



**DIAGNÓSTICO, PERSPECTIVAS Y DESEMPEÑO DE LA
ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN EL DEPARTAMENTO DE
CALDAS**

LUISA FERNANDA ECHEVERRY CARDONA

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MANIZALES
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MANIZALES, COLOMBIA
2018**

**Diagnóstico, perspectivas y desempeño de la energía solar fotovoltaica en el
Departamento de Caldas**

Luisa Fernanda Echeverry Cardona

Proyecto de trabajo de grado para optar al título de:

Magister en Ingeniería

Director (a):

PhD. Francy Nelly Jiménez García

Codirector (a):

PhD. Olga Lucia Ocampo López

Línea de Investigación:

Línea de gestión de tecnología

Grupo de Investigación:

Física y Matemática con énfasis en la formación de ingenieros

Diseño Mecánico y Desarrollo Industrial

Universidad Autónoma de Manizales

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería

Manizales, Colombia

2018

DEDICATORIA

A mis padres Juan Carlos y Lucelly, a quienes amo profundamente por haberme brindado su comprensión, apoyo y amor incondicional durante todo mi proceso de maestría, por sus consejos y por creer en mí.

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Autónoma de Manizales por su apoyo en el proceso de aprendizaje de la maestría y en el desarrollo del proyecto de investigación.
- A la Dra. Francly Nelly Jiménez y a la Dra. Olga Lucia Ocampo, por dar su voto de confianza a mí tema de investigación y por sus aportes día a día a mi proyecto de grado a través de su apoyo incondicional y valiosas enseñanzas.
- A mi hermana, mi novio y mi familia por su amor, apoyo incondicional y darme ánimo para continuar.
- A mis compañeros de maestría por haber sido un apoyo constante frente a los nuevos retos que se nos presentaban en el transcurrir de la maestría.
- A la Ingeniera y Joven Investigadora Alejandra María Restrepo por sus aportes en esta investigación y su apoyo constante.
- Al Servicio Nacional de Aprendizaje SENA regional Manizales por haberme permitido realizar el análisis de los sistemas en el ambiente de energías renovables.
- Al profesor Gerardo Arias por su apoyo en la culminación del análisis de los SSFV analizados en el SENA.
- A mis jefes y compañeros de trabajo de la Torre Emblemática Multifuncional de la Universidad de Manizales por el apoyo y el espacio que me dieron para la realización de la maestría.
- Y a todos aquellos que contribuyeron de una u otra forma a la culminación exitosa de este proceso.

RESUMEN

En este trabajo se presenta un diagnóstico sobre los sistemas solares fotovoltaicos instalados en el Departamento de Caldas, a partir de la aplicación de un instrumento de recolección de información, el cual permitió conocer los sistemas existentes, sus características y el grado de satisfacción en su uso. Además se realizó una estimación de potencial de radiación solar en el Departamento de Caldas a partir de información climática de tres estaciones meteorológicas de la base de datos del Instituto de Estudios Ambientales IDEA de la Universidad Nacional sede Manizales y de tres estaciones remotas de las bases de datos de la NASA y la National Solar Radiation Database NSRDB. Con esta información se obtuvieron el promedio histórico diario mensual, la radiación solar mensual, y la radiación solar anual, y se realizaron análisis estadísticos descriptivos e inferenciales. Finalmente, se realizó el análisis del desempeño energético de tres sistemas solares instalados en el Servicio Nacional de Aprendizaje SENA Regional Manizales, en los cuales se determinaron las características de rendimientos, eficiencias y performance ratio de cada uno. El conocimiento de los sistemas solares existentes en la región, de la radiación solar en diferentes sitios del departamento y del desempeño energético bajo las condiciones ambientales propias del departamento permitió establecer perspectivas para la implementación de esta forma de energía en Caldas.

Palabras Clave: Energía solar fotovoltaica, radiación solar, rendimiento energético, performance ratio.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción.....	17
2. Planteamiento del problema de investigación y su justificación.....	22
2.1 Descripción del área problemática.....	22
2.2 Formulación del problema.....	24
2.3 Justificación.....	25
2.4 Objetivo general.....	27
2.5 Objetivos específicos.....	27
3. Antecedentes.....	28
4. Referente Contextual.....	36
5. Referente Normativo y legal.....	40
6. Referente teórico.....	43
6.1 Energías renovables.....	43
6.1.1 Energía solar térmica.....	43
6.1.2 Energía solar fotovoltaica.....	44
6.2 Tipos de tecnologías de celdas solares.....	45
6.2.1 Celdas solares de primera generación.....	45
6.2.2 Celdas Solares segunda generación.....	46
6.2.3 Celdas solares de tercera generación.....	47
6.2.4 Celdas solares de cuarta generación.....	48
6.3 Generación de energía solar fotovoltaica.....	49
6.3.1 Sistema solar fotovoltaico ON GRID.....	50
6.3.2 Sistema solar fotovoltaico OF GRID.....	50
6.3.3 Sistema solar fotovoltaico híbrido.....	50
6.3.4 Elementos para implementar un sistema solar.....	51
6.4 Radiación.....	52
6.4.1 Unidades de medida de la radiación solar.....	52
6.4.2 Irrradiación global horizontal media diaria.....	53
6.4.3 Tasas de captación de radiación y temperatura en estaciones climatológicas.....	55

6.5	Parámetros de eficiencia de un sistema solar fotovoltaico.....	56
6.5.1	Energía solar diaria recibida por el generador fotovoltaico E_{solar}	56
6.5.2	Energía diaria generada en continua E_{DC}	56
6.5.3	Energía diaria generada en alterna E_{AC}	56
6.5.4	Rendimientos en los SSFV.....	57
6.5.5	Rendimiento energético de la instalación o performance ratio PR.....	58
6.5.6	Productividad diaria o Yield.....	58
6.5.7	Pérdidas por temperatura.....	59
7.	Metodología.....	61
7.1	Tecnologías y Aplicaciones de la energía solar en Caldas.....	61
7.2	Estimación del potencial de radiación solar.....	66
7.3	Desempeño energético de sistemas instalados.....	68
8.	Resultados.....	74
8.1	Caracterización de tecnologías y aplicaciones de la energía solar en Caldas.....	74
8.1.1.	Descripción general de los sistemas encontrados.....	74
8.1.2.	Análisis por categorías de las respuestas dadas al instrumento.....	88
8.2	Estimación del potencial de radiación solar.....	102
8.2.1.	Radiación solar diaria estaciones meteorológicas.....	103
8.2.2.	Radiación solar diaria estaciones remotas.....	107
8.2.3.	Radiación solar mensual estaciones meteorológicas.....	123
8.2.4.	Radiación solar mensual estaciones remotas.....	124
8.2.5.	Radiación solar anual estaciones meteorológicas.....	129
8.2.1.	Radiación solar anual estaciones remotas.....	129
8.2.2.	Mapas de radiación solar.....	132
8.3	Desempeño energético de algunos SSFV instalados en el Departamento de Caldas.....	135
8.3.1	Irradiancia para los tres sistemas solares fotovoltaicos.....	135
8.3.2	Análisis SSFV monocristalino On Grid.....	137
8.3.3	Análisis SSFV policristalino On Grid.....	144
8.3.4	Análisis SSFV policristalino Off Grid.....	151
8.3.5	Comparación del rendimiento de los tres sistemas analizados.....	157
8.3.6	Performance ratio de los tres sistemas analizados.....	161
9.	Discusión de Resultados.....	163
10.	Conclusiones.....	167

11. Recomendaciones	171
12. Referencias Bibliográficas	172
13. Anexos	176
13.1 Anexo 1. Instrumento de Evaluación diseñado.....	176
13.2 Anexo 2. Metodología para descargar bases de datos.....	182
13.3 Anexo 3. Análisis diario SSFV.....	187
13.4 Anexo 4. Publicaciones y participación en eventos.....	202

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Municipios del Departamento de Caldas.....	36
Tabla 2. Porcentaje de cobertura de energía CHEC 2017	38
Tabla 3. Resumen de estaciones analizadas y sus características.....	68
Tabla 4. Descripción de los SSFV encontrados	75
Tabla 5. Resumen valores de radiación solar estaciones remotas NASA y NSRDB.....	134
Tabla 6. Resumen valores de radiación solar estaciones meteorológicas IDEA.....	134

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografía 1. Sistema de paneles solares fotovoltaicos	29
Fotografía 2. Sistema de paneles solares conectado a la red.....	30
Fotografía 3. Sistema de paneles solares Universidad Nacional sede Manizales	31
Fotografía 4. Cobertura de energía CHEC 2017	38
Fotografía 5. Energía solar térmica	44
Fotografía 6. Evolución de las tecnologías de células fotovoltaicas	49
Fotografía 7. Irradiación horizontal media diaria para Colombia	54
Fotografía 8. Regiones del Departamento de Caldas	65
Fotografía 9. Inversor ABB sistemas ON GRID.....	69
Fotografía 10. Características de entradas sistema solar fotovoltaico 1.....	70
Fotografía 11. Características de entradas sistema solar fotovoltaico 2.....	70
Fotografía 12. Sistemas solares fotovoltaicos analizados SENA	71
Fotografía 13. Inversor cargador Out Back con regulador FLEXmax80.....	71
Fotografía 14. Sistema solar fotovoltaico Banco de la República.....	77
Fotografía 15. SSFV Concentrados del Centro – Manizales.....	78
Fotografía 16. SSFV monocristalino 2040W	79
Fotografía 17. SSFV policristalinos Off Grid (Derecha) y On Grid (Izquierda)	79
Fotografía 18. SSFV vereda playa larga finca La Fonda	80
Fotografía 19. SSFV municipio de Chinchiná.....	81
Fotografía 20. SSFV cargador de equipos móviles La Rochela.....	81
Fotografía 21. Instalación solar fotovoltaica Finca rural Filadelfia	82
Fotografía 22. Luminaria con energía solar parque Riosucio	83

Fotografía 23. Luminarias restaurante La Roca Riosucio	84
Fotografía 24. Sistema solar fotovoltaico SENA La Dorada	86
Fotografía 25. Sistema solar fotovoltaico vivienda Pancoger La Dorada	87
Fotografía 26. Mapa de radiación solar 1981-2010.....	132
Fotografía 27. Radiación solar Departamento de Caldas 1981-2010.....	133
Fotografía 28. Mapa de radiación solar global Departamento de Caldas 2010.....	134

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistemas de energía solar fotovoltaicas en Caldas	76
Figura 2. Conocimiento de las energías renovables no convencionales.....	89
Figura 3. Tipo de generación solar fotovoltaica instalada.....	91
Figura 4. Potencia pico instalada de los SSFV encontrados.....	91
Figura 5. Instalación del sistema en áreas rurales y urbanas	93
Figura 6. Sectores con aplicaciones de SSFV en el Departamento de Caldas	93
Figura 7. Tiempo de uso de los SSFV	95
Figura 8. Inversión en el SSFV instalado	96
Figura 9. Mantenimiento al sistema de generación de energía solar instalado	98
Figura 10. Estado actual de los SSFV	100
Figura 11. Cumplimiento de expectativas del sistema solar	100
Figura 12. Grado de satisfacción con el sistema instalado	101
Figura 13. Radiación solar diaria en estaciones meteorológicas de Manizales.....	103
Figura 14. Radiación solar media estaciones IDEA 2005-2016.....	105
Figura 15. Diagrama de cajas de la radiación solar en estaciones IDEA	106
Figura 16. Promedio diario mensual multianual en la estación Manizales	108
Figura 17. Radiación solar media estación Manizales	110
Figura 18. Promedio diario mensual multianual en la estación Chinchiná	112
Figura 19. Radiación solar media estación Chinchiná	113
Figura 20. Promedio diario mensual multianual en la estación Norcasia	115
Figura 21. Radiación solar media estación Norcasia.....	116
Figura 22. Radiación solar estaciones remotas.....	117

