



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**Complementariedad en isla con integración
de energías renovables para la capacidad
del servicio energético.**

**Isolated complementarity with renewable
energy integration for energy service
capacity.**

Manuel Alejandro Cipagauta Zambrano

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación
Manizales, Colombia

2022

II Complementariedad en isla con integración de energías renovables para la capacidad del servicio energético

Complementariedad en isla con integración de energías renovables para la capacidad del servicio energético.

Isolated complementarity with renewable energy integration for energy service capacity.

Manuel Alejandro Cipagauta Zambrano

Trabajo final de investigación presentado como requisito para optar al título de:

Magister en Ingeniería – Ingeniería Eléctrica

Director:

Ph.D. Neil Guerrero González

Línea de Investigación:

Energías Renovables y Eficiencia Energética

Grupo de Investigación:

Environmental Energy and Education Policy

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación

Manizales, Colombia

2022

Le dedico el logro de este trabajo a mi madre por el incondicional apoyo y compañía frente al proceso de mi etapa estudiantil, estando siempre en mis recaídas y faltas de ideas, brindándome motivación a continuar y finalizar este importante proyecto de vida. Doy Gracias por inculcarme a no rendirme ante las adversidades sin perder el rumbo a mis objetivos y en cada dificultad ver una oportunidad de aprendizaje.

Gracias a ello soy una persona con principios, valores y perseverancia ante los retos del día a día para luchar desde el corazón por mis sueños.

..." El camino comienza de hacer eterno lo repentino, y el deseo de recorrer ese camino nace desde el corazón" ... MACZ

Declaración de obra original

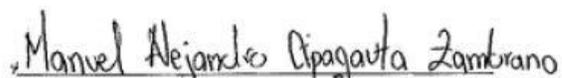
Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Manuel Alejandro Cipagauta Zambrano

Fecha 02/12/2022

Agradecimientos

Un honor poder realizar mi trabajo de maestría en la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, mi segunda casa durante 8 años en este andar de vida, donde quiero agradecer a mi institución por abrirme las puertas, en la cual me enseñaron los valores de pertenencia y ética al proceso educativo inculcándome siempre a ser un excelente profesional.

Por otro lado, agradecer a Dios y a la Virgen que me cubrieron con su consagración, a mi familia y mi pareja que no desampararon en cada ruego y ayuda para avanzar paso a paso en este sueño, donde estuvieron presentes en todo momento, esos instantes de angustia, furia y frustración en los cuales tuve un incondicional apoyo de mi pareja, con sus oraciones para salir adelante y lograr el sueño planteado de finalizar mi investigación.

Así mismo, expresar mi gratitud hacia mi tutor de tesis el Profesor y Doctor Neil Guerrero González el cual gracias a él me propuse este desafío, él más que una guía, se ha convertido en mi mentor, mi amigo y un padre para mí en este camino educativo, sus valiosos consejos, enseñanzas y experiencia conjuntamente con su paciencia han logrado formar una excelente persona en este reto propuesto, sin duda alguna un orgullo haber sido parte de su mentoría.

Por último, un agradecimiento formal a mis amigos y colegas que se hicieron presentes de forma desinteresada, dándome fuerza mental para alcanzar este sueño trazado.

Manuel Alejandro Cipagauta Z

Resumen

El presente trabajo prevé analizar y evaluar escenarios económicos y técnicos hacia la integración del servicio complementario mediante energía solar fotovoltaica, con Capacidad de Operación en Isla (COI) para el sector agropecuario. El planteamiento del problema, describe los impactos para el cambio climático de los combustibles fósiles, aborda la situación de dependencia del recurso hídrico que ha prevalecido durante décadas, y la importancia de cambiar a fuentes alternativas de producción como la energía limpia y renovable, que sean amigables con el medio ambiente. En los antecedentes generales, se describe el marco histórico de la energía solar FV, la situación del sistema eléctrico colombiano, su marco legal, y el potencial solar en Colombia. Así mismo, se describen los componentes del Sistema solar FV, el funcionamiento de los paneles solares, la cadena de suministros de la tecnología FV, y sus ventajas económicas. La Fundamentación teórica expone los más importantes modelos de generación eléctrica a nivel global, como la generación centralizada, los Recursos Energéticos Distribuidos (DERs), los sistemas de generación distribuida (GD), los sistemas híbridos hacia la generación de energía y los servicios complementarios, en particular la complementariedad operativa en isla. La propuesta diseñada, para la implementación de la energía solar fotovoltaica, es un sistema aislado de la red, con complementariedad en isla (COI) a pequeña escala como alternativa para la electrificación rural, hecho con base en el modelo agrovoltaico que señala un doble uso de las superficies: para actividades agropecuarias y producción de energía mediante paneles solares.

Palabras clave: *Energía solar FV, sistema agrovoltaico, Complementariedad en Isla, agricultura de precisión*

Abstract

The present work plans ahead examining and evaluating cost-reducing and technical scenes for the integration of the complementary intervening service photovoltaic solar energy, with Capacidad of Operación in Isla (COI) to child and median increases. The proposal of the problem, describe the impacts for the climatic change of the fossil fuels, the position of dependence of the hydric resource that has prevailed during decades tackles, and the importance to change toward alternative sources of production like the clean and renewable energy, that they be friendly with the ambient midway. In the general background, the solar energy's historic frame describes FV, the situation of the electric Colombian system, his legal frame itself, and the solar potential in Colombia. Likewise, FV, the functioning of the solar panels, describe the Solar System's components themselves the technology's chain of supplies FV, and his cost-reducing advantages. The theoretic Foundation exposes the most important models of electric level global generation, like the centralized generation, the Distributed Energy Resources (DERs), the systems of distributed generation GD, the hybrid systems for the generation of energy and accessorial services, in particular the operating complementariedad at island. The proposal designed, for the implementation of photovoltaic solar energy, it is a system isolated of the net net, with complementariedad at island COI on a small scale as an alternative for the rural electrification, fact on the basis of the model agrovoltaico that indicates a double use of the surfaces: For agricultural activities and production of intervening energy solar panels.

Keywords: *Solar energy FV, agrovoltaics system, Complementary in Isla, agriculture of precision*

Contenido

	Pág.
1. Capítulo 1 - Problema.....	5
1.1 Planteamiento del problema.....	5
1.1.1 Justificación.....	7
1.1.2 Objetivos.....	11
1.2 Metodología.....	12
2. Capítulo 2 – Antecedentes generales	15
2.1 Marco histórico.....	15
2.2 El Sistema Eléctrico colombiano	17
2.3 Marco legal.....	20
2.4 El potencial solar en Colombia	23
3. Capítulo 3 – Fundamentación Teórica	27
3.1 Modelos de generación eléctrica.....	27
3.1.1 Generación centralizada.....	27
3.1.2 Recursos Energéticos Distribuidos (DERs).....	28
3.1.3 Generación distribuida (GD)	30
3.1.4 Sistemas híbridos para la generación de energía	33
3.2 Servicios complementarios.....	34
3.3 Complementariedad operativa en Isla	35
4. Capítulo 4- Energía Solar Fotovoltaica (FV)	38
4.1.1 Sistema solar FV (componentes).....	39
4.1.2 Captación de la energía: paneles solares FV.....	41
4.1.3 La cadena de suministros de la tecnología FV.....	46
4.1.4 Ventajas económicas de los sistemas solares FV.....	48
5. Capítulo 5 – Sistema inyectado a Red	52
5.1 Sistema inyectado a red, con complementariedad en isla COI.....	54
5.2 El sistema inyectado a microrredes.....	57
5.2.1 Retos para el desarrollo de microrredes	58
5.3 Sistemas de monitoreo y control	59
5.4 La electrificación rural	61
6. Capítulo 6– Sistema aislado de la Red.....	64
6.1 Aplicaciones de la Energía Solar FV en sistemas aislados.....	65
6.1.1 Sistemas solares domésticos (SSD).....	66
6.1.2 Aplicaciones para el sector salud.....	67
6.1.3 Energía FV para el suministro de agua potable	67
6.1.4 Energía FV para escuelas, instalaciones comunales	68
6.1.5 Tecnología FV, para las Telecomunicaciones.....	68
6.1.6 Centros de carga para baterías FV.....	69
6.1.7 Aplicaciones de la energía solar FV en agricultura	69
7. Propuesta de innovación: Energía agrovoltaica y agricultura inteligente para potenciar los cultivos agrícolas y el suministro de energía.....	77

XII Complementariedad en isla con integración de energías renovables para la capacidad del servicio energético

7.1	Descripción del modelo agrovoltaico.....	78
7.2	Aplicaciones de los sistemas agrovoltaicos.....	79
7.3	Avances tecnológicos y agricultura 4.0	82
7.4	Aportes y limitaciones de la propuesta.....	83
7.5	Exploración experimental a la propuesta	85
7.5.1	Radiación Solar Extraterrestre teórica anual	85
7.5.2	Radiación Solar Terrestre teórica anual	89
7.5.3	Radiación Solar Terrestre teórica para los días del año en la ciudad de manizales	91
7.6	Prototipo experimental a la propuesta.....	85
8.	Conclusiones y recomendaciones	107
8.1	Conclusiones	107
8.2	Recomendaciones	108
9.	Bibliografía	111

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 - 1 Energías limpias, alternativas y renovables.....	8
Figura 2 -2 Panel térmico para el calentamiento de agua.....	16
Figura 3 -2 Demanda energética en Colombia en barriles de petróleo: prospectiva 2030	18
Por otro lado, se encuentran las ZNI (zonas no interconectadas) al servicio eléctrico. Los efectos de la prestación de servicios eléctricos públicos, ZNI se refiere a ciudades, pueblos, villas y pueblos que no están conectados al Sistema Interconectado Nacional (SIN) (29), como se ilustra en la Figura 4 – 2 Zonas no interconectadas al servicio eléctrico en Colombia:.....	18
Figura 5 - 2 Mapa de energía solar FV en Colombia	24
Figura 6 - 3 Método de detección de isla para convertidores.....	33
Figura 7 -3 Esquema funcional de un sistema híbrido alimentado mediante energía solar y la red convencional.....	34
Figura 8 - 4 Componentes básicos de un sistema solar FV.....	41
Figura 9- 4 Proceso de conversión de la luz solar en energía FV.....	42
Figura 10 - 4 Componentes de un panel solar.....	43
Figura 11 - 4 Clases de paneles solares, de acuerdo a su constitución.....	44
Figura 12 - 5 Conexión en serie de dos paneles solares	53
Figura 13 - 5 Conexión de paneles solares en paralelo	53
Figura 14 - 5 Sistema inyectado a red, con un controlador e inversor para convertir la energía a 110 V.AC.....	55
Figura 15-5 Esquema básico de conexión a red de un sistema fotovoltaico	56
Figura 16 - 5 Sistema FV integrado a una microrred	57
Figura 17-6 Sistema FV aislado de la red, con capacidad de operación en Isla COI	65
Figura 18 - 6 Diseño básico de un SSD con energía solar FV.....	66

XIV Complementariedad en isla con integración de energías renovables para la capacidad del servicio energético

Figura 19 - 6 Suministro de agua potable con energía solar FV.....	68
Figura 20- 6 Irrigación de cultivos con energía solar FV.....	71
Figura 21- 6 Abrevadero para ganado usando tecnología FV	72
Figura 22 - 6 Cerca eléctrica diseñada para usar energía solar FV.....	73
Figura 23-7 Ejemplo de agricultura agrovoltaica: combinación de cultivos con paneles solares para sombreado.	80
Figura 24 Cercas para ganadería, con paneles solares	81
Figura 25-7 Modelos agrovoltaicos, de acuerdo a las necesidades. Figura central con invernadero.....	81
Figura 26 Radiacion Extraterrestre Teórica.....	86
Figura 27 Ángulo de Declinación	86
Figura 28 Ángulo Horario	88
Figura 29 Radiacion Solar Terrestre Teórica.....	90
Figura 30 Radiación Solar Terrestre teórica en Manizales	92
Figura 31 Radiación Solar Terrestre teórica en Manizales	¡Error! Marcador no definido.
Figura 32 Irradiancia Extraterrestre con Factor de claridad en un año	94
Figura 33 Insolación Solar en la ciudad de Manizales.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 34 Insolación Solar en la ciudad de Manizales.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 35 Generación Teórico-Práctica en un mes	¡Error! Marcador no definido.

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 - 2 potencial de la energía solar en Colombia por regiones	25
Tabla 2- 5 Panorama general del potencial y limitaciones de los sistemas FV.	63
Tabla 3 - 6 principales actividades agrícolas estimuladas con la energía FV.....	70
Tabla 4 - 6 Repercusiones de los sistemas FV en la agricultura.....	76
Tabla 5 - 7 Datos del módulo fotovoltaico.....	97
Tabla 6 - 7 Datos del inversor fotovoltaico.....	97
Tabla 7 - 7 Datos generales de horas pico solar y temperatura.....	98
Tabla 8 - 7 Análisis de distancias para instalación final	98
Tabla 9 - 7 Cálculo de la sección de los conductores	99
Tabla 10 - 7 Análisis para factores de pérdidas del sistema	101
Tabla 11 - 7 Pérdidas de temperatura para el sistema	102
Tabla 12 - 7 Análisis de Generación Teórico anual para el sistema.....	103
Tabla 13 - 7 Análisis de Generación Práctico anual para el sistema.....	103
Tabla 14 - 7 Proyección de generación para varios años	104

Lista abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>ADRS</i>	Agricultura y desarrollo Rural Sostenibles
<i>AC</i>	Corriente alterna
<i>AGPE</i>	Autogeneración a Pequeña Escala
<i>CCB</i>	Centro de Carga de Baterías
<i>CCD</i>	Costos del ciclo de duración de un sistema o tecnología, durante su vida útil.
<i>COI</i>	Capacidad de operación en Isla para los sistemas de energía solar FV
<i>CREG</i>	Comisión de Regulación de Energía y Gas de Colombia
<i>CSM</i>	Centro de Solidaridad Mundial
<i>DC</i>	Corriente continua
<i>DERs</i>	Recursos energéticos distribuidos
<i>DRS</i>	Desarrollo Rural Sostenible
<i>EPE</i>	Empresa proveedora de electricidad
<i>Gw</i>	Gigavatios
<i>ER</i>	Energía Renovable
<i>FAZNI</i>	Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de Zonas No Interconectadas
<i>FV</i>	Sistema de energía solar fotovoltaico. Se refiere a la conversión directa de la luz solar en electricidad a través de semiconductores.
<i>Gw</i>	Giga vatios
<i>IDEAM</i>	Instituto de Estudios Ambientales de Colombia
<i>IPSE</i>	Instituto para la Promoción de Soluciones Energéticas
<i>Kv</i>	Kilo voltios
<i>Kw</i>	Kilovatios de potencia
<i>Kwh</i>	Kilovatio sostenido por hora.
<i>Mw</i>	Magavatios
<i>ON-GRID</i>	Sistemas de energías solar FV interactivos con la Red Eléctrica.
<i>RES</i>	<i>Renewale Energy Sources</i>

Abreviatura Término

SG	<i>Smart Grid</i> (Red Inteligente). Sistema de comunicación para monitorear y controlar la red de forma eficaz, en tiempo real y eficiente, y un sistema eléctrico automatizado.
SSD	Sistema Solar Doméstico, se refiere a una aplicación común de los sistemas FV para llevar luz, radio y televisión a los hogares, sobre todo en los países en desarrollo.
V	Voltios de potencia
VSC	Control de frecuencia
W	Vatio(s) Watt(s)
Wp	<i>Watt-peak</i> , se refiere a una medida <i>standard</i> de la producción eléctrica de los módulos FV: la potencia máxima de un modulo FV en condiciones <i>standard</i> de prueba.
ZNI	<i>Zonas no interconectadas de Colombia</i>

Introducción

Colombia cuenta con una fuerte dependencia del recurso hídrico para la producción de energía eléctrica. Alrededor del 68 % de la matriz energética, según la firma de expertos en mercados XM (1) está representada por la generación hidráulica, (2) debido a la abundancia de agua en la nación. La construcción de megaproyectos hidroeléctricos se encuentra actualmente en revisión a escala mundial y nacional debido al impacto sobre el medio ambiente y los numerosos desafíos que se deben superar, (3) además de los riesgos que implica su emplazamiento para las poblaciones aledañas.

La búsqueda de alternativas para el suministro de energía se hace cada día más evidente y necesaria, así como el uso de energías limpias y amigables con el medio ambiente. El uso de la energía solar fotovoltaica FV tiende a imponerse en el mundo entero por sus beneficios económicos, de mantenimiento y fácil instalación, así como por la durabilidad de los materiales. De esta forma, los sistemas solares FV ofrecen grandes ventajas principalmente para potenciar la producción agropecuaria y mejorar la calidad de vida de las poblaciones rurales.

El incremento progresivo de la población mundial ha hecho de la agricultura un campo de estudio indispensable a través de la historia, y en la actualidad se ha hecho más apremiante la búsqueda de soluciones integrales, porque es un sector que contribuye significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero que provocan el cambio climático. Se prevé que la presión sobre la disponibilidad de alimentos en todo el mundo aumente drásticamente con el aumento de la población mundial en las próximas décadas (4). De otro lado, los recursos disponibles y las tierras cultivables, son cada vez menos, y los niveles de agua están retrocediendo (5).

En este escenario, la energía solar FV, está demostrando ser de gran viabilidad para los SSD, agricultura, sectores industrial y comercial, en zonas donde no llega el sistema nacional de interconexión SIN. La tecnología FV, está tomando gran auge en el mundo entero por sus beneficios ambientales y por ser de fácil instalación y mantenimiento, a su vez permite solucionar problemas de suministro en zonas donde no llega la red, y por tanto, sus aplicaciones, principalmente para uso doméstico y tareas agropecuarias, se pueden potenciar mediante la capacidad de operación en isla COI.

Así mismo, las alternativas energéticas como la agrovoltaica (*agrovoltaics*) y otras tecnologías disruptivas en agricultura inteligente que serán motivo de análisis, se están convirtiendo en innovaciones efectivas para potenciar el uso del suelo e incrementar la producción agropecuaria.

Como se ha expuesto, el uso de combustibles fósiles y las actividades agrícolas convencionales, son los sectores que más aportan a la emisión de gases de efecto invernadero se ha convertido en una de las mayores amenazas para el futuro de la humanidad, ya que son causantes del cambio climático. En este contexto, se plantea que la combinación de la energía solar FV con una agricultura sostenible, (agrovoltaica) se reduce en una de las principales opciones para hacer más sostenible el sector, instalando placas solares en terrenos de cultivo, lo que permite una sinergia para el mejor aprovechamiento de la energía solar y los suelos aptos para la agricultura (6).

De igual manera, se describen los adelantos tecnológicos que se inscriben en lo que se ha dado en llamar la agricultura de 4^a. Generación, basada en tecnologías disruptivas, enfocadas a la reducción de la huella ecológica de la producción agropecuaria, como motivación para futuras investigaciones de innovación susceptibles de aplicar en Colombia (7). En efecto, para la implementación de la tecnología agrovoltaica, se han hecho adelantos tecnológicos que hacen uso de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC's), para monitorear recursos, a fin de maximizar su uso, y obtener el máximo de rendimiento de los cultivos (4). Actualmente, los países más desarrollados (ver Anexo 1) están incursionando en proyectos como el *Smart farming*, que usa los datos obtenidos de la agricultura de precisión de forma inteligente en la industria agraria, mejorando la eficiencia de la producción, reduciendo el trabajo humano mediante la

automatización de tareas, el monitoreo de los cultivos, el procesamiento de imágenes. *la teledetección, Internet de las cosas (IoT), aprendizaje automático, big data, etc.* (4).

Este estudio pretende, brindar al conocimiento de las energías renovables, los avances tecnológicos y sus aplicaciones en el agro, así como proponer un modelo simulado de cultivos de tomate, con base en el modelo agrovoltaico, -con un sistema solar FV con capacidad de operación en isla COI-, que se basa en un doble uso del terreno (paneles solares y agricultura) como aporte a las innovaciones que se pretenden realizar en el país para potenciar el uso del suelo e incrementar la producción agropecuaria, mediante el uso de la energía solar FV.

1. Capítulo 1 - Problema

1.1 Planteamiento del problema

El consumo excesivo y excesivo de energía es uno de los mayores problemas a los que nos enfrentamos actualmente. La principal fuente de emisión de gases de efecto invernadero, así como de otros gases que inciden en la salud de las personas han sido, como es bien sabido, las fuentes de energía convencionales a base de combustibles fósiles (5). En todo el mundo, los combustibles fósiles representan el 85% de toda la producción de energía comercial; aproximadamente el 36% de esta energía se produce a partir del petróleo, el 38% del carbón y el 23% del gas natural (8).

Además, la necesidad de energía es cada vez mayor a nivel mundial, y en la actualidad se buscan diferentes fuentes para satisfacer las necesidades, que crecen cada día. Por tratarse de recursos naturales no renovables, las fuentes tradicionales de energía ocasionan una incertidumbre en los procesos de prospección, se incrementan los costos de producción, lo que incide en pérdida de confianza en la oferta, además de tensiones geopolíticas (9).

Se considera que más del 80% de la energía utilizada en la actualidad, proviene de los combustibles fósiles, causantes de la degradación ambiental y el calentamiento global. Las RES (*Renewable Energy Sources*) figuran ahora, en el contexto global, como una panacea para solucionar los problemas del cambio climático. De hecho, las fuentes de energía renovable abastecen el 15-20% de la demanda energética actual (10), en especial, los sistemas de energía solar FV a pequeña escala (AGPE) ya que son viables económicamente, para proveer electricidad en áreas remotas y rurales, por lo que, en países como Colombia, se convierten en una alternativa social, económica y ambientalmente sustentables.

Una desventaja de instalar sistemas solares fotovoltaicos es que no se realiza monitoreo, inspección o evaluación, lo que conduce a un diseño y planificación deficientes del sistema, fallas mecánicas y eléctricas, explosiones internas, la creación de circuitos rotos en las cajas de conexiones y la generación de arcos en la energía eléctrica (11). De ahí la importancia de diseñar modelos alternativos como el presente, con el fin de disminuir los riesgos físicos y ambientales causados por el uso inadecuado de otros sistemas, y para una adecuada instalación, operación y mantenimiento de sistemas basados en la energía solar FV, particularmente para usos en el sector agropecuario, acompañado del uso de nuevas tecnologías para incursionar en lo que en la actualidad es llamado *agricultura inteligente*. (11).

Muchas regiones de Colombia figuran entre las *Zonas no interconectadas (ZIN)* a las redes principales, por lo que se requiere la implementación de otras fuentes energéticas, como la FV para el autoconsumo. No obstante, en muchos predios rurales de poco terreno, los propietarios se abstienen de instalar los sistemas solares FV por el espacio que ocupan. En la actualidad los ambientalistas están explorando los beneficios cruzados del uso de la energía solar para apoyar la agricultura (6), mediante modelos como la agrovoltaica que permite utilizar la tecnología FV en la misma superficie en que realizan las actividades agropecuarias, sin mayores inconvenientes, con el valor agregado de contar con fuentes propias de abastecimiento energético para las tareas del agro.

Además, uno de los graves problemas para los agricultores es la producción de cultivos intolerantes a la luz y al calor, a medida que aumenta la temperatura global. Las verduras de alta demanda como los tomates, el brócoli, la lechuga, la espinaca, la calabaza y más requieren sombra para alcanzar ciclos de crecimiento óptimos (6). El sistema agrovoltaico, es un término acuñado por ecologistas para designar un modelo que consiste en utilizar placas solares FV para producir sombra artificial cuando se requiere – para agricultura y/o ganadería- y a su vez aprovechar de forma complementaria los terrenos para generar energía solar FV, con grandes ventajas para la sostenibilidad económica y ambiental (3).

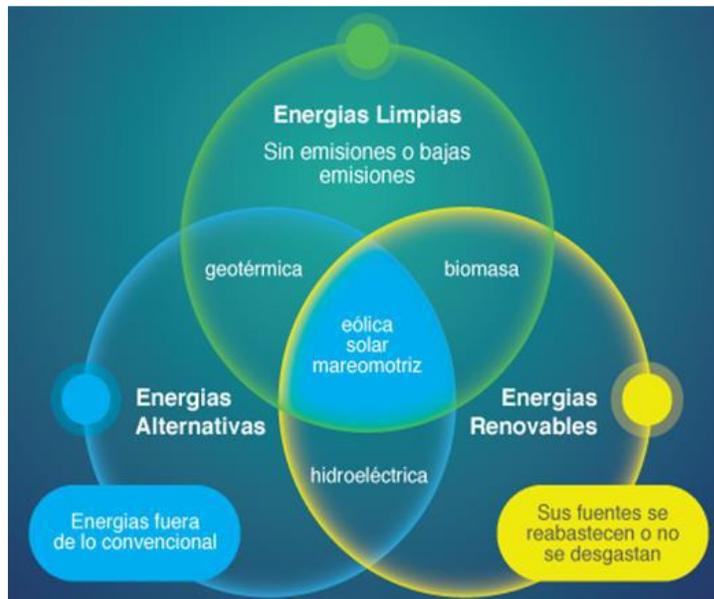
1.1.1 Justificación

La conciencia ambiental y el crecimiento industrial en Colombia han cambiado la forma de pensar y comportarse de las organizaciones receptoras y proveedoras de servicios. Actualmente, se buscan procedimientos amigables con el medio ambiente porque ayudan a reducir la huella de carbono en todos los procedimientos y en la cadena de suministro (12). En el mundo globalizado, el concepto de conciencia ambiental cobra una importancia exponencial, en donde la sostenibilidad de las organizaciones socioeconómicas en un nivel agregado depende fundamentalmente de tres dimensiones: la ambiental, la social y la económica (13).

En la actualidad, Incluso después de que sus costos hayan disminuido, el desafío de cambiar todo el paradigma tecnológico asociado con el uso de combustibles fósiles como fuente de energía eléctrica para diversos usos y como fuente de energía motriz para automóviles, barcos y aviones se plantea con la transición de la energía convencional. fuentes a fuentes alternativas (14). Es por esto que se requiere la innovación tecnológica para implementar energías renovables (RES) que satisfagan las necesidades, de forma que su transporte y costos económicos sean asequibles para la sociedad de consumo. Las tecnologías que más se destacan actualmente son aquellas que emplean RES con sistemas ecológicos inteligentes (10).

Aunque energía limpia y energía renovable no son lo mismo, se entiende que la energía limpia renovable proviene de fuentes de las que se obtienen la energía y los residuos que se pueden producir durante este proceso (15). Se consideran energías limpias la solar, la eólica y mareomotriz, que provienen de fuentes limpias, renovables, sostenibles y no producen residuos contaminantes en su transformación. Además de las fuentes mencionadas, también se tienen en cuenta las energías renovables como la geotermia, la biomasa y las pequeñas centrales hidroeléctricas. Estas fuentes son amigables con el medio ambiente, pero pueden producir desechos durante el proceso de conversión (7). Una descripción de las energías limpias, alternativas y renovables, se aprecia en la siguiente figura.

Figura 1 - 1 Energías limpias, alternativas y renovables



Fuente: Blanchard, A: *Mouchot: La chaleur solaire et ses applications industrielles* (15)

Las energías renovables o alternativas, tales como la energía solar fotovoltaica, la energía eólica y la biomasa, entre otras, se están convirtiendo cada día más en una opción viable con gran aceptación en el mercado, por su seguridad, confiabilidad y menor impacto ecológico (16). Entre ellas, la energía solar es propuesta como una de las alternativas más fiables por la simplicidad de su aprovechamiento y el carácter potencial que tiene en algunas zonas del mundo (11).

