comprometida se ha obtenido un valor promedio resultante de 0.25 el cual al ser mayor a 1/#periodos (n), es decir ($1/25 = 0.04$), indica que se está obteniendo ganancia de la inversión realizada.

Tabla 14. Indicadores Financieros

Sistema Fotovoltaico	
VAN (WACC)	
TIR	12.38%
ROI	10.15
Criterio de flujo de caja Neto	4.53
Criterio del flujo neto de caja medio anual por unidad monetaria comprometida	0.25
R(B/C)	1.44

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EXCEL

Tomando los datos de la Figura 29 con 16120 USD se tendría un sistema solar instalado con un potencia pico de 5000 Wp con un crecimiento a 6000 Wp. Asumiendo, de forma exagerada, un radiación permanente y constante de 4 horas al día y que el panel solar siempre entrega la potencia pico, se tendría un suministro de energía de origen fotovoltaico de $5000 \times 4 = 20000$ kWh.día en condiciones tanto climáticas como técnica ideales. Esto implica que en un mes la energía obtenida del sistema fotovoltaico alcanzaría los 566 kWh por mes. Con un precio por kWh de \$415 para el estrato Comercial en Medellín se tiene que el valor de la energía generada con el sistema solar fotovoltaico bajo análisis sería de por mes.

Por otro lado, en el futuro inmediato, el punto de corte entre la tendencia de reducción en los costos de la electricidad generada con tecnología fotovoltaica y la tendencia de incremento en los precios de la energía de la red convencional al usuario final marcará el inicio del desarrollo de un mercado solar fotovoltaico

CONCLUSIONES

A lo largo de la investigación sobre este proyecto se analizaron los principales aspectos tanto técnicos como financieros a tener presente cuando se realiza una investigación de generación fotovoltaica en una sucursal bancaria, teniendo en cuenta los principales marcos como son el regulatorio, técnico y tarifario en la región de Antioquia. De igual forma mostrar los lineamientos a seguir para el dimensionamiento de los elementos que componen el sistema, además de la inversión necesaria para la implementación de los mismos. Todo lo anterior para terminar en un diseño y con miras a una segunda etapa de implementación y puesta en marcha de este tipo de soluciones que impactan un entorno sostenible y financiero del sector.

Los objetivos planteados en el desarrollo del trabajo se han cumplido satisfacción, lo cual logrando obtener una base de datos que sirve como modelo para el estudio de implementación de un sistema fotovoltaico. De igual manera se puede apreciar la importancia de esta investigación en fuentes de energía alternativas que no contaminen el medio ambiente, en especialmente al gran potencial que se tiene en la transformación de energía eléctrica.

Se encontró un entorno tarifario, donde la inversión en el sistema generación fotovoltaica no es una idea que represente un beneficio económico a corto o mediano plazo, en el largo plazo puede ser rentable si se presenta un panorama en el que la energía dispare los precios. En el caso que el mercado de la energía dispare el kWh por temas estratégicos y climáticos, esto haría más atractivo la inversión, pues el proyecto mejoraría directamente el retorno de la inversión.

La metodología implementada se basó en el estudio de los componentes tecnológicos disponibles en el mercado local y nacional, haciendo énfasis en los costos y presentando el marco legal y tributario. También se analizó y se comparó diferentes variables a la hora de formular un proyecto de generación eléctrica por medio de paneles fotovoltaicos. Esta Metodología se basó en la caracterización de proveedores, selección de equipos y en la recopilación del recurso solar disponible para Antioquia, seguida del dimensionamiento de equipos y presupuesto final.

Se evidencia que este tipo de soluciones genera otros impactos tales como el tecnológico, el cual genera formación del recurso humano en nuevas tecnologías, mejoramiento en la oferta de servicios tecnológicos; también un impacto sobre la productividad y competitividad, generando empleo, con desarrollo tecnológico de los proveedores y mejorando productividad y calidad; por ultimo un impacto sobre el medio ambiente y la sociedad, con la reducción de combustibles fósiles, reducción en recursos naturales tales

como leña, reducción en la generación de emisiones y mejoramiento de calidad de vida entre otros.