Figura 23. Diagrama de caja radiación solar estaciones remotas	119
Figura 24. Temperatura estaciones remotas	121
Figura 25. Diagrama de caja temperatura estaciones remotas.....	122
Figura 26. Radiación solar mensual estaciones meteorológicas.....	124
Figura 27. Radiación mensual estación remota Manizales.....	125
Figura 28. Radiación mensual estación remota Chinchiná.....	127
Figura 29. Radiación mensual estación remota Norcasia.....	128
Figura 30. Radiación solar anual estaciones meteorológicas-IDEA	130
Figura 31. Radiación solar histórica anual estaciones remotas	131
Figura 32. Irradiancia	136
Figura 33. Radiación promedio del día estaciones metrológicas	136
Figura 34. Pcc y Pca SSFV monocristalino On Grid	138
Figura 35. Pcc en función de la irradiancia del SSFV monocristalino On Grid.....	138
Figura 36. Pca en función de la irradiancia del SSFV monocristalino On Grid.....	139
Figura 37. Rendimiento del inversor del SSFV monocristalino On Grid	140
Figura 38. Rendimiento del generador del SSFV monocristalino On Grid en función de la irradiancia	141
Figura 39. Rendimiento del generador del SSFV monocristalino On Grid en función de la temperatura del módulo.	142
Figura 40. Perdidas instantáneas por temperatura SSFV monocristalino On Grid	143
Figura 41. Pcc y Pca SSFV policristalino On Grid	145
Figura 42. Pcc en función de la irradiancia del SSFV policristalino On Grid	145
Figura 43. Pca en función de la irradiancia del SSFV policristalino On Grid	147
Figura 44. Rendimiento del inversor del SSFV policristalino On Grid	148

Figura 45. Rendimiento del generador en función de la irradiancia del SSFV policristalino On Grid.....	149
Figura 46. Rendimiento del generador en función de la temperatura del módulo del SSFV policristalino On Grid.....	150
Figura 47. Perdidas instantáneas por temperatura SSFV policristalino On Grid.....	150
Figura 48. Pcc y Pca SSFV policristalino Off Grid.....	151
Figura 49. Pcc en función de la irradiancia del SSFV policristalino Off Grid.....	152
Figura 50. Pca en función de la irradiancia del SSFV policristalino Off Grid.....	153
Figura 51. Rendimiento del inversor del SSFV policristalino Off Grid.....	154
Figura 52. Rendimiento del generador en función de la irradiancia del SSFV policristalino Off Grid	155
Figura 53. Rendimiento del generador en función de la temperatura del módulo del SSFV policristalino Off Grid	156
Figura 54. Perdidas instantáneas por temperatura SSFV policristalino off grid	156
Figura 55. Rendimiento de los generadores de energía.....	157
Figura 56. Rendimiento de los inversores	158
Figura 57. Rendimiento de los sistemas	159
Figura 58. Yield parcial de los sistemas	160
Figura 59. Performance ratio de los sistemas	162
Figura 60. Irradiancia	187
Figura 61. Corriente continua.....	188
Figura 62. Potencia en corriente continua y potencia en corriente alterna.....	189
Figura 63. Potencia en corriente continua vs Irradiancia	190
Figura 64 .Potencia en corriente alterna vs Irradiancia	191

Figura 65. Corriente continua vs Irradiancia	192
Figura 66. Porcentaje de rendimiento del inversor.....	193
Figura 67. Porcentaje de rendimiento del generador en función de la irradiancia	194
Figura 68. Porcentaje de rendimiento del generador en función de la temperatura del modulo	194
Figura 69. Porcentaje de rendimiento del generador durante el día	196
Figura 70. Porcentaje de rendimiento del inversor durante el día	196
Figura 71. Porcentaje de rendimiento del sistema durante el día	197
Figura 72. Yield parcial durante el día	199
Figura 73. Performance ratio durante el día	200

LISTA DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS

Superíndices

Superíndice	Término
N	Exponente, potencia

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>GW</i>	Gigawatios
<i>MW</i>	Megawatios
<i>SIN</i>	Sistema interconectado nacional
<i>EPM</i>	Empresas públicas de Medellín
<i>IPSE</i>	Ingeniería y proyectos en sistemas energéticos
<i>GIEN</i>	Grupo de investigación en energías
<i>EPSA</i>	Energía del pacífico
<i>kW</i>	Potencia en kilowatios
<i>CO₂</i>	Dioxido de carbono
<i>kV</i>	Tensión en kilovoltios
<i>W</i>	Potencias en watios
<i>SENA</i>	Servicio nacional de aprendizaje
<i>FNCER</i>	Fuentes no convencionales de energía renovable
<i>PERL</i>	Passivated Emitter Rear Locally Cells
<i>CuInSe₂ o CIS</i>	Seleniuro de cobre e indio
<i>Cu (InGa) Se₂ o CIGS</i>	Diseleniuro de cobre, indio y galio
<i>CdTe</i>	Telurio de cadmio
<i>Si-a</i>	Silicio amorfo
<i>GaAs</i>	Arseniuro de Galio
<i>DSSC</i>	Celdas solares sensibilizadas con colorante
<i>TiO₂</i>	Oxido semiconductor poroso
<i>W/m²</i>	Watios por metro cuadrado
<i>SSFV</i>	Sistema solar fotovoltaico
<i>SIN</i>	Sistema interconectado nacional
<i>CHEC</i>	Central Hidroeléctrica de Manizales
<i>EPM</i>	Empresas Públicas de Medellín
<i>GEE</i>	Grupo de estudios económicos

1. INTRODUCCIÓN

La energía solar ha tenido a través de los años un crecimiento considerable que la ha llevado a convertirse en la tercera energía renovable más importante después de la energía hidroeléctrica y de la energía eólica. Europa es el número uno en cuanto a la generación de energía solar con 51 GW de capacidad instalada, seguida por Japón (5 GW), EE. UU. (4,4 GW) y China, muy por detrás de Europa, con 3,1 GW (Roca, 2016). La Energía solar fotovoltaica ha experimentado este crecimiento debido a la necesidad de asumir los retos que en materia de generación de energía se presentan en el mundo actual. Las reglamentaciones de las energías renovables de algunos países, como España, han propiciado un gran incremento de la capacidad de fabricación, distribución e instalación de esta forma de energía (EPIA, 2011).

En cuanto a la instalación de sistemas solares fotovoltaicos en el mundo se tiene que al menos 40 GW se instalaron a nivel mundial en 2014, frente a 37 GW en 2013, lo que estableció un récord para el sector solar fotovoltaico. Debido a los resultados de generación obtenidos en el 2014 con respecto al año 2013 se proyectó una marca de 540 GW a nivel mundial en un lapso de cinco años, que da cuenta del crecimiento que está presentando la energía solar (Solar Power Europe, 2014). En 2014 la generación con energías renovables aumento más rápido, lo cual se vio representado en instalaciones conectadas a la red de 130 GW a nivel mundial. Las estimaciones mostraban que el crecimiento iba a seguir siendo ascendente para el año 2015 dejando ver un buen camino para las energías renovables. Para el año 2015, la República Popular de China ocupaba el mercado más grande con un 23% de

la generación global, seguida por la Unión europea con un 17% y de Estados Unidos de América con 11%. La energía solar fotovoltaica cubre más del 7% de la demanda de energía eléctrica en 3 países de Europa: Italia, Alemania y Grecia (International Energy Agency, 2015).

La distribución entre las fuentes de energía renovable cambió substancialmente en la Unión Europea. Mientras que en el año 2000 sólo el 5% de la electricidad renovable fue generada por energía eólica, en el 2015 esa cantidad se elevó a 32%. La energía solar, que era una fuente casi inexistente en el 2000, para el 2015 representó el 12% de fuentes renovables de generación de energía en la Unión Europea (Vazquez, Hallack, Andreão, & Tomelin, n.d.).

Para el 2015 alrededor del 40% de las nuevas instalaciones de generación de energía renovable en China, la obtuvieron con la generación eólica en tierra donde aproximadamente dos turbinas eólicas fueron instaladas cada hora, con la puesta en marcha de una capacidad estimada de 60 GW instalados integrada en la red, lo que conllevó a que China tuviera más de la mitad de la generación de energía eólica terrestre con 33 GW.

El sector solar europeo agrupado en torno a SolarPower Europe, ha estimado que el continente instaló 8,61 gigavatios (GW) de nueva capacidad fotovoltaica en 2017, un 28% más que el año anterior. El año 2016, Turquía relevó a Alemania como líder del sector en el viejo continente, con un total de 1,79 GW de nueva capacidad instalada, que supusieron un importante crecimiento del 213%. En los Estados miembros de la Unión Europea, a la que no pertenece Turquía, el crecimiento fue un 6% más modesto, con 6,03 GW instalados en 2017 frente a los 5,69 GW instalados un año antes. Sin embargo, según ambas métricas, el crecimiento constante es un signo alentador para Europa. Los datos llevaron al Chief

Executive Officer (CEO) de SolarPower Europa, James Watson, a instar a la UE a adoptar mayores medidas para apoyar la expansión del sector (Power Solar, 2018).

En cuanto a las tecnologías empleadas para fabricar los paneles solares fotovoltaicos, se tiene que los primeros fabricantes de células fotovoltaicas en el mundo han sido Suntech Power (5,8% del mercado mundial), JA Solar (5,4%), First Solar (5,2%), Trina Solar (3,9%), Q-Cells (3,7%), Yingli (3,6%), Motech (3,5%), Sharp (3,3%), Gintech (3,0%) y Kyocera (2,4%). En 2015, la producción fotovoltaica mundial incluyó 43.9 GW de silicio multicristalino, 15.1 GW de silicio monocristalino y 4.2 GW de lámina delgada (Energy, 2018).

A raíz de los avances tecnológicos alcanzados, la eficiencia de las células solares se incrementa año tras año, de manera que en algo más de una década, los módulos con una eficiencia de conversión de la energía solar en eléctrica del 18-20% (23% en célula) a principios de los años 90, han pasado a ser módulos con valores de eficiencia del 25,2% (26,6% en célula) en la actualidad (Martil, 2018). En paralelo con el incremento de eficiencia, el precio del Vatio fotovoltaico ha experimentado una reducción continuada que obedece a una ley empírica, conocida en el sector como Ley de Swanson (también se la conoce como “curva de aprendizaje de la energía fotovoltaica”). Dicha tendencia, aunque ha sufrido altibajos en años recientes, muestra que el precio del Vatio se reduce un 20% cada vez que se duplica la potencia instalada en el mundo. La razón de esa drástica disminución se debe a la apuesta generalizada por la energía solar fotovoltaica a escala mundial, lo que ha generado unas economías de escala (Martil, 2018).

Colombia no solo es un país privilegiado por su recurso hídrico, su potencial se fortalece cuando se habla de las condiciones para generar energía a través de recursos como

el sol y el viento. Para aprovechar este potencial se requiere que se materialice un mecanismo regulatorio que haga viable el cierre financiero de los proyectos a gran escala y que de esta manera sea posible producir energía suficiente, no solo para atender las necesidades del hogar, sino incluso para vender los excedentes.

En el Departamento de Caldas se han venido desarrollando algunos proyectos que involucran la generación de energía solar fotovoltaica, pero son aislados, poco difundidos y no se conocen los lineamientos que se han seguido para su construcción y mantenimiento a través del tiempo. Por otro lado, no es claro el desempeño energético específico de tales sistemas y solo se refieren las eficiencias y pérdidas teóricas, las cuales son calculadas a condiciones ideales, bastante alejadas de las reales. De otra parte, se hace necesario conocer las características climatológicas de cada región en específico con miras a lograr una mayor integración de los sistemas solares a la cadena energética nacional.

Para conocer el estado actual de los sistemas solares fotovoltaicos instalados en el Departamento de Caldas, se realizó un diagnóstico a través de un instrumento de recolección de información, que se aplicó en todos los municipios y permitió el análisis de 28 instalaciones solares fotovoltaicas, lo cual, indica la existencia de por lo menos un sistema por municipio. Posteriormente, se realizó un análisis de la información climática de seis estaciones remotas y tres estaciones meteorológicas, empleando las herramientas gráficas y de estadística descriptiva de Microsoft Excel. Por otra parte, se empleó el software SPSS para el análisis estadístico inferencial, en el cual se identificaron tendencias, correlaciones entre radiación y temperatura, y diferencias estadísticamente significativas entre las estaciones. Finalmente, se realizó la espacialización de la información tomando como base los mapas del IDEAM, que permitieron identificar diferencias para cada una de las regiones evaluadas,

lo cual, indica que es necesario el análisis puntual de la radiación del lugar en el cual se va a construir el SSFV que permita obtener la eficiencia real. Por último, se realizó un análisis de tres sistemas solares fotovoltaicos con diferentes tecnologías y características de construcción para determinar la eficiencia y rendimiento de cada uno. Este análisis permitió identificar diferencias en cada uno de ellos, y concluir que es necesario un diseño detallado dependiendo del lugar y las necesidades que se deseen cubrir, así como también permitió determinar que las pérdidas por temperatura en el municipio de Manizales no fueron significativas dada la temperatura ambiente del lugar.