La ausencia de radiaciones electromagnéticas, olores, CO₂ y otros gases de efecto invernadero que contaminan y aceleran el calentamiento global es una de las ventajas de la energía solar fotovoltaica. También se diferencia de otras fuentes de energía en que es limpia, sencilla y silenciosa, requiere poco mantenimiento, es una fuente inagotable de energía, carece de partes móviles, causa menos daño ambiental e incluso produce pocos desechos (16). Además, de acuerdo con *la Agencia Internacional de Energía* (9) permite la generación de empleos locales para la instalación y mantenimiento de sistemas descentralizados, el fortalecimiento de la seguridad energética, la reducción de

la contaminación y la reducción del precio de la energía eléctrica debido al aumento del suministro y la confiabilidad del servicio (9).

Otra de sus características más atractivas es que son fáciles de instalar y tienen una vida útil de más de 20 años con el mantenimiento adecuado, que es prácticamente inexistente si los paneles se conectaron e instalaron correctamente. A diferencia de las centrales hidroeléctricas, no consume ni contamina el agua y no tiene impacto en la reducción del caudal de los ríos. Su producción, distribución y disponibilidad ilimitadas reducen el costo de construcción de infraestructura para el transporte de energía, evitando posibles efectos ambientales durante esta logística (16).

Debido a la influencia de los fenómenos naturales, la variedad de climas, la seguridad y otros factores, la red de interconexión del país enfrenta problemas de suministro y confiabilidad en materia energética (17). Además, en la transición de redes pasivas a redes activas trae consigo problemas de operación en la red (18); uno de estos problemas es la confiabilidad y resiliencia del sistema; por tanto, se precisa crear entornos en los cuales se disponga de mayor continuidad del suministro eléctrico a los usuarios. Resulta por tanto interesante analizar este sistema a nivel micro, mediante modelos de generación distribuida GD, a pequeña y mediana escala (AGPE) con la inserción de energía solar fotovoltaica ordenada mediante la capacidad de operación en isla (COI).

Por otra parte, la reglamentación en operación por isla en los sistemas eléctricos de distribución masiva, presenta un gran reto técnico, económico y regulatorio en el reconocimiento de todas las ventajas y desventajas teóricas atribuibles a este tipo de operación (19). De este modo, el análisis del servicio complementario COI se convierte en un problema dinámico altamente complejo bajo la transversalidad de aspectos sociales, económicos, técnicos y de mercado (20), cuando se realiza a gran escala; pero sus costos y operatividad pueden ser altamente confiables, a pequeña y mediana escala (AGPE). Además, la operación de los sistemas de distribución eléctrica por islas se plantea como una alternativa que asegura la resiliencia local y mejora la seguridad ante imprevistos y apagones (20).

Diseñar sistemas solares FV con capacidad de operación en Isla, (acoplados a microrred y aislados de la red) es una contribución que espera incentivar la creatividad y el fomento de las instituciones para la innovación en energías alternativas, y el suministro de estos servicios a las zonas rurales, para de esta manera, aportar a las decisiones informadas en materia de opciones de tecnología FV.

En la actualidad, existen dos tipos de sistemas fotovoltaicos, uno inyectado a red, que se caracteriza por no poseer un banco de baterías; la energía generada por los paneles solares, se usa de forma directa y la energía restante se conecta directo al transformador para ser enviada a la microrred (11). El segundo sistema, aislado de la red, es la tecnología FV sencilla, consistente en uno o varios paneles solares, utilizando una batería como acumulador de carga, para usos que no demandan un alto consumo de energía.

En este contexto, diseñar sistemas FV aislados de la red, resulta ser de gran utilidad para la provisión de energía en el sector agropecuario, con sistemas COI e instalados de acuerdo a los diseños utilizados por la agrovoltaica (10). Además, con las nuevas tecnologías, se ha tratado de implementar una agricultura inteligente para ayudar a gestionar las actividades agrícolas y aprovechar mejor las fuentes de energía (4) como la orientación automática de paneles solares (21).

Por otra parte, Al agotar la tierra y los recursos naturales, el sector agrícola tiene un impacto en la ecología del planeta. La sobreproducción de cultivos erosiona el suelo, consume una cantidad excesiva de agua y reduce los niveles de nutrientes del suelo. El modelo agrovoltaico sugiere cubrir áreas cercanas a granjas y fuentes de agua con paneles solares para producir más energía limpia mientras se preserva la tierra para el futuro crecimiento agrícola (6) (22).

Son innovaciones que tratan de solucionar problemas externos asociados a la agricultura, -como las condiciones climáticas extremas, la falta de energía convencional y otros inconvenientes como las enfermedades de las plantas-, mediante la implementación de estrategias de monitoreo, herramientas predictivas basadas en datos,

que se pueden utilizar para proporcionar información sobre operaciones agrícolas, -como los hábitos de consumo (demanda), rendimiento de cultivos, condiciones climáticas, características de los suelos, entre muchos otros datos- que pueden contribuir significativamente a mitigar los riesgos ya que permiten tomar disposiciones en función de la indagación recibida en tiempo real de los datos heurísticos de regla general (4), para mejorar la producción agropecuaria y en muchos casos, reducir los costos para los agricultores.

1.1.2 Objetivos

Objetivo General

Diseñar un sistema eléctrico de Complementariedad en isla COI con integración de energías renovables para mejorar la capacidad del servicio energético en el sector agropecuario mediante el modelo agrovoltaico.

Objetivos Específicos

- Describir los modelos convencionales de generación energética, antecedentes del sistema eléctrico colombiano, marco legal y potencial solar existente en el país para analizar las condiciones y viabilidad de la transición hacia el uso de energías alternativas como la solar FV.
- Describir las características generales de la tecnología solar FV, los sistemas inyectados a red y aislados de la red con capacidad de operación en Isla COI, sus aplicaciones, ventajas económicas y potenciales usos para el sector agropecuario.

- Modelar y simular un escenario de integración de un sistema solar FV, con Capacidad de Operación por Isla, mediante el modelo agrovoltaico que permite un doble uso de terrenos para producción agropecuaria y generación energética.

1.2 Metodología

La siguiente constituye la metodología del trabajo de investigación:

- En primero lugar, se realizará una revisión bibliográfica en la cual se buscará indagar sobre la existencia de la idea trazada en la investigación, en donde se recopilará información pertinente a los sistemas fotovoltaicos utilizados en el sector agrícola.
- En segundo lugar, se identificará un problema a partir de la revisión bibliográfica hallada anteriormente, para con esto lograr un panorama explicito en resolver una necesidad en el sector.
- En tercer lugar, se propondrá un sistema en un escenario claro y único en el que solucione conjuntamente el problema identificado en la investigación trazada.
- Así mismo, se ejecutará una validación del problema identificado mediante datos recolectados e indagación bibliográfica almacenada de la investigación, dando paso al estudio del diseño de un sistema de energía solar FV aislado de la red, con el sistema complementario en isla, para posibles aplicaciones en zonas donde no llega la red, utilizando el modelo agrovoltaico que permite combinar la instalación de paneles solares con cultivos (tomate).
- Luego, se dispondrá la escritura del documento final (tesis), en el cual después de tener claridad en el tema trazado y una validación a la problemática expuesta,

se trata de plantear condiciones favorables para la implementación del servicio complementario COI a través del sistema de energía solar fotovoltaica FV para usos agropecuarios.

- Los estándares que se toman como base para modelar la operación por islas europeos y americanos más relevantes en esta operación son el IEEE Std 1547.4, IEEE P2030, IEEE C37.95, IEEE 37.118, EN 50160, IEC 61000, IEC 61850 (23).
- Excel y AutoCAD serán las herramientas de trabajo para el presente trabajo de investigación; son algunos de los que utilizan investigadores alrededor del mundo para modelar y simular redes de distribución aisladas o interconectadas.
- Finalmente, se expondrán de forma general unas conclusiones y recomendaciones de acuerdo a la problemática planteada en esta investigación dando una solución factible a esta.

2. Capítulo 2 – Antecedentes generales

2.1 Marco histórico

La energía solar se ha utilizado desde el siglo III A.C., cuando Arquímedes usó espejos para reflejar la luz del sol sobre la flota romana para quemarla en la batalla de Siracusa en la antigua Grecia. En el siglo XVI, Leonardo da Vinci diseñó espejos cóncavos para producir "vapor y calor industriales". El mayor avance en la conversión de energía solar tuvo lugar en el siglo XIX, especialmente en Francia, cuando el físico Alexandre Edmund Becquerel descubrió el efecto fotoeléctrico, creando células fotovoltaicas. (7).

Los primeros negocios de energía solar surgieron en el siglo XX, incluida Power Co, que Frank Schuman estableció en los Estados Unidos en 1911 y tenía una capacidad de generación de 20 KVA. Aunque el aprovechamiento de la energía solar no es tan nuevo en el mundo, en Colombia data del siglo pasado cuando se utilizaba esta energía para calentar agua, este método era muy común en las regiones bananeras de la costa atlántica, más tarde, varias universidades comenzaron a crear y sugerir la instalación de calentadores residenciales y calentadores comerciales para uso en hoteles, restaurantes y hospitales. La forma de los paneles calentadores se observa a continuación:

Figura 2 -2 Panel térmico para el calentamiento de agua



Fuente: Celsia: <https://www.celsia.com/es/blog-celsia/paneles-solares-como-funcionan-y-que-son/>

Desde finales del siglo pasado, Colombia se ha sumado a la dinámica mundial en el desarrollo de sistemas de producción, transmisión y gestión de la energía producida y consumida, y es reconocido como uno de los países con mayor producción de energía renovable de mayor creación en la región, gracias a las condiciones naturales que lo hacen posible. les sitúa en una posición privilegiada respecto a otros países del mundo para desarrollar proyectos fotovoltaicos (7).

La transición de energía convencional a renovable es un desafío que crece exponencialmente en Colombia (3). Este crecimiento está impulsado por la creación de estándares locales y globales, así como por desarrollos tecnológicos y reducciones de costos en los sistemas de generación de energía. Actualmente, la energía fotovoltaica, que tiene una capacidad instalada de 385.674 MW, es una de las tecnologías de generación de energía más populares y utilizadas (8).

Así mismo, la cabida fotovoltaica global en el mercado anualmente en 2015 ha crecido significativamente, diez veces más que hace diez años, y este crecimiento está impulsado por la defensa del cambio climático y el medio ambiente (8).

Dentro de los principales antecedentes del trabajo de investigación está la importancia que han tenido las microrredes aisladas alrededor del mundo como laboratorios o proyectos piloto para luego ser extrapolados a casos de sistemas robustos interconectados (24). Estos proyectos cuentan con la presencia de ejes transversales como lo son la intervención activa de la demanda, inserción de cargas especiales y de la generación distribuida (GD), automatización y creación de entornos económicos que incentivan la venta de energía a la red (9).

Algunos autores alrededor del mundo han reconocido la transversalidad de la operación por isla en beneficios técnicos, económicos, regulatorios, ambientales y sociales (18) (11) (25). Además, se ha determinado que cada país posee condiciones particulares para la implementación de operación por islas (20) y por ello, se debe hacer un estudio complejo que permita visibilizar la viabilidad para implementar dicha operación.

El uso inteligente y eficiente de la energía solar es una gran opción para superar la actual crisis energética mundial. Para reducir costes se han realizado estudios y se han propuesto diversas formas de aumentar su eficacia. Estos incluyen la investigación técnica sobre convertidores de baterías solares, el diseño de sistemas de control automático para la carga y descarga de baterías, el control solar para cargar y descargar correctamente las baterías para evitar el mal uso y el daño de las baterías del mismo tipo (10).

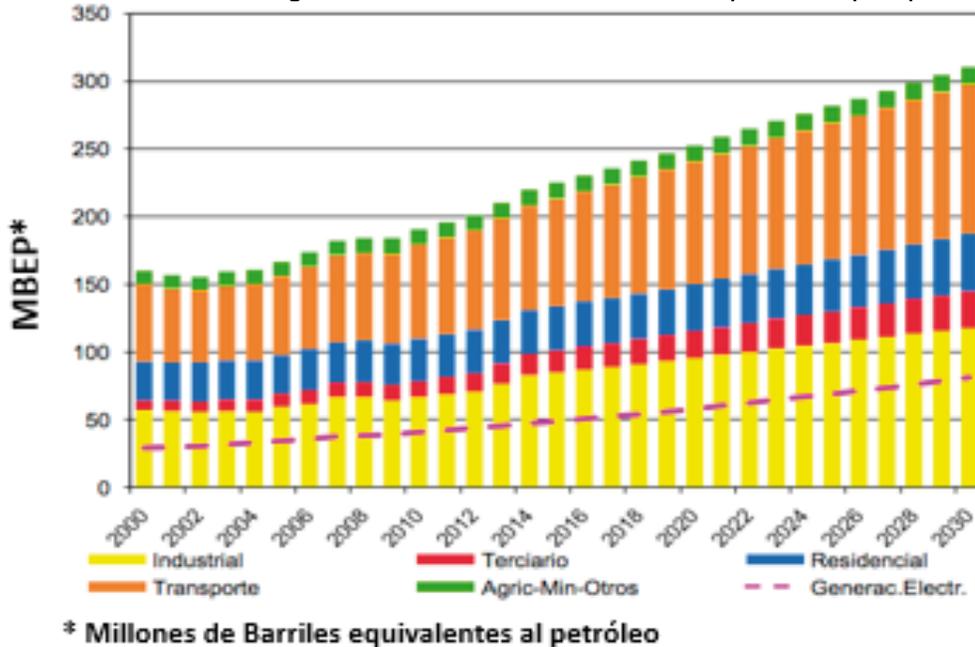
2.2 El Sistema Eléctrico colombiano

En Colombia el consumo de electricidad es de 974 kWh/per por ciudadano, (26) siendo mayor a los países africanos. Más de 500.000 transformadores de distribución conforman el sistema de distribución eléctrica de Colombia, que abarca más de 470.000 km de red

(27). La confiabilidad de los sistemas de distribución difiere significativamente entre los operadores de red en varias regiones y también depende del nivel de voltaje (28).

En Colombia, el crecimiento en la demanda energética, clasificando la demanda por sectores, se muestra a continuación (figura 3-2) en la cual se hace una proyección hasta el año 2030 (2).

Figura 3 -2 Demanda energética en Colombia en barriles de petróleo: prospectiva 2030



Fuente: Unidad de planeación minero energética UMPE (2015)

Por otro lado, se encuentran las ZNI (zonas no interconectadas) al servicio eléctrico. Los efectos de la canon de servicios eléctricos públicos, ZNI se refiere a ciudades, pueblos, villas y pueblos que no están conectados al Sistema Interconectado Nacional (SIN) (29), como se ilustra en la Figura 4 – 2 Zonas no interconectadas al servicio eléctrico en Colombia:



Fuente: Ley 1855 de 2013 por la cual se definen las ZNI de Colombia. (30)

Por lo general, este tipo de territorios están escasamente poblados y tienen bajas densidades de población. Alrededor del 52% del territorio del país está clasificado como ZNI (30). Se están desarrollando pequeños proyectos en áreas seleccionadas para satisfacer las necesidades energéticas de estas comunidades y reemplazar el uso de combustibles fósiles o leña. (31). No obstante, crear la infraestructura para satisfacer sus necesidades de energía y agua potable no es suficiente, especialmente en áreas remotas y de difícil acceso. (32).

Por lo tanto, Es necesario desarrollar soluciones para mejorar la calidad y confiabilidad del suministro eléctrico. Un nuevo desafío para el sector eléctrico en términos de continuidad y calidad del servicio es el reconocimiento de la integración de nuevos servicios y tecnologías como una oportunidad para mejorar la calidad y confiabilidad de los suministros eléctricos (28) (32).

La falta de una legislación que promueva la inversión para aumentar la confiabilidad es la causa principal de la falta de confiabilidad de los sistemas de distribución de electricidad en Colombia. Por lo tanto, la inversión en nuevas ampliaciones y reemplazos del sistema tiene como objetivo satisfacer las necesidades básicas, pero el objetivo principal

no es solo aumentar la confiabilidad del sistema (28), sino lograr una mayor cobertura y eficiencia con la prestación en el servicio.

En un futuro cercano, se han identificado dos opciones en Colombia para asegurar la operación en isla en los sistemas de distribución. Primero, a expensas de las pequeñas centrales hidroeléctricas existentes, es recomendable reconstruir o modernizar los sistemas de control para permitirles operar tanto en sistemas combinados como aislados (28). Una segunda opción para asegurar el trabajo en las islas es regular o incentivar a los propietarios de nuevas centrales eléctricas a instalar equipos de control y protección adecuados para operar en las islas. (28) (32).

Finalmente, para las ZNI, existe la posibilidad de promover, con políticas de servicios públicos del Estado, el uso de sistemas de energía solar fotovoltaicos que posibiliten a los pobladores de las zonas rurales lejanas, instalar y auto-consumir energía eléctrica económica, eficiente y amigable con el medio ambiente, como el sistema FV con capacidad de operación COI, propuesto en el presente estudio.

2.3 Marco legal

Un incentivo a la generación distribuida es la energía fotovoltaica. El marco regulatorio tradicional de la energía eléctrica en Colombia puede no dar cabida a este tipo de planes de prestación de servicios energéticos. Si bien la nación tiene un alto potencial para producir energía renovable a partir de fuentes como el sol y el viento, no se han implementado incentivos tipo tarifa de alimentación y no parecen ser relevantes en el discurso público (2).

Sin embargo, se vienen introduciendo proyectos de ley y normas nacionales que incentivan el uso de energía alternativa, tal es el caso del proyecto de ley 09 del senado: “Por medio de la cual se promueve e incentiva el uso de paneles solares y paneles fotovoltaicos”, con el propósito de incentivar la construcción de viviendas en las que se implementen paneles solares FV.

Por otra parte, con la Ley 1715 de mayo de 2014, (33) Colombia ha dado un paso importante para la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional, y que pretende fomentar la inversión, el desarrollo de tecnologías limpias, y la gestión eficiente de la energía (10). La referida ley hace de la venta de excedentes de energía por parte de cogeneradores y delegados en el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible un mandato para incorporar a la política ambiental los principios y criterios ambientales de la FNCE, cogeneración, producción propia, la generación distribuida y la eficiencia energética requiere que se promuevan los beneficios ambientales a nivel nacional (34).

Además, no se han establecido nuevos lineamientos para facilitar la participación de los cogeneradores en los mercados de energía o de valor agregado en el SIN en virtud de la Ley 1715 de 2014, pero los cogeneradores Los generadores pueden vender el exceso de electricidad a una serie de agentes antes de entrada en vigor de esa ley. de conformidad con las normas contenidas en la Ley 1215 de 2008 y demás normas de la Comisión Reguladora de Gas y Energía de la CREG (34).

La CREG es responsable de establecer los procedimientos para conectar, operar, mantener y comercializar la energía de estos generadores y con la GD en general. (34). De esta forma, la comisión ha reglamentado a través de la Resolución CREG 179 de 2015 la flexibilización de las conexiones de las plantas menores, cogeneradores y auto-generadores al Sistema Interconectado Nacional SIN, disminuyendo de este modo algunas barreras regulatorias que se habían identificado para la masificación de GD en Colombia (28). Por consiguiente, la Ordenanza Colombia toma en cuenta aspectos como la comercialización de energía proveniente de la GD y la autoproducción en pequeña escala - AGPE, requisitos técnicos para la conexión de estos recursos al sistema interconectado nacional - SIN e incentivos fiscales al momento de aplicarlos. (34).

Sin embargo, aún queda un largo camino por recorrer para incentivar a todos los usuarios del sistema eléctrico a participar en la producción de energía no convencional, ya que los incentivos no pueden motivar a los pequeños usuarios a invertir en fuentes de energía renovables, las centrales eléctricas y las regulaciones

aún no han establecido servicios que les permitan para ser conectado a granel sin afectar el normal funcionamiento del sistema de distribución. (34).

Sin embargo, La Ley establece que se debe buscar el uso de fuentes de energía solar en proyectos de urbanización residencial y comercial urbanos o comarcales, brindando incentivos fiscales a los usuarios finales que incorporen energía verde en sus proyectos (33). Sin embargo, el desarrollo de esta forma de energía en Colombia avanza (27). Aunque se han realizado cambios en la normatividad, aún persisten vacíos que no permiten a las empresas del sector de las energías renovables, realizar inversiones con seguridad jurídica e igualdad de condiciones frente a los productores tradicionales (27).

La generación de energía solar con sistemas fotovoltaicos siempre está orientada hacia las zonas rurales, donde el alto costo de la generación de electricidad se debe principalmente a los precios de los combustibles, y los costos de operación y mantenimiento en áreas remotas hacen que la producción de energía solar se vuelva más económica a largo plazo y más fiable (26). De esta forma, el Estado ha realizado programas de electrificación rural con un sistema de vivienda unifamiliar tradicional que consta de un panel o módulo solar de 50 a 70 Wp, un regulador de carga y una batería de 60 a 120 Ah. Estos pequeños sistemas alimentan la iluminación, la radio y la televisión y satisfacen las necesidades básicas de los agricultores.

En los últimos años, los programas de electrificación rural han instalado más sistemas con financiamiento gubernamental sustancial, utilizando fuentes como FAZNI (Fondo de Asistencia Financiera para la Electrificación de Áreas No Rurales). contiguas). IPSE (Instituto para el Desarrollo de Soluciones Energéticas) es actualmente el organismo líder de los esfuerzos del gobierno para llevar energía a las zonas rurales de Colombia. Según la organización, actualmente hay instalados más de 15.000 sistemas para estas aplicaciones. Así mismo, IPSE está desarrollando soluciones innovadoras como sistemas híbridos, como las plantas Diesel y la energía solar fotovoltaica combinadas en modo de espera para reducir los costos de combustible (26).

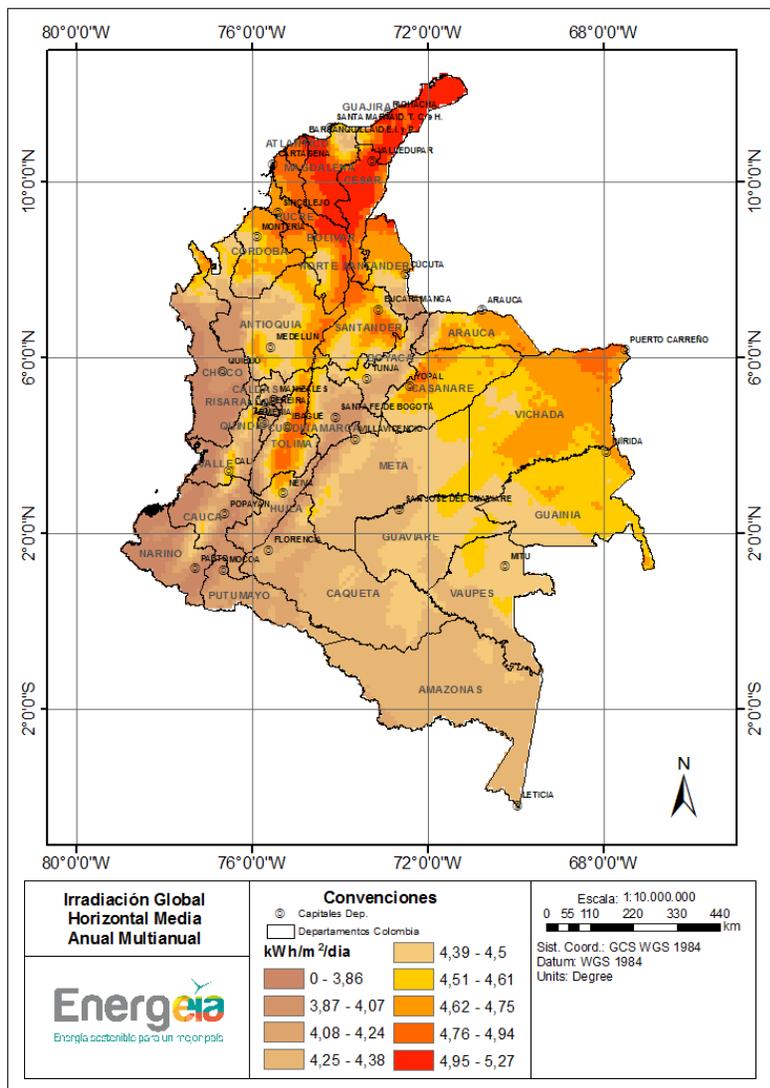
2.4 El potencial solar en Colombia

Debido a su ubicación geográfica en el centro de Ecuador y la exposición a la luz solar durante 12 horas al día, los 365 días del año, utilizando las tecnologías fotovoltaicas más básicas actualmente disponibles en el mercado, Colombia es considerada como una de las naciones con alta producción de energía fotovoltaica. capacidad en el mundo. Diferentes estudios sobre los sistemas FV en Colombia, (27) Sostienen que la irradiación de la nación es más alta que el promedio mundial, lo que favorece el potencial de la nación para la energía solar fotovoltaica. Hay una mayor concentración de esta radiación a lo largo de las costas del Atlántico y el Pacífico, en la Orinoquia y en la Región Central (35).

Con un promedio diario plurianual cercano a los 4,5 kWh/m², la nación tiene un buen potencial de energía solar en todo el país. Esto es más alto que el promedio mundial de 3,9 kWh/m² y los 3,0 kWh/m² de Alemania, lo cual es una buena señal, siendo el país que hace el mayor uso de la energía solar en el mundo (7). Esto significa que nuestro país es privilegiado para un adecuado aprovechamiento de esta energía (10).

La evaluación del potencial energético solar de Colombia por regiones se realiza utilizando información principalmente de las estaciones meteorológicas del IDEAM (Instituto de Investigaciones Ambientales), las cuales son procesadas para convertir la información meteorológica en información energética y se difunde a través del Instituto Geográfico Agustín Codazzi. como el mapa PV para Colombia, se puede ver a continuación en la Figura 5-2.

Figura 5 - 2 Mapa de energía solar FV en Colombia



Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2019).

El más reciente estudio que complementa la indagación sobre radiación solar, es el *Atlas de Radiación Solar de Colombia* (35) que demuestra el potencial por zonas de la energía solar en el país. La siguiente tabla (Tabla 1 - 2) contiene la fortaleza de la energía solar en el país Colombia por regiones.

Tabla 2 - 2 potencial de la energía solar en Colombia por regiones

Región del País	Radiación solar (kWh/m²/año)
Guajira	2000-2100
Costa Atlántica	1730-2000
Orinoquía-Amazonía	1550-1900
Región Andina	1550-1900
Costa pacífica	1450-1550

Fuente: Atlas de radiación solar de Colombia. Ministerio de Minas y Energía INEA-HIMAT

3. Capítulo 3 – Fundamentación Teórica

3.1 Modelos de generación eléctrica

Existen diferentes modelos de generación y distribución de la energía eléctrica. Para efectos del presente estudio, se describen de forma general, la generación centralizada, los Recursos Energéticos Distribuidos (REDs), la Generación Distribuida (GD), y los servicios complementarios existentes en la actualidad, en particular el servicio complementario con capacidad de operación en isla COI.

3.1.1 Generación centralizada

En este modelo, la electricidad se genera en plantas de gran tamaño ubicadas en el centro que normalmente utilizan energía hidroeléctrica, energía nuclear o combustibles fósiles. (36). Es la forma tradicional cómo funcionan los sistemas eléctricos, y se basa en un flujo de potencia unidireccional y con escaso control sobre la demanda. Se caracteriza por ser jerárquica, en la que las necesidades del consumo, se satisfacen por parte de unos pocos productores (36), y su objetivo es maximizar el rendimiento económico y logístico (36).