La dificultad para la obtención de la radiación solar para el municipio de Envigado, fue una limitante para caracterizar el potencial energético. Para ello se obtuvieron promedios solares de radiación solar, a través del mapa de radiación solar de Colombia, no obstante es un aproximado más no un valor real de la zona.

El lento avance en el desarrollo de las tecnologías de baterías para aplicaciones FV, no favorecen económicamente el desarrollo del sistema, debido a los altos costos para su implementación y reposición. De igual forma, por las características constructivas, operativas y de disposición final de estos elementos se mantienen de manera permanente el riesgo de impacto ambiental.

Teniendo en cuenta que el costo de la energía eléctrica con EPM es relativamente bajo, en comparación con otros países, el costo de la inversión en SFV no representa un beneficio económico a mediano plazo. No obstante para evaluar este tipo de proyectos y ver una viabilidad, se debe considerar también todo el impacto ambiental en operación.

Se considera que la demanda energética que pueden tener algunos clientes del sector industrial no justifique, debido a que a que con este trabajo se puede deducir que los altos costos de inversión de los sistemas FV no justifica por ahora para este tipo de soluciones, debido a la pequeña demanda que podría suplir, de lo contrario las inversiones serían de otro nivel con unos retornos que son nos atractivos para este tipo de clientes. El sector de pymes, residencia y rural tienen un gran potencial tanto para iluminación como para equipos de bajo consumo tales como telecomunicaciones o sistemas adiabáticos.

El proyecto genera rentabilidad a pesar del costo bajo de la energía actualmente debido a la caída de los precios del petróleo. En el mediano plazo cuando los precios del petróleo estabilicen y el costo de la energía incremente nuevamente, la rentabilidad del proyecto aumentará aún más.

Como se puede evidenciar en esta propuesta donde se pone de manifiesto en primer lugar que no existe ninguna dificultad o inviabilidad para la instalación, puesta en funcionamiento y operación de un sistema solar fotovoltaico de pequeña escala en el municipio de Envigado, ya que tanto la tecnología como el recurso solar están disponibles para su implantación. No obstante la viabilidad técnica, es poco probable obtener un resultado económicamente atractivo con la instalación de este tipo de sistema de aprovechamiento de la energía solar. La razón principal radica en los altos costos de adquisición y de instalación del sistema solar fotovoltaico que no tornan competitiva esta tecnología frente a la electricidad disponible en la red nacional que abastece los centros urbanos, a un costo considerablemente menor dado su origen principalmente hidráulico. Sin embargo, es claro que la presión por el uso de energías renovables como la

fotovoltaica puede acelerar la reducción en los precios y hacer económicamente viable este tipo de proyectos, al menos en el mediano plazo.

Los cálculos elaborados en el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico son específicos para totalidad de la cantidad de energía que demandaría la sucursal, por lo que un aumento en esta variable, significaría disminución del cubrimiento del sistema. Durante el proceso metodológico para el cálculo del potencial energético y el dimensionamiento de los módulos se incluyen factores de eficiencia que describen las pérdidas de eficiencias energéticas por la influencia de diversos componentes del sistema y el comportamiento de los módulos

Es necesario la formulación y la aceptación de incentivos con la ley 1715 por parte del gobierno, para motivar la inversión de capital privado en el desarrollo de este tipo de sistemas en el territorio nacional. Esto se puede hacer mediante mecanismos de distribución de ingreso por la energía producida en exceso como es el caso de España donde se establecen primas por la energía producida a través de fuentes renovables, cuyo principal objetivo es reducir el tiempo de amortización de la inversión.