El presente documento se inicia con la descripción del planteamiento del problema, seguidamente se realiza una recopilación de antecedentes de las energías renovables y los SSFV en Colombia. Posteriormente, se presenta el referente contextual, normativo y teórico del trabajo y se la metodología seguida para el desarrollo de cada uno de los objetivos. Se presentan, además, los resultados de la identificación de tecnologías y aplicaciones de SSFV, la estimación del potencial de energía solar a partir de información climática existente, y la evaluación del desempeño energético de algunos sistemas instalados en el Departamento de Caldas. Finalmente, se realiza una discusión de resultados y se presentan las principales conclusiones del trabajo.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN

2.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA

En Colombia, país en vía de desarrollo, se hace evidente la latente realidad de escasez de combustibles en un futuro no muy lejano, como consecuencia de la extinción de los recursos de energía convencionales. Adicionalmente, los combustibles fósiles causan contaminación de la tierra, el agua y el aire, y producen gases de invernadero que contribuyen al calentamiento global. Por lo cual se hace necesaria la implementación de nuevas alternativas de energía renovables no convencionales como la energía solar.

La capacidad efectiva neta del Sistema Interconectado Nacional (SIN), al finalizar el 2015, fue 16,420 MW. Al comparar esta capacidad de energía eléctrica generada con la registrada en 2014 se observa un crecimiento en 931 MW, equivalentes al 6%, lo que hace evidente que se constituyan nuevas formas de generación de energía eléctrica que suplan las necesidades debido al aumento paulatino de la demanda de energía. Es importante anotar, que se halla interconectado el 34% del territorio nacional con un total aproximado de 9 millones de usuarios y una cobertura del 93.6% (XM Filial de ISA, 2016).

Colombia genera su electricidad, en primer lugar, de plantas hidroeléctricas debido a la gran cantidad de ríos con que cuenta y, en segundo lugar, de los combustibles fósiles cuyas reservas se están agotando rápidamente. Colombia tiene varios recursos energéticos aún sin explorar como la energía solar, la eólica, y las centrales mini hidráulicas que se constituyen

en una fuente de energía renovable importante gracias a su posición geográfica. El país tiene 28,1 MW de capacidad instalada en energía renovable (excluyendo a las centrales hidroeléctricas) consistente principalmente en energía eólica y solar; lo cual se constituye en un punto de partida para alcanzar lo predicho por el estudio del Programa de asistencia para la administración del Sector energético del Banco Mundial, que establece que la sola explotación suficiente de energía eólica y solar podría cubrir más de lo que el país necesita. Lo anterior pone de manifiesto la necesidad de conocer las potencialidades y capacidades con que se cuenta actualmente y a partir de allí generar una cultura en el país en torno al uso de este tipo de energías renovables.

Colombia se encuentra en la zona ecuatorial por lo cual recibe abundante radiación solar durante todo el año (Jaramillo-Robledo Álvaro, 2005); la temperatura que presenta es proporcional a la fluctuación de la radiación total incidente; sin embargo, existe un desfase según las condiciones atmosféricas del día, la temperatura máxima se registra después del mediodía y la mínima un poco antes de la salida del sol (Jaramillo-Robledo Álvaro, 2005). Las temperaturas medias anuales se encuentran por encima de 24°C., la cual, la hace un país privilegiado en el tema de radiación solar; sin embargo, hay regiones más propicias que otras para la instalación de SSFV, teniendo en cuenta la relación entre la temperatura ambiente y la radiación solar. El Departamento de Caldas, al no presentar temperaturas muy superiores a los 25°C -temperatura indicada para obtener la mayor eficiencia de los paneles solares- es privilegiado para la generación de energía solar.

El brillo solar, también conocido como insolación, es el número de horas de brillo o de radiación directa, para Colombia el máximo valor de brillo solar varía entre 11,3-12,6 h/d, estos valores se pueden ver afectados causando una reducción por la nubosidad, la

orientación, la exposición de las laderas, y la amplitud del horizonte. En la zona Andina de Colombia, el brillo solar promedio es de 1550 horas/año, con extremos superiores de 2050 h/año y mínimos de 1050 h/año (Ocampo, Vélez, & Londoño, 2014); en el Departamento de Caldas, se cuenta con regiones con características diferentes dependiendo la topografía y climatología del lugar, lo cual, no permite que se puedan generalizar parámetros en la generación de energía solar.

En el Departamento de Caldas la temperatura varía de acuerdo con la altitud y el relieve, alterada por los vientos alisios del noreste y del sureste. La distribución de los pisos térmicos en Caldas es cálido 32%, templado 36%, frío 23% y el piso bioclimático de páramo 9%. Dado que en Caldas no se posee un alto potencial de vientos por los pisos térmicos, pero por el contrario si se cuenta un potencial de radiación solar, se considera que la energía solar fotovoltaica podría ser una fuente no convencional de energía renovable para este sector, dado que cuenta con equilibrio en cuanto a la radiación solar que incide y la temperatura ambiente (IDEAM, 2010).

2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En el Departamento de Caldas se han venido desarrollando algunos proyectos que involucran la generación de energía solar fotovoltaica, pero dichos proyectos son aislados y poco conocidos, algunos no siguen unos lineamientos claros para su construcción y mantenimiento a través del tiempo, de otros no se conoce el desempeño energético en términos de variables como: temperatura, sombreado entre otras. De otra parte, se hace necesario conocer la radiación solar en Caldas en términos cada vez más precisos con miras a lograr una mayor integración de los sistemas solares a la cadena energética nacional.

Surgen las preguntas de investigación:

¿Cuál es el estado actual y las perspectivas futuras de la energía solar fotovoltaica en el Departamento de Caldas?

¿Cuáles son los factores que más afectan el desempeño energético de los sistemas solares instalados en el Departamento de Caldas?

2.3 JUSTIFICACIÓN

El mundo está a punto de sufrir un cambio climático irreversible debido a que, si suben en más de 2° C las temperaturas medias anuales, tanto los países en vía de desarrollo como los desarrollados tendrán que hacer frente a un aumento de los desastres naturales, con sequías más intensas y más prolongadas, pérdida de cosechas y una pérdida masiva de especies. Dado que la causa del cambio climático es la quema de combustibles fósiles, necesitamos urgentemente una revolución energética que cambie el mix energético mundial por fuentes no contaminantes. Si queremos evitar un cambio climático peligroso, las emisiones globales deben alcanzar su cota más alta en 2015 y comenzar a bajar a partir de entonces, acercándose a cero lo más posible en 2050. La energía solar fotovoltaica es una forma viable, desde el punto de vista comercial y a gran escala, de generar electricidad; la fuente de esta energía involucra tecnologías que ayudan a la mitigación del cambio climático y que no se agotará fácilmente.

El uso de energía solar fotovoltaica reduce significativamente el consumo directo de fuentes de energía primarias. También proporciona energía a precio previsible y estable ya que la mayoría de los costos de instalación están incluidos en la inversión inicial. Para otras fuentes el costo depende de variables, y, algunas veces, de los precios volátiles del

combustible y de la electricidad. Además, el impacto ambiental y las emisiones de CO₂ de la energía solar son extremadamente bajas, lo cual contribuye al aumento en la producción de energía sustentable y también mitiga el efecto del cambio climático.

Colombia es un país privilegiado respecto al sol debido a la exposición que se tiene por ser un país ubicado cerca de la línea del ecuador, por ello es importante aprovechar esta fuente de energía que es gratuita y limpia apartando el uso del petróleo y de las demás fuentes de energía que contaminan y que se agotan.

La disponibilidad de recursos energéticos es uno de los factores más importantes en el desarrollo tecnológico del Departamento de Caldas, puesto que cuenta con recursos para aplicación de diversas energías renovables como la geotérmica, eólica y solar. A su vez, el desarrollo tecnológico determina que tipos de energía renovables no convencionales son más eficientes para su uso en el Caldas, para su determinación se hace evidente la importancia de conocer el estado actual de uso de la energía solar fotovoltaica en el departamento para difundir las buenas prácticas y tomarlas como punto de partida para realizar procesos de mejoras en los sistemas de energía solar fotovoltaica.

La radiación solar posee un amplio espectro que se puede clasificar en tres rangos: ultravioleta para longitudes de onda desde 0,3 a 0,4 μm , visible desde 0,4 a 0,7 μm e infrarrojo en el intervalo de 0,7 a 5 μm . Los instrumentos de radiación solar miden la potencia incidente por unidad de superficie, integrando la energía de las diferentes longitudes de la onda. Los diversos flujos de radiación inciden y se emiten en la superficie terrestre se miden con instrumentos de la Organización Mundial de Meteorología, OMM. La medición de radiación solar se relaciona directamente con la generación de energía solar fotovoltaica por lo cual, la estimación de la radiación solar, a una escala menor y específicamente para el Departamento

de Caldas, permitirá conocerlas las oportunidades que se tiene en el departamento para la implementación masiva de esta forma de energía como alternativa energética.

De otra parte, es preciso medir la eficiencia energética real de los sistemas instalados en el departamento y contrastarla con la eficiencia nominal reportada para estos sistemas; de esta forma, se podrán determinar que variables inciden sobre el desempeño energético de los sistemas instalados en el Departamento de Caldas. En el Departamento de Caldas se cuenta con grupos de investigación que han venido trabajando en el tema de las energías renovables, instituciones como la Universidad Nacional sede Manizales y el Servicio Nacional de Aprendizaje de la sede Manizales y La Dorada adelantan investigaciones de monitoreo y seguimiento a los sistemas con los que cuentan en sus instalaciones.

2.4 OBJETIVO GENERAL

Determinar el estado actual y las perspectivas futuras de la energía solar fotovoltaica en el Departamento de Caldas y los factores que más afectan el desempeño energético de sistemas solares fotovoltaicos instalados.

2.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar las tecnologías y aplicaciones de la energía solar fotovoltaica empleadas actualmente en el Departamento de Caldas.
2. Estimar el potencial de energía solar fotovoltaica en el Departamento de Caldas a partir de la información climática existente.
3. Evaluar el desempeño energético de algunas tecnologías en energías solar instaladas en el Departamento de Caldas.

3. ANTECEDENTES

Colombia en los últimos años ha venido incursionando en las energías renovables. Ya en la década de los 80, en unidades residenciales construidas en sectores de Ciudad Salitre y Ciudad Tunal en Bogotá, y Villa Valle de Aburrá en Medellín, el Centro Las Gaviotas instaló un sistema de paneles para calentar autónomamente el agua de miles de tanques de reserva. Hacia el año 2015, empresas como la de Energía del Pacífico (EPSA) invirtió más de 1.240 millones de pesos en la construcción del laboratorio de energía solar más grande del país, ubicado en las instalaciones de la compañía en el municipio de Yumbo, que está conectado directamente a su red eléctrica interna y provee hasta un 5 por ciento de la demanda que abastece al complejo, gracias a una tecnología combinada de módulos solares de silicio monocristalino, policristalino y amorfo de capa delgada.

Empresas Publicad de Medellín (EPM) también está generando electricidad con energía solar ya que está vinculada a un piloto que lidera el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas (IPSE). En este proyecto ha permitido llevarle energía a más de 580 personas y seis escuelas ubicadas en áreas rurales apartadas de las veredas de Caucasia y Cáceres, en el bajo Cauca antioqueño y El Reflejo, La Media, La Ilusión, La Nueva Etapa, La Cabaña y Nuevo Horizonte, en San Vicente del Caguán, con una capacidad de generación autónoma que supera los 1.025 Vatios (W).

En la capital del departamento del Valle del Cauca, Cali, se encuentra la Universidad Autónoma de Occidente en la que se tienen instalado un sistema solar fotovoltaico bajo el plan estratégico del año 2015, el cual cuenta con proyectos responsables bajo el marco de campus sostenible. El Sistema Solar Fotovoltaico conectado a red eléctrica se desarrolló bajo la coordinación del Grupo de Investigación en Energías, GIEN, con el apoyo de la Rectoría y la Dirección Administrativa y Financiera de la Universidad, en alianza con el operador de red Energía del Pacífico, EPSA. El sistema está distribuido en los parqueaderos ubicados en el Ala Norte, con una cantidad de 188 paneles solares los cuales tienen una potencia de instalada de 45.12 kWp, equivalente a la producción de la energía que consumen aproximadamente 30 viviendas en un mes. Así mismo, en los parqueaderos del Ala Sur de la Universidad se instalaron 220 módulos fotovoltaicos (Fotografía 1), mientras que la azotea del Edificio Central está compuesta por 230 paneles; un total de 638 módulos que funcionan bajo tecnología HIT la cual permite la unión de capas de silicio monocristalino con silicio amorfo para brindar mayor eficiencia y están conectados a la red eléctrica de la Institución.