Es un sistema que, si bien ha tenido sus ventajas, más recientemente se reconoce sus limitaciones ya que el emplazamiento de las centrales hidroeléctricas depende de condiciones geográficas (fuentes hídricas) mientras que las centrales térmicas causan contaminación atmosférica, y en todos los casos se requieren medidas técnicas especiales para su seguridad, principalmente para las centrales termonucleares (37). Además, Las mayores instalaciones de generación se encuentran frecuentemente en las ciudades más pobladas, alejadas de los centros de consumo (38). Debido a este desequilibrio entre la oferta y la demanda, la electricidad debe viajar largas distancias

antes de ser utilizada, lo que reduce la eficiencia energética del sistema y requiere la instalación de una infraestructura de transporte sofisticada (36).

Por otro lado, las redes de transporte están saturadas, y esto, junto con la proliferación de pequeñas plantas cercanas a los centros de consumo (incluso dentro del mismo edificio), desplaza gradualmente la atención hacia una generación más distribuida. La producción y el consumo están más estrechamente sincronizados (36).

3.1.2 Recursos Energéticos Distribuidos (DERs)

Los *Recursos Energéticos Distribuidos* (DERs, por sus siglas en inglés) Son un grupo de fuentes de control de demanda, almacenamiento y generación distribuida (28) que están atrayendo mucha atención a nivel mundial. Por otro lado, a pesar de que se entiende cuán crucial es su presencia para la estabilidad a largo plazo del sistema eléctrico, la construcción de grandes centrales eléctricas está disminuyendo (38).

Los DERs generalmente se instalan teniendo en cuenta los parámetros operativos estándar de los sistemas de distribución eléctrica, a saber, flujos unidireccionales y generación centralizada. La transición de un sistema eléctrico pasivo a uno activo con requisitos específicos de planificación y operación está representada por los sistemas de distribución eléctrica, que introducen un nuevo paradigma de operación (39).

Los DERs están conectados a sistemas de distribución eléctrica a voltajes inferiores a 3 kV. En general, la infraestructura de los sistemas de distribución actuales es insuficiente para soportar una instalación significativa de DERs. El panorama de generación colombiana, según la UPME en 2017, muestra una tendencia a proyectos de capacidad menor a 10MW (2). Estos proyectos se conectarán a los niveles de tensión 1 y 2, que son sistemas típicamente radiales; y, adicional a estos proyectos hidroeléctricos, se presenta un gran potencial en proyectos de cogeneración en sistemas solares fotovoltaicos conectados al mismo nivel de tensión (3).

Uno de los principales problemas de dichos niveles de tensión corresponde a situaciones de generación atrapada (20) debido, entre otras cosas, al no acondicionamiento de la red que optimice el aprovechamiento energético. En este sentido, se hace necesario incluir nuevos desarrollos tecnológicos en telecomunicaciones y dispositivos electrónicos que garanticen una operación segura (28).

Los DERs deben desconectarse durante un procedimiento de falla o mantenimiento de acuerdo con las normas vigentes para el diseño, construcción y operación de sistemas de distribución eléctrica. Se utiliza una señal enviada desde el dispositivo de protección que detecta el fallo o dispositivos de protección locales para llevar a cabo dicha desconexión (28). En caso de falla o desconexión, el objetivo es evitar que una parte del sistema continúe suministrando energía. Las instrucciones de operación de los sistemas eléctricos sufren nuevos cambios como consecuencia de la instalación de DERs en la red de distribución. Como resultado, el operador del sistema de distribución debe evaluar los riesgos involucrados con la adición de DERs. El problema principal se establece en la literatura como la aparición de islas accidentales. (40).

Por su parte, el aumento considerable de instalación de DERs en redes de distribución ligado a un rápido avance tecnológico de los sistemas de telecomunicaciones, control, protección y monitoreo utilizado en los sistemas de distribución presenta un gran reto de análisis técnico, comercial y regulatorio (20) en la prospectiva de ahondar en servicios complementarios que se puedan suministrar como el sistema fotovoltaico mediante la operación de sistemas de distribución por islas.

En los últimos 20 años se ha considerado la posibilidad de que los DERs puedan suministrar servicios complementarios, a pesar de que estos servicios tradicionalmente se suministren por robustas centrales de generación (41), lo cual hace interesante formular otras propuestas como la generación distribuida (GD), para integrar sistemas de energías alternativas a pequeña y mediana escala (AGPE).

3.1.3 Generación distribuida (GD)

Esta es definida como “cualquier tecnología de generación a pequeña escala que proporciona electricidad en puntos más cercanos al consumidor que la generación centralizada y que se puede conectar directamente al consumidor o a la red de transporte o distribución” (31). Según La Agencia Internacional de la Energía (IEA) la generación distribuida, es “la que se conecta a la red de distribución en baja tensión y la asocia a tecnologías como los motores, mini y micro-turbinas, pilas de combustibles y energía solar FV” (9).

La generación in situ, integrada o descentralizada son otros términos para la generación distribuida (42). En comparación con la estructura piramidal del centralizado, es del tipo de malla. Esta red fomenta la producción de energía de bajo consumo cerca de donde se utilizará, reduciendo las pérdidas de electricidad en el transporte. Esto se traduce en ahorro de energía y, en consecuencia, eficiencia (10). Además, reduce los costos de infraestructura para la distribución y el transporte porque se necesitan menos infraestructuras y más cortas (43). Adicionalmente, se disminuyen las emisiones nocivas y las reservas requeridas de capacidad de generación instalada. También se reduce el impacto ambiental de las grandes infraestructuras eléctricas (28).

La GD, se ha sugerido como una solución potencial al problema del paradigma tecnológico debido a la disponibilidad de energía eléctrica a partir de la producción por pequeñas unidades descentralizadas cercanas a los lugares de consumo (44). En varias naciones alrededor del mundo, el esquema GD ha creado un mercado para pequeños sistemas de generación que usan energía renovable, eliminando la distinción entre producción y consumo y permitiendo que negocios, residencias y otras instituciones se conviertan tanto en productores como consumidores de energía. (24).

Si hay medidores inteligentes que rastrean el exceso de generación, la energía producida de esta manera puede enviarse al sistema interconectado convencional o consumirse directamente por el pequeño generador (45). El esquema de generación distribuida usando fuentes de energía limpia tiene también otra ventaja:

aunque los costos fijos de la inversión son relativamente elevados, el costo marginal de la generación y distribución de una adicional, es prácticamente cero (46).

Este sistema es mucho más ventajoso que el anterior en cuanto al uso de fuentes de energía renovables. Los tipos de instalaciones de generación de energía a pequeña escala que se utilizan como fuentes de energía distribuida suelen oscilar entre 3 kW y 10 000 kW (34). La tecnología disponible para proyectos de generación eléctrica distribuida incluye algunos tipos de energías convencionales (máquinas de combustión interna y externa, microturbinas, entre otras) así como energías renovables (fotovoltaica, aerogeneradores, minihidráulica, biomasa o geotérmica, entre otras) (28).

La producción para el autoconsumo, que fomenta el consumo de energía a través de la generación local, se presenta en GD como la principal vía de desarrollo de este cambio de modelo. El objetivo es maximizar la generación integrada, en la que el productor y el consumidor son uno y el mismo (47). Con este cambio de paradigma, los consumidores aún pueden estar conectados a la red y aún pueden ocurrir intercambios de energía, que pueden regularse de varias maneras. No significa, sin embargo, que solo deba utilizar la energía que produce o que deba realizar una actividad económica como productor (28). Dado que poder generar electricidad permite reducir la dependencia de las compañías eléctricas, entre otros beneficios, la ventaja para los consumidores con una mayor autonomía energética favorece una mayor seguridad de suministro (28).

Fenómeno eléctrico de Isla

Los dos tipos del fenómeno de la isla eléctrica son intencionales y no intencionales, provocados por eventos fortuitos, respectivamente. El fenómeno isla, que ocurre cuando un sistema formado por uno o más grupos y cargas de GD pierde la conexión a la red, pero sigue suministrando energía a esa zona de la red (microrred), es uno de los principales inconvenientes de la GD en este segundo escenario. Debido a que esa parte del sistema está eléctricamente aislada, la red eléctrica no puede controlarla de esta manera (48).

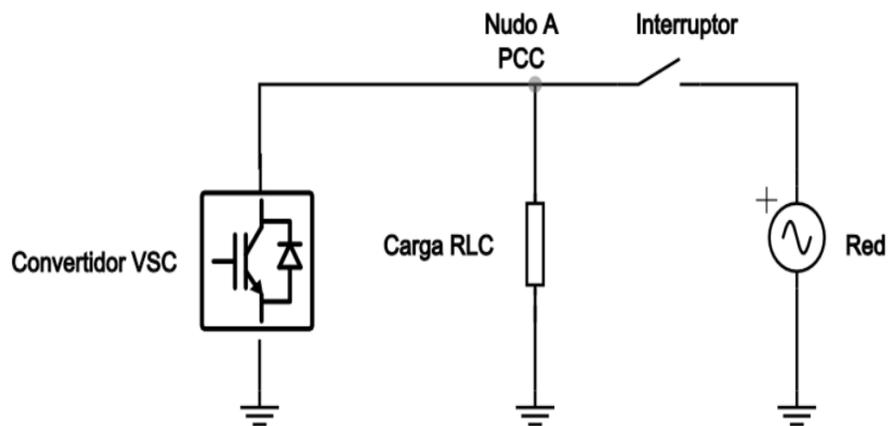
Considerando que en el sentido prospectivo se considera la GD, como un sistema de gran utilidad en el futuro, los inversores conectados a la red deben estar equipados con un sistema de protección de aislamiento para garantizar la seguridad (48). Cada sistema de generación de energía conectado a la red requiere procedimientos para prevenir y detectar el estrangulamiento causado por eventos aleatorios, por lo que es importante que un convertidor conectado a la red pueda cambiar su modo de operación en los sistemas de generación distribuida (48).

El fenómeno isla no intencional, puede ocurrir por diferentes motivos: (48)

- Apertura accidental debida al fallo en un equipo, cortando la conexión con la red.
- Falta en la red cercana al PCC dando apertura de desconexión.
- Actos vandálicos.
- Error humano.
- Suceso por fenómenos naturales.
- Cambios violentos en la red por parte de la demanda o la generación.
- Desconexión intencionada para servicios de mantenimiento (48).

Para realizar la intervención es necesario desconectar la generación y la carga de la red mediante un disyuntor. La siguiente figura (6-3) muestra un sistema compuesto por un convertidor que alimentará la red representada en el lado derecho del diagrama por una fuente de tensión (Grid). El Nodo A se denomina "*point of common coupling*" (PCC), este será el punto de conexión entre la red eléctrica y la carga (48).

Figura 6 - 3 Método de detección de isla para convertidores



Fuente: Martínez A: Estudio y simulación de métodos de detección de isla para convertidores (48)

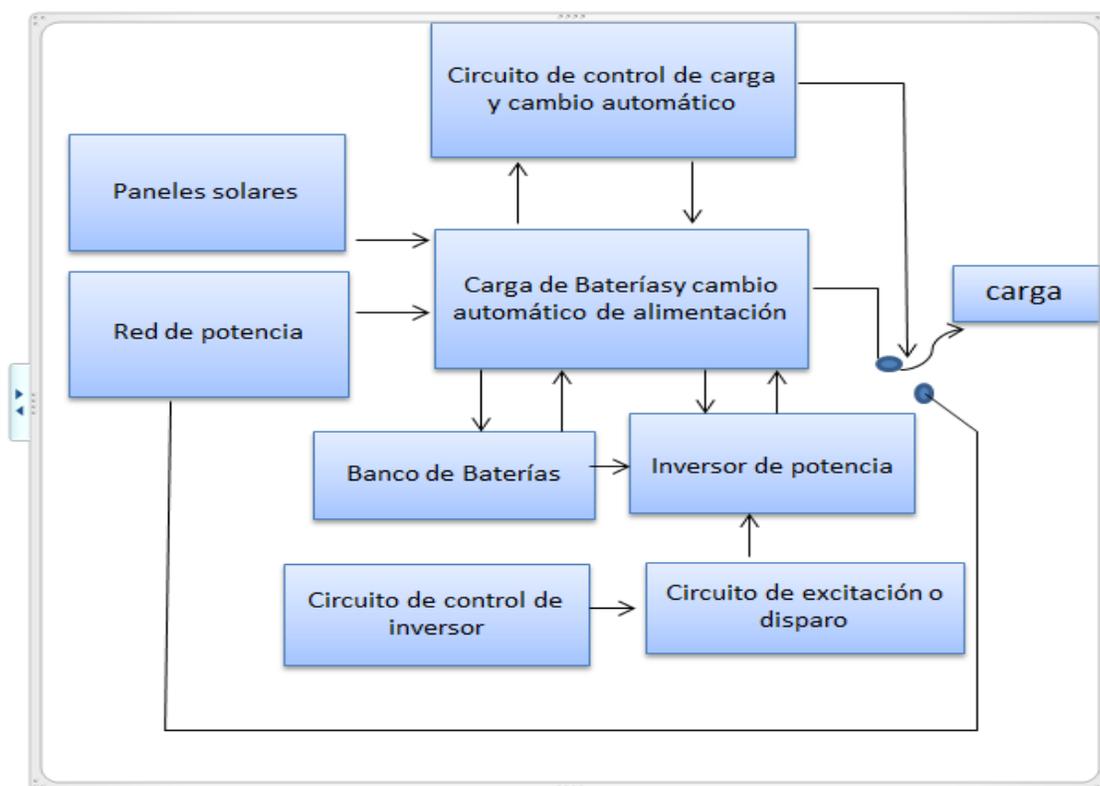
3.1.4 Sistemas híbridos para la generación de energía

Los sistemas híbridos se caracterizan por integrar dos o más fuentes de energía diferentes. Existen así distintos sistemas híbridos para la generación de energía eléctrica, utilizando fuentes de energía primaria y nuevas tecnologías como una alternativa económica viable para un suministro confiable de electricidad. Entre las fuentes utilizadas, se encuentran la energía solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica, mareomotriz y biomasa (49). También se pueden utilizar fuentes externas como una turbina eólica, un generador diesel o simplemente la red eléctrica (50). Generalmente esta configuración usa un inversor de potencia híbrido que integra la energía producida por los paneles solares, la energía almacenada en las baterías y la energía de otra fuente externa (50).

Entre las ventajas que ofrecen los sistemas híbridos, se pueden mencionar: que Mejoran el uso de fuentes de energía alternativas fácilmente disponibles, logrando un mayor equilibrio y estabilidad en el servicio, mejorando la calidad de la energía producida, manteniendo la producción estable de sus fuentes primarias y reduciendo la dependencia de la producción de cambios externos como las variaciones climáticas y la escasez de combustible (49).

Para el transporte de cargas, como ventiladores, equipos de refrigeración y dispositivos que deben funcionar en áreas con alta radiación solar, se prefieren los sistemas híbridos. Al hacer esto, se disminuye la carga alimentada por la red convencional, lo que ayuda a abordar el problema ambiental (49). A continuación, se muestra en la figura (7-3) la forma como funciona un sistema híbrido.

Figura 7 -3 Esquema funcional de un sistema híbrido alimentado mediante energía solar y la red convencional



Fuente: Elaboración propia

3.2 Servicios complementarios

Son servicios de soporte técnico que típicamente brindan los agentes generadores para mantener el sistema eléctrico dentro de rangos de operación seguros y con índices de confiabilidad adecuados. Los agentes generadores son sistemas técnicos que tienen

la capacidad de operar de manera independiente dentro de un sistema interconectado (28).

Entre estos servicios, se encuentra un servicio adicional con capacidad en isla (COI) presentado como soporte para ayudar a mejorar la confiabilidad. en los sistemas eléctricos de distribución y reducir los tiempos de restablecimiento durante un evento (fallas fortuitas o mantenimiento) (19). Además, se tiene una referencia de restauración tras un apagón, que permite el suministro continuo a los usuarios que se encuentran dentro de la isla prevista, permite acortar los tiempos de restauración (19).

La capacidad y control de voltaje de arranque autónomo, frecuencia primaria y control de frecuencia secundaria (AGC), entre otros, son los servicios complementarios más utilizados (28). Si bien las grandes plantas de generación históricamente han brindado servicios complementarios, los DERs han sido investigados como una fuente potencial de servicios complementarios durante los últimos 20 años (41).

3.3 Complementariedad operativa en Isla

Un modo de operación es uno de los componentes clave al determinar los beneficios o inconvenientes de implementar sistemas GD dentro de las redes eléctricas. La porción de un sistema eléctrico (distribución o transmisión) con DERs presentes que tiene la capacidad de operar independientemente del sistema interconectado se denomina capacidad operativa en islas. Se planifica y diseña una operación segura y confiable a corto o largo plazo de la formación de islas (28).

En las últimas décadas, numerosas instituciones de investigación y universidades han investigado la viabilidad técnica, comercial y regulatoria de la operación de los sistemas de distribución por islas (29). Dicho interés está respaldado por un aumento significativo en la instalación de DER en las redes de distribución y el rápido desarrollo de los sistemas de telecomunicaciones, control, protección y

monitoreo utilizados en los sistemas de distribución y a principios básicos enmarcados en el *Trilema¹ energético* (13).

Altera según la gravedad de la falla y el tiempo necesario para reparar los elementos fallados, pero en general, las islas intencionales creadas y planificadas para ofrecer el servicio COI complementario operan de manera continua en menos de tres horas. Se anticipa que la formación intencional de islas tomará menos tiempo que la duración promedio de falla, que es de 35 horas por año para los sistemas de distribución eléctrica en Colombia (28).

El modo isla incluye desconectar la unidad DG y la carga del sistema eléctrico, ya sea de manera temporal o permanente (51). Luego, la reconexión de la isla al sistema eléctrico requiere la sincronización y el cierre de los elementos de protección, lo que debe controlarse cuidadosamente, ya que es necesario garantizar que el subsistema se energice con el mismo voltaje y frecuencia que el sistema eléctrico principal (51).

La automatización y la creación de anillos abiertos, que en ocasiones permiten operar desde una fuente de energía diferente, han aumentado la flexibilidad de operación de los sistemas de distribución eléctrica (52). Reconocer y analizar los factores que conducen a las interrupciones del sistema de distribución eléctrica es necesario para mejorar la confiabilidad. Esto conducirá a la creación de acciones que permitirán reducir los eventos (19).

En estos casos, se utiliza el término "aislamiento intencional o planificado", que incluye la parada intencional del grupo electrógeno y sus cargas asociadas. Estas instalaciones eléctricas son microrredes y actualmente se están desarrollando para mejorar la continuidad de la energía y reducir los costos de operación del sistema eléctrico (51).

¹ Trilema energético: consiste en desarrollar políticas energéticas que garanticen una seguridad en el suministro, accesibilidad del servicio a la población y que sea ambientalmente sostenible.

Como un servicio de apoyo brindado por los generadores, se presenta el servicio complementario COI. También se considera una opción diferente para operar sistemas de distribución eléctrica con el potencial de aumentar la confiabilidad (20). Sin embargo, son necesarias inversiones en la automatización de la infraestructura eléctrica. Los referidos agentes generadores de apoyos reciben una compensación extra por ponerse a disposición para ofrecer el servicio de apoyo (19).

Por otra parte, el sistema COI, se puede implementar de forma aislada de la red para otras aplicaciones, en zonas donde no llega la red eléctrica. En tiempos recientes, la simbiosis de la generación fotovoltaica y la agricultura ha estado presente en la discusión académica y en aplicaciones prácticas en muchos países (47) (ver anexo 1) En efecto, la posibilidad de llevar fuentes de energía a lugares apartados para uso doméstico y la tecnificación de las actividades agrícolas se ha hecho cada vez más extensiva, con distintas aplicaciones e incluso con sistemas híbridos y nuevas tecnologías *agrovoltáicas*, en las que la tierra se utiliza con un doble propósito: instalaciones solares, agricultura y/o ganadería (27).

El potencial de los sistemas fotovoltaicos (FV) se ha demostrado en proyectos de electrificación rural en todo el mundo, especialmente con sistemas solares domésticos (SSD) (53). En los países en vías de desarrollo, la importancia económica de los sistemas fotovoltaicos está aumentando debido a los precios más bajos, por lo que son significativos los proyectos interesantes relacionados con su uso en áreas como los servicios urbanos y sociales, la agricultura y otro tipo de actividades industriales. volver a publicar impacto en el desarrollo rural (53).

De esta forma los sistemas FV contribuyen al desarrollo rural sostenible (DRS), indispensablemente a las actividades que generan ingresos y que pueden implementarse en forma integral. “Los sistemas solares FV, por la flexibilidad de su aplicación, representan una oportunidad única para que el sector de la energía proporcione “paquetes” de servicios a las zonas rurales apartadas, por ejemplo, para los servicios de salud, educación, comunicaciones y luz eléctrica, así como para la agricultura y el suministro de agua” (53).

4. Capítulo 4- Energía Solar Fotovoltaica (FV)

Como sugiere su nombre, los sistemas solares utilizan la energía que emite el sol. Es una fuente de energía la cual tiene muchos beneficios, pero también presenta una serie de desafíos cuando se usa. Entre sus beneficios destacan su carácter inagotable, renovable y su uso libre de contaminación (3). Pero al usarlo, es importante tener en cuenta su baja densidad de potencia, su naturaleza intermitente y su variabilidad incontrolable. Debido a estos desafíos, debe transformarse en una fuente de energía diferente para poder almacenarla y utilizarla en el futuro (3).

Los paneles, absorben la radiación solar y la transforman en energía eléctrica para el uso doméstico o industrial y estos son llamados celdas fotovoltaicas (PV-Photovoltaic) (11). Se trata de semiconductores que pueden generar un potencial eléctrico cuando son ionizados por radiación (54). De esa forma, una celda solar puede convertir energía de radiación solar directamente a electricidad, pero para almacenar la energía se hace uso de baterías de carga (10). El sistema cuenta con un monitor para conocer el nivel de carga de las baterías, para su uso y para efectos de reparación y mantenimiento.

Es necesario, además, tener una referencia para determinar el punto en el que se debe cambiar a un estado de batería cargada o el punto en el que la energía se puede exportar a otros sistemas para su uso, además de los sistemas convertidores de CC/CA, para que los electrodomésticos comunes puedan usarla o convertidores que sólo funcionan con corriente continua (DC/DC)(10).

Los sistemas fotovoltaicos (PV) se pueden utilizar en una amplia gama de aplicaciones y generan energía limpia y confiable sin quemar combustibles fósiles (55), como los servicios domésticos, servicios agropecuarios, para el sector de los servicios comerciales y la industria rural, y para servicios comunales y sociales del sector rural. Con un

promedio de 6 a 9 horas de luz solar por día en Colombia, la conversión y generación de energía eléctrica a través de estos sistemas depende de la duración de la radiación solar en un día (2).

4.1.1 Sistema solar FV (componentes)

Entre los componentes del sistema fotovoltaico están: el generador fotovoltaico (paneles solares), un generador auxiliar Inversor, controlador de carga, tablero de control y protección, así como baterías diseñadas específicamente para sistemas fotovoltaicos (16). El diseño del sistema incluye los siguientes elementos necesarios, descritos en la figura 8-4:

- **Un generador fotovoltaico.** Constituido por paneles solares que producen tensión continua y corriente constante (56).
- **Un generador auxiliar,** que complementa al anterior en los momentos de insuficiente radiación. Con mucha frecuencia está constituido por un grupo termoeléctrico alimentado por Diesel o gasolina (56).
- **Panel eléctrico o caja de interruptores,** que recibe la corriente alterna que se envía desde el inversor, para accionar las luces y aparatos con energía solar (54).
- **Medidor de utilidad:** El contador de servicios mide el consumo de energía. En realidad, va hacia atrás cuando el sistema genera más energía de la que necesita inmediatamente. Este exceso de energía solar compensa la energía que se utiliza por la noche. Esto se denomina “*net metering*” o medición neta (54).
- **Un acumulador de energía** que adapta los diferentes ritmos de producción y demanda, almacenando energía en los momentos en que la producción es superior a la demanda, y entregándola en el caso contrario. En la mayoría de los sistemas está constituido por un acumulador electroquímico, o batería de plomo ácido. Con menor frecuencia se utilizan baterías de níquel-cadmio. Para este

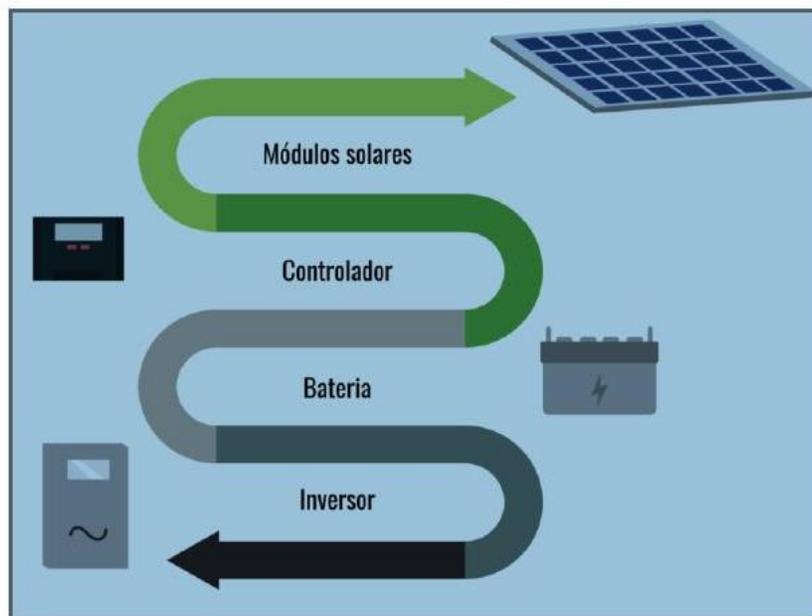
caso, por tratarse de un servicio complementario en Isla, se deberá utilizar un promedio de 6 baterías (56).

- **Una carga** que utiliza la energía eléctrica producida por los generadores y que puede adoptar muchas formas: equipos DC (iluminación, televisión, enlaces de telecomunicación, etc.), equipos AC (motores eléctricos, iluminación, etc.) e incluso la propia red de suministro y distribución de electricidad convencional en alterna (56)

- **Conjunto de dispositivos que realizan tareas de protección y control** a la vez que sirven de interfaz para todos los anteriormente mencionados. Los reguladores de carga de batería y los convertidores o inversores CC-CA se agrupan, en general, bajo el título de "acondicionamiento de potencia", y pueden ser los más utilizados. El sistema utiliza un convertidor (CC/CA tipo VSC) como fuente de tensión. El sistema eléctrico actual depende en gran medida de los inversores. Adaptan el voltaje de salida de los paneles al voltaje de la microrred en una variedad de aplicaciones, incluida la generación eólica y fotovoltaica. También se recomienda porque funciona como una fuente de energía ininterrumpida, produciendo voltaje sinusoidal de las baterías en caso de un corte de energía (19).

- Por calidad y cantidad, existen inversores para aplicaciones domésticas y para sistemas aislados que solo se utilizan para convertir corriente continua en corriente alterna para el uso de electrodomésticos u otros aparatos eléctricos. Los dispositivos que necesitan 120 voltios pueden funcionar con celdas fotovoltaicas, que entregan de 12 a 14 voltios de corriente continua. El regulador de carga, por otro lado, gestiona la corriente que va a la batería y otros aparatos eléctricos. Cuando la batería está completamente cargada, el regulador detiene el flujo de corriente directa hacia ella, y cuando la batería está descargada, la energía transmitida que se habría utilizado para cargarla se detiene. (57).