BIBLIOGRAFÍA

- Antena3.com. (2013). Estalla la guerra de los precios entre renovables y eléctricas. Retrieved from http://www.cienciexplora.com/ecologia/estalla-guerra-precios-renovables-electricas_2013102300069.html
- Díaz, J. R., Camejo Cuán, J. E., Batista, I., Núñez Rodríguez, A., Ramos Heredia, R., Rodríguez Gámez, M., ... Borges Gámez, A. (1998). Experiencias en la Electrificación de una Comunidad Rural con Energía Solar Fotovoltaica. In *Congreso Internacional de Energías Renovables "SENESE X"* (pp. 278–286).
- González-castrillo, P., Romero-cadaval, E., González-romera, E., & Guerrero-martínez, M. Á. (2012). Análisis de la calidad de suministro en una red de distribución con generación distribuida fotovoltaica. *DYNA*, 87, 400–410.
- Mejía, A., Vásquez, J., & González, A. (2012). Bacterias, fuente de energía para el futuro. *Tecnura*, (32), 118–143. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/tecn/v16n32/v16n32a11.pdf>
- Rodríguez, M. M., Martín, R. L., & Roselló, M. J. P. (2010). Las plantas fotovoltaicas en el paisaje. tipificación de impactos y directrices de integración paisajística. *Nimbus*, 25–26, 129–154.
- Vallejo, W. A. (2010). Estudio del Recurso Solar en la Ciudad de Bogotá para el Diseño de Sistemas Fotovoltaicos Interconectados Residenciales. *Revista Colombiana de Física*, 42(2).
- Guerrero, E. C., Palomino, Y., & Valdez, J. (2013). Diseño de un sistema solar fotovoltaico estándar para las escuelas públicas del sur de barranquilla. *Eleventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*.
- G. M. S. Azevedo, M. C. Cavalcanti, K. C. Oliveira, F. A. S. Nevez, and Z. D. Linds, "Evaluation of Maximum Power Point Tracking Methods for Grid Connected Photovoltaic Systems," Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008 IEEE. 15-19 June 2008 Page(s):1456 – 1462.
- US Department of Energy (DOE). (s. f.). EERE: SunShot Initiative Home Page. [En línea] disponible en [http:// www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/](http://www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/).
- A. Pinilla, L. Rodríguez, y R. Trujillo. (2009). Performance evaluation of Jepirachi Wind Park. Vol. 34, n.º 1. [En línea] disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148108001481>
- Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas (INEA). (1996). Censo y evaluación de sistemas solares fotovoltaicos instalados en Colombia. [En línea]

disponible en http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/energias_alternativas/potencialidades/Censo_Solar_Fotovoltaico.pdf.

M. H. Rodríguez. (2009). Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. [En línea] disponible en <https://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/a9%2028.pdf>.

Ortiz, J. D. (2013). Viabilidad técnico-económica de un sistema fotovoltaico de pequeña escala. *Visión Del Caso*, 103–117.

M. M. Sierra, “Análisis de viabilidad técnico y económico para instalar un sistema energético basado en tecnología solar a pequeña escala, en un área de la universidad EAN”, Informe de avance, 2011.

Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y CORPOEMA, C. E. (2010, diciembre). Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia. Vol. 2. [En línea] disponible en http://www.upme.gov.co/Sigic/DocumentosF/Vol_2_Diagnostico_FNCE.pdf.

Susana, F., & Aparicio, C. R. (2010). METODOLOGÍA PARA LA FORMULACIÓN DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR MEDIO DE PANELES, VO(Metodologia), 14–17. Retrieved from <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/2987/2/136150.pdf>

ARISTIZABAL, A y GORDILLO, G. Monitoreo del desempeño del inversor que conforman el primer sistema fotovoltaico interconectado en Colombia, usando instrumentación virtual. *Revista colombiana de física*, VOL. 38, No.1, 2006. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Departamento de Física.

Unidad de planeación minero energética UNME e instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales de Colombia IDEAM, Atlas de radiación solar de Colombia, 2005, pág. 115.

National Renewable Energy Laboratory (NREL). (s. f.). Best Research-Cells Efficiencies. [En línea] disponible en http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg.

European Photovoltaic Industry Association (EPIA). (2012). Global Market Outlook for Photovoltaics until 2016. [En línea] disponible en <http://files.epia.org/files/Global-Market-Outlook-2016.pdf>.