Fotografía 1. Sistema de paneles solares fotovoltaicos



Fuente: Universidad Autónoma de Occidente – Cali

La empresa de suministro y administración de medicamentos y otras tecnologías en salud, AUDIFARMA, en la sede ubicada en el municipio de Pereira cuenta con 224 paneles que pueden producir 240 kW en un momento de máxima eficiencia (Fotografía 2); esta energía la introducen al sistema conectado a la red, y es esta la cantidad de energía que dejan de utilizar de la red. El sistema solar fotovoltaico conectado a la red sin almacenamiento se encuentra en funcionamiento desde hace aproximadamente dos años, generando un ahorro del 15 % de energía.

Fotografía 2. Sistema de paneles solares conectado a la red



Fuente: Audifarma Pereira

En cuanto a proyectos de energía solar fotovoltaica en instituciones educativas se pueden resaltar algunos proyectos como la Institución Educativa Martinica en la zona rural de Montería, capital del departamento de Córdoba en Colombia, la cual cuenta con una instalación de 16 paneles solares que garantizan luz durante 24 horas. La iniciativa permite que aproximadamente 400 Kg de CO₂ se dejen de emitir. Esta institución fue el primer colegio en Colombia en utilizar esta tecnología de la energía solar. En Bogotá se encuentra

el Colegio Distrital Ramón Jimeno, en el cual el Distrito invirtió 480 millones de pesos y gracias a la instalación de paneles solares funciona autónomamente generando cerca de 21,62 kV, dejando de emitir cerca de 22 toneladas de CO₂ y ahorrando 71% en el consumo mensual del servicio gracias a su nueva iluminación LED.

En el Departamento de Caldas encontramos instalaciones solares fotovoltaicas escasas y aisladas; una de ellas se encuentra ubicada en la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales en el edificio de ciencias exactas y naturales bloque W, el cual cuenta con 40 paneles policristalinos de 250 W cada uno de los cuales generan un total de 10000 W (Fotografía 3). Este sistema y entró en funcionamiento el pasado 15 de febrero de 2016 y generó 812 kW por hora, lo que representa un ahorro de 450 mil pesos en la facturación total de la energía del campus.

Fotografía 3. Sistema de paneles solares Universidad Nacional sede Manizales



Fuente: Universidad Nacional de Colombia sede Manizales

Otra de las aplicaciones se encuentra ubicada en el servicio nacional de aprendizaje SENA del departamento, el cual tiene instalados paneles solares de diferentes tecnologías y con diferentes características de instalación como ángulo y orientación. De igual forma el

parque de energía renovable cuenta con la utilización de la radiación del sol para procesos agrícolas y pecuarios como la automatización de invernaderos, galpones y porcícolas, para mejorar las condiciones de crianza de aves y porcinos. Instalaron 17 paneles solares, compuestos por capas de silicio y a su vez alimentan bancos de baterías que almacenan 48 V. También hay cuatro bancos didácticos con funciones diferentes, y otros paneles que dan calefacción a los criaderos de cerdos y un salón de clases en el que se pueden cargar celulares, tener conectados unos 10 computadores y un video beam. El lugar, para 17 estudiantes, está destinado al aprendizaje sobre el tema de energías renovables.

Si bien se encuentran sistemas solares fotovoltaicos instalados en Manizales y en ciudades cercanas, no hay un conocimiento sobre que otros sistemas se tienen en el departamento y cuál es el nivel de conocimiento en la región respecto a esta forma de energía, lo cual se quiso determinar en esta investigación.

Desde el marco regulatorio en Colombia fue emitida la Ley 1715 de 2014 y este es el marco desde el cual el país se encamina al uso e implementación de estas fuentes no convencionales de energía, entre las que se incluye la generada por paneles solares (Congreso De Colombia, 2014). Con esta Ley se establece un nuevo escenario para el sector eléctrico, que favorece el uso eficiente de los recursos energéticos y la diversificación de las fuentes tradicionales de energía eléctrica, en ella se definen las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), como:

“aquellos recursos de energía renovable disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleadas o son utilizadas de manera marginal y no se comercializan ampliamente. Se consideran FNCER la

biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, la geotérmica, la solar y los mares” (Congreso De Colombia, 2014).

En el país se han venido desarrollando estudios en el tema de energías renovables no convencionales que promuevan y evalúan las condiciones y características de la generación de energía solar en Colombia, algunos de los estudios que se han realizado se describen a continuación.

En la Universidad Autónoma de Occidente se ha venido trabajando en los últimos años sobre energías renovables, el año 2011 se desarrolló una tesis de grado en el que diseñaron un sistema solar fotovoltaico de 20 kW conectado a la red UAO. En este trabajo se realiza una investigación bibliográfica de diseños de sistemas fotovoltaicos en diferentes países del mundo siguiendo las reglamentaciones de cada país y teniendo esta información como referencia, proponen los pasos para realizar un diseño de un sistema solar fotovoltaico conectado a la red, el cual desarrollan a lo largo del trabajo (Gutiérrez Bolaños & Gutiérrez Patiño, 2011).

Posteriormente en el 2013 la Universidad Autónoma de Occidente desarrollo un estudio técnico - económico para la implementación masiva de sistemas solares fotovoltaicos para los estratos cinco y seis de la ciudad de Cali. En el trabajo se realizaron investigaciones en los estratos 5 y 6 en aspectos como el consumo, y verificaron costos en la facturación y en el precio del kW/h en los dos estratos. Estos datos los obtuvieron de la electrificadora de Cali, con la información obtenida realizaron los cálculos para la implementación del sistema solar fotovoltaico incluyendo, además, los costos de los diferentes componentes del sistema. Todos estos cálculos los realizaron mediante el software Homer (Hybrid Optimization Micro Power Energies Renewable) y con los resultados obtenidos analizaron técnica y

económicamente el proyecto, así como los costos de la instalación y el dimensionamiento del sistema (Escobar, 2013).

En el 2013 el fondo mundial para la naturaleza WWF desarrollo en compañía del centro de investigación económica y social Fedesarrollo un análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales para Colombia, con el cual buscaban aportar elementos para la discusión de política pública sobre el desarrollo de este tipo de energías y su implementación en Colombia. Su objetivo era calcular los costos económicos y sociales de la generación de energía eléctrica en Colombia a partir de tecnologías tradicionales y fuentes renovables no convencionales de energía (García, Correodor, Calderón, & Gómez, 2013).

La Universidad Nacional de Colombia también ha realizado investigación en el campo de las energías renovables. En el 2014 la Facultad de Minas desarrolló una caracterización y evaluación económica para la inversión en plantas menores a 20 MW conectadas al (SIN) de Colombia a partir de fuentes de energías renovables eólica y solar. En este trabajo se realizó una comparación de inversión en proyectos típicos de energía eólica y solar en Colombia, a través de la revisión bibliográfica para caracterizar proyectos de energía solar y eólica. Posteriormente realizó un análisis económico avanzado mediante métodos y modelos financieros para dar un aporte en toma de decisiones de inversión en tecnologías de fuentes de energía no renovables, eólica y solar, en Colombia (Buendía, 2014).

De otra parte, en el tema de desempeño energético, en 2014 se presentaron dos investigaciones en las que se propone un nuevo modelo para predecir la energía generada por una instalación fotovoltaica conectada a la red en los países de latitudes bajas. En este trabajo se proponen métodos para tratar de predecir la influencia de aspectos relacionados con la

radiación solar disponible en la ubicación geográfica de la instalación, el clima, la orientación y la inclinación de las superficies utilizadas, el diseño apropiado del sistema y la calidad de los componentes. El método que describen en el artículo lo analizan en Colombia mediante un comparativo de los aspectos mencionados como pérdidas angulares y debido a la suciedad, las pérdidas debidas a la temperatura, las pérdidas de conversión DC-AC y el coeficiente de rendimiento del sistema en diferentes ciudades (Mulcué-Nieto & Mora-López, 2014).

De igual manera la segunda investigación que desarrollaron fue una metodología para establecer las pérdidas máximas permitidas por sombras y orientación en aplicaciones fotovoltaicas en edificios en la cual se propone una metodología para elaborar normas técnicas con el fin de limitar las pérdidas debido a la sombra y la orientación de las superficies con paneles solares construidas, en los que cualquier país podría tomar como punto de referencia. Para este artículo toman como caso de estudio a Colombia mediante la realización de un análisis comparativo de las diferentes ciudades (Mulcué-Nieto & Mora-López, 2015). De estos dos trabajos, relacionados con el desempeño energético, se tomarán los modelos para realizar el estudio del comportamiento energético de algunos sistemas instalados en el SENA Regional Caldas que se propone en la presente investigación.

4. REFERENTE CONTEXTUAL

El presente trabajo se realizó para el Departamento de Caldas el cual está situado en el centro occidente de la región andina, localizado entre los 05°46'51'' y los 04°48'20'' de latitud norte, y los 74°38'01'' y 75°55'45'' de longitud oeste. Cuenta con una superficie de 7.888 km² lo que representa el 0.69 % del territorio nacional. Limita por el norte con el departamento de Antioquia, por el este con el departamento de Cundinamarca, por el sur con los departamentos del Tolima y Risaralda, y por el oeste con el departamento de Risaralda.

- *Superficie:* 7.888 km²
- *Población:* 987.991 Habitantes (Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), 2015)
- *Densidad:* 125.25 Hab/km²

El Departamento de Caldas está dividido en 27 municipios, 22 corregimientos, así como, numerosos caseríos y sitios poblados.

Tabla 1. Municipios del Departamento de Caldas

MUNICIPIOS DEL DEPARTAMENTO DE CALDAS			
Manizales	Aguadas	Anserma	Aránzazu
Belalcazar	Chinchiná	Filadelfia	La Dorada
La Merced	Manzanares	Marmato	Marquetalia
Marulanda	Neira	Norcasia	Pacora
Palestina	Pensilvania	Riosucio	Risaralda
Salamina	Samaná	San José	Supía
Victoria	Villamaría	Viterbo	

Fuente: Propia.

El departamento está conformado por tres regiones geográficas. La primera comprende la vertiente oriental de la Cordillera Occidental separada de la Central por el río Cauca. La parte central del departamento se extiende desde el río Cauca hasta el filo de la

Cordillera Central. La tercera región va desde el filo de la Cordillera Central hasta las orillas del río Magdalena.

El operador de red Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC) es quien realiza el suministro de energía en el Departamento de Caldas. El sistema de generación de CHEC cuenta con un esquema de aprovechamiento hídrico el cual es protegido con zonas de bosques que tiene la empresa en las cuencas altas de los ríos: Chinchiná, San Francisco, Campoalegre y La Estrella. Actualmente, CHEC cuenta con 7 plantas de generación, que por su capacidad de producción están designadas como Plantas Menores y Plantas Mayores. Las Plantas Menores de generación son Sancancio, Intermedia, Municipal y Guacaica, las cuales están inmersas en la urbe manizaleña. Las Plantas Mayores de generación son La Ínsula, La Esmeralda y San Francisco, las cuales están ubicadas una en zona rural de Palestina y dos en zona rural de Chinchiná; las tres plantas utilizan las aguas de los ríos Chinchiná y Campoalegre para la generación de energía. La información general de los sistemas de generación del operador de redes es la siguiente:

- Número de centrales de generación hidráulica mayores a 20 MW: 2
- Número de centrales de generación hidráulica menores a 20 MW: 5
- Número de centrales de generación térmica: 1
- Capacidad generación hidráulica: 189,22 MW
- Capacidad generación térmica: 51 MW
- Total centrales de generación de energía: 8
- Total capacidad generación de energía: 240,22 MW

Como se observa en las cifras anteriormente mencionadas, la principal materia prima para la generación de energía es el agua; con el fin de acceder a este recurso natural, la CHEC realiza acuerdos con diferentes corporaciones para su concesión del uso. Por otro lado, la

materia prima que CHEC utiliza para la ejecución de la operación de generación termoeléctrica es el combustible de tipo líquido y gas. Así mismo, el operador de red celebra contratos con otros generadores, con el fin de respaldar la generación de energía eléctrica en el departamento. Como se observa en la fotografía 4, todos los municipios del Departamento de Caldas cuentan con acceso a la energía eléctrica en las cabeceras urbanas.