Figura 8 - 4 Componentes básicos de un sistema solar FV

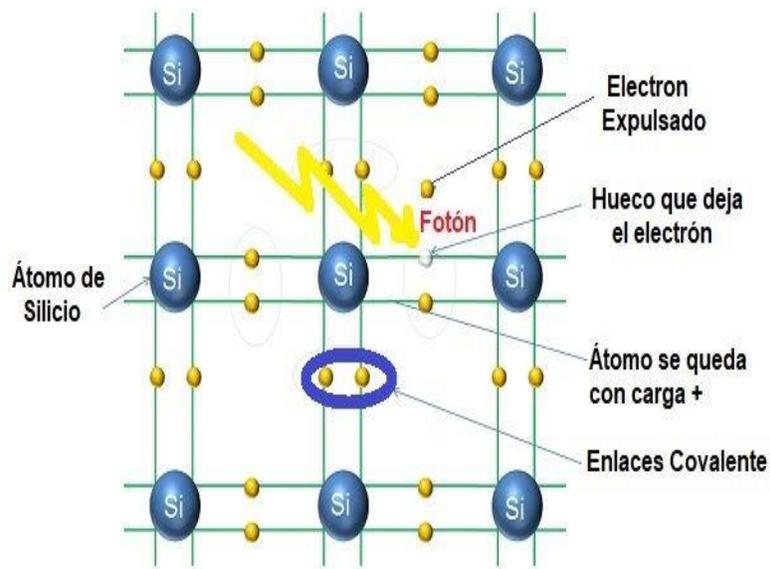


Fuente: Sunsupply, 2017 recuperado de: info@sunsupplyco.com (50)

4.1.2 Captación de la energía: paneles solares FV

El hecho de que un sistema esté aislado o conectado a una red determinará en gran medida cuál de los muchos sistemas diferentes de recolección de energía fotovoltaica se utilizará. En general, se basan en la tecnología de los paneles solares, que están compuestos por módulos fotovoltaicos individuales y capturan la energía solar antes de convertirla en electricidad. Están contruidos con celdas solares, que a su vez están compuestas de celdas solares separadas hechas de silicio (tanto cristalino como amorfo), carbono, oro y otros materiales semiconductores. Debido a su costo-beneficio, el silicio suele ser el material más utilizado. Su función principal es absorber fotones, luego de lo cual entran en contacto con los átomos de silicio y liberan electrones que viajan a través de semiconductores. (16) y de esta forma, se transforma la luz (fotones) en energía eléctrica (electrones), como se ilustra en la figura 9-4

Figura 9- 4 Proceso de conversión de la luz solar en energía FV

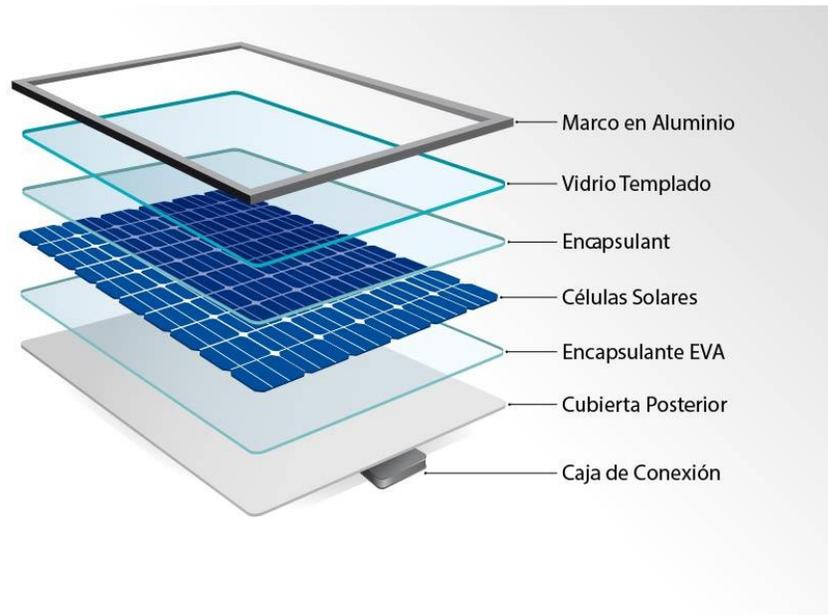


Fuente: Área tecnológica <https://www.areatecnologia.com/electricidad/paneles-solares.html>

En los paneles solares cuando hay luz solar, una célula solar se comporta casi como una batería. La luz solar recibida sufre el efecto fotoeléctrico que separa los electrones de modo que forman una capa de carga positiva y una de carga negativa en la célula solar; (36). El flujo de electrones es una corriente que circula mediante hilos conductores, interconectados mediante contactores de metal en la parte superior e inferior de la celda fotovoltaica, para así, extraer la corriente de uso externo junto con el voltaje de la celda, el cual define la potencia del panel (58) esta diferencia de potencia genera una corriente eléctrica continua (DC) que puede ser almacenada en una batería, y/o trasladada a un circuito electrónico conversor (inversor) que transforma la corriente continua en corriente alterna, (AC) de 120V o 240V (11).

Los componentes de un panel solar, son el marco de aluminio, vidrio templado, una lámina encapsulante, células solares, y una cubierta posterior, como se ilustra en la figura 10-4

Figura 10 - 4 Componentes de un panel solar



Fuente: Celsia. <https://www.celsia.com/es/blog-celsia/paneles-solares-como-funcionan-y-que-son/>

De acuerdo al tipo de célula que los componen, se puede establecer una diferencia que condiciona la conductividad eléctrica de los mismos. Los paneles fotovoltaicos, en función del tipo de célula se clasifican en:

- **Monocristalinos**, hechos de secciones de un único cristal de silicio (Si) en forma circular recortada u octogonal.
- **Policristalinos**: Las células FV están formadas por pequeñas partículas cristalizadas.
- **Amorfos**: Cuando el silicio aún no se ha cristalizado.

Figura 11 - 4 Clases de paneles solares, de acuerdo a su constitución



Fuente: Celsia. <https://www.celsia.com/es/blog-celsia/paneles-solares-como-funcionan-y-que-son/>

Los dos sistemas fotovoltaicos más utilizados son el monocristalino y el policristalino (55). La efectividad de los paneles radica en su peso, grosor y costo. El rendimiento de las placas monocristalinas puede alcanzar el 22% mientras que el de las policristalinas no supera el 10% (59). En general, la diferencia entre las dos clases de paneles radica en el comportamiento de las variables de voltaje, corriente eléctrica y potencia (55). De acuerdo con diferentes estudios, (55) (60) que miden estas variables, mediante un medidor digital versátil, el módulo monocristalino, produce un voltaje máximo pico de 18,86 V y el policristalino de 17,49 V, y valores corrientes de 6.8 A y 8.56 A del panel monocristalino y 5.31 A a 8.73 A del panel policristalino. Sin embargo, estas medidas dependen de las condiciones climáticas (radiación solar, temperatura y humedad) del lugar de instalación (60).

Las empresas productoras de paneles solares, realizan pruebas estándar con el fin de medir su potencia nominal, de acuerdo a las condiciones de temperatura (promedio de 25 ° C), radiación solar promedio en un día de verano (1000 Watts/m²). Por ejemplo, si se toma un panel de 1 metro cuadrado, se somete a prueba y su producción fue de 200 watts, sabemos que la eficiencia del panel es de 20% y su potencia nominal es de 200 watts hora/m² (59).

De igual modo, para medir la eficiencia de los paneles, se tienen en cuenta factores externos que pueden reducir la potencia generada por el módulo: temperatura ambiental, temperatura de la celda, temperatura normal de operación y radiación solar (59). Igualmente, se considera el efecto de las sombras, ya que el modelo de la celda FV que incluye una resistencia en serie y otra en paralelo, al tener que pasar la corriente a través de ambas resistencias, no solamente puede haber una caída en la corriente producida, sino que hay un voltaje que le resta al generado por el resto de las celdas (59).

Desde los años 1970 se han realizado investigaciones sobre la tecnología de concentración fotovoltaica de manera que ha mejorado su eficiencia hasta conseguir superar a la energía FV tradicional (58). En la actualidad, se realizan investigaciones en Europa y los Estados Unidos, para la producción a escala comercial de paneles con mayor productividad que los convencionales. Se trata de módulos que utilizan una menor concentración de silicio y convierten la luz solar en energía eléctrica con muy alta eficiencia y pueden ser conectados a redes con 3 MW de potencia (58).

Por otra parte, la dificultad que se presenta para captar la energía solar con estructuras fijas, se están desarrollando tecnologías para la orientación de los paneles solares de acuerdo a la posición del sol, que permitan aprovechar óptimamente su energía durante todo el día (21). Hoy en día, existen herramientas que permiten hacer estos procesos de forma automática para la orientación paralela del panel continuamente al sol, como es el caso de los orientadores solares, diseñados para adquirir energía del sol de acuerdo a su movimiento diario con un movimiento de este a oeste de manera circular (21). También se están diseñando y comercializando paneles bifaciales, cuya ubicación permite captar la luz solar desde dos ángulos diferentes (61).

En cuanto al costo de los paneles fotovoltaicos, ha disminuido constantemente desde que se produjeron las primeras células fotovoltaicas comerciales y el precio se ha vuelto cada vez más competitivo en comparación con las fuentes de energía tradicionales (7).

Revisión y mantenimiento

Los sistemas de energía solar FV, requiere de inspección visual de los componentes, conexiones, voltaje de las baterías, panel de control, en lo posible, cada tres meses. Con respecto a las placas solares, se recomienda limpiarlo con agua y jabón, sin químicos, que puedan deteriorar las uniones de las células FV. Si bien los paneles vienen diseñados para soportar cualquier clima, ambiente y temperaturas extremas, se debe evitar en lo posible, que sufran golpes, reciban objetos pesados, o maltrato que puedan ocasionar alguna fisura (16).

4.1.3 La cadena de suministros de la tecnología FV

Es importante analizar la cadena de suministro de sistemas FV en el país, particularmente en zonas no interconectadas, entendiendo por cadena de suministro todas las partes involucradas de forma directa o indirecta en la satisfacción de la demanda de los clientes (12). Incluye por tanto proveedores, transportadores, almacenistas, vendedores y los mismos clientes (26).

Para encontrar un cambio hacia el desarrollo humano sostenible, las cadenas de suministro generalmente buscan indicadores que respalden su progreso y el impacto que los cambios tienen en sus procesos. Esto se debe a que la ciencia de la sostenibilidad explora las relaciones e interacciones entre la actividad humana y los ecosistemas que sustentan la vida. Adicionalmente, la cadena se distingue por el flujo continuo de información que permite la comunicación entre todos los actores que la componen (12)

Para encontrar un cambio hacia el desarrollo humano sostenible, las cadenas de suministro generalmente buscan indicadores que respalden su progreso y el impacto que los cambios tienen en sus procesos (12). Esto se debe a que la ciencia de la sostenibilidad explora las relaciones e interacciones entre la actividad humana y los ecosistemas que sustentan la vida. Adicionalmente, la cadena se distingue por el

flujo continuo de información que permite la comunicación entre todos los actores que la componen (12).

Para evitar dañar los componentes, se debe tener especial cuidado al transportar el sistema de generación de energía al sitio de instalación. Comenzamos a instalar el sistema solar fotovoltaico una vez que todas las herramientas y componentes necesarios están en el sitio. El mantenimiento necesario debe realizarse como paso final, de acuerdo con el plan de mantenimiento creado antes de la puesta en marcha. Debido a las necesidades únicas de manejo de los sistemas fotovoltaicos, la articulación requiere un esquema logístico riguroso (12).

Dado que la energía solar fotovoltaica se genera a partir de un recurso renovable, los procedimientos utilizados para su instalación, captación, mantenimiento y transporte deben ser lo menos contaminantes posible para que este sistema produzca beneficios desde el diseño de su cadena de suministro y el uso de enfoques de logística sostenible, así como la gestión interna para su uso adecuado (12). Actualmente no existe conexión entre las etapas de los procesos logísticos para la energía solar; en cambio, solo existen conexiones esporádicas que limitan su desarrollo (12). Es fundamental tomar en cuenta la estrategia de orientación a la cadena de suministro como primer paso para madurar un modelo que permita impulsar todas las etapas de la cadena de suministro de este tipo de sistemas en Colombia (12).

Existen desafíos en varias áreas que limitan el crecimiento de este tipo de sistema en Colombia con respecto a la cadena de suministro solar fotovoltaica:

- La mayoría de los componentes no se fabrican en el país, el gran problema se encuentra en distribuir el producto hasta las diferentes zonas, por las condiciones, las limitaciones de velocidad y capacidad de la red vial principalmente. De igual manera la falta de otros medios de transporte que podrían agilizar el traslado como las vías férreas (12).

- Los proyectos de energía de este tipo en el país se están enfocando en zonas con problemas de conexión a la red eléctrica nacional ZNI (12).

Varias etapas integradas en la cadena de suministro del sistema fotovoltaico están comenzando a desarrollarse actualmente en la nación, incluida la planificación, la gestión y la ejecución. Estas etapas se basan en los procedimientos de gestión de la cadena de suministro, como la oferta, la demanda, la producción, la entrega y la logística inversa (12). Además del apoyo del Estado en el desarrollo y creación de políticas gubernamentales para la expansión y crecimiento de este tipo de generación de energía en Colombia, se trata de establecer una sincronización en todos sus ámbitos y procesos (12).

Orientación y gerencia de la cadena de suministro OGSC

Se recomienda a las empresas encargadas de abastecer el mercado de los sistemas solares FV, adoptar el concepto de gerencia en la cadena de abastecimiento, visto como un solo sistema y estrategia de cara a la competitividad y eficiencia en el mercado, a través de una eficaz coordinación y gestión de los flujos de la cadena de suministro (12).

La perspectiva estratégica de OGCS alienta a las personas dentro de una organización a actuar de manera que gestionen los flujos de proveedor a cliente y lucha por la integración, una fuerte capacidad operativa y estratégica. La segunda perspectiva estructural del OGCS, por otro lado, se enfoca en los artefactos organizacionales que respaldan la gestión de la cadena de suministro. Al incorporarlos a su rutina diaria, por ejemplo, puede desarrollar y mantener comportamientos internos que respalden las relaciones (12).

4.1.4 Ventajas económicas de los sistemas solares FV.

Respecto al mercado, Para garantizar un suministro de energía confiable a largo plazo, Colombia ha establecido un marco regulatorio. Este plan asegura que los recursos de generación puedan satisfacer la demanda de energía durante una escasez a

precios razonables y al mismo tiempo asegura la tasa interna de retorno (TIR) de los inversionistas.

Por otra parte, La separación de las industrias de transmisión y generación es una característica clave de la liberalización del mercado de la electricidad (19). Como consecuencia de la mencionada liberalización, es necesario reconocer los servicios de apoyo al sistema, también conocidos como servicios complementarios, que ayudan a mantener el sistema eléctrico operativo dentro de límites seguros y con índices de confiabilidad adecuados. (46).

Además de prestarse como requisitos técnicos necesarios para la conexión al sistema eléctrico, los servicios complementarios también podrán ser compensados mediante tarifas reguladas, directamente contratadas o distribuidas a través de mecanismos de mercado (31). Asimismo, se destaca que el uso de mecanismos de mercado para la asignación de servicios complementarios asegura su provisión competitiva a mínimo costo, con la salvedad de que no todos los servicios complementarios tienen condiciones técnicas para competir en igualdad de condiciones (19).

El pago por servicios auxiliares que utilizan la capacidad de generación brinda una compensación adicional que ayuda a recuperar los costos fijos de generación, lo que mejora la confiabilidad del sistema tanto inmediatamente con la prestación del servicio como a largo plazo al ayudar a mantener un margen de reserva de generación requerido (19).

El servicio COI complementario se paga mediante una tarifa no lineal que permite al inversor recuperar todos los gastos relacionados con su implementación. La tarifa bipartita se compone de un valor fijo, donde se tiene en cuenta el costo asociado a la disponibilidad del servicio en el caso de una restauración u operación por islas, y un componente variable, donde se tienen en cuenta los costos por operación, es decir, donde se asignan valores a los parámetros en función del tipo de tecnología y la ubicación de la instalación, lo que genera la necesidad de estimar los beneficios potenciales de la prestación (19).

De esta forma, la rentabilidad para un inversionista que implemente el servicio COI complementario es superior a la rentabilidad actual, aumentando la competitividad de las fuentes de generación de pequeña escala. Como resultado de la instalación de fuentes de pequeña escala y el potencial de optimización de pérdidas, las pérdidas del sistema de distribución también se reducen o controlan, aumentando el beneficio general para la sociedad. (19).

La realidad es que la infraestructura energética del país se ha expandido a la par que la industria energética, que ha crecido exponencialmente junto con la demanda. Según el Banco Mundial, la demanda mundial de electricidad se duplicará para 2030, alcanzando los 2.500 TWh. Para acomodar este crecimiento, la región necesitaría instalar 239 GW adicionales de capacidad, que estarían cerca de los 330 GW, que son números astronómicos desde el punto de vista económico. (43). Debido a esto, el gobierno modificó las leyes tributarias y tarifarias a través de la Ley 1715, permitiendo la entrada de importantes inversionistas y creando oportunidades en el mercado eléctrico colombiano. (62).

Además, el gobierno expidió la Resolución 40715, (2019) que reglamenta la obligatoriedad a la demanda de comprar un 10% de energía limpia y la Ley 1955 (2019), por el cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo (2018-2022) estableció en el artículo 296 que “los agentes comercializadores estarán obligados a que entre un 8 y 10 por ciento de sus compras de energía provengan de fuentes no convencionales de energía renovable, a través de contratos de largo plazo asignados en determinados mecanismos de mercado que establezca la resolución” (63).

El uso de las energías alternativas como la solar, tiene beneficios económicos necesarios de resaltar. En primer lugar, permiten una reducción de la dependencia de los recursos energéticos no renovables, y la dependencia de fuentes extranjeras para el abastecimiento local. Además, la conservación de energía protege la economía y los consumidores de posibles fluctuaciones en el precio y la interrupción en el servicio por accidentes naturales o técnicos (3). Por otra parte, el uso eficiente de energía por parte de la población y el Estado contribuye a fortalecer las economías locales, la economía doméstica y de los locales comerciales o comunitarios de modo que la disminución de los

costos de las tecnologías, como es el caso de los paneles solares, crean oportunidades para actores que no se encontraban en el mercado comercial (47).

.
De acuerdo con lo anterior, el país le debe apostar a un proceso de diversificación de la matriz energética y a la transición hacia el uso de energías renovables, especialmente los sistemas solares FV, para pasar de una economía dependiente del petróleo y la energía hidroeléctrica, hacia una economía basada en fuentes sostenibles más eficientes que soporten el crecimiento de la demanda energética de los próximos años (3).

5. Capítulo 5 – Sistema inyectado a Red

El sistema conectado a la red eléctrica (*on-grid*) o interactivo, constituye uno de los sistemas más usados en el mundo, sobre todo como servicios públicos de soporte ante eventos o con el fin de potenciar aún más la red convencional de suministro de energía (39) (10). Este sistema puede conectarse a una red eléctrica, bien sea mediante un banco de baterías pequeño para casos de emergencia, pero también puede implementarse sin el uso de baterías, en cuyo caso, la energía generada por los paneles se usa en forma directa, y la energía restante se conecta directo al transformador para ser enviada a la red (10).

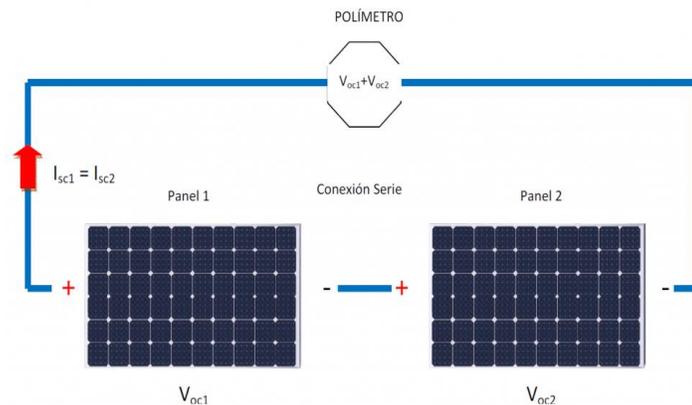
Conexión de los paneles

Los paneles solares pueden instalarse en serie, en paralelo, o la combinación de ambas, dependiendo de la magnitud de la instalación fotovoltaica, de la tensión de trabajo de las baterías (en caso de autoconsumo aislado), y de la tensión de salida al inversor (en caso de grandes instalaciones) (54).

Conexión en serie

Para la conexión en serie, se conectan el polo positivo con el polo negativo de otro(s) panel(es), y de esta forma las tensiones se suman y la intensidad resultante es la de uno de los paneles (deben ser de las mismas características) (54) como muestra la figura 12-5. Este tipo de conexión se realiza en paneles solares con potencias entre los 200W y los 260W, compuestos por 60 células y para uso en instalaciones solares de 24V o 48V. A diferencia de la conexión en paralelo, se mantiene la intensidad y se suma el voltaje.

Figura 12 - 5 Conexión en serie de dos paneles solares

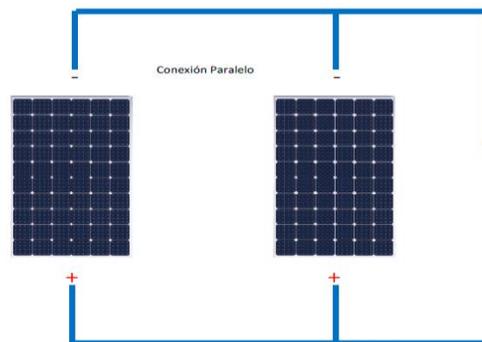


Fuente: Area tecnológica <https://www.areatecnologia.com/electricidad/paneles-solares.html>

Conexión en paralelo

En este caso, se conectan por un lado todos los polos positivos de los paneles de la instalación solar, y por el otro, se conectan todos los polos negativos como muestra la figura 13-5. De esta forma, se mantiene el voltaje o tensión de las placas solares mientras que se suma la intensidad (amperios).

Figura 13 - 5 Conexión de paneles solares en paralelo



Fuente: Area tecnológica <https://www.areatecnologia.com/electricidad/paneles-solares.html>

Conexión mixta

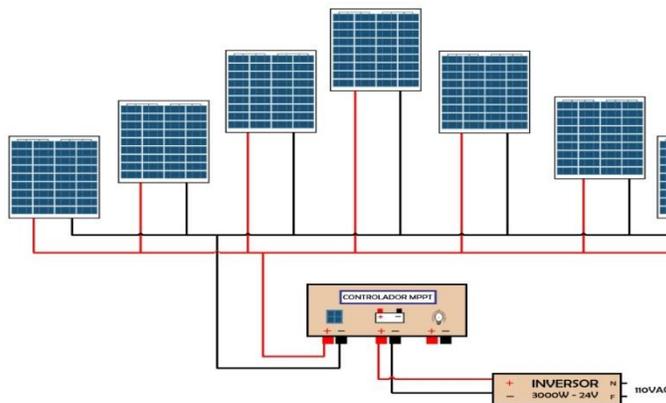
La conexión mixta en serie y paralelo, se recomienda para instalaciones solares en las que se conecten 5 o más módulos FV de 60 células y potencia superior a 200W, lo que permite obtener un voltaje no demasiado alto y a su vez, multiplicar el amperaje total de la instalación. De esta forma, se aumenta tanto el voltaje como la intensidad, la cual puede adaptarse mediante un regulador a las características de las baterías.

5.1 Sistema inyectado a red, con complementariedad en isla COI.

Para la operación en isla intencional se requiere previamente la realización de diferentes estudios de la red conforme a los escenarios de demanda y condiciones operativas. Los estudios deben considerar también condiciones de falla, perfiles de tensión y funcionamiento de protecciones, entre otros, tal como se establece en la norma IEEE Std 1247.4 (23), que trata el proceso de conexión y desconexión de islas dentro de una red principal (51).

Este tipo de sistemas utilizan un convertidor y un inversor, para convertir la energía DC en AC, como ilustra la figura 14-5.

Figura 14 - 5 Sistema inyectado a red, con un controlador e inversor para convertir la energía a 110 V.AC



Fuente: elaboración propia

La implementación de RED junto con los sistemas de comunicación y control permite la activación de la red de distribución, allanando el camino para las capacidades operativas en la isla, aunque quizás con algunos cambios en la red que permitan la división por capacidad de las fábricas para asegurar el suministro de mercancías (51).

Entre las características y ventajas del sistema COI, se pueden mencionar (28):

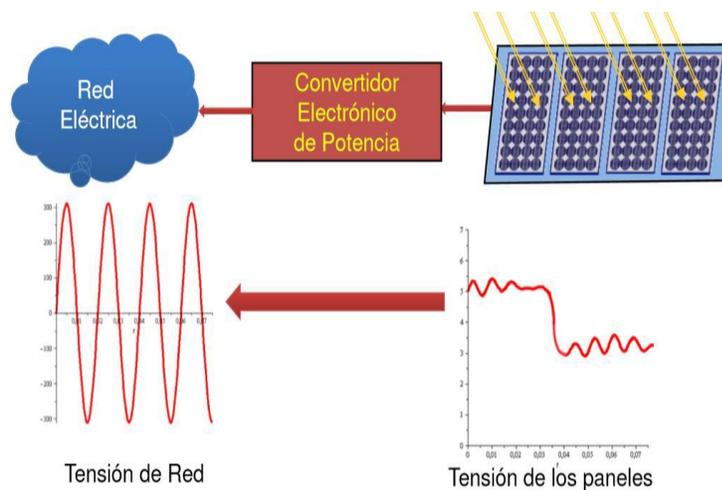
- Cuentan con recursos energéticos distribuidos, incluyendo necesariamente fuentes de energía distribuida.
- Tienen la capacidad de operar sin conexión a la red de suministro y en simultáneo con ella.
- Abarcan porciones de la red eléctrica local y pueden hacer parte del sistema de potencia nacional.
- Son planeadas de forma completamente intencional (28).

Luego, la operación de una isla intencional es similar a la de un sistema eléctrico de potencia interconectado tradicional, a pequeña escala y con sistemas de comunicaciones

avanzadas (45). Esto significa que, en general, las dificultades operativas que se pueden presentar son las mismas de los sistemas interconectados (28).

Cabe señalar aquí que el control de frecuencia confiable es fundamental para la operación en isla planificada, ya que los sistemas conectados no tienen mucha inercia debido a la gran cantidad de generadores que tienen. En la inversión de propósito, la estabilidad de la frecuencia depende del controlador del grupo electrógeno (64). La figura 15-5 describe el esquema básico de conexión a red de un sistema solar fotovoltaico.

Figura 15-5 Esquema básico de conexión a red de un sistema fotovoltaico



Fuente: Área tecnológica <https://www.areatecnologia.com/electricidad/paneles-solares.html>

La figura muestra que es necesario ajustar la tensión de salida de la planta fotovoltaica para conectarla a la red. Esto es posible gracias a la electrónica de potencia con convertidores de potencia (48).

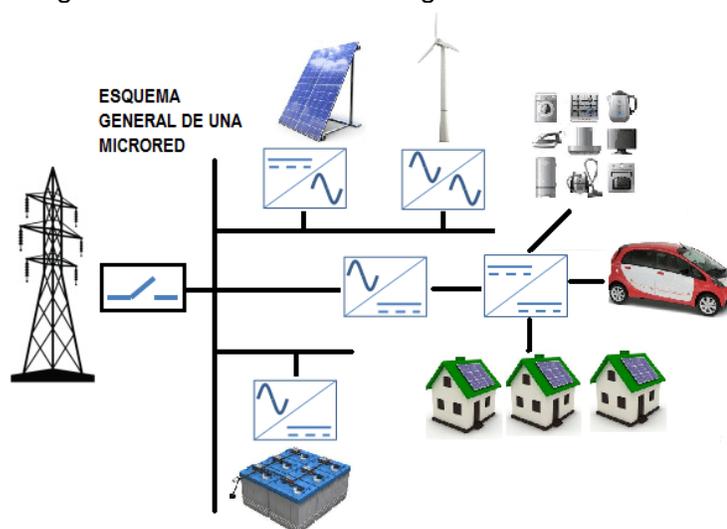
Con lo anterior, a futuro estas tecnologías pueden desarrollarse aún más, ya que se necesitan acumular en los sistemas de energía. Estos sistemas hacen una contribución positiva a la integridad del sistema eléctrico en términos de:

- Colaborando a la implementación de las energías renovables
- Control de frecuencia
- Control de voltaje
- Contribuyendo en función de la necesidad de la demanda (48)

5.2 El sistema inyectado a microrredes

Las microrredes, Son sistemas eléctricos autónomos con capacidad para funcionar en conjunto con el sistema interconectado nacional en forma conectada, aislada o en paralelo. Se componen de componentes de administración centralizada, control centralizado y almacenamiento centralizado, junto con una demanda controlable. (28)

Figura 16 - 5 Sistema FV integrado a una microrred



Fuente: Área tecnológica: <https://www.areatecnologia.com/electricidad/paneles-solares.html>

5.2.1 Retos para el desarrollo de microrredes

Seguidamente, se describen los principales problemas, desde un punto de vista técnico, de explotar las islas de microrredes identificadas en el documento. Cabe señalar que antes de la introducción de la microrred, se deben realizar diagnósticos para comprender los requisitos del sistema de distribución, ya que se pueden requerir elementos adicionales para actualizar la infraestructura de red o comunicación ahora disponible (34).

- *Ausencia en la infraestructura de comunicaciones:* Uno de los aspectos principales de las microrredes son las telecomunicaciones. Este elemento suele estar bien desarrollado a nivel del sistema de transmisión; Sin embargo, a nivel del sistema de entrega, en la mayoría de los casos aún es necesario trabajar en una infraestructura de comunicación más confiable para permitir el control y la gestión adecuados de los recursos dedicados a la microrred (40) (45).
- *Pérdida de sincronismo:* Durante el aislamiento, un problema común es la pérdida de sincronización con la red eléctrica, lo que puede dificultar la reconexión de la isla a la red eléctrica. Por lo general, en las redes distribuidas, los reconectores se utilizan para abrir y luego volver a conectar los circuitos en caso de falla. Sin embargo, en el caso del GD, es posible que, en el momento de la reconexión, haya una diferencia entre el ángulo de fase o la frecuencia del GD y el sistema, lo que puede forzar el rotor de la máquina GD y causar problemas con la carga. (40).
- *Calidad de potencia:* La calidad de la energía está relacionada con la distorsión de la onda de tensión, manifestada por fenómenos transitorios, como parpadeo y caídas de tensión, o fenómenos permanentes, como caídas de tensión e interrupciones continuas (17). La introducción de nuevas tecnologías de GD y la introducción de microrredes pueden afectar la calidad de la energía. (34).

- *Coordinación de protecciones:* El preámbulo de la generación distribuida en los sistemas de distribución convencionales puede tener un impacto en la operación y coordinación de las medidas de protección (40) (65). Si se produce una falla, la corriente de cortocircuito aumenta debido a la participación de GD. Además, cuando el sistema funciona de forma aislada, estas corrientes pueden variar significativamente y es posible que se requieran pruebas de coordinación de protección adicionales (34).
- *Puesta a tierra:* Cuando opera de forma independiente, el generador distribuido opera por separado del sistema interconectado, lo que requiere una conexión a tierra separada. El estándar IEEE 142 de 2007 permite conectar múltiples bases para múltiples fuentes en paralelo. Esto significa que el sistema aislado tiene una base para GD (34).

5.3 Sistemas de monitoreo y control

Se debe comprender exactamente cómo se administra la isla para garantizar que funcione sin problemas tanto sin conexión como cuando se vuelve a conectar al sistema. En otras palabras, debe haber mecanismos adecuados de detección de islas y protocolos preestablecidos para volver a conectarse a la cadena de suministro (66).

Esto es crucial porque los recursos de la isla para generar electricidad siempre deben poder satisfacer la demanda. El controlador debe poder funcionar tanto conectado a la red como autónomo. En este último, debe ser capaz de mantener el voltaje y la frecuencia dentro de los parámetros de operación establecidos. Para mantener la frecuencia y el voltaje (así como su fase) cerca de los parámetros del sistema aguas arriba, la planta generadora también necesita tener un controlador apropiado (34).

El sistema activo de distribución, es un sistema eléctrico automatizado con capacidad de controlar la generación distribuida y la demanda según objetivos del operador de red. Este sistema tiene mayor flexibilidad en la operación que un sistema de distribución automatizado (28), y permite integrar nuevas fuentes de generación a pequeña escala

(AGPE), además de que tienen la capacidad de realizar reconfiguraciones topológicas de las redes de distribución en el caso de fallas y desconexiones fortuitas. En éste sentido, los sistemas activos de distribución presentan características generales de redes inteligentes SG (en inglés “*Smart Grids*”) (10).

El SG, es la tendencia actual y la siguiente generación de redes eléctricas. En los Estados Unidos y la Unión Europea, se está adoptando este sistema como la mejor opción para la seguridad eléctrica, aunque muchos otros países lo están implantando (10) Actualmente, se considera que la red eléctrica tradicional es un sistema rígido, que carece de flexibilidad para la generación, transmisión y distribución de energía (39).

En la actualidad, la red eléctrica tradicional está transitando hacia una red eléctrica moderna, en la que se implementa un sistema de comunicación para monitorear y controlar la red de forma eficaz, en tiempo real y eficiente, y un sistema eléctrico automatizado, ambos enmarcados dentro de la *Smart Grid* (SG-Red Inteligente) (10).

Infraestructura de comunicación y seguimiento

El manejo de la información en tiempo real sobre los eventos de la red, requiere de una infraestructura en telecomunicaciones que sea confiable, y permita un nivel de interoperabilidad entre las distintas partes de la isla, en cumplimiento de estándares internacionales (34). Con respecto a la reconexión de la isla a microrred, al sistema eléctrico de potencia, es necesario hacer énfasis que las diferencias de tensión, frecuencia y fase entre ambos sistemas deben estar dentro de los límites aceptables, como se expresa en la IEEE Std 1547-2003 (23).

Existen varias formas estandarizadas para reconectar las islas al sistema de potencia (66):

- *Sincronización activa*: se realiza cuando existe algún mecanismo de control que pueda hacer coincidir la frecuencia, la tensión y la fase de la microrred con las del sistema de potencia principal en el nodo de conexión. Para esto es necesario

contar con mediciones las variables de ambas partes y que esta información se contraste en el sistema de control (66).

- *Sincronización pasiva*: también requiere mediciones del sistema de potencia y de la isla, pero en este caso es necesario verificar las condiciones de sincronismo y solo se puede hacer la conexión cuando las diferencias estén dentro de límites establecidos. Es posible entonces que no se pueda reconectar (66).
- *Isla des-energizada*: En este método es necesario interrumpir el servicio en la microrred para hacer la conexión y luego se ponen en operación las unidades de GD con la referencia de tensión y frecuencia de la red (66).

5.4 La electrificación rural

La electrificación rural ha representado un gran reto para muchos países, que tratan de extender la red nacional de electricidad a los lugares más apartados, pero sigue siendo un desafío, y aún existen, particularmente en Colombia, muchas zonas que carecen de fuentes de energía, debido a que la extensión de la red primaria, a menudo es demasiado costosa por la gran longitud de los cables que habría que tender (17).

Aun así, la demanda de energía sigue siendo una constante en el país, para lograr un DRS equitativo. Las principales actividades que requieren electricidad en el sector rural son:

- Sector agropecuario: irrigación, preparación de las tierras y fertilización
- Sector doméstico: iluminación, elaboración, preparación y conservación de los alimentos.
- Sector de la industria y los servicios comerciales rurales: iluminación, procesos industriales, establecimientos comerciales.
- Servicios comunales y sociales: bombeo de agua, refrigeración para los centros de salud, iluminación de las instalaciones comunales (centros de acción comunal) (53).

Por otra parte, estos procesos de electrificación rural presentan dificultades como la dispersión de los consumidores potenciales que ocasiona poca demanda; concentración de la demanda en un breve período del día, lo que da como resultado factores como un volumen máximo relativamente alto y una carga baja; pérdida de energía de hasta el 25%, incluido el robo; limitado poder adquisitivo de los consumidores para el consumo de electricidad y el gasto en electrodomésticos; y dificultad en la facturación, mantenimiento y servicio. (53).

Algunos estudios (9) (67) señalan que si bien la electrificación mediante la extensión de la red ordinaria es versátil una vez instalada, acarrea grandes costos de inversión, cuando las necesidades que se satisface pueden suplirse mediante otros sistemas como la energía solar FV, o sistemas híbridos que pueden ser más rentables, y de fácil mantenimiento.

En cuanto a los proyectos recientes de electrificación rural, la viabilidad económica ha sido uno de los criterios para estas nuevas estructuras. Las opciones de energía descentralizada se consideran cada vez más como una alternativa a la extensión de la red convencional cuando se buscan las opciones de electrificación rural menos costosas. Estas tecnologías descentralizadas tienen beneficios, pero también tienen algunos inconvenientes, particularmente en términos de escala y carga (53).

Es por esto que los sistemas de energía solar FV y otros de energías renovables, se han ido posicionando a nivel global, como una alternativa a la extensión de la red eléctrica ordinaria “y su reducida dimensión y estructura modular los hace particularmente adecuados para las poblaciones remotas y dispersas, cuya demanda de energía es poca y desigual” (53). De esta forma, se ha difundido el uso desde los SSD, hasta alcanzar niveles comerciales altos en el presente siglo, con proyectos, adelantos tecnológicos, modelos de crédito, establecimiento de infraestructuras de distribución, instalación, mantenimiento y reparación de los sistemas solares FV, y la capacitación de técnicos de equipos (18).

Sin embargo, existen limitaciones para una difusión más amplia de los sistemas FV, como la falta de información y promoción, falta de sistemas de financiación, obstáculos institucionales, como los monopolios, aranceles y reglamentos, obstáculos de dimensión y costos, que garanticen la inversión privada y la falta de infraestructura local de instalación y mantenimiento de la tecnología FV (53), como se ilustra en la Tabla 2-5.

Tabla 3- 5 Panorama general del potencial y limitaciones de los sistemas FV.

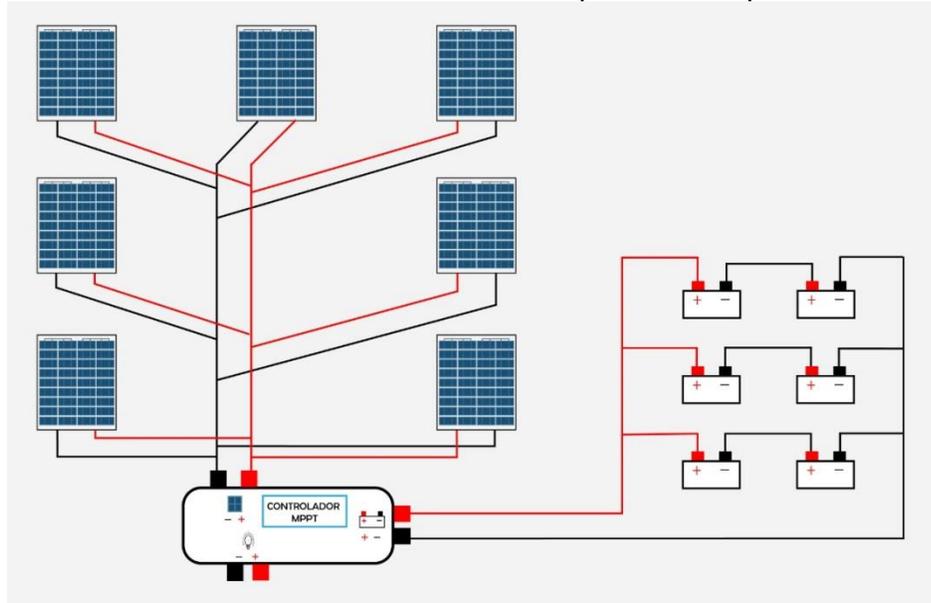
Sector	Potencial	Limitación	Resultados
Equipo e inversión	Flexibilidad: facilidad de aumentar de pocos a más Wp	Gastos elevados de inversión por unidad (Wp)	Los sistemas FV son competitivos sobre todo en el rango de poco consumo de energía en las zonas alejadas y sin electricidad. Necesidades de sistemas de financiación (debido también a la poca disponibilidad de capital en las zonas rurales)
Operación y mantenimiento	Fiabilidad: pocos gastos y necesidad de mantenimiento y supervisión	Necesidad de respaldo o almacenamiento para utilización nocturna y en días de poco sol. La batería es el punto débil de los sistemas FV.	Los sistemas FV a menudo son competitivos por la relación de su costo y duración
Organización	Integración fácil en "paquetes" de consumo adaptados a las necesidades del consumidor	Una mayor participación del consumidor es más necesaria en los proyectos de energía FV que en los de extensión de la red eléctrica ordinaria	Necesidad de introducir cambios institucionales en el sector eléctrico para los proyectos de electrificación rural con sistemas FV
Consecuencias ambientales	No perjudican el medio ambiente, emiten poco CO ₂ y otros gases, en comparación con los sistemas que consumen combustibles fósiles	La eliminación de baterías es un aspecto ambiental importante	Posible financiación conjunta de los programas interesados en el cambio climático.

6. Capítulo 6– Sistema aislado de la Red

El uso de energía solar FV, se está realizando mayormente, para explotar su potencial en sectores como la agricultura, la educación y la atención médica en las zonas rurales, a las que no llega el Sistema de Interconexión SIN.

El sistema tipo isla, además de tener la capacidad de inyectarse a una microrred, tiene como objetivo abastecer energía a las zonas de difícil acceso para la red eléctrica. Estos sistemas cuentan con un banco de baterías capaz de almacenar y proveer energía durante largas horas de consumo (11). Frente a los sistemas convencionales que constan de una sola batería y un tablero FV, la capacidad de operación en isla COI puede aumentar el potencial del sistema de energía solar, al contar con el banco de baterías, y un conjunto de paneles interconectados, para su carga, como se ilustra en la figura 17-6.

Figura 17-6 Sistema FV aislado de la red, con capacidad de operación en Isla COI



Fuente: elaboración propia

Como se observa en el diagrama, se usa un conjunto de placas solares FV, conectadas en paralelo, a un controlador, que luego distribuye la corriente a un juego de baterías, lo que incrementa el nivel de acumulación de la energía, para potenciar los usos del sistema de energía solar FV.

6.1 Aplicaciones de la Energía Solar FV en sistemas aislados

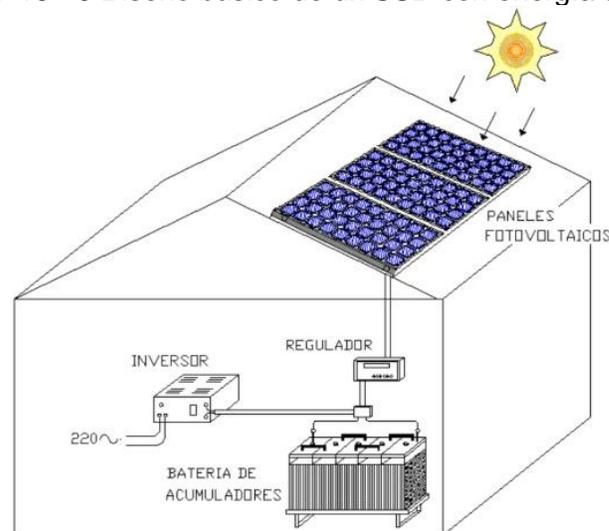
Los sistemas solares FV, de forma aislada, tienen múltiples aplicaciones: sector salud, suministro de agua potable, escuelas, instalaciones comunales, telecomunicaciones, centros de carga para baterías FV, y para el sector agropecuario (abrevaderos para ganado, cercas eléctricas, bombeo de agua potable, entre otras), que se expondrán en el presente capítulo.

6.1.1 Sistemas solares domésticos (SSD)

Los sistemas solares domésticos (SSD), es una tecnología cuya aplicación predominante es en las zonas rurales, para dotar a los hogares de energía FV, que les permita tener iluminación, usar aparatos electrodomésticos, como radio y tv., y computadores. Esto contribuye a mejorar la calidad de vida de la población, ya que permite el incremento de actividades que generan ingresos, extender el día y ahorrar tiempo, para otras actividades productivas o educativas (53).

En la actualidad, los proyectos de energía FV, también se están extendiendo a servicios sociales y comunales rurales, como suministro de agua potable, centros de salud, educación e instalaciones comunales (FAO) lo que posibilita las actividades productivas no agrícolas como: restaurantes, bares, supermercados, talleres técnicos y artesanales ya que permiten el uso de pequeñas herramientas y aparatos, iluminación y uso de equipos que no demandan un suministro alto de energía, lo cual contribuye a la generación de empleo en las zonas rurales (53). La figura 18-6 muestra un diseño básico de sistema solar FV para SSD.

Figura 18 - 6 Diseño básico de un SSD con energía solar FV



Fuente: Sunsupply 2017. Componentes de un sistema de energía solar Recuperado de: info@sunsupplyco.com

6.1.2 Aplicaciones para el sector salud

La tecnologías FV ha contribuido a mejorar los servicios de salud en el sector rural de muchos países, ya que permite entre otros servicios: iluminación eléctrica, comunicaciones, refrigeración de vacunas, y uso de aparatos como nebulizadores, centrífugas, equipos para esterilización y tratamiento de agua, entre otros (29).

Debido a la necesidad crítica de almacenamiento confiable de vacunas para los programas de inmunización, los refrigeradores y congeladores PV se usan con frecuencia en los centros de salud porque requieren poco mantenimiento y son muy confiables. (3). Con frecuencia las fallas del fluido eléctrico normal, ocasionan pérdidas en las instituciones de salud, pero los sistemas de refrigeración con energía FV, garantizan la permanencia del suministro de energía, siempre que se hagan los procesos de mantenimiento requeridos (32).

6.1.3 Energía FV para el suministro de agua potable

Contar con el suministro de agua potable es difícil en muchas regiones del país. Se estima que alrededor de mil millones de personas siguen sin contar con un suministro de agua potable (68). Sin embargo, en las últimas tres décadas se viene trabajando en sistemas de bombeo de agua en el medio rural, mediante sistemas FV, que resultan más económicos y fiable que otros métodos, como las bombas pequeñas de diesel (47). Son sistemas que se utilizan para suministrar agua potable a la población rural, como ilustra la figura 19-6, pero también se emplean para abrevaderos de ganado y para riego de cultivos.

Figura 19 - 6 Suministro de agua potable con energía solar FV



Fuente: Sunssply 2017. Componentes de un sistema de energía solar Recuperado de: info@sunsupplyco.com

6.1.4 Energía FV para escuelas, instalaciones comunales

En muchas zonas rurales, las escuelas que no contaban con energía eléctrica de la red ordinaria, ya poseen sus propias fuentes de energía, principalmente FV. Esto les ha permitido el uso de iluminación, aparatos audiovisuales, salas de cómputo, laboratorios, recarga de dispositivos móviles, el funcionamiento de los restaurantes escolares. De igual forma, la tecnología FV se ha implementado para los centros comunales, casas de cultura, y sitios para reuniones sociales, fiestas, actividades religiosas, reuniones de las juntas de acción comunal, entre otras. Así mismo, se ha podido llevar iluminación pública a sectores y calles para actividades nocturnas y para brindar seguridad a los pobladores.

6.1.5 Tecnología FV, para las Telecomunicaciones

Las empresas de telecomunicaciones constituyen un sector importante del mercado de paneles FV, para las estaciones repetidoras y antenas de telefonía celular, que se ubican en zonas rurales a las cuales no hay acceso de energía eléctrica de la red. Aunque no

benefician directamente a los pobladores rurales, el avance en telecomunicaciones locales es posible implementar la tecnología FV, para el funcionamiento de conexiones únicas de radio y teléfonos móviles con sistemas pequeños aislados, cuya facilidad de mantenimiento permite un servicio permanente y con mayor seguridad (53).

6.1.6 Centros de carga para baterías FV

En regiones a las que no llega la red eléctrica, los pobladores comúnmente utilizan baterías de automóvil para usos simples, que recargan en sitios que cuentan con energía y tienen cargadores, lo cual representa costos de transporte y tiempo extra. El sistema solar FV se está utilizando con éxito y se ha convertido en una de las aplicaciones más usadas en las zonas rurales para centros de carga de acumuladores, lo que contribuye a la mejora paulatina del sistema doméstico de batería (mejores instalaciones, control de carga) (53) a menor precio.

6.1.7 Aplicaciones de la energía solar FV en agricultura

El acceso a fuentes de energía es un requisito indispensable para la satisfacción de las necesidades humanas básicas y suministrar los servicios fundamentales. Sin embargo, en muchos países la población rural no tiene acceso a la red eléctrica, necesaria para la producción agropecuaria y garantizar la seguridad alimentaria, el cultivo de tierras, la ganadería, la industria agropecuaria, la conservación de los productos y el transporte. En los países en desarrollo, actualmente en las zonas rurales “las necesidades de energía se satisfacen sobre todo con combustibles de biomasa, y con trabajo humano y animal. Este inicuo panorama limita seriamente la posibilidad de muchos pobladores de las zonas rurales de mejorar la productividad agrícola y su calidad de vida” (53).

Es por ello que muchos sectores (públicos y privados) han apostado por el uso de energías alternativas. Recientemente, la FAO (69) ha venido promoviendo el suministro de servicios de energía solar FV en muchos lugares del mundo, sobre todo para uso doméstico y para potenciar actividades que generen ingresos e incrementen la productividad agrícola (16).

Entre las aplicaciones más extendidas actualmente de la energía solar FV, que implica el uso de *recursos agrovoltáticos*, mediante programas estatales y la incursión de la industria privada, se pueden mencionar: cercas eléctricas, abrevaderos para ganado, riego por goteo accionado, control de plagas, bombeo de aireación para acuicultura, iluminación para piscicultura y avicultura, sistemas de refrigeración, entre otros.

La encuesta de la FAO, (69) muestra las principales actividades agrícolas estimuladas con la energía FV descritas en la tabla 4-6 (% del total de las encuestas).

Tabla 4 - 6 principales actividades agrícolas estimuladas con la energía FV

Irrigación	23%
Refrigeración de cultivos, carne, pescado, lácteos, otros	2%
Bombeo de agua para piscicultura	5%
Bombeo de agua para dar de beber al ganado	19%
Control de plagas	2%
Cercas eléctricas para control del pastoreo	14%
Iluminación para procesar pescado	2%
Iluminación para pesca	5%
Iluminación para procesamiento del café en Colombia	12%

Fuente: Encuesta FAO. (69)

Energía FV para bombeo e irrigación de cultivos

En muchas zonas rurales, la irrigación de cultivos representa un gran problema, por los altos costos en el uso de combustibles o electricidad y por los efectos para el medio ambiente. Tradicionalmente el riego se ha hecho en algunos sectores agrícolas por medio de inundación, lo que ocasiona problemas como desperdicio de agua, degradación de suelos por inundación y salinización, sobre todo en los climas áridos (69)

La introducción de nuevos sistemas con tecnologías de bombeo, como riego por goteo y micro-riego, que se acoplan a las características de los sistemas de bombeo FV, han

permitido solucionar estas dificultades, con muchas ventajas adicionales (27). La canalización del agua por conductos cerrados, permite controlar la presión del agua evitando la infiltración y la contaminación, así como los emisores de goteo y micro-aspersores facilitan una irrigación constante y controlada de los cultivos y por tanto, un mayor ahorro de agua. Asimismo, es posible utilizar estos sistemas en la fertilización de cultivos y aprovechar al máximo los insumos agrícolas, dosificando su aplicación (47).

Aun así, Dado que el riego fotovoltaico es más competitivo a alturas más bajas, es necesario mejorarlo en áreas técnicas como el bombeo de agua superficial y el desarrollo de bombas con alturas de suministro bajas. Además, es importante diseñar sistemas de riego por goteo de baja presión, completos con los filtros adecuados y mecanismos de aplicación de fertilizantes. (44).

Figura 20- 6 Irrigación de cultivos con energía solar FV



Fuente: Sunsupply 2017. Componentes de un sistema de energía solar Recuperado de: info@sunsupplyco.com

Energía FV para abrevaderos de ganado

La energía solar FV, también está teniendo aplicaciones en ganadería, ya que existen zonas en las que el agua natural no es asequible para el ganado, por lo que requieren sistemas eficientes para el suministro de agua, como el bombeo FV para abrevaderos, lo que potencia un mejor uso de los recursos ganaderos, con opciones flexibles de suministro del líquido vital. Las bombas FV, ofrecen grandes ventajas por ser portátiles, requieren poco mantenimiento y no necesitan supervisión ni suministro de combustibles (47).

En general, los sistemas de bombeo fotovoltaicos no requieren una batería de respaldo; en cambio, usan un tanque de agua, lo que reduce los costos de mantenimiento y aumenta la confiabilidad del sistema (53). Sistemas más complejos como el sistema en isla, que requieren una mayor inversión, pueden ser más convenientes para la ganadería extensiva.

Figura 21- 6 Abrevadero para ganado usando tecnología FV



Fuente: Sunsply 2017. Componentes de un sistema de energía solar Recuperado de: info@sunsupplyco.com

Cercas eléctricas FV

En Colombia, la ganadería es uno de los renglones de la economía más importantes y en las zonas más remotas, aún se emplea el sistema de cercas con alambre de púas, lo que implica costos por mantenimiento y mano de obra para los ganaderos. Sin embargo, el uso de las cercas eléctricas FV se ha ido imponiendo ya que es más rentable y fácil de implementar. El uso de una batería con panel solar, permite un funcionamiento independiente y de fácil traslado, lo que posibilita la planificación del pastoreo y la rotación del ganado. Hay unidades FV pequeñas e integradas para cercas, a menudo utilizadas como unidades móviles para cercas pequeñas (de pocos kilómetros) (53).

Los cargadores para cercas eléctricas típicamente consisten en un conjunto electrónico capaz de producir descargas breves (del orden de 0.0003 segundos) de alto voltaje (de 5000 a 7000 voltios, dependiendo del animal). Las breves descargas que solo ocurren cuando un animal toca la cerca dan como resultado un bajo consumo de energía. En el caso de las unidades más pequeñas, los cargadores pueden funcionar con energía normal, baterías de 12 W o incluso pilas secas. (53).

Figura 22 - 6 Cerca eléctrica diseñada para usar energía solar FV



Fuente: Sunsply 2017. Componentes de un sistema de energía solar Recuperado de: info@sunsupplyco.com

Energía FV para piscicultura

De acuerdo con cifras de la FAO (69), el desarrollo de la acuicultura se ha ido incrementando 5 veces más, desde la década de los 80, principalmente en los países en vías de desarrollo. Por ser un sector importante de la economía, se implementan cada vez más mecanismos para potenciar la producción piscícola.

Tradicionalmente, la demanda de sistemas de aireación y otros servicios eléctricos en regiones apartadas o en el mar, se satisface mediante generadores diesel cuyo funcionamiento es costoso y generan un impacto ambiental, sobre todo cerca de los ecosistemas acuáticos vulnerables.