Fotografía 4. Cobertura de energía CHEC 2017



Fuente: Informe de sostenibilidad CHEC 2017

La cobertura del servicio de energía del operador de red CHEC es el de 100% a nivel urbano y del 99.51% a nivel rural, para una cobertura total del 99.87% con 432681 usuarios del servicio de energía (CHEC, 2017).

Tabla 2. Porcentaje de cobertura de energía CHEC 2017

% de Cobertura del servicio de energía eléctrica CHEC por departamento y municipio 2017				
Departamento	Municipio	Urbano 2017	Rural 2017	Total 2017
Caldas	Manizales	100%	99,86%	99,99%
	Aguadas	100%	98,71%	99,33%
	Anserma	100%	99,83%	99,93%
	Aranzazu	100%	99,70%	99,86%
	Belalcázar	100%	99,30%	99,60%
	Chinchiná	100%	99,76%	99,95%
	Filadelfia	100%	99,82%	99,89%
	La Dorada	100%	98,91%	99,92%
	La Merced	100%	99,78%	99,86%
	Manzanares	100%	99,63%	99,83%
	Marmato	100%	99,60%	99,67%
	Marquetalia	100%	99,96%	99,98%
	Marulanda	100%	99,77%	99,84%
	Neira	100%	99,87%	99,94%
	Norcasia	100%	97,22%	99,01%
	Pácora	100%	99,72%	99,85%
	Palestina	100%	100%	100%
	Pensilvania	100%	99,75%	99,84%
	Riosucio	100%	99,60%	99,76%
	Risaralda	100%	99,78%	99,88%
Salamina	100%	99,15%	99,63%	
Samaná	100%	98,82%	99,12%	
San José	100%	99,50%	99,63%	
Supía	100%	99,68%	99,83%	
Victoria	100%	99,42%	99,63%	
Villamaría	100%	98,27%	99,84%	
Viterbo	100%	99,79%	99,95%	
Total Caldas		100%	99,53%	99,87%

Fuente: Informe de sostenibilidad CHEC 2017.

REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL

Colombia se adhirió al Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Ley 629 de 2000). El objetivo de este Protocolo era reducir las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI), por lo cual las energías renovables se convirtieron en una opción estratégica para Colombia.

En Colombia se viene trabajando desde el 2001 en la implementación y utilización de energías renovables, lo que inicio con la Ley 697/01, sobre Uso Racional de Energía. Esta ley define como propósito nacional avanzar hacia la utilización de fuentes renovables en pequeña escala y, particularmente, apoya la investigación básica y aplicada para que, con el tiempo, se reduzcan costos y se amplíe la capacidad de energías como la eólica, la solar, la geotérmica o la biomasa (Congreso de Colombia, 2001).

En el 2002 con la Ley 788/02 se exime del impuesto a las ventas de energía con fuentes renovables, durante quince años, si se obtienen los certificados de reducción de emisiones de carbono previstos en el Protocolo de Kioto, los cuales generan ingresos a los empresarios. El 50% de estos ingresos tiene que destinarse a programas de beneficio social para gozar de la exención del impuesto (El Congreso de Colombia, 2002).

En la Resolución MME 18-0919 de 2010 se definió el Plan de Acción 2010-2015 y los subprogramas del PROURE. La vigencia de este Plan se extendió hasta junio de 2016, fecha en la que se adoptaría el Plan 2016-2020. A finales de 2013, Colombia aprobó el estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en inglés) (Ley 1665 de 2013), el cual promueve el uso sostenible de las energías renovables.

Finalmente, en mayo de 2014 se aprobó la Ley 1715, que desarrolla una política pública para la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema energético nacional. Esta ley tiene como objetivos generales promover la eficiencia energética y la utilización de Fuentes No Convencionales de Energía Renovables (FNCER), en el Sistema Interconectado Nacional (SIN) y en las Zonas No Interconectadas (ZNI), reducir las emisiones de GEI, y cumplir acuerdos internacionales. Entre los incentivos definidos en esta Ley, se destaca la reducción de 50% del valor de la inversión en FNCE sobre el total de la renta durante 5 años posteriores a la inversión. Además, los equipos, maquinaria y servicios para producir energía a partir de FNCER serán excluidos del pago de IVA y aranceles (para nuevos proyectos y la maquinaria/equipo no fabricada en el País).

Otros temas planteados son la creación del Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE) y el fomento de la cooperación internacional para las FNCER. Algunos de los avances que ha tenido la Ley 1715 de 2014 mediante actos administrativos se mencionan a continuación:

Decreto 2469 de 2014: establece lineamiento de política energética en materia de entrega de excedentes de autogeneración. La Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG, regula la actividad de autogeneración a gran escala en el SIN, en la Resolución 024 de 2015.

Decreto 2492 de 2014: define disposiciones en materia de implementación de mecanismos de respuesta de la demanda.

Decreto 1623 de 2015: establece una expansión de cobertura del servicio de energía eléctrica en el SIN y en las ZNI.

Resolución UPME 281 de 2015: define el límite máximo de autogeneración a pequeña escala.

Decreto 2143 de 2015: reglamentación de los incentivos tributarios de Ley 1715

Resolución UPME 045 de 2016: procedimiento para certificación a proyectos FNCER para acceder a incentivos tributarios Ley 1715, la cual establece los requisitos y el procedimiento para que proyectos de generación con fuentes de energía no convencional, en especial de tipo renovable, accedan a beneficios tributarios.

Resolución UPME 143 de 2016: registro de proyectos FNCER en la UPME.

Resolución 030 de 2018: mediante la Resolución 030 del 26 de febrero de 2018, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) reglamentó determinados aspectos técnicos y comerciales para permitir la integración de autogeneradores de energía a pequeña escala (AGPE) al SIN, que estaban pendientes por desarrollar en virtud de lo señalado en la Ley 1715 de 2014 y en el Decreto 348 de 2017.

Actualmente, la UPME cuenta con 318 registros de proyectos de generación de energía solar en fase 1, 64 proyectos en fase 2 y 14 en fase 3. Los proyectos de generación de energía solar representan el 69,84% de los registros que ocupan el primer lugar seguido de la generación hidráulica con un 20,63%, El Departamento de Caldas cuenta con 5 registros de proyectos de generación de energía solar en fase 1, lo cual representa el 26,32% y 14 registros de generación de energía hidráulica que representa el 73,68% restante (UPME, 2018).

4.1 REFERENTE TEÓRICO

En el presente capítulo se abordan tópicos teóricos necesario para dar explicación a los objetivos de este trabajo, entre ellos se tienen aspectos sobre las energías renovables, específicamente la energía solar y sus tecnologías; también se tratan los temas de radiación solar, su tasa de captación y análisis. Posteriormente, se describen los parámetros de eficiencia de un sistema solar fotovoltaico desde su definición hasta su formulación matemática.

4.2 ENERGÍAS RENOVABLES

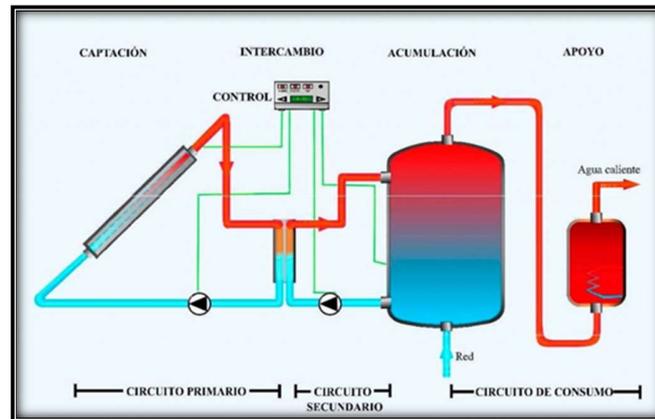
Las energías renovables se caracterizan por ser una alternativa de generación de energía limpia lo cual permite que no genere gases de efecto invernadero, ni tampoco dióxido de carbono que ocasionen daños en el medio ambiente. Actualmente el crecimiento de las energías renovables ha ido en aumento puesto que se encuentran en la naturaleza en una cantidad ilimitada y a que su recurso no se agota debido a que se regenera de manera natural. Entre algunas de las diferentes fuentes de energía renovable se encuentran la geotérmica cuyo recurso es la temperatura interna de la tierra; la mareomotriz cuya fuente es la fuerza de las olas del mar; la eólica que aprovecha la velocidad del viento; y la solar cuya energía la proporciona el sol mediante la radiación electromagnética, especialmente los rayos que emiten en el ultravioleta, la luz y el calor. Es de interés para el presente trabajo la energía solar, la cual se puede ser de dos tipos: solar térmica y solar fotovoltaica:

4.2.1 Energía solar térmica

La energía solar térmica utiliza la fuente de energía de la radiación del sol para producir calor lo cual permite que se pueda aprovechar para diferentes servicios como

cocinar, producción de agua caliente, calefacción o para acondicionar los lugares mediante los cambios en la temperatura ambiente.

Fotografía 5. Energía solar térmica



Fuente: Biosolenergía.

4.2.2 Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica genera energía mediante la conversión de la radiación del sol en energía eléctrica, este proceso se realiza mediante el efecto fotovoltaico, que consiste en la conversión de luz en electricidad. La luz solar está compuesta por fotones, estos poseen diferentes energías, que corresponden a las diferentes longitudes de onda del espectro solar. Cuando los fotones inciden sobre una célula solar, pueden ser reflejados o absorbidos, o pueden pasar a través de ella. Sólo los fotones absorbidos generan electricidad, la energía del fotón se transfiere a un electrón de un átomo de la célula. Con esta nueva energía, el electrón es capaz de escapar de su posición normal asociada con un átomo para formar parte de una corriente en un circuito eléctrico. Para realizar este proceso se requiere de un elemento semiconductor en la celda. El semiconductor más utilizado es el silicio, que es el elemento más abundante en la naturaleza, después del oxígeno, otros semiconductores empleados son el germanio y el selenio.

4.3 TIPOS DE TECNOLOGÍAS DE CELDAS SOLARES

La generación fotovoltaica de electricidad se realiza a través de módulos solares fabricados usando tecnologías diferentes; en este sentido, se tienen actualmente, las celdas solares de primera, segunda, tercera y cuarta generación, las cuales se describen a continuación.