La energía solar FV, ha representado una opción para las comunidades de pescadores y empresas para aplicarlas en el uso de bombas de aireación y sistemas de refrigeración para el pescado y la producción de hielo (en tierra) para el comercio de los productos del mar, a los mercados cercanos (53). De esta forma, la refrigeración FV, por su costo y fácil adaptación, está siendo más competitiva en la actualidad, con innovaciones en compresores de poco consumo de energía y técnicas mejoradas de aislamiento, para refrigeradores pequeños, aunque también se utilizan sistemas híbridos diesel/FV y eólicos/FV que ofrecen una solución más competitiva para casos que requieren refrigeradores de gran tamaño y capacidad (47).

Sistemas de Refrigeración FV

Los sistemas de refrigeración FV para la conservación de carnes, lácteos y otros alimentos, también está teniendo gran acogida en el mercado. Inicialmente era un problema adaptar los refrigeradores eléctricos para funcionar con tecnología FV, por el alto consumo de energía, sin embargo, ya se están produciendo refrigeradores para uso FV, a precios competitivos, que permiten ser adquiridos por parte de las poblaciones rurales (53).

La conservación de vacunas veterinarias es otro uso de la refrigeración FV en la industria agrícola. Los mismos factores que justifican los costos en el caso de las vacunas en el campo médico también se aplican aquí, incluido el valor de la confiabilidad y los requisitos mínimos de mantenimiento. (53).

Otras aplicaciones de la energía FV en agricultura

Iluminación de gallineros.

La energía FV también ha encontrado aplicación en avicultura, para la iluminación de criaderos de aves de corral, que permite alargar las horas de luz, y por tanto, aumentar la producción de carne y huevos (53). Normalmente, las granjas avícolas utilizan demasiada energía para las luces térmicas que procuran calor para reducir la mortandad de los polluelos, y los sistemas FV normales, no alcanzan a cubrir la demanda exigida, aunque es posible experimentar con tecnología FV instalada mediante el sistema COI, que, además permitiría utilizar ventiladores para zonas más cálidas que requieren ventilación para las aves de corral (53).

Control de plagas

En agricultura, las plagas de insectos ocasionan grandes pérdidas y los métodos de control usuales (plaguicidas) además de los costos que demandan, generan impactos medio-ambientales por su uso intensivo y a la larga, resistencia al plaguicida. En distintos lugares del mundo, se están utilizando linternas solares para atrapar determinadas plagas. Una ONG, el Centro de Solidaridad Mundial (CSM), introdujo esta aplicación en su programa de control ecológico de plagas (53) (47). Numerosos cultivos comerciales y de secano se ven perjudicados por la oruga pelirroja, que prevalece en la región semiárida del sur y centro de la India. Los pesticidas se usan con frecuencia para controlarlo, pero estos productos químicos son malos para el medio ambiente y hacen que aumente la resistencia a los pesticidas. El CSM comenzó a experimentar con bombillas suspendidas sobre un balde de agua jabonosa o queroseno. Cuando se instalan luces en los campos por la noche, la luz atrae a la mayoría de ellos, lo que hace

que caigan al agua y se ahoguen antes de poner sus huevos. En lugar de tender cables a través de los campos, las linternas solares eran mucho más rentables, eficientes y seguras(53).

La siguiente tabla, describe el porcentaje de las repercusiones que tienen los sistemas FV en la agricultura, de acuerdo con la Encuesta FAO (1999).

Tabla 5 - 6 Repercusiones de los sistemas FV en la agricultura

Más productividad (mayor rendimiento)	28%
Menos pérdidas (índice de muertes) o producción más veloz	16%
Mejor gestión de los recursos naturales	19%
Más tierras para cultivar	0%
Cosechas múltiples al año	12%
Productos nuevos, más comerciales	12%
Se pueden criar más animales.	16%
Producto de mejor calidad (precios más altos, más ventas)	19%
Acceso a mercados más lucrativos (p. ej. Mediante la conservación del producto para transportarlo).	0%

Fuente: Encuesta FAO (69)

7. Propuesta de innovación: Energía agrovoltaica y agricultura inteligente para potenciar los cultivos agrícolas y el suministro de energía.

La energía *agrovoltaica*, o también denominada *agrofotovoltaica*, es una aplicación de la energía solar FV para obtener tanto energía solar como productos agrícolas en un mismo terreno, es decir, que los sistemas de recolección de energía solar, conviven con los cultivos y/o la ganadería, en una misma superficie (70). Se trata de un modelo que unifica e integra la tecnología FV a los campos de cultivo, creando sinergias que permiten superar la dificultad existente hasta ahora de contar con grandes espacios para la instalación de placas solares que compitan con la agricultura o la ganadería para el uso del suelo (71).

Por otra parte, uno de los limitantes para la producción agrícola a medida que se incrementa la temperatura global, es la siembra de cultivos intolerantes a la luz y al calor, y que requieren sombra para alcanzar ciclos óptimos de crecimiento. El uso de paneles solares para proteger los cultivos, que se acuñó bajo el término agrovoltaico (*agrovoltaics*); es una técnica implementada inicialmente por los alemanes Adolf Goetzberger y Armin Zastrow en 1981 (70), pero comenzó a extenderse a partir de la década pasada, con grandes posibilidades para el sector agropecuario (72). Desde entonces, se ha investigado y desarrollado mucho. Desde Alemania, en la ciudad de Heggelbach el año pasado. En un campo de cultivos se levantó una estructura de cinco metros de altura. Los rendimientos de tres de los cuatro cultivos fueron superiores al rendimiento tradicional bajo el sistema agrofotovoltaico, y la eficiencia del uso de la tierra aumentó en un 186 por ciento por hectárea (73).

La agrovoltaica, por tanto, es una disciplina que parte de la consideración de que la tierra es un recurso limitado, y que ante la creciente demanda de energía para la producción agraria se precisa el uso de fuentes renovables y amigables con el medio ambiente como

la solar, por tanto, es un sistema que “trata de lograr la conjunción económicamente eficiente de ambas actividades mediante la mutua complementariedad en una misma superficie” (47).

Hasta ahora solo algunos países como USA, Japón, Francia, Alemania, Holanda, India, Australia, Vietnam (74) y China (75) (76) han sido los pioneros en este tipo de innovaciones, con proyectos diseñados en centros de investigación, que incluyen modelos para combinar las actividades agropecuarias con sistemas solares FV idóneos. De esta forma, han implementado configuraciones agrovoltaicas que utilizan tecnologías convencionales en cotas bajas, cotas altas y otros lugares, combinando la generación fotovoltaica con el cultivo de productos como paprika, tomate, frutas, flores ornamentales, papa, entre otros, que requieren cierta cantidad de sombra (47).

Volver la mirada sobre los terrenos agrícolas como fuente potencial de captación de energía solar, es la tendencia actual en la búsqueda de fuentes alternativas. Se trata de una forma de equilibrar la producción de alimentos y energía de forma inteligente, para evitar la extensión de zonas de cultivo y potenciar al máximo el rendimiento de las cosechas. La combinación de las dos industrias puede aumentar la competitividad del sector e incluso conducir al desarrollo de nuevas empresas comerciales que aprovechen sus importantes ventajas competitivas. (71).

En Colombia, la energía solar agrovoltaica aún no se ha adoptado lo suficiente dada la poca divulgación que existe en la materia (3) (7). Por tratarse de una innovación de reciente data, muchos agricultores se resisten a ubicar sistemas agrovoltaicos en los campos abiertos de sus parcelas, puesto que consideran que ocupan demasiado terreno y limitan el área de cultivo (6), pero con una adecuada planificación y conociendo los beneficios obtenidos de la doble utilización del terreno, esta limitación podría superarse.

7.1 Descripción del modelo agrovoltaico

Se trata de instalar un sistema solar FV a una altura considerable sobre los cultivos, que requieren cierto porcentaje de sombra, y en aquellos que se puedan ver afectados, la

producción de energía compensa las posibles pérdidas. Es algo que favorece el autoconsumo fotovoltaico, puesto que la electricidad generada cubre fácilmente las necesidades energéticas de la producción agraria, favoreciendo de esta forma el autoconsumo fotovoltaico. “Cuando los agricultores instalan paneles solares, pueden aumentar la producción de alimentos y alimentar la red eléctrica libre de emisiones” (6). Según un estudio publicado por la revista *Nature Enlace Externo*, “con que solo un 1 % de los terrenos cultivables se dedicaran a la producción de electricidad solar, sería posible compensar la demanda mundial de energía” (70).

Los sistemas agrovoltaicos consisten en la instalación de los paneles solares unos metros por encima del terreno de cultivo mediante soportes fijos, lo que permite el acceso de maquinaria agrícola a los cultivos situados debajo (70). En sitios en los que se requiere el uso de maquinaria pesada (tractores, máquinas de bombeo, fumigadoras, etc.) se puede implementar este sistema a una altura considerable o con mecanismos que permitan el fácil desplazamiento vertical de los paneles solares para facilitar las tareas agrícolas (71). De hecho, se debe mantener un espacio adecuado durante la construcción de campos agrovoltaicos para el movimiento de equipos y el cultivo de hortalizas (71). Los paneles están fijados a marcos metálicos que permiten el uso de equipos de cosecha, el crecimiento óptimo de los cultivos y, por supuesto, la absorción de la radiación solar necesaria para convertir la luz solar en electricidad (71). También se pueden ubicar los paneles en el techo de un invernadero, o sobre cables elevados con facilidad para desmontarlos y trasladarlos a otros sitios, y adaptarlos de acuerdo a las necesidades del lugar: clima, rotación de cultivos, etc. (22)

7.2 Aplicaciones de los sistemas agrovoltaicos

Entre las aplicaciones que puede dársele a los sistemas agrovoltaicos se cuentan:

Sombreado: La protección de fenómenos atmosféricos para cultivos delicados como fruticultura, horticultura, cereales, plantas medicinales, etc. A su vez, los paneles protegen los cultivos del daño relacionado con la luz, Como resultado de la transpiración, las plantas enfrían los sistemas solares. Los cultivos con poca luz pueden

mantener sus tasas de producción porque el sobrecalentamiento reduce la eficiencia de los dispositivos renovables (6).

Figura 23-7 Ejemplo de agricultura agrovoltaica: combinación de cultivos con paneles solares para sombreado.



Recuperado de: <https://ovacen.com/paneles-solares-cultivos/>

En ganadería, y para el uso de terrenos no cultivables, en los que el clima o el suelo no es apto para la agricultura, es posible instalar sistemas agrovoltaicos, que se posibilitan un doble uso del suelo: generación de energía y pastos para ganado. Debido al sobrecalentamiento de los animales provocado por el calentamiento global, la producción ganadera también es limitada. Cuando sube la temperatura, los animales de pastoreo como el ganado vacuno y ovino necesitan sombra. Los granjeros pueden proteger eficazmente a sus animales en sus campos instalando paneles solares (6). Con la ganadería, el desarrollo de hábitats hospitalarios para la reproducción de polinizadores (abejas y otros insectos), actividades agrícolas asociadas, y aunque también hay algunas experiencias positivas con aves, también se han utilizado sistemas convencionales (ángulo fijo y sistemas de seguimiento con elevaciones comunes). construido con éxito en países como Cuba (47).

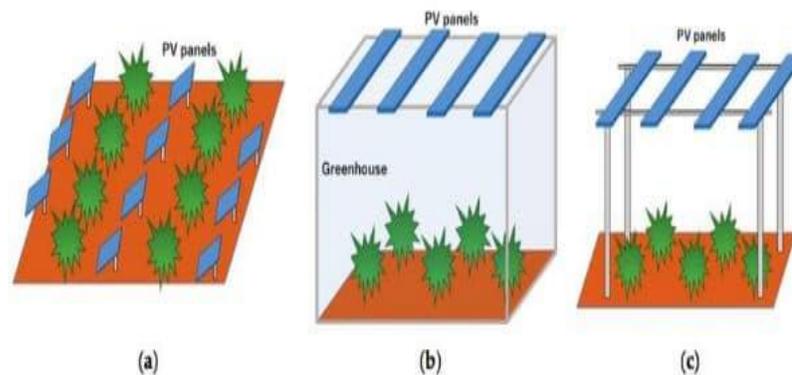
Figura 24 Cercas para ganadería, con paneles solares



Fuente: redel@udg.co.cu <https://redel.udg.co.cu>

Invernaderos: En algunos países, se utilizan placas solares para cubrir los invernaderos y evitar la exposición de los cultivos a la luz directa del sol, que se proyecta por los costados del invernadero, optimizando la producción (77). Además, la energía producida puede utilizarse para sistemas de calefacción, ya que durante la noche se requiere calentadores para evitar que la temperatura descienda demasiado. Usualmente, estos calentadores usan combustibles líquidos o gaseosos (gasóleo o propano), cuyo precio sube constantemente y cuya escasez es un peligro a considerar (6).

Figura 25-7 Modelos agrovoltaicos, de acuerdo a las necesidades. Figura central con invernadero



Fuente: <https://ovacen.com/paneles-solares-cultivos/>

Sistemas flotante-voltaicos: Los sistemas agrovoltaicos también contemplan el uso de placas solares sobre fuentes de agua –canales de riego, lagos, estanques piscícolas, etc.- para evitar la evaporación excesiva en zonas de alta exposición solar y en las que el agua es indispensable para la producción agrícola y ganadera. Los expertos se refieren a los paneles como sistemas flotantes voltaicos porque flotan en la superficie del agua (6). A medida que aumentan las temperaturas globales, también aumentan las tasas de evaporación, lo que provoca sequías prolongadas en algunas áreas (6). Instalar sistemas flotantes FV, sobre las fuentes de agua, permite no solo conservar los recursos naturales, sino generar energía de forma limpia y eficiente.

7.3 Avances tecnológicos y agricultura 4.0

Para la implementación de la agrovoltaica, se han hecho adelantos tecnológicos, que permiten el seguimiento y la orientación de los paneles para evitar que proyecten sombra y maximizar su eficacia en un mismo lugar, durante muchas horas, adaptándose así a las necesidades de las plantas. Para ello, se han diseñado modelos de *software*, acordes a los procesos de evolución de los cultivos y los cambios meteorológicos. Asimismo, se está investigando la fabricación de placas solares que posibiliten la absorción de energía solar FV y a su vez permitan el paso de longitudes de onda de luz solar para la fotosíntesis de las plantas (70)

La agricultura de precisión: es un enfoque que utiliza las TIC para monitorear recursos como cultivos, campos y animales. Su objetivo es maximizar el uso de recursos y el rendimiento de los cultivos al tiempo que minimiza los costos asociados. El sector agrícola consume una cantidad significativa de recursos en forma de agua, tierra, fertilizantes y energía. La agricultura de precisión se ocupa de calcular la cantidad exacta de recursos necesarios para cultivar plantas y mantener el ganado (4).

Smart farming: Se, basada en el uso de los datos obtenidos de la agricultura de precisión de forma inteligente, con el fin de realizar estudios de suelos, predecir e incrementar el

rendimiento de los cultivos, reduciendo el desecho de recursos, automatizando tareas y proporcionando apoyo a la gestión agrícola. También utiliza tecnologías como el *big data*, el *Internet de las Cosas* y la inteligencia artificial (4). En la actualidad, la *Smart farming* es de gran interés para investigadores y científicos, ya que ha dado grandes resultados en la descenso de la huella ecológica en la agricultura, mejorando la eficiencia de la producción, reduciendo el trabajo humano a través de vehículos no tripulados, detección de enfermedades a través del procesamiento de imágenes y más (4).

Agricultura de 4ª. Generación: Son avances que se inscriben en lo que se ha dado en llamar la *agricultura 4.0* o la cuarta revolución agrícola, discutida por la Cumbre del Gobierno Mundial en 2018 en el informe titulado “*Agricultura 4.0 – el futuro de la tecnología agrícola*”. El informe subraya la necesidad de prácticas de elaboración de alimentos más eficientes que puedan superar la creciente demanda en próximos años. Dicha eficiencia, puede incrementarse exponencialmente con la integración de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC’s) y las *tecnologías disruptivas (DT)* como la *teledetección*, *Internet de las cosas (IoT)*, *aprendizaje automático*, *big data*, etc., a la industria agrícola (4).

7.4 Aportes y limitaciones de la propuesta

Ventajas

Como ya se mencionó, la energía agrovoltáica ofrece ventajas ecológicas al reducir la emisión de gases de efecto invernadero en la producción agrícola, pero a su vez disminuye el impacto medioambiental en los ecosistemas y la biodiversidad ya que reduce la tendencia creciente a ampliar las zonas de cultivo como ocurre en muchas regiones del país.

Por otra parte, permite el doble uso del terreno –agricultura, ganadería y producción energética- optimizando su uso y rendimiento. Es algo potencialmente más eficaz en zonas cálidas tropicales en las que muchos cultivos requieren sombra ante eventuales

efectos de sobre-exposición solar que incrementan la temperatura y la evaporación generando pérdidas para los agricultores (73) (29).

Diferentes estudios hechos sobre las ventajas que ofrecen los sistemas agrovoltaicos, han señalado entre otras, las siguientes:

- *Más productividad* según tipo cultivo. Muchos cultivos alimentarios funcionan mejor cuando están a salvo de la luz directa: «La producción total de chiltepin (una especie de chile) era tres veces mayor bajo los paneles fotovoltaicos, y la producción de tomate fue el doble.» (78)
- *Ahorro de agua*: Tener sombra en el terreno agrícola «x» horas al día, conserva la humedad por más tiempo, es decir, que se puede tener un mayor rendimiento con menos cantidad de riego del usual ya que se hace un uso más eficiente del agua. Con los beneficios de la sombra, algunos cultivos bajo paneles solares son hasta un 328% más eficientes en el uso del agua según este informe (53).
- *Temperatura más estable*: La sombra de los paneles aporta temperaturas diurnas más frías y temperaturas nocturnas más cálidas para las plantas que crecen debajo, así como más humedad disponible en el aire (53).

Desventajas

Sin embargo, en zonas que demandan altos niveles de exposición solar, las desventajas se presentan para cultivos que se puedan ver afectados por las sombras que proyectan los paneles solares, lo que restringe la diversidad en la producción y limita el cultivo a especies más resistentes (70). Otra limitación, de tipo económico, es la inversión inicial que se precisa, pero que puede minimizarse, mediante políticas estatales que incentiven este tipo de propuestas, con la reducción de aranceles e impuestos sobre los materiales necesarios para instalar sistemas agrovoltaicos, que, a su vez, reducen los costos de los servicios públicos convencionales.

Por otra parte, no todas las áreas disponibles en la zona rural pueden ser utilizadas, ya que los sistemas agrovoltaicos requieren condiciones técnico-económicas específicas y estudios previos: condiciones topográficas y geotécnicas, niveles de radiación,

propiedades del suelo, tamaño del área, aspectos ecológicos, probabilidad de inundaciones, accesibilidad (79), seguridad de las instalaciones ante eventuales actos vandálicos o de robo (47).

La susceptibilidad de esta tecnología a los fuertes vientos puede ser uno de sus inconvenientes. Sin embargo, los edificios podrían construirse en lugares con una baja probabilidad estadística de huracanes y asegurarse sobre un terreno rocoso. (80). También se podrían crear estructuras más fuertes con componentes móviles, lo que permitiría colocar los paneles horizontalmente según sea necesario. (47).

7.5 Exploración experimental a la propuesta

Los estudios piloto incluyen una serie de métodos teórico prácticos donde llevamos a la recopilación información, con esta demostrar una validación óptima del problema identificado mediante datos recolectados un posible diseño de un sistema de energía solar FV aislado en la red, con el sistema complementario en isla, para posibles aplicaciones en zonas rurales. (82)

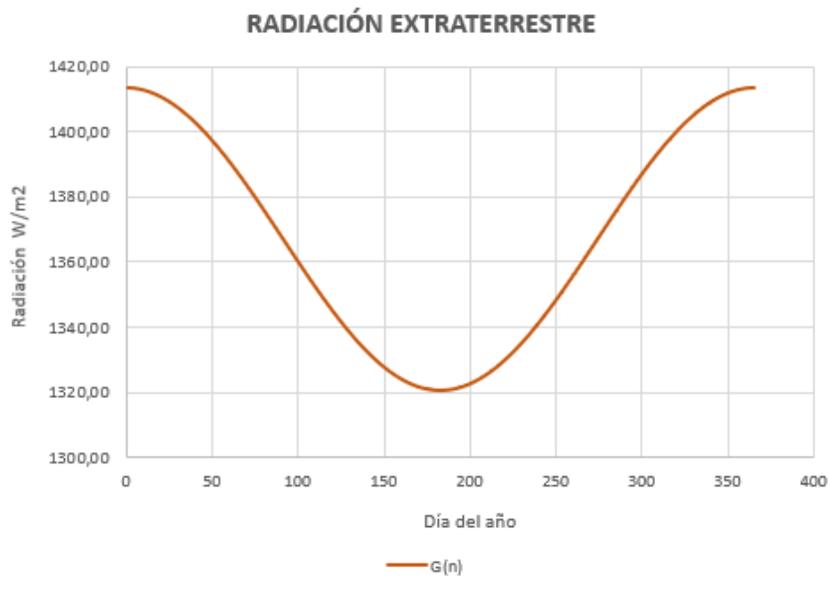
Con lo anterior, se tiene los siguientes conceptos a tratar para la validación de los estudios realizados en la investigación:

7.5.1 Radiación Solar Extraterrestre teórica anual

El sol es el responsable de la fotosíntesis por lo que su uso en la agricultura es fundamental. Para optimizar la producción agrícola con sistemas fotovoltaicos es importante conocer las fluctuaciones de la radiación solar en un espacio y tiempo determinado. De manera similar, para optimizar mejor SSFV en regiones que no son SIN, se debe conocer la irradiancia solar para aprovechar el ángulo de inclinación, el patrón de irradiancia y la irradiancia solar. Determinar el ángulo de inclinación óptimo permite capturar más energía solar de los

paneles fotovoltaicos, lo que requiere un ajuste fino en el movimiento de la Tierra y en el sistema solar de la rotación en una ubicación particular.

Figura 26. Radiación Extraterrestre Teórica



Fuente: Elaboración propia

El movimiento de la Tierra alrededor del Sol toma un año en una órbita elíptica y gira paralelamente a su eje en un día. El gráfico anterior muestra el nivel de radiación extraterrestre en días específicos del año para un uso más eficiente de la energía solar en sistemas fotovoltaicos.

La variación climática sustancial puede ocurrir a nivel local y regional. Las diferencias topográficas en la inclinación de la tierra provocan diferencias en la radiación solar equivalentes a decenas de grados de latitud.

Por otro lado, la radiación recibida sobre una superficie inclinada depende del ángulo de incidencia de los rayos del sol sobre esta superficie. Depende tanto de su inclinación y orientación, como de la órbita del Sol. Con lo anterior se determina la latitud y la fecha. Para ello, se obtiene a partir de una curva de variación diaria de la radiación

solar extraterrestre incidente en la superficie cuya pendiente varía en función de la ubicación geográfica, la fecha y las características de la pendiente.

Ángulo de Declinación

La declinación del sol es el ángulo entre el plano ecuatorial y los rayos del sol de la tierra. Su valor oscila entre los $23,45^\circ$ durante el solsticio de verano y los $23,45^\circ$ durante el solsticio de invierno. Además, toma el valor 0 en los equinoccios de primavera y otoño, donde se utiliza la siguiente fórmula para encontrar la muestra anual teórica:

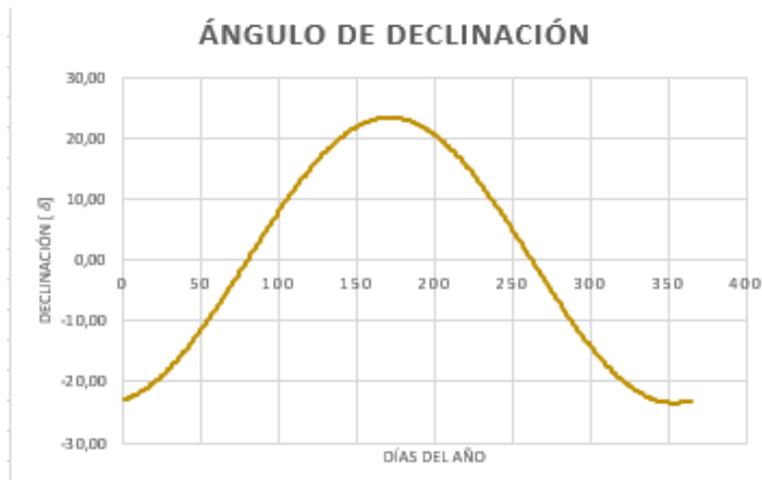
$$\delta(n) = 23,45 * \text{sen} \left[(284 + n) * \frac{360}{365} \right]$$

Donde:

n: Número de día del año

Además, se tiene que la declinación es la desviación del Sol del plano ecuatorial de la Tierra. Cuando el ángulo aparece al norte del ecuador es positivo y cuando aparece al sur es negativo, por lo que en cualquier día del año se determina la declinación según la siguiente ecuación y el resultado es un instrumento suficiente para conocer la perspectiva del sol en cualquier época del año y en cualquier día.

Figura 27. Ángulo de Declinación



Fuente: Elaboración propia

También es importante conocer el ángulo de inclinación de la Tierra con respecto a su eje polar, que hace que el Sol esté más alto en el cielo durante el verano que durante el invierno.

Ángulo Horario (ω)

Siendo un ángulo formado por la intersección entre el meridiano del sol y el observador del mismo, tiene una variación de una hora equivalente a quince grados, donde para hallar dicho ángulo se utiliza la siguiente ecuación para hallar su valor teórico:

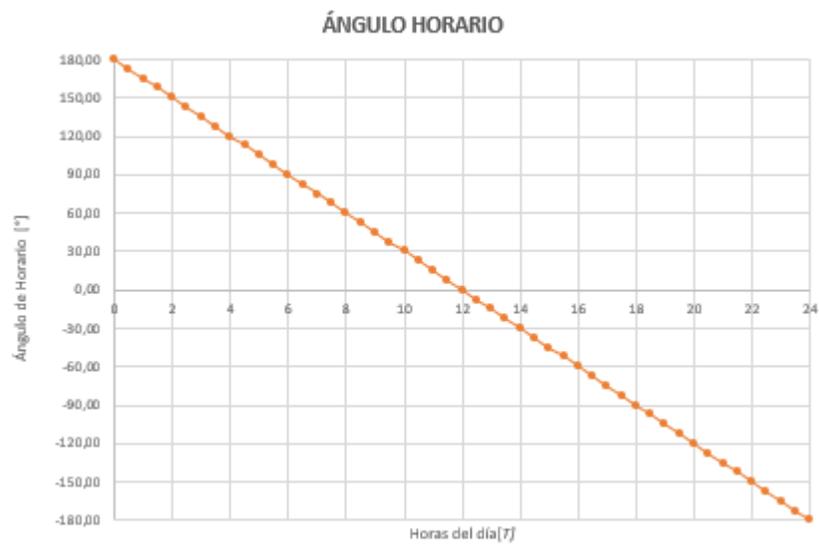
$$\omega = \frac{12 - T}{24} * 360$$

Donde:

T: es la hora en formato 24 horas

ω : ángulo horario en grados [°]

Figura 28. Ángulo Horario



Fuente: Elaboración propia

El camino claro del sol en el horizonte entre el amanecer y el atardecer es visible a medida que la Tierra gira de oeste a este. La proyección de la trayectoria del sol en el plano vertical y la proyección en el plano horizontal determinan cada una un ángulo diferente que determina la trayectoria del sol a lo largo del día.