4.3.1 Celdas solares de primera generación

Las celdas solares de esta generación son las fabricadas de Silicio que se obtiene con la unión de un semiconductor “tipo P” o “tipo N” formado por la impurificación del Si a la cual se denomina homojuntura p/n. Con estas celdas basadas en Silicio monocristalino fabricadas se han logrado eficiencias cercanas al 25 % (Jianhua Zhao, 1994), valor que está muy cercano al límite teórico. El mercado mundial es dominado por la tecnología de primera generación de Silicio monocristalino y policristalino (Goetzberger, Hebling, & Schock, 2003). Los paneles solares de *silicio monocristalino* fueron los pioneros de la energía solar y se empezaron a fabricar en la década de 1950 con el método de Czochralski para uso de la Nasa principalmente. Estos paneles se fabrican mediante lingotes de silicio puro de un solo cristal adoptando una forma cilíndrica una vez solidificados. Con una eficiencia de laboratorio de celda única registrada del 26.7%, el silicio monocristalino tiene la eficiencia de conversión confirmada más alta de todas las tecnologías fotovoltaicas comerciales. Los paneles solares de *silicio policristalino* se fabrican mediante silicio puro con múltiples cristales y derretido en un molde cuadrado que se enfría y se corta en láminas de silicio perfectamente cuadradas. Gracias a su fabricación utilizando múltiples cristales, las placas poli captan mejor la radiación solar difusa y la que se produce en las primeras y últimas horas del sol. A pesar de la reducción de costes de la célula policristalina, se debe destacar el menor

rendimiento del módulo y la mayor tasa de rechazo en la fabricación de la célula (10% frente al 5% en monocristalino). La diferencia entre la superficie de las células monocristalinas y policristalinas se basa en que las policristalinas tienen zonas de colores diferentes, en vez del color uniforme de las células monocristalinas. Las células de silicio policristalino tienen una eficiencia que varía de 12 a 21%. Se fabrican mediante el reciclaje de componentes electrónicos desechados, es decir, los llamados "restos de silicio", que se vuelven a fundir para obtener una composición cristalina compacta. La última edición de la tabla de récords de eficiencia de laboratorio en celdas solares y módulos fotovoltaicos publicada por la revista científica especializada *Progress in Photovoltaics* en enero del 2018, registró el récord de eficiencia para celdas solares de silicio monocristalino de 25.8%, con la configuración de base tipo n, área de 4 cm² y con contactos en las caras anterior y posterior

4.3.2 Celdas Solares segunda generación

La segunda es la denominada tecnología de películas delgadas que ha sido muy exitosa mediante la fabricación de módulos basados en tres tipos diferentes de materiales: Cu (In, Ga) Se₂ (CIGS), CdTe y silicio con estructura amorfa (a-Si). La escasez de silicio en el mercado por su utilización en la industria electrónica y el alto coste del proceso de fabricación, están impulsando el desarrollo de las células de lámina delgada y otras nuevas tecnologías. Entre los materiales semiconductores utilizados en las células de segunda generación se incluyen: el seleniuro de cobre e indio (CuInSe₂ o CIS), el diseleniuro de cobre, indio y galio (Cu (InGa) Se₂ o CIGS), el telurio de cadmio (CdTe) y el silicio amorfo (Si-a). El ***Silicio Amorfo*** se caracteriza por no tener ninguna estructura cristalina a diferencia de los mono y poli cristalinos, ya que se forma por varias capas de Silicio depositadas al vacío sobre un cristal, plástico o metal. Lo habitual es que se forme una célula continua que

ocupa todo el módulo, ya que se pueden fabricar de diversos tamaños. Este tipo de tecnología plantea el problema de una clara disminución de su eficiencia cuando han sido expuestos a una larga y prolongada irradiación solar. También se ha demostrado que en las 100 primeras horas de funcionamiento se produce una degradación hasta que se estabiliza y la producción de corriente es prácticamente estable después. Es de destacar que es una tecnología muy estable con un buen comportamiento ante agentes externos como la lluvia, la humedad, la temperatura o la corrosión.

4.3.3 Celdas solares de tercera generación

En esta categoría se tienen varios tipos de celdas como son las celdas solares sensibilizadas y en general las celdas orgánicas. En 1986 se demostró por primera vez el efecto fotovoltaico en materiales orgánicos y unos años más tarde se produjo la primera demostración de una célula fotovoltaica construida íntegramente con materiales poliméricos semiconductores. Entre las celdas basadas en los denominados materiales emergentes se destacan las celdas sensibilizadas con colorantes también conocidas como electroquímicas y las celdas orgánicas basadas en polímeros conductores (Gong, Song, Yang, Li, & Li, 2009).

Las llamadas celdas solares sensibilizadas con colorante (DSSC) o celdas de Grätzel son una variante de menor costo frente a las celdas de silicio. Estas celdas están constituidas por un electrodo que es en general un óxido semiconductor poroso (TiO_2 nanocrystalino) el cual se recubre con una capa de colorantes orgánicos ya sea sintéticos o naturales, como los pigmentos extraídos de plantas: clorofila, carotenos etc. Este colorante hace la absorción de la luz ya que el TiO_2 es transparente a la luz visible. Se emplea además un electrolito constituido por el par I⁻/I₃ mezclado con un solvente orgánico, y que se encuentra en contacto con el fotoelectrodo (Brian & Grätzel, 1991). Entre las ventajas que ofrecen estas células

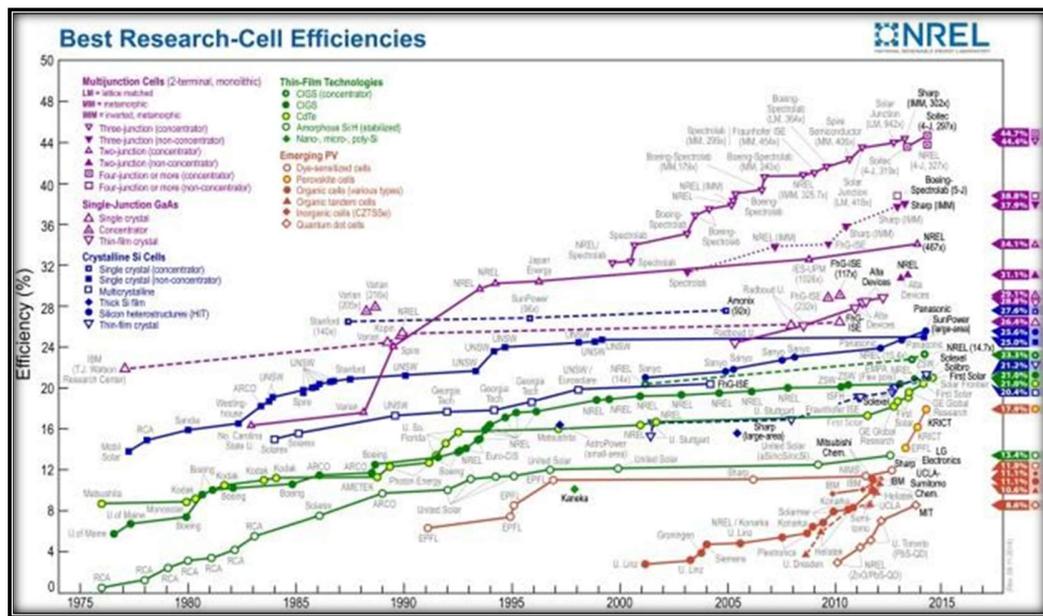
cabén destacar su menor coste de fabricación, una mayor posibilidad de incorporación en la estructura arquitectónica de los edificios y su transparencia que les da una mayor posibilidad de captar la luz desde diferentes ángulos. Sin embargo, las eficiencias que presentan son inferiores al promedio de eficiencias de las celdas basadas en silicio; el record de eficiencia de este tipo de células actualmente es del 11%.

4.3.4 Celdas solares de cuarta generación

Lo que se podría denominar celdas solares de cuarta generación incluye los paneles solares de nano partículas con polímeros que busca celdas con mayor eficiencia y menos costo; se incluyen también las celdas con tecnología multi-unión. Las células solares fotovoltaicas que se utilizan en la actualidad, denominadas mono unión, están formadas por un semiconductor que tiene dos niveles de energía. Cuando sobre ellos actúa un fotón que no tiene la energía suficiente para excitar el electrón del nivel más bajo al superior no aprovechan esa energía. En el caso contrario, cuando el fotón tiene energía suficiente, lo que ocurre es que sí excita el electrón, pero la única energía que puede recuperar es la diferencia de energía de los dos niveles del semiconductor, el resto se pierde. Las células solares multiunión consisten en una aplicación de células solares, con distintos espacios de banda, conectadas en serie mediante uniones túnel. La posición de estas células debe ir en orden descendente con relación a su espacio de banda. Si se disponen en posición inversa la primera absorbería toda la radiación que tuviese más energía que su espacio de banda, pero solo se aprovecharía dicho espacio por lo que el resto de la energía se invertiría en calentar la célula. En el instituto alemán Fraunhofer ISE se alcanzó un récord de eficiencia del 33.3% para una celda tándem o multiunión de dos terminales y tres uniones p-n fabricada con los materiales GaInP/GaInAs unida a la oblea de una celda de silicio monocristalino.

En la fotografía 6, se muestra la evolución en el tiempo (durante los últimos 30 años) de la eficiencia de conversión de los diferentes tipos de celdas solares que se han desarrollado con tecnologías las distintas generaciones, también se observan los centros de investigación que mayor aporte han hecho para lograr de estos resultados.

Fotografía 6. Evolución de las tecnologías de células fotovoltaicas



Fuente: Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) Estados Unidos

4.4 GENERACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

En la generación de energía solar fotovoltaica existen diversas aplicaciones desde la aeroespacial hasta aparatos eléctricos funcionando con energía solar como iluminación, señalización y telecomunicaciones hasta la producción a mayor y menor escala para el consumo en general, en la que se encuentran principalmente dos tipos de instalaciones fotovoltaicas:

4.4.1 Sistema solar fotovoltaico ON GRID

El sistema fotovoltaico conectado a la red (On Grid) funciona en forma paralela con el suministro de energía eléctrica del operador de red, en este caso toda la energía que se genera durante las horas de sol aprovechables del día es consumida por la carga que se encuentre instalada, mientras que en la noche o en días donde la generación solar no es eficiente se utiliza el suministro de energía eléctrica de la red. Actualmente se están implementando contadores bidireccionales para medir la energía que reciben de la red y la energía que en algún caso puedan enviar o suministrar a la red.

4.4.2 Sistema solar fotovoltaico OF GRID

El sistema solar fotovoltaico autónomo o aislado (Of Grid) es el que no tiene acceso a la red eléctrica del sistema interconectado, por lo cual, se emplea principalmente en zonas aisladas o para el autoconsumo, de igual manera se utiliza para iluminación de alumbrado público o señalización. Generalmente, se recurre a este tipo de sistemas acumuladores para suplir al sistema en la noche o en días donde haya poca generación solar fotovoltaica mediante el almacenamiento de la energía en las baterías.

4.4.3 Sistema solar fotovoltaico híbrido

El sistema fotovoltaico solar híbrido es una combinación de la tecnología de la energía solar y la red eléctrica, que permite integrar de la mejor forma ambas fuentes de energía. Si la energía producida a través de generadores fotovoltaicos es suficiente para el consumo, el inversor híbrido utiliza los excedentes para cargar la batería. Del mismo modo, si el consumo es superior a la energía fotovoltaica, el inversor tomara la energía que le falta de la red pública. En ausencia de sol, el inversor, según el consumo de energía, usará la energía exclusivamente a partir de baterías o podrá tomar energía de la red pública.

4.4.4 Elementos para implementar un sistema solar

Para implementar un sistema solar, ya sea autónomo o conectado a la red, se requieren por lo menos algunos de los siguientes elementos:

- **Modulo fotovoltaico:** es el elemento más importante de la instalación debido a que captura la energía solar y la convierte en energía eléctrica, está formado por la unión de diferentes celdas solares para proveer al módulo de la potencia necesaria.
- **Regulador de carga:** Protege a las baterías de las sobrecargas y proporciona a su salida una tensión fija continua. Estabiliza el valor de tensión nominal a la que trabaja la instalación.
- **Inversores:** son los encargados de convertir la corriente continua del sistema solar fotovoltaico en corriente alterna, lo que permite que pueda alimentar los diferentes equipos que generalmente trabajan con corriente alterna como televisores, neveras, lavadoras, licuadoras, iluminación entre otras.
- **Acumulador o batería:** permite la acumulación de la energía eléctrica producida por los paneles solares durante los periodos de luz solar para posteriormente suministrarla para el consumo de las instalaciones durante los periodos de poca generación solar o la noche. Estos no son requeridos en un sistema de generación conectado directamente a la red
- **Contador bidireccional:** además de poder medir el consumo de energía eléctrica que se consume girando en el sentido normal puede girar de manera contraria, haciendo posible que el operador de red reste a nuestro recibo la energía que estamos generando y sume a nuestro favor la energía de exceso.

4.5 RADIACIÓN

El sol es una gran estrella que permite la vida en nuestro planeta. Al interior de esta estrella suceden una cantidad de reacciones químicas y pequeñas fusiones atómicas que hacen que el sol convierta su masa en energía que se emite a través de la radiación hasta llegar a la tierra. La cantidad de radiación solar incidente sobre la superficie de la tierra, sea en suelo firme o en los océanos, ha sido cuantificada a través de mediciones realizadas por instrumentos ajustados para detectar, exclusivamente, la radiación solar incidente a ras del suelo.

La potencia solar recibida por cada metro cuadrado de la superficie formada por la esfera orbital de la Tierra es *de* $1368 \frac{W}{m^2}$. Dicha esfera se denomina Esfera Exterior y tiene un radio igual a la distancia entre el Sol y la Tierra (Nahle Sabag, 2011).

Algunos de los factores que influyen en que se tenga una menor o una mayor cantidad de radiación solar son:

Latitud: a mayor distancia de la línea ecuatorial menor radiación solar.

Altura sobre el nivel del mar: a mayor altura, mayor radiación.

Orografía: Se refiere a las elevaciones que puedan existir en una zona en particular.

Por ejemplo, los valles profundos tienen menor radiación solar.

Nubosidad: En cuanto mayor es la nubosidad, menor radiación solar hay.

4.5.1 Unidades de medida de la radiación solar

La tasa de transferencia de energía por radiación electromagnética es llamada flujo radiante, el cual tiene unidades de energía por unidad de tiempo y es expresada como:

$$F = \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

Esta es medida en joules por segundos (equivalente a vatios que es una unidad de potencia eléctrica). Por ejemplo, el flujo radiante del Sol es cercano a $3,65 \times 10^{23}$ kW.

El flujo radiante por unidad de área $\frac{\text{Energía}}{\text{Área} \times \text{tiempo}}$ es llamado irradiancia (o densidad de flujo radiante). Esta magnitud de radiación instantánea está expresada en unidades de potencia por unidad de superficie. Este se expresa como:

$$E = dQ/dt/dA, \quad (2)$$

se mide en vatios por metro cuadrado. La irradiancia de la radiación electromagnética del Sol (el cual tiene un radio aproximado de 7×10^8 metros) está dada por:

$$E_{Sol} = \frac{3.90 \times 10^{26}}{4\pi(7 \times 10^8)^2} = 6.34 \times \frac{10^7 W}{m^2}. \quad (3)$$

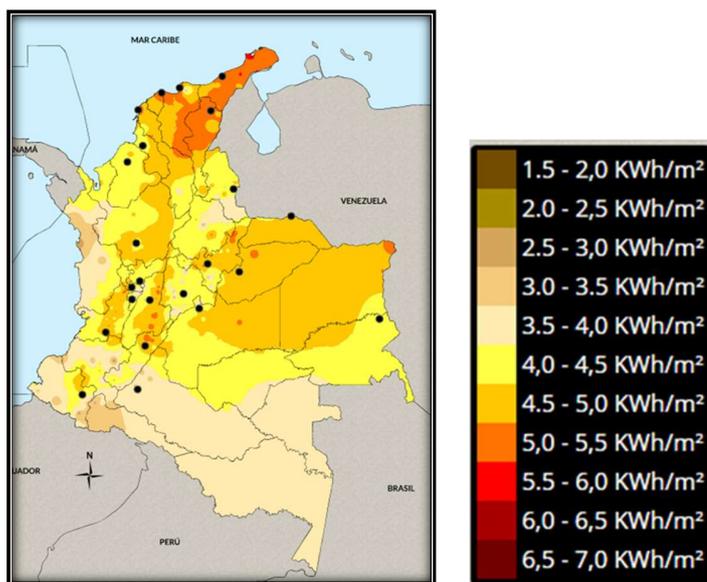
Las cantidades de radiación son expresadas generalmente en términos de exposición radiante o irradiancia, siendo esta última una medida del flujo de energía (flujo radiante) recibida por unidad de área en forma instantánea, como se mencionó anteriormente; mientras que la exposición radiante es la medida de la radiación solar, en la cual la irradiancia es integrada en el tiempo como $\frac{\text{Energía}}{\text{Área}}$ y cuya unidad es el kWh/m² por día (si es integrada en el día) ó MJ/m² por día (IDEAM, 2015b).

4.5.2 Irradiación global horizontal media diaria

Colombia es un país privilegiado por su posición geográfica. No solo cuenta con gran variedad de climas, también presenta uno de los niveles de radiación solar más altos en el mundo, dándole una gran ventaja en el uso de energía solar fotovoltaica. Por su posición geográfica Colombia, ubicado en la zona ecuatorial, cuenta con radiación solar constante en determinadas zonas del territorio, uno de los elementos claves para convertirse en generador

de energía solar. Este efecto puede durar las 12 horas al día, registrando incluso los índices más altos a nivel mundial. Por lo cual, con una menor cantidad de paneles solares, a diferencia de otros países, es posible abastecer una casa o edificio, haciéndolo más económico y eficiente a largo plazo (Fotovoltaica, 2017).

Fotografía 7. Irradiación horizontal media diaria para Colombia



Fuente: Grupo de Climatología y Agrometeorología Subdirección de Meteorología – IDEAM Cartografía Básica IGAC (IDEAM, 2015a)

Teniendo en cuenta que 1 de cada 5 personas carece de energía eléctrica en su hogar y que la energía solar fotovoltaica en Colombia permite mayor acceso a sectores rurales a bajo costo, estamos frente a una gran oportunidad de reducir el efecto invernadero, conservar nuestros recursos naturales e incrementar la cobertura de energía para familias del sector rural colombiano (Fotovoltaica, 2017).

4.5.3 *Tasas de captación de radiación y temperatura en estaciones climatológicas*

A continuación se describen los parámetros empelados en este trabajo para estudiar la radiación a partir de la información de las estaciones climatológicas locales y remotas.

- ***Promedio histórico diario mensual de radiación solar***

En el presente trabajo, se entenderá como promedio histórico diario medio mensual al promedio de todos los días analizados para cada uno de los meses del año, luego de haber realizado la sumatoria de la radiación solar del día.

Promedio de los días n analizado del mes durante los años de analisis $\left(\sum_{\text{Hora } 1}^{\text{Hora } 24} \text{Radiación solar día n analizado} \right)$

- ***Radiación solar histórica mensual***

La radiación solar histórica mensual, se entenderá como la sumatoria de la radiación solar para todos los días del mes en el periodo de años analizados.

$\sum_{\text{Día } 1}^{\text{Día } 28} \text{Radiación solar para cada uno de los meses durante los años de analisis}$

- ***Radiación solar histórica anual***

La radiación solar histórica anual, se entenderá como la sumatoria de la radiación solar de los 12 meses para cada uno de los años analizados.

$\sum_{\text{Mes } 1}^{\text{Mes } 12} \text{Radiación solar para cada uno de los años analizados}$

4.6 PARÁMETROS DE EFICIENCIA DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

Para calcular los rendimientos y eficiencias de los SSFV que se analizaron en el objetivo 3, se deben tener en cuenta los cálculos que se presentan a continuación, ya que son variables que dependen de factores diferentes para cada uno de los sistemas como la temperatura ambiente, ubicación, tecnología del panel, inversor, y que inciden directamente en los rendimientos.

4.6.1 *Energía solar diaria recibida por el generador fotovoltaico E_{solar} .*

Es el producto de la irradiación diaria $G_{d,B}$ y el área del generador en m^2 , y se mide en Wh. La irradiación diaria es energía diaria recibida sobre el plano generador y se mide en Wh/m^2 .

$$E_{solar} = G_{d,B} \times Area. \quad (4)$$

4.6.2 *Energía diaria generada en continua E_{DC}*

Es la energía diaria a la entrada del inversor, se mide en Wh o en kWh y se calcula como:

$$E_{DC} = \int P_{DC} dt = \int I_{DC} V_{DC} dt. \quad (5)$$

Donde, I_{DC} es la corriente generada en continua y V_{DC} es la tensión generada en continua y su producto P_{DC} es la potencia generada en continua.

4.6.3 *Energía diaria generada en alterna E_{AC}*

Es la energía diaria a la salida del inversor se mide Wh o en kWh y se calcula como:

$$E_{AC} = \int P_{AC} dt \quad (6)$$

Donde P_{AC} es la potencia activa que se define como el producto entre la corriente y la tensión generada en alterna:

$$P_{AC} = I_{AC} * V_{AC} * \cos \varphi \quad (7)$$

Que coincide con la potencia aparente cuando el $\cos \varphi = 1$. Esta energía E_{AC} se suele expresar también en kVAh.

4.6.4 Rendimientos en los SSFV

El rendimiento del generador η_{gen} es el cociente entre la energía generada a la salida del generador (entrada del inversor) y la energía solar recibida en el generador fotovoltaico. Se expresa en %.

$$\eta_{gen} = \frac{E_{DC}}{E_{solar}} * 100. \quad (8)$$

El Rendimiento del inversor η_{inv} es el cociente entre la energía a la salida del inversor E_{AC} y su energía a la entrada E_{DC} . Se expresa en %.

$$\eta_{inv} = \frac{E_{AC}}{E_{DC}} * 100. \quad (9)$$

El Rendimiento del sistema $\eta_{sistema}$ es el cociente entre la energía a la salida del inversor y la energía solar recibida por el sistema, expresado en %.

$$\eta_{sistema} = \frac{E_{AC}}{E_{solar}} * 100. \quad (10)$$

Sin embargo, a la hora de poder comparar las eficiencias de los sistemas fotovoltaico se definen otros parámetros que involucran características que permiten poderlos comparar con otros sistemas de características diferentes.

4.6.5 Rendimiento energético de la instalación o performance ratio PR.

El rendimiento global, PR, se utiliza ampliamente en el ámbito fotovoltaico como indicativo de calidad de los sistemas desde que, en 1998, fuese incluido en un estándar IEC (IEC International Standard, 1998). Este parámetro se define como la relación entre la energía que un sistema fotovoltaico produce y que produciría un hipotético sistema ideal, entendido como uno cuyos módulos solares trabajen siempre a la temperatura de referencia (25°C) y que, por lo demás, este totalmente libre de pérdidas.

Es el cociente entre la energía diaria generada por el sistema y la que generaría en condiciones ideales, es decir, sin pérdidas y se expresa en %.

$$PR = \frac{E_{AC}}{E_{ideal}} * 100. \quad (11)$$

E_{AC} es la energía diaria generada por el sistema y es la energía generada medida a la salida del inversor. La energía ideal se calcula como:

$$E_{ideal} = E_{solar} * \eta_{STC} \quad (12)$$

Es decir, el producto de la energía solar recibida por el generador por su rendimiento en condiciones estándar de medida.

4.6.6 Productividad diaria o Yield

Se define como el cociente entre la energía diaria producida y los Vatios pico instalado, y por tanto sus unidades son kWh/kWp.

$$Yield = \frac{E_{CA}}{P_{n,PV}} \quad (13)$$

Donde, $P_{n,PV}$ es la potencia nominal del generador fotovoltaico medida en condiciones estándar. Hay una manera sencilla para calcular el PR a partir del Yield y es:

$$PR(\%) = \frac{Yield}{Y_R} = \frac{Yield}{G_{d,B}/1000} * 100 \quad (14)$$

Donde Y_R se llama el yield de referencia y se define como el cociente entre la radiación solar incidente en el plano generador y la irradiancia en condiciones estándar de medida ($1000\text{W}/\text{m}^2$).

4.6.7 Pérdidas por temperatura

En el caso de los módulos de silicio monocristalino, la potencia de salida cae aproximadamente un 4% por cada aumento de temperatura de 10°C . Esto se debe principalmente al efecto del calentamiento en el voltaje de circuito abierto de las células fotovoltaicas (Mulcué-Nieto, 2014). La expresión más común para calcular la potencia máxima que puede entregar cada módulo es la propuesta por Osterwald (1986), ya que produce resultados satisfactorios (Almonacid, Rus, Pérez-Higueras, & Hontoria, 2011) a pesar de su simplicidad. Este modelo utiliza las condiciones STC como punto de referencia:

$$P_{max} = P_{max,STC} \frac{G'_{(\beta,\alpha)}}{G_{STC}} [1 + \gamma(T_C - 25)] \quad (15)$$

Donde P_{max} es la potencia máxima en W, $G'_{(\beta,\alpha)}$ la irradiancia incidente en la superficie en W/m^2 , $P_{max,STC}$ es la potencia máxima del módulo en condiciones STC en W, $G_{STC} = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$, γ es el coeficiente de variación del pico de potencia con la temperatura, y T_C la temperatura instantánea de las células fotovoltaicas. Este último está dado por:

$$T_C = T_a + G'_{(\beta,\alpha)} \frac{TONC-20}{800}, \quad (16)$$

Donde T_a es la temperatura ambiente y T_{ONC} es la temperatura de funcionamiento nominal de la celda, es decir, la alcanzada en condiciones de incidencia normal bajo una irradiancia igual a 800 W / m^2 y una temperatura ambiente de 20° C .

De acuerdo con lo anterior, las pérdidas de temperatura instantáneas se darían por la diferencia entre la potencia real P_{max} y la potencia hipotética producida si las células estuvieran trabajando a 25° C , lo que resultaría en:

$$L_{temperature} = -\gamma(T_c - 25) \quad (17)$$

Se puede ver que estas pérdidas dependen de la temperatura de las células, es decir, de la temperatura ambiente y de la irradiancia incidente en el plano del generador.