7.5.2 Radiación Solar Terrestre teórica anual

La radiación extraterrestre diaria estará influenciada por la declinación del sol y el promedio anual del número de horas de sol. Hoy existen ideas teóricas para explicar el ciclo anual, las variaciones regionales y la radiación solar de la Tierra. A través de varios laboratorios virtuales accesibles a través de Internet, se puede analizar gráficamente el programa de cálculo de la radiación solar en cualquier época del año y en cualquier lugar del planeta. Para su cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$G_b(n) = \tau * G_c \left[1 + 0,034 * \cos\left(\frac{360 * n}{365,25}\right) \right] [Wm^{-2}]$$

Donde:

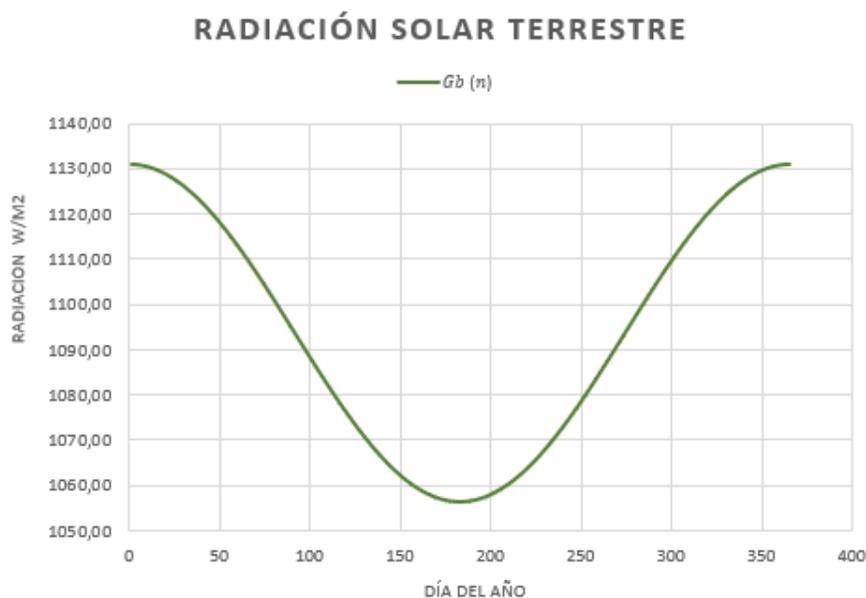
$G_b(n)$: radiación solar terrestre

τ : transmitancia atmosférica (0,8)

n : Número de día del año

G_c : Constante solar $1367 \left[\frac{W}{m^2} \right]$

Figura 29. Radiación Solar Terrestre Teórica



Fuente: Elaboración propia

Según la inclinación o altura de los rayos del sol, la radiación solar extraterrestre es la cantidad de energía que recibe una superficie en un punto fuera de la atmósfera en el plano tangente a la Tierra que se recibe en una superficie perpendicular a los rayos del sol. sol. rayos de sol un período de tiempo, el sol.

7.5.3 Radiación Solar Terrestre teórica para los días del año en la ciudad de Manizales

La intensidad de la radiación emitida por el sol depende del ángulo con el que sus rayos inciden en la superficie. Una superficie recibe la máxima radiación solar cuando la luz incide sobre ella verticalmente. Cuando la tendencia de los rayos de luz disminuye, la energía se distribuye en un área más grande y se recibe menos radiación por unidad de área. Con esto, se tiene un aspecto influyente en el cálculo de la energía solar o irradiación solar, es la latitud del lugar que se está analizando, en este caso favorece que la ciudad de Manizales se encuentra situado aproximadamente a cinco (5°) respecto a la línea del Ecuador lo que permite obtener una mejor irradiación, en la cual para la ciudad de Manizales será una latitud de 5.07, y se utilizará la siguiente ecuación para su cálculo correspondiente, en la que se mide la radiación solar terrestre horaria, la altura solar y la radiación solar en un día determinado:

$$G_b(n)_t = G_b(n) * \sin \alpha$$

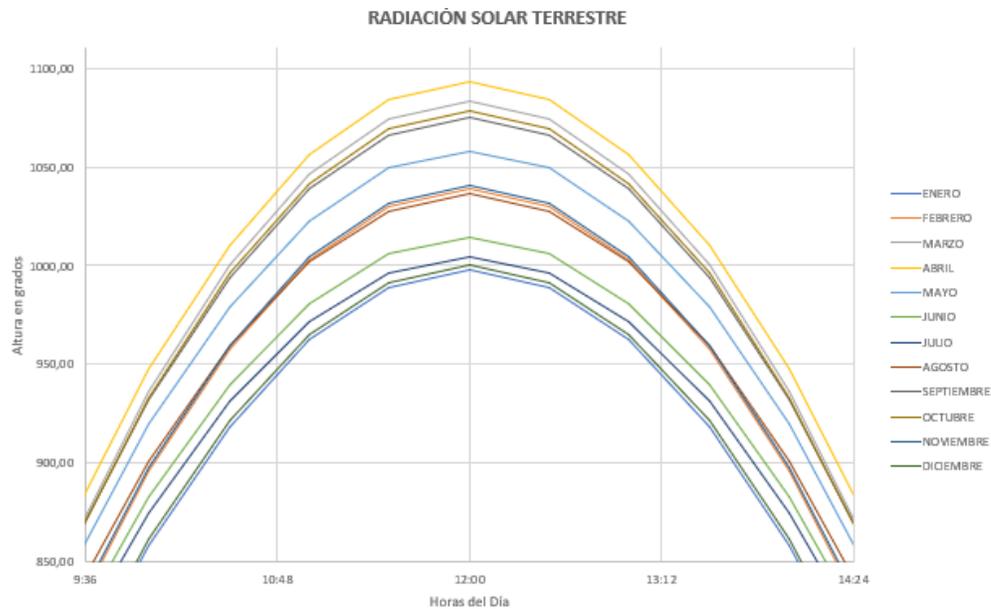
Donde:

$G_b(n)_t$: radiación solar terrestre horaria.

α : altura solar.

$G_b(n)$: radiación solar terrestre en el día n .

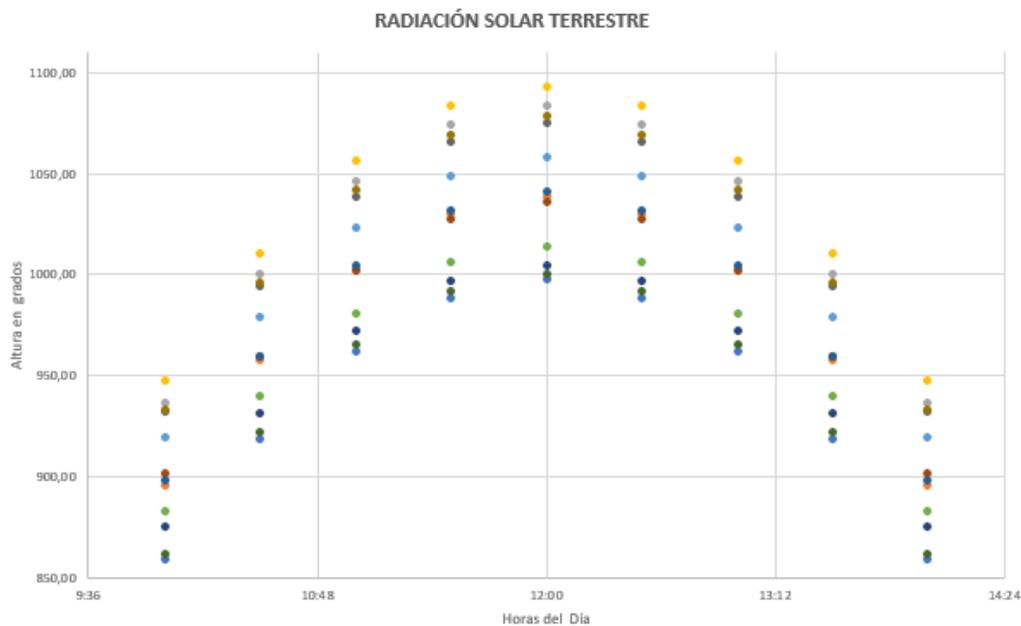
Figura 30. Radiación Solar Terrestre teórica en Manizales



Fuente: Elaboración propia

Gráficamente se muestra que los meses de verano y primavera son mayormente aprovechables para la irradiación del solar, además la variación de la energía solar entre los diferentes días del año para la ciudad de Manizales es relativamente poca, tiene un descenso interesante entre los últimos dos meses del año, pero recupera la estabilidad durante los primeros dos meses del año, para añadir siendo una curva sinusoidal se puede ver que a medida que avanza el día la altura solar crecerá esto por el ángulo solar, además siendo el mayor punto sobre el medio día siendo la hora de mayor aprovechamiento de la irradiación solar.

Figura 31. Radiación Solar Terrestre teórica en Manizales



Fuente: Elaboración propia

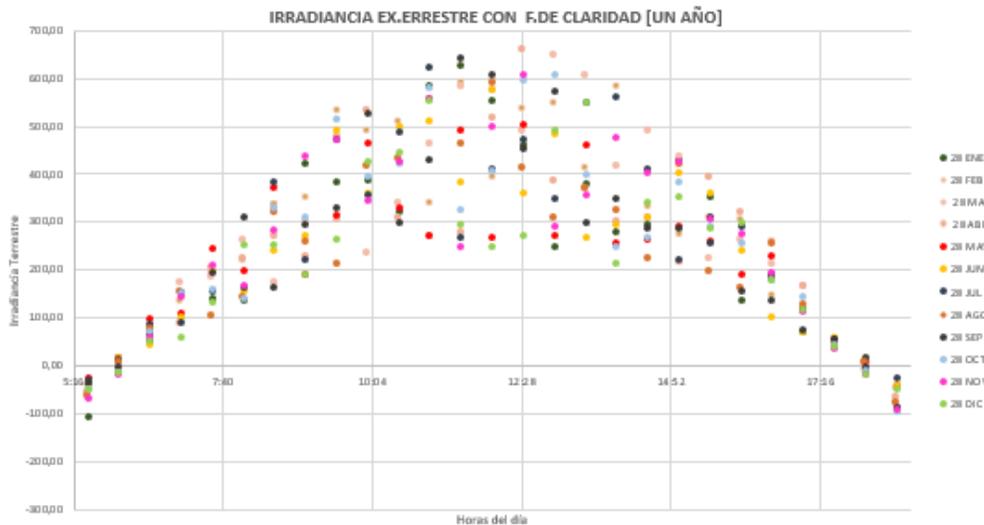
La posición del sol varía durante el día y en diferentes estaciones, por consiguiente, la radiación solar está determinada en gran medida por factores geográficos como la latitud y forma el microclima de la tierra. Las zonas climáticas de la Tierra se dividen en bandas que coinciden aproximadamente con los paralelos de la Tierra, siguiendo un gradiente latitudinal. La figura de arriba muestra la hora del día en que la radiación solar es más alta.

Claridad Solar en la Ciudad de Manizales

Es evidente que la claridad solar se aproxima más a la realidad que la radiación solar terrestre teórica, ya que tiene en cuenta un factor clave como lo es la nubosidad, siendo los puntos más altos de aprovechamiento de la energía solar los comprendidos entre las horas alrededor del mediodía, dónde luego va haber una decendencia al llegar las horas de la noche de dicha energía. Es importante considerar el factor de claridad

como un factor aleatorio para obtener estimaciones más realistas de la radiación extraterrestre, como se muestra a continuación en los cálculos de un año.

Figura 32. Irradiancia Extraterrestre con Factor de claridad en un año



Fuente: Elaboración propia

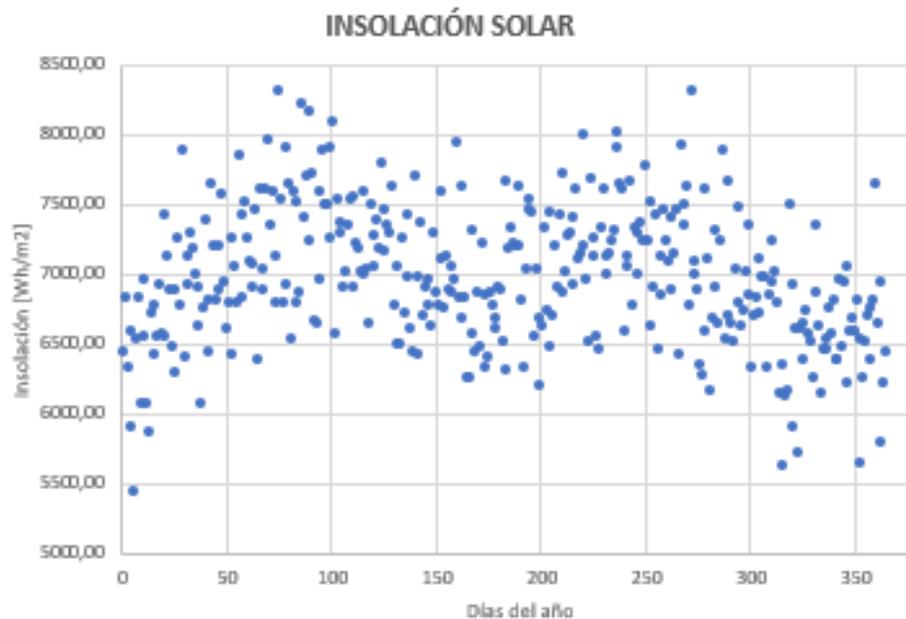
Gráficamente se puede observar que la variación al graficar todos los días 22 de cada mes, va a ser muy poca en la ciudad de Manizales, dónde nuevamente los meses de mayor aprovechamiento serán los primeros del año y los menos meses de aprovechamiento los últimos del año, es decir, gráficamente se puede ver que al analizar el pico más alto de cada mes (hora del medio día o a su alrededor) se tendrá que la energía solar para aprovechamiento será mayor en el mes de abril y mayo a comparación de la irradiancia del mes de noviembre y diciembre que será mucho menor.

Insolación solar en la ciudad de Manizales

Aprovechar la energía solar mediante sistemas fotovoltaicos ha permitido reconocer la importancia científica y tecnológica de la insolación como factor climático fundamental para la transformación de la energía solar en otras energías utilizables.

La insolación al igual que la claridad dependen de un factor aleatorio en la energía en este caso simulando la nubosidad acercándose un poco más a lo real de la irradiancia solar, ya que ésta depende del clima y latitud de la región siendo como objeto de estudio la nubosidad del sector geográfico para el mayor aprovechamiento de la energía solar, teniendo una buena eficiencia en las celdas fotovoltaicas, por lo tanto, se deduce que la insolación depende de la claridad. Además, cabe resaltar que el instrumento ideal para medir la insolación es un heliómetro, un aparato meteorológico diseñado para registrar el número de horas de radiación solar al día que superan un valor fijo, que es prácticamente igual al tiempo de un golpe de calor al sistema fotovoltaico.

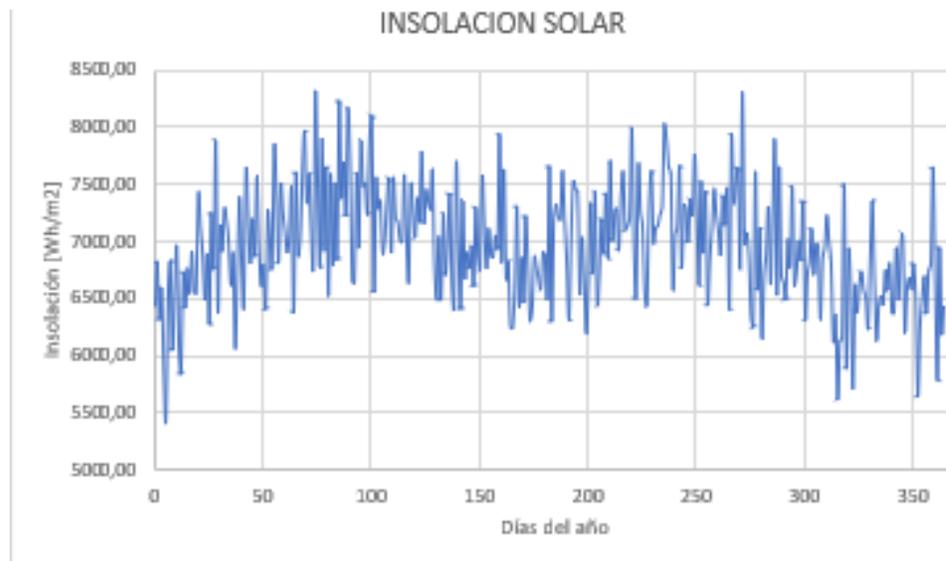
Figura 33. Insolación Solar en la ciudad de Manizales



Fuente: Elaboración propia

Gráficamente la energía solar en Manizales varía poco, y tiene un rango de insolación bastante, aprovechable y útil [entre 5000 y 8000 Wh/m²], concluyendo que sería factible la posibilidad de instalación de las celdas fotovoltaicas.

Figura 34. Insolación Solar en la ciudad de Manizales



Fuente: Elaboración propia

Gráficamente se puede ver una curva de tendencia dónde habrá picos de mayor aprovechamiento de la energía solar (radiación), dónde nuevamente podemos observar que en las horas alrededor del mediodía es donde la insolación será mayor, aunque podemos observar claramente que a las 15:10 hora militar, es decir horas de la tarde hay un pico de insolación mayor esto haciendo dudar que el pico mayor de aprovechamiento sea el medio día, sin embargo, esto depende del clima que varía cada día.

Así mismo, la variación de la energía solar para la ciudad de Manizales es relativamente poca, siendo que los resultados de la insolación solar aquí obtenidos teóricos sean más aproximados a la vida real, ya que tienen en cuenta un factor muy influyente como lo es la nubosidad (claridad), aunque faltaría incluir la contaminación del ambiente, la

topografía y otros aspectos que influyen enormemente en la captación de esta energía en las celdas fotovoltaicas para su mayor aprovechamiento.

Por último, se puede ver que el resultado final de la insolación es la sumatoria de las irradiancias obtenidas cada media hora del día, siendo ésta la irradiancia que captaría las celdas fotovoltaicas para su mayor aprovechamiento.

7.6 Prototipo experimental a la propuesta

Las fichas técnicas de los paneles fotovoltaicos nos dan una serie de parámetros de definición eléctrica, donde se interpretan datos técnicos para entender mejor las fichas y productos que utilizaremos según el requerimiento del cliente y que nos facilita el fabricante. Así, se tendrá un prototipo experimental a la propuesta con una planta solar fotovoltaica inicial de 75Kw, la cual tiene las siguientes características:

Tabla 5–7. Datos del módulo fotovoltaico

Diseño de una planta solar fotovoltaica de 75 Kw								
Datos del módulo								
P_{pk} [W]	V_{oc} [V]	V_{MPP} [V]	I_{MPP} [A]	I_{sc} [A]	α [A/°C]	β [V/°C]	g [%/°C]	NOCT
230	36,9	29,7	7,75	8,35	0,04	0,38	0,47	45

Fuente: Elaboración propia

En donde:

P_{pk} [W] Potencia pico del módulo solar (en vatios)

V_{oc} [V] Voltaje o tensión de circuito abierto (en voltios)

V_{MPP} [V] Voltaje o tensión en el punto de máxima potencia (en voltios)

I_{MPP} [A] Corriente o intensidad en el punto de máxima potencia (en amperios)

I_{sc} [A] Corriente o intensidad de cortocircuito (en amperios)

NOCT Temperatura nominal de operación del módulo (grados centígrados)

De igual manera, cabe aclarar que no todos los paneles solares son iguales, tienen una ligera diferencia, en la cual varía un porcentaje de operación respecto a la corriente, el voltaje y la eficiencia el cual lo representamos de la siguiente manera:

$$\alpha[A/^{\circ}C] \quad | \quad \beta[V/^{\circ}C] \quad | \quad g[\%/^{\circ}C]$$

Por otro lado, tenemos el inversor que es fundamental para los sistemas solares puesto que se le encomienda de la transformación de energía solar cosechada de los módulos fotovoltaicos, la cual es energía continua y se encarga de transformarla en energía alterna para uso final del usuario.

Tabla 6–7. Datos del Inversor fotovoltaico

Datos del inversor					
V_{DCmax}	V_{DCmin}	I_{DCmax}	PPV_{max}	η_{max}	η_{avr}
600	200	180	75000	94%	93%

Fuente: Elaboración propia

En donde:

- V_{DCmax} Tensión en corriente continua máxima
- V_{DCmin} Tensión en corriente continua mínima
- I_{DCmax} Intensidad en corriente continua máxima
- PPV_{max} Potencia del módulo máxima
- η_{max} Eficiencia máxima de operación
- η_{avr} Eficiencia de operación

Por último, en los datos de entrada para el diseño prototipo se tendrá una recolección de datos de las horas solares pico (HSP) de la ciudad de Manizales, halladas teóricamente por medio de la latitud y la temperatura promedio de los meses del año.

Tabla 7–7. Datos generales de horas pico solar y temperatura

Datos de HSP y temperatura												
Datos	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
HSP	18,01	18,95	20,16	20,90	20,75	20,26	20,17	20,61	20,93	20,45	19,22	18,15
Tem	22	23	22	22	22	23	24	23	22	22	22	21

Fuente: Elaboración propia

Luego de tener los datos técnicos de fábrica de cada uno de los dispositivos a usar y definido el sector dónde serán instalados, se prosigue a calcular las distancias del terreno donde se instalarán estos dispositivos, donde se tiene en cuenta específicamente área del terreno y dimensiones del módulo solar fotovoltaico. A continuación, tendremos las ecuaciones básicas para el análisis de las respectivas distancias:

$$d = \frac{h}{\tan(61 - \textit{latitud})}$$

$$h = l_{\textit{panel}} * \textit{Sin}(\beta_{\textit{panel}})$$

Planos inclinados $h1 = l_{\textit{panel}} * \textit{cos}(\beta_{\textit{panel}})$

En donde:

latitud, 5.07 en la ciudad de Manizales

$l_{\textit{panel}}$ Latitud del sector para el panel o módulo solar

h Altura del panel o módulo solar

$(\beta_{\textit{panel}})$ Ángulo del terreno

Tabla 8–7. Análisis de distancias para instalación final

ANÁLISIS DE DISTANCIA MÍNIMA Y ÁREA FINAL					
Latitud	5,07				
Dimensiones del módulo[m]			Opción a elegir	Parte mas angosta en la superficie	
Altura	Ancho	Espesor	Area		h= 1,06
1,68	1,06	0,04	48,23	Dis.minima	h= 0,04
			Dis. entre		
			Area total		
			72,23		
Distancia	0,72	0,02			
Dt	0,96	0,97			
Dimensiones del módulo[mm]					
Altura	Ancho	Espesor			
1682	1062	35			

Fuente: Elaboración propia

Cómo en toda instalación eléctrica es indispensable calcular el área transversal del cable o conductor a utilizar en la instalación del sistema fotovoltaico, para evitar riesgos a futuro se calculará con la siguiente ecuación:

$$S = P \frac{2L \cdot I_{1,2}}{\Delta V}$$

En donde:

- S Área transversal para sistema monofásico
- L Longitud del conductor
- P Potencia del dispositivo fotovoltaico
- I Intensidad o corriente del dispositivo fotovoltaico

Tabla 9–7. Cálculo de la sección de los conductores

CÁLCULO DE LA SECCIÓN DE LOS CONDUCTORES												
Circuito	Longitud	I_m [A]	$I_{25\%}$ [A]	V_m [V]	ΔV [%]	$\Delta V_{[n]}$ [V]	S [mm ²]	S elegida	$\Delta P_{D,c}$ [W]	ΔP_{total} [W]		
Módulos a cuadro DC	25	7,75	9,69	356,4	0,30%	1,0692	8,09	10	5,36	144,82		
Cuadro DC a inversor	12	209,25	261,56	356,4	0,45%	1,6038	69,91	70	268,12	268,12		
inversor a red	16	106	132,77	400	0,55%	2,2	34,49	35	184,22	184,22		
					1,3					597,15		

Eficiencia del cableado	
η_{cond}	0,01
$P_{R_{cond}}$	0,99

Datos del cobre a 20°C	
Resistividad mm ² /m	0,02
Conductividad mm ² /m	55,99
Coefficiente de temperatu	0,01

Fuente: Elaboración propia

En donde cabe resaltar:

- ΔV [%] Regulación de Tensión o Voltaje
- $\Delta V_{[n]}$ [V] Producto entre la regulación y tensión o voltaje nominal
- I_m [A] Intensidad o corriente nominal
- $I_{25\%}$ [A] Intensidad o corriente al 25%

Por otro lado, es importante realizar un análisis de pérdidas generales del sistema fotovoltaico debido que a la hora de la recolección de la energía en la práctica influyen de una u otra manera para afectar la eficiencia de los dispositivos o explícitamente del mismo módulo solar, éstas pérdidas significativas se catalogan principalmente en la temperatura ambiental, temperatura del módulo, en la suciedad o polución de la zona, sombras, cableado entre otras cómo se muestra a en la tabla tabla 10–7. Análisis para factores de pérdidas del sistema y la tabla 11–7. Pérdidas de temperatura para el sistema a continuación:

Tabla 10–7. Análisis para factores de pérdidas del sistema

ANÁLISIS DE FACTORES DE PERDIDAS EN LA PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA										
Pérdidas	Suciedad	Inversor	Disparidad	Cableado	Reflexion	Transformadores	Disponibilidad	Potencia Total		
Valores típicos	0-8	8-10%	2-5%	1-2%	2-6%	1-5%	1-5%	2-10%		
	Inclinación	Sombras	Suciedad	Disparidad	Reflexion	Cableado	Inversor	Transformadores	Disponibilidad	Tolerancia
Pérdidas	0,00%	0,00%	2,00%	2,00%	2,00%	0,65%	7,00%	0,00%	1,00%	2,00%
PR	1	1	0,98%	0,98%	0,98%	0,99	0,93	1	0,99	0,98

Fuente: Elaboración propia

Así mismo, cómo ya mencionado anteriormente existen pérdidas por temperatura por suciedad por el mismo módulo, por la sombras o pérdidas por la misma red (inel) del servicio eléctrico, donde estas pérdidas son calculadas por la ecuación:

$$PR = PR_{TEMP} * PR_{INEL} * PR_{ORI} * PR_{SOMBRAS} * PR_{SUCIEDAD} * PR_{MISMATCH}$$

Tabla 11–7. Pérdidas de temperatura para el sistema

Mes	Tamb	Tmod	P.tem	PR tem	PR. total
Enero	22	53,25	0,03	0,97	0,18
Febrero	23	54,25	0,50	0,50	0,09
Marzo	22	53,25	0,03	0,97	0,18
Abril	22	53,25	0,03	0,97	0,18
Mayo	22	53,25	0,03	0,97	0,18
Junio	23	54,25	0,50	0,50	0,09
Julio	24	55,25	0,97	0,03	0,01
Agosto	23	54,25	0,50	0,50	0,09
Septiembre	22	53,25	0,03	0,97	0,18
Octubre	22	53,25	0,03	0,97	0,18
Noviembre	22	53,25	0,03	0,97	0,18
Diciembre	21	52,25	-0,44	1,44	0,27
Promedios	22,33	53,58	0,18	0,82	0,15

Fuente: Elaboración propia

En donde:

Tamb Temperatura Ambiental

Tmod Temperatura del módulo fotovoltaico

Ptem Porcentaje promedio de temperaturas

PRtem Pérdida de temperatura

Finalmente, luego de la instalación y correspondiente análisis del sistema fotovoltaico se procede a un análisis teórico-práctico la recolección de datos de energía generada por el sistema teniendo en cuenta los factores de pérdidas mencionados anteriormente, este análisis es indispensable puesto que nos evidencia si el diseño teórico logra ser óptimo en campo para uso final del usuario. La potencia será dada en kilovatios hora dependiendo la proyección en un día, una semana o un mes, como se muestra en las tablas a continuación:

Tabla 12–7. Análisis de Generación Teórico anual para el sistema

ANÁLISIS DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD ANUAL TEÓRICO						
Mes	N.días	HSP	pq	kWh _{edía}	kWh _{esgm}	kWh _{esMes}
Enero	31	18,01	0,18	246,56	1725,94	7643,45
Febrero	28	18,95	0,09	134,04	938,27	3753,09
Marzo	31	20,16	0,18	276,07	1932,51	8558,25
Abril	30	20,90	0,18	286,09	2002,60	8582,58
Mayo	31	20,75	0,18	284,02	1988,13	8804,57
Junio	30	20,26	0,09	143,30	1003,09	4298,98
Julio	31	20,17	0,01	9,23	64,61	286,14
Agosto	31	20,61	0,09	145,79	1020,52	4519,43
Septiembre	30	20,93	0,18	286,53	2005,69	8595,82
Octubre	31	20,45	0,18	280,03	1960,22	8680,97
Noviembre	30	19,22	0,18	263,20	1842,41	7896,04
Diciembre	31	18,15	0,27	368,61	2580,27	11426,90
Total Anual						83046,21

Fuente: Elaboración propia

Así mismo, recordar que en un sistema real influyen factores importantes que causan pérdidas que afectaran al sistema ya aludidas anteriormente, en la cuales varia la recolección como se muestra a continuación:

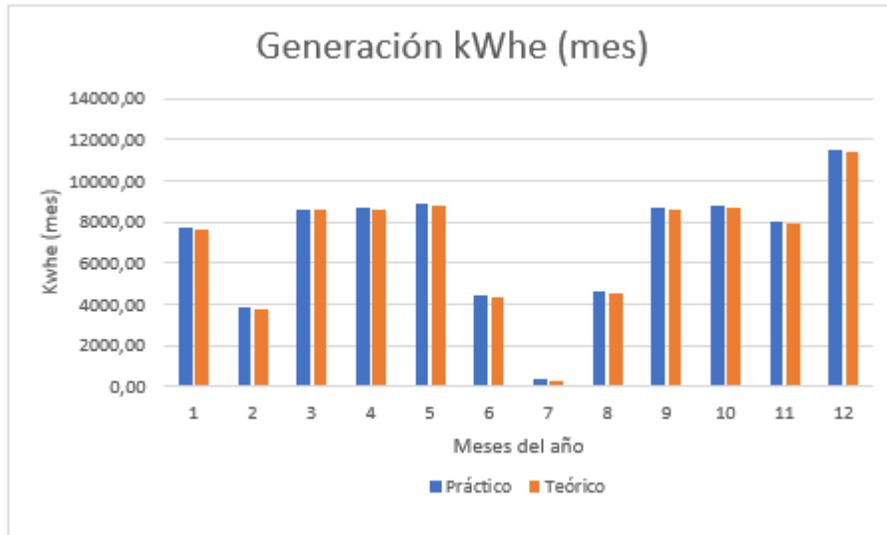
Tabla 13–7. Análisis de Generación Práctico anual para el sistema

ANÁLISIS DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD ANUAL PRÁCTICO						
Mes	N.días	HSP	pq	kWh _{edía}	kWh _{esgm}	kWh _{esMes}
Enero	31	18,01	0,18	249,26	1744,84	7727,15
Febrero	28	18,95	0,09	135,79	950,52	3802,09
Marzo	31	20,16	0,18	278,36	1948,54	8629,24
Abril	30	20,90	0,18	289,34	2025,35	8680,08
Mayo	31	20,75	0,18	287,08	2009,55	8899,43
Junio	30	20,26	0,09	146,17	1023,18	4385,08
Julio	31	20,17	0,01	12,48	87,36	386,89
Agosto	31	20,61	0,09	149,04	1043,27	4620,18
Septiembre	30	20,93	0,18	289,78	2028,44	8693,32
Octubre	31	20,45	0,18	282,90	1980,31	8769,94
Noviembre	30	19,22	0,18	266,25	1863,76	7987,54
Diciembre	31	18,15	0,27	371,48	2600,36	11515,87
Total Anual						84096,80

Fuente: Elaboración propia

Por último, tenemos en un paralelo entre los meses del año de la generación dada por el sistema fotovoltaico instalado en la práctica y lo analizado teóricamente, donde se evidencia en la siguiente gráfica:

Figura 35. Generación Teórico-Práctica en un mes



Fuente: Elaboración propia

Gráficamente, se tiene que los resultados del consumo de la energía eléctrica obtenidos, son un aproximado que representa el consumo diario-mensual para un sistema agrovoltaico promedio; ya que no se tiene en cuenta la variación exacta del día a día, para simular esta generación se utilizó una pequeña variación entre 1 a 3 kilovatio hora y así tener un aproximado un poco más real al consumo del servicio, además resaltar que la variación de error teórico-practica es mínima siendo un sistema eficiente para implementación y uso final de los usuarios. Además, asentar que como se muestra gráficamente el mes de julio no tuvo mucha generación puesta fue un mes de bastantes factores climáticos y esto influyo a la hora de la recolección de la energía solar.

Posteriormente de la recogida de datos y realizar el estudio de generación, se desarrolla una proyección de energía dada en kilovatios para que el usuario final tenga un conocimiento de lo que puede generar el sistema fotovoltaico instalado.

Tabla 14–7. Proyección de generación para varios años

Año	Energía	Año	Energía	Año	Energía
1	84096,80	11	79985,32	21	76074,84
2	83676,31	12	79585,39	22	75694,47
3	83257,93	13	79187,46	23	75316,00
4	82841,64	14	78791,52	24	74939,42
5	82427,43	15	78397,57	25	74564,72
6	82015,30	16	78005,58	26	74191,90
7	81605,22	17	77615,55	27	73820,94
8	81197,19	18	77227,47	28	73451,83
9	80791,21	19	76841,34	29	73084,57
10	80387,25	20	76457,13	30	72719,15

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, considerando las pérdidas y la diferencia teórico-práctica de energía en el sistema fotovoltaico de autoconsumo propuesto de forma experimental, se resalta que el mayor porcentaje de pérdidas es por efecto de la temperatura, las cuales serán mínimas gracias a los cultivos agropecuarios (agrovoltaje) que autorregularán esta temperatura gracias a la humedad producida en ellos, siendo así una existencia de aire que circula por debajo de los módulos solares y los enfría de forma natural.

8. Conclusiones y recomendaciones

8.1 Conclusiones

Es evidente que el planeta necesita transitar hacia fuentes alternativas de energía para mitigar el cambio climático. La tecnología solar FV ofrece grandes ventajas económicas, sociales y ambientales, para la sostenibilidad y resiliencia de los sistemas energéticos, es renovable, limpia, más asequible que los combustibles fósiles y cada vez está generando más empleo.

La dificultad que se presenta en las zonas rurales para su implementación por el área que ocupan los sistemas solares FV, puede sortearse fácilmente, mediante el modelo agrovoltaico con las ventajas descritas anteriormente. Además, el sistema complementario en isla COI, se constituye en una alternativa viable, eficaz y de fácil instalación y mantenimiento para un suministro energético confiable y permanente, siempre que se realicen las labores de mantenimiento regularmente.

Colombia requiere una modernización tecnológica para acompañar las innovaciones en materia energética como la tecnología solar FV, con los avances que se vienen realizando en otros lugares del planeta, y que se inscriben en la 4ª generación agrícola, para hacer más eficiente, resiliente y ambientalmente sostenible la producción agropecuaria en el país. Las experiencias descritas son un referente a tener en cuenta, conforme a las características climatológicas, topográficas, recursos hídricos, etc., particulares de cada región geográfica.

La utilización de la energía solar en agricultura está en sus primeras fases de desarrollo, pero con una tendencia creciente a la expansión en cuanto a sus aplicaciones e innovaciones tecnológicas de última generación. Es de esperarse que su uso se incremente a medida que la conciencia ambiental sea más extendida entre las

poblaciones, los gobiernos y las industrias. Además, la producción a escala industrial, disminuirá los costos de las instalaciones y por tanto su difusión y aprovechamiento, particularmente para el sector agropecuario con miras a una verdadera sostenibilidad productiva y ambiental.

8.2 Recomendaciones

En la actual etapa -señalada por el gobierno colombiano- de transición hacia la producción de energías limpias, y de potenciar la producción agraria en el país mediante un uso más racional del suelo, la agrovoltaica puede convertirse en una gran alternativa, en busca de la seguridad alimentaria, al mejorar la calidad de vida de las comunidades rurales y reducir la fuente de emisión de gases de efecto invernadero para controlar el cambio climático.

Una solución estaría en capacitar a los agricultores y promover campañas institucionales en las zonas rurales, acerca de los beneficios de producción mediante los sistemas agrovoltaicos para mejorar la productividad. Si bien esta transición puede llevar algún tiempo, puede aumentar positivamente el rendimiento de los cultivos y disminuir la degradación ambiental.

Colombia requiere estudios más especializados que permitan la adopción de tecnologías de punta para una mayor eficacia de la energía agrovoltaica, acorde a las condiciones del clima tropical húmedo, y las exigencias energéticas de la producción agraria del país. Se recomienda por tanto, incentivar las investigaciones con carácter intersectorial (público y privado) para diagnosticar el comportamiento de las instalaciones agrovoltaicas con el fin de fijar estándares de equipamiento y realizar estudios sobre impactos sociales y tecnológicos en las comunidades rurales, teniendo en cuenta las consideraciones de los actores locales, el nivel de investigación que posee sobre los sistemas agrovoltaicos y sus ventajas, actitud con respecto a la tecnología, la influencia de posibles agentes externos, condiciones económicas, etc.

A. Anexo:

Información de potencia en instalaciones agrovoltaicas en el mundo

Tipo de instalación	Actividad Agrícola	Australia	Mundo (China, Japón, Corea del Sur, Francia y otros)*	Estados Unidos	Alemania, Austria, Corea del sur e Irlanda	China	Reino Unido
Estructuras comunes	Pastoreo	1,1GW		0,1 GW			50MW
	Hábitat de polinizadores						
	Cultivos						
Estructuras elevadas	Cultivos	2,8 GW				0,7 GW	
Paneles bifaciales verticales	Pastoreo, heno, cultivos y cercas				6,2 MW		
<p>* Incluye estructuras comunes y elevadas en cultivos</p> <p>** Tecnología muy reciente.</p>							

Fuentes: kelsey et al. (2020), Clean Energy Council (2021), Sculock (2014) y Next2sun (2021).

9. Bibliografía

1. XM. Informe mensual ejecutivo. 2012th ed. XM , editor. Medellín, Colombia: XM expertos en mercados; 2016.
2. UPME. Unidad de Planeación Minero Energética UPME Bogotá, Colombia: Recuperado de: <http://bit.ly/2w7WoQo>; 2015.
3. Giraldo M, Vacca R, Urrego A. Las energías alternativas ¿Una oportunidad para Colombia? Bogotá: Escuela de Negocios, Gestión y Sostenibilidad; 2019.
4. Yadav S, Kaushik A, Sharma M, Sharma S. Tecnologías disruptivas en agricultura inteligente: una visión ampliada con análisis de sentimiento. *Agroingeniería* 2022. 2022;; p. 4, 424-460 <https://doi.org/10.3390/agriengineering4020029>.
5. I.P.C.C. Intergovernmental Panel on Climate Change / Climate Change 2014- Pmpacts, Adaptation and Vulnerability: Regional Aspects.. Cambridge;; 2014.
6. Miller A. Agricultura, mejores prácticas Solares. [Online].; 2021 [cited 2022 8 30. Available from: <https://www.sustainability-times.com/low-carbon-energy/solar-energy-and-agriculture-can-benefit-from-one-another/>.
7. Velasco A, Salazar O. Evolución de la Generación de Energía Solar Fotovoltaica en Colombia Santiago de Cali: Universidad del Valle; 2019.
8. REN21. Steering Committee,. Renewables. 2016;; p. http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/05/GSR_2016_Full_.
9. I.E.A. International Energy Agency. London, U.K.; 2014.
10. Berrío LH, Zuluaga C. Smart Grid y la energía solar fotovoltaica para la generación distribuida: una revisión en el contexto energético mundial. *Ingeniería y Desarrollo*. 2014;; p. vol.32 núm. 2, Julio-diciembre 2014, pp. 369-396 disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85232596010>.
11. Sanclemente A. Diseño de un sistema fotovoltaico acoplado a red y tipo ISLA,

- teniendo en cuenta el análisis y seguimiento de las normas Retie para incorporarlo a la empresa certicol S.A.S Municipio de Cali- Valle. Popayán: Corporación Universitaria Autónoma del Cauca/ Tesis de Grado. Facultad de Ingenierías; 2015.
12. Valderrama M, Ocampo P, Gracia L, Rodríguez U. La gestión para cadena de suministro de sistemas de energía solar FV en Colombia y su situación solar. *Avances: Investigación en Ingeniería*. 2018 Mar; 15(1)(15 112-130 DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.1368>).
 13. Council WE. World Energy Trilemma Priority actions on climate change and how to balance the trilemma. 53rd ed. WEC , editor. London: WEC; 2015.
 14. Pérez C. Technological revolutions, paradigm shifts and socio-institucional change. *Globalization, economic development and inequality: An alternative perspective*. 2004;; p. 217-242.
 15. Blanchard A. Mouchot: La chaleur solaire et ses applications industrielles París: Gauthier-Villars; 1980.
 16. Ruiz S. Análisis de la implementación de energía renovable como método alternativo de generación de electricidad en el Ecuador Quito, Ecuador: Tesis de Grado/ Pontificia Universidad Católica del Ecuador. ; 2013.
 17. Ramírez S, Cano E. Descripción General de los Disturbios más Comunes". en *Calidad del Servicio de Energía Eléctrica*,. Manizales, Colombia pp. 371;; 2006.
 18. Arias M. Arias, M (2012, octubre). Redes de Distribución de EE: Desafíos y tendencias. Comunicación presentada en la reunión anual del comité de energía de AUGMrf. Montevideo, Uruguay;; 2012.
 19. Marín J, Carvajal S. Modelo híbrido de simulación para la Implementación del Servicio Complementario de Capacidad de Operación por Islas utilizando dinámica de sistemas y aprendizaje automático. *Revista Espacios*. 2017;; p. Vol 38 (No. 53) 12.
 20. Jiménez JD. [ebook]. [Online].; 2017 [cited 2019 5 7. Available from: [Available at: http://www.bdigital.unal.edu.co/60937/1/1060647673.2017.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/60937/1/1060647673.2017.pdf) [Accessed 12 May 2019].
 21. Abello E, Bernal W. Prototipo para la orientación automática de paneles solares. *Revista Publicaciones e Investigación..* 2016;; p. Vol. 11 Número 1: 103-111, enero-julio 2017 ISSN: 1900 - 6608 e 2539 - 4088.

22. Besnier F. La Energía Solar en Agricultura/ Publicaciones de Extensión Agraria. Hojas Divulgadoras. 2015;; p. Núm 11 pp. 12-80 Madrid.
23. IEEE. [Distribution System Analysis Subcomitte/ IEE 37 Node Test Feeder/ IEEE Power Engineering Society].; 1992.
24. Rusko R. The redefined role of consumer as a prosumer: Value co-creation, coopetition. Production and Manufacturing System. Managment: Coofdination Approaches and Multi-Site Planning. 2012;; p. 162-174.
25. ENTSO-E. ENTSO-E Metadata Repository. [Online].; 2015 [cited 2021 7 4. Available from: <https://emr.entsoe.eu/glossary/bin/view/>.
26. Rodríguez H. Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. Revista de Ingeniería. 2009;; p. revista de ingenieríaUniversidad de los Andes. Bogotá, Colombia. rev.ing. ISSN. 0121-4993.
27. SIEL. La evolución de la distribución y comercialización de energía eléctrica en Colombia. [Online].; 2013 [cited 2021 01 01. Available from: <http://www.siel.gov.co/LinkClick.aspx?fileticket=UyZjfzsXXmk%3d&tabid=58>.
28. Marín-Jiménez J. Análisis para la provisión del servicio complementario de capacidad de operación por islas a partir de Recursos Energéticos Distribuidos en ambientes desregulados. Manizales: Universidad Nacional de Colombia/ FAculata de Ingeniería y Arquitectura/ Teis doctoral; 2017.
29. Rodríguez M. 18 años de experiencia del CIES en electrificación rural fotovoltaica. Perspectivas. 2017;; p. Seminario Internacional. Energía Solar, Medio Ambiente y Desarrollo, Cusco. disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/319991205>.
30. Congreso de Colombia. Ley 1855 de 2013, por la cual se definen las zonas no interconectadas. Bogotá;; 2013.
31. AOCODIS. Análisis de pérdidas no técnicas de las empresas de distribución eléctrica. Bogotá;; 2004.
32. Prias O, Montaña D. Modelo estratégico de innovacion para impulsar la gestión energética en Colombia. Energética. 2014 Apr; 3(44, 61-68).
33. República de Colombia. Ley 1715 de 2014 "Por medio de la cual se promueve e

- incentiva el uso de paneles solares y paneles fotovoltaicos”. Bogotá, Colombia; 2014.
34. González J. Análisis técnico para la implementación de la capacidad de operación por isla a partir de la generación distribuida proveniente de cogeneración Manizales: Universidad Nacional/ Tesis de Grado Facultad de Ingeniería y Arquitectura; 2021.
 35. IDEAM. Atlas de Radiación Solar de Colombia Bogotá, Colombia: Ministerio de Minas y Energía. INEA-HIMAT; 2009.
 36. Arribas C. Análisis del balance neto fotovoltaico Madrid, España: Universital Carlos III de Madrid, España; 2012.
 37. Aldana A, Rodríguez D. Complementarity of energy resources for the electrical generation: a review. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. 2019; p. vol. 29(2) Julio-diciembre de 2019.
 38. Weber P. Diseño e Implementación de Plataforma SCADA para Sistemas de Electricidad Sustentable en la Localidad de Huatacondo. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Tesis de grado. Ingeniería Civil-Eléctrica; 2011.
 39. Chowdhury SP, Crossley P, Chowdhury S. *Microgrids and active Distribution Networks*. London: Institution of Engeneering and Tchnology; 2009.
 40. Mohamad H, Mokhlis H, Bakar A, Ping H. A review on islanding operation and control for distribution network connected with small hydro power plant. *Renewable and sustainable energy Reviews*. 2011 Jul; 15(8), (3598-3963 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.06.010>).
 41. Joos G, Ooi B, McGillis D, Galiana F, Marceau R. The potencial of distributed generation to provide ancillary services. *Power engineering society summer meeting* (cat. no.00ch37134) (Vol. 3, p. 1762 1767 vol. 3). doi: 10.1109/PESS.2000.868792. 2000; p. (cat. no.00ch37134) (Vol. 3, p. 1762 1767 vol. 3). doi: 10.1109/PESS.2000.868792.
 42. Arriola FJ. *Perturbaciones más habituales en un sisstema eléctrico* Madrid: Bilbao; 2000.
 43. Procolombia. *Inversión en el Sector de Energía Bogotá, Colombia*: Recuperado de: <https://www.inviertaencolombia.com.co/sectores/servicios/energia.html>; 2019.

44. Hahn A, Flores C, Schmidt R. Photovoltaic water pumps-lessons learned from demonstration and field testing projects supported by GTZ. International Workshop on PV. 2008;; p. Disponible en: <http://www.gtz.de/pvp/english/sen04.asp>.
45. Sioishansi FP. Integrating Renewable, Distributed, & Efficient Energy. Elsevier. 2011 Sep; 7(Issue 2).
46. Kirby B. Ancillary Services: Technical and commercial insights. [Online].; 2007 [cited 2021 4 6. Available from: [Retrieved, October 4, 2021](#).
47. Gutiérrez-Urdaneta L. La simbiosis de la generación fotovoltaica y la agricultura. Revista Granmense de Desarrollo Local. 2022;; p. 191-207, Disponible en: redel@udg.co.cu <https://redel.udg.co.cu>.
48. Martínez A. Estudio y simulación de métodos de detección de Isla para convertidores Sevilla, España: Universidad de Sevilla/ Tesis de Grado. Escuela Técnica superior de Ingeniería; 2017.
49. Díaz-Rodríguez J, Pabón L, Pardo A. Sistema híbrido de energía utilizando energía solar y red eléctrica. Lámpsakos. 2011;; p. No. 7 | PP. 69-77 | enero-junio | 2012 | ISSN: 2145-4086 | Medellín - Colombia.
50. Sunssply. Componentes de un sistema de energía solar Bogotá: Recuperado de: info@sunsupplyco.com; 2017.
51. Miranda V, Fabricio P, Epn N, Que A. Propuesta para lograr la Operación en Isla Intencional de un Sistema real de Distribución que dispone de Generación Distribuida.. Politécnica. 2017 Apr; 7(27, 201–208.).
52. Palizban O, Kauhaniemi K, Guerrero J. Microgrids in active network management – part II: System operation, power quality and protection. Renewable and sustainable energy reviews. 2014 Apr; 36(0)(440-451).
53. Van-Campen B, Guidi D, Best G. Energía solar fotovoltaica para la agricultura y desarrollo rural sostenibles. Roma;; 2000.
54. CELSIA. Paneles solares, como funcionan y qué son. [Online].; 2019 [cited 2022 3 4. Available from: [Diosponible en: https://www.celsia.com/es/blog-celsia/paneles-solares-como-funcionan-y-que-son/](https://www.celsia.com/es/blog-celsia/paneles-solares-como-funcionan-y-que-son/).
55. Romoacca J. Estudio comparativo de potencia generada por paneles fotovoltaicos

- monocristalinos y policristalinos en la Universidad Nacional de San Antonio ABAD del Cusco. Cusco, Perú: Universidad Nacional de San Antonio ABAD. Cusco, Perú; 2018.
56. Gimeno F, Soguí S, Orts S. Convertidores electrónicos: Energía solar fotovoltaica, aplicaciones y diseño Valencia, España: Universidad politécnica de Valencia / Disponible en: www.editorial.upv.es ; 2011.
57. Celik A. Effect of different load profiles on the loss-of-load probability of stand-alone photovoltaic systems. *Renewable Energy*. 2007 Nov; 32(12).
58. Branker K, Pahak M, Pearce JM. A Review of Solar Photovoltaic Levelized Cost Electricity. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2011 Sep; 15(4470 doi:10.1016/j.rser.2011.07.104. Open access).
59. Swanson RM. Photovoltaics Power Up. *Science*. 2009 May; 7(324 (5929) 891-2 doi:10.1126/science.1169616.).
60. Barbosa J. Estudio comparativo entre variables fotovoltaicas de dos sistemas de paneles solares (Monocristalino y policristalino) en Bogotá. Bogotá: Tesis de Maestría. Univesidad Sergio Arboleda. Escuela de Posgrados; 2013.
61. Brakels R. Bifacial Solar Panels May Dominate Australian Solar Farms. *Solarquotes*. 2021;; p. disponible en: <https://www.solarquotes.com.au/blog/bifacial-panels-solar-farms/>.
62. Pv Magazine. Colombia podría obligar a las comercializadoras a consumir energía renovable. *Pv Magazine- Noticias*. 2019;; p. Recuperado de: <https://www.pv-magazine-latam.com/2019/08/13/colombia-podria-obligar-a-las-comercializadoras-a-consumir-un-10-de-energia-renovable>.
63. Plan Nal de Desarrollo 2018-2022. Plan Nacional de Desarrollo / República de Colombia. In ; 2018; Bogotá, Colombia.
64. Wildi T. *Electrical Machines, Drives and Power Systems*. 1st ed. Pearson , editor. London: Prentice Hall; 2006.
65. Gopalan S, Sreeram V, lu H. A review of coordination strategies and protection schemes for microgrids. *Renewable an sustainable energy reviews*. 2014 Aug; 32(22-228 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.037>).
66. Mathur HD. Enhancement of power system quality using distributed generation. In

- IEEE International Conference on Power and Energy; 2010; <https://doi.org/10.1109/PECON.2010.5697646>. p. 567-572.
67. DTI. Islanded Operation of Distribution Networks (Inf. tec). United Kingdom.; 2005.
68. PNUD. Informe anual sobre el acceso de la población mundial al agua potable. Ginebra: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, ONU; 2017.
69. FAO/WEC. World Energy Council; Dutkiewicz, Richard, e.a; The Challenge of Rural Energy Poverty in Developing Countries. Joint FAO report. Ginebra, Suiza: FAO/WEC; 1999.
70. Iberdrola. Energía solar y agricultura. [Online].; 2020 [cited 2022 7 6. Available from: <https://www.iberdrola.com/innovacion/energia-agrovoltaica> [Agrovoltaica](https://www.iberdrola.com/innovacion/energia-agrovoltaica) [Energía solar y agricultura](https://www.iberdrola.com/innovacion/energia-agrovoltaica).
71. Toscano E. Tecnología solar Agrovoltaica para mejorar el rendimiento de los cultivos Madrid: disponible en: <https://toscano.es/2022/03/30/agrovoltaica-mejorar-rendimiento-cultivos/>; 2022.
72. Rodríguez M. 18 años de experiencia del CIES en electrificación rural fotovoltaica.. Perspectivas. 1017;; p. Seminario Internacional. Energía Solar, Medio Ambiente y Desarrollo, Cusco. disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/319991205>.
73. Scurlock J. Agricultural good practice guidance for solar farms. BRE. 2014;; p. Recuperado de: www.bre.co.uk/nsc.
74. GreenID. Dual-use approaches for solar energy and food production. International experience and potentials for Vietnam. Green Innovation and Development Centre. 2019;; p. disponible en: http://rainer-brohm.de/wp-content/uploads/2019/02/Dual-use-approaches-for-solar-energy-and-food-production-international-experience_en.pdf.
75. Clear Energy Council. Australian guide to agrisolar for large-scale solar. Solarquotes. 2021;; p. Recuperado de: <https://assets.cleanenergycouncil.org.au/documents/resources/reports/agrisolar-guide/Australian-guide-to-agrisolar-for-large-scale-solar.pdf>.
76. Scognamiglio A, Garde F, Ratsimba T, Monnier A, Scotto E. Photovoltaic greenhouses: a feasible solution for islands?. Design solar energy. 2015;; p.

disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/271522951>.

77. Graham M,MA, Moldenke A, DeBano S, Best L&HC. Partial shading by solar panels delays bloom, increases floral abundance during the late-season for pollinators in a dryland, agrivoltaic ecosystem. *Scientific Reports*. 2021;; p. 11:7452 disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86756-4> www.nature.com/scientificreports.
78. Next2sun. Agrivoltaics-Solar fence. *References*. 2021;; p. Germany. disponible en: <https://www.next2sun.de/en/references/>.
79. Mierzwiak M, Calka B. Multi-criteria analysis for solar farm location suitability. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*. 2017;; p. 104. DOI: 10.1515/rgg-2017-0012 Polonia.
80. Riaz M, Younas R, Imran H, Alam M, Butt N. Module technology for agrivoltaics: vertical bifacial vs. tilted monofacial farms. *Journal of Photovoltaics*. 202;; p. [rXiv:1910.01076v2](https://arxiv.org/abs/1910.01076v2) [physics.app-ph].
81. Viera J, Bonessi G. *IEEE 7o. Encuentro de Energía, Potencia, Instrumentación y Medidas*. Montevideo, Uruguay;; 2008.
82. *Ejemplos de Investigación Experimental*.2022. <https://www.ejemplos.co/investigacion-experimental/>