El evaluar todos las variables anteriormente mencionados permite conocer bajo diferentes parámetros cómo se comporta el sistema de generación de energía solar en particular y que rendimientos presenta respecto al diseño de la capacidad de los paneles, inversor, cableado, orientación, ubicación y a las características climatológicas del lugar.

5. METODOLOGÍA

En este trabajo fue producto de una investigación aplicada, con un enfoque cuantitativo, que constó de tres objetivos específicos que se abordaron mediante metodologías específicas que se describen a continuación.

5.1 TECNOLOGÍAS Y APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR EN CALDAS

Para el primer objetivo de este trabajo se realizó inicialmente una fase exploratoria en la cual se determinaron los lugares del Departamento de Caldas donde existen sistemas solares fotovoltaicos instalados; seguidamente, se realizó una fase descriptiva a partir de la información recopilada por medio de entrevistas y un instrumento de evaluación aplicado a los responsables de los sistemas de generación instalados.

Para desarrollar el objetivo de identificación de tecnologías y aplicaciones en el Departamento de Caldas, se procedió en primer lugar a realizar una investigación en fuentes primarias y secundarias, para identificar qué lugares del departamento contaban con sistemas solares fotovoltaicos instalados. Posteriormente, con la colaboración de profesionales expertos en el tema de la Universidad Autónoma de Manizales, Universidad Autónoma de Occidente y del Servicio Nacional de Aprendizaje Regional Caldas SENA se construyó el instrumento de evaluación que permitiría recolectar la información encontrada en el departamento acerca de los sistemas solares FV instalados y sus aplicaciones. (Anexo 1). En el instrumento se tuvieron en cuenta 6 criterios de segmentación para la clasificación de la

información según el área del tema específico que se quería analizar. De esta manera, se abarcaron los diferentes temas de interés en cuanto a las tecnologías existentes en el Departamento de Caldas, su uso y aplicaciones, así como la valoración que dan a estos sistemas y sus expectativas frente a ellos. A continuación, se presentan los 6 criterios y las preguntas que hacen parte de ellos.

Criterio de segmentación I. Preguntas generales

En esta sección se buscaba indagar sobre el conocimiento de los encuestados en el tema de energías renovables. Las preguntas de esta sección son:

1. ¿Qué conoce sobre energías renovables?
2. ¿Cómo adquirió tal información?
3. ¿Qué tipo de energía renovable está empleando en este momento?

Criterio de segmentación II. Información de la empresa que suministra la energía eléctrica

En esta sección se buscaba conocer acerca de las características del suministro de energía eléctrica a través del sistema interconectado nacional. Las preguntas de esta sección son:

1. ¿Cuál es la empresa que le provee el suministro de energía eléctrica?
2. ¿Cuál es el costo del kWh?
3. ¿Cuál es el tipo de contrato que tiene con esta empresa?
4. ¿Cuál es la potencia del sistema (generado)?
5. ¿Cuál es el nivel de Tensión del sistema?
6. La planta es: Propia, concesión o comodato
7. ¿Cuál es su demanda de energía kWh/mes?
8. ¿En qué horarios funciona su operador de red?

Criterio de segmentación III. Información del sistema solar fotovoltaico en particular que está usando y sus características.

En esta sección se buscaba conocer específicamente el tipo de generación de energía solar con el que contaban y las características específicas del sistema instalado. Las preguntas de esta sección son:

1. ¿Qué tipo de sistema solar está empleando en este momento?
2. ¿Cuál es el tipo de generación solar fotovoltaica con el que cuentan actualmente?
3. ¿Qué característica tiene el sistema solar fotovoltaico instalado?

Criterio de segmentación IV. Usos dados a la energía solar fotovoltaica generada

En esta sección se buscaba indagar acerca del sector al que pertenecía el sistema de generación de energía solar instalada, los usos que le daban a la energía generada y si le habían realizado alguna ampliación al sistema. Las preguntas de esta sección son:

1. ¿Qué tipo de uso tiene su instalación de generación de energía solar fotovoltaica?
2. ¿Cuáles son las aplicaciones en las que emplea la energía solar fotovoltaica generada por el sistema instalado?
3. ¿Ha realizado alguna ampliación al sistema? (número de paneles, potencia instalada etc)
4. ¿Ha aumentado los consumos del sistema desde su implementación?

Criterio de segmentación V. Costos del sistema instalado

En esta sección se buscaba conocer acerca de todos los costos derivados del sistema de generación de energía solar instalada y las actividades derivadas al mantenimiento del sistema. Las preguntas de esta sección son:

1. ¿Cuánto tiempo tardo la instalación del sistema solar fotovoltaico con el que cuentan?

2. ¿Cuál fue el costo global de la instalación del sistema de generación de energía solar instalado?
3. ¿Cuánto es el tiempo de retorno de inversión proyectado para el sistema de energía solar instalado?
4. ¿Tiene usted documentación que den cuenta de los costos de la inversión del proyecto o instalación solar FV?
5. ¿Contó con algún subsidio o sistema especial de financiamiento para la construcción del sistema de generación de energía solar?
6. ¿Realiza mantenimiento al sistema?
7. ¿Qué tipo de mantenimiento realiza?
8. ¿Cuál es la frecuencia con la que se realiza mantenimiento al sistema?
9. ¿Cuál es el costo del mantenimiento y operación del sistema?
10. ¿Cuáles considera que son las principales falla y problemas del sistema?
11. ¿Qué personal maneja el sistema y que formación tiene y que dificultades encuentra en el manejo?

Criterio de segmentación Área VI. Grado de Satisfacción

En esta sección se buscaba indagar acerca del grado de satisfacción y el cumplimiento de las expectativas derivadas del sistema de generación de energía solar instalado. Las preguntas de esta sección son:

1. ¿Está en funcionamiento el sistema actualmente?
2. ¿Cuál es su percepción sobre las energías renovables ahora que usa una de ellas?
3. ¿La instalación del sistema de generación de energía solar cumplió con las expectativas que tenía?
4. Indicadores de satisfacción
5. ¿Ampliaría usted la capacidad instalada del sistema actual?
6. ¿Complementaría el sistema actual con otro tipo de energía renovable?
7. En una escala de 1 a 5, siendo 5 muy satisfactorio y 1 insatisfactorio, ¿cómo califica su grado de satisfacción con el sistema que tiene instalado?

La población objeto para la aplicación del instrumento fue todo el Departamento de Caldas, por lo cual, se dividió el departamento en subregiones y de esta manera se realizaron las visitas a cada municipio para la aplicación del instrumento.

Fotografía 8. Regiones del Departamento de Caldas



Fuente: Gobernación de Caldas

La primera indagación e investigación de lugares en los que se encontraba instalados sistemas solares fotovoltaicos fue en la región Centro Sur del departamento que comprende los municipios de Chinchiná, Manizales, Neira, Palestina y Villamaría. Posteriormente, se realizaron las visitas a los demás departamentos según la región a la que pertenecían.

- **Bajo Occidente:** Anserma, Belalcázar, Risaralda, San José y Viterbo
- **Alto Occidente:** Filadelfia, La Merced, Marmato, Riosucio y Supía
- **Norte:** Aguadas, Aránzazu, Pácora y Salamina
- **Alto Oriente:** Manzanares, Marquetalia, Marulanda y Pensilvania
- **Magdalena caldense:** La Dorada, Norcasia, Samaná, Victoria

En cada uno de los municipios del Departamento de Caldas se realizó la indagación mediante diferentes canales que permitieran conocer los lugares del municipio que contaban con instalaciones solares fotovoltaicas. Los canales utilizados fueron *el voz a voz* con los diferentes habitantes del municipio, indagación en las alcaldías, secretarías de planeación e infraestructura, oficinas del operador de red CHEC y las emisoras en cada municipio. De esta manera fue posible identificar los sistemas existentes y aplicar el instrumento de recolección de información. Posteriormente se realizó la sistematización de la información y el análisis de datos de cada uno de los criterios de segmentación, a través de análisis estadísticos cualitativos y cuantitativos.

5.2 ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE RADIACIÓN SOLAR

Para el segundo objetivo, la estimación del potencial de radiación solar, se realizó un análisis descriptivo e inferencial con la información de las variables climatológicas (radiación y temperatura) registradas en estaciones meteorológicas instaladas en el Departamento de Caldas. Para realizar la estimación del potencial de radiación solar a través de la información climática existente se analizaron bases de datos de diferentes fuentes, y tres estaciones meteorológicas locales del IDEA, tres estaciones de la NASA (NASA, 2018) y tres estaciones remotas de la National Solar Radiation Database (NSRDB) (Laboratory, 2018). Las estaciones NSRDB son una colección en serie completa de los valores por hora y media hora de las tres mediciones más comunes de radiación solar: horizontal, directa normal, y horizontal difusa, así como otros datos meteorológicos.

Los datos disponibles en el NSRDB para varios países internacionales se desarrollaron utilizando uno de dos modelos diferentes: el Modelo solar físico (PSM) que se utiliza para la última versión de los datos NSRDB de los EE. UU, y el modelo semi empírico SUNY. Para

Colombia, el modelo empleado es el PSM con series cada media hora y una resolución espacial de 4km x 4km en un periodo de tiempo analizado desde 1999 y 2014 para Manizales, Chinchiná y Norcasia.

Las estaciones remotas de la NASA POWER Data Access Viewer Prediction Of Worldwide Energy Resource v1.0.9 contienen parámetros meteorológicos y relacionados con la energía solar formulados para evaluar y diseñar sistemas de energía renovable, y permite acceder a datos promediados diarios para rangos de fechas y parámetros específicos para una región de $\frac{1}{2}$ x $\frac{1}{2}$ grado para todo el mundo. Las bases de datos analizadas fueron para Manizales, Chinchiná y Norcasia con una frecuencia de datos diaria desde 1981 hasta 2017.

Por último, se analizaron estaciones meteorológicas locales del IDEA y específicamente del Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas (CDIAC) con una plataforma online que permite visualizar la información ambiental del Departamento de Caldas. Este Centro es parte de una alianza estratégica entre la Universidad Nacional de Colombia (UN) sede Manizales y La Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS). Se analizó un histórico de datos meteorológicos e hidrometeorológicos provenientes de las estaciones ubicadas Yarumos, Ingeominas y Posgrados, con frecuencia de medición cada 5 minutos desde 2004 hasta 2014.

Finalmente, se obtuvieron graficas de radiación solar mensual, promedio histórico diario medio mensual de radiación solar, y variación anual de radiación solar para cada una de las estaciones de las diferentes fuentes anteriormente mencionadas. En la tabla 3, se presenta un resumen de la información de las fuentes de datos empleadas.

Tabla 3. Resumen de estaciones analizadas y sus características

Característica	Estación	Fuente	Latitud	Longitud	Registro Desde	Registro Hasta	Años Registrados
Estación Meteorológica	Yarumos	IDEA	5°3'47,41"	75°28'52,63"	2005	2016	11
Estación Meteorológica	Posgrados	IDEA	5°3'22,2"	75°29'32,3"	2005	2016	11
Estación Meteorológica	Ingeominas	IDEA	5°4'17,2"	75°31'27,5"	2005	2016	11
Estación remota	Manizales	Nasa	5°03'58"	75°29'05"	1988	2017	29
Estación remota	Chinchiná	Nasa	4°58'50"	75°36'27"	1988	2017	29
Estación remota	Norcasia	Nasa	5°34'27"	74°53'20"	1988	2017	29
Estación remota	Manizales	NSRDB	5°03'58"	75°29'05"	1998	2015	18
Estación remota	Chinchiná	NSRDB	4°58'50"	75°36'27"	1998	2015	18
Estación remota	Norcasia	NSRDB	5°34'27"	74°53'20"	1998	2015	18

Fuente: Propia

La información fue analizada empleando las herramientas gráficas y estadísticas de Microsoft Excel para el análisis de estadística descriptiva. Por otra parte, se empleó el software SSPS para el análisis de estadística inferencial donde se identificaron tendencias, correlaciones entre la radiación y la temperatura y diferencias estadísticamente significativas entre las estaciones. Finalmente, se realizó la espacialización de la información tomando como base los mapas del IDEAM y las correlaciones específicas para la zona (Ocampo & Vélez 2015).

5.3 DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE SISTEMAS INSTALADOS

En el tercer objetivo, se registraron los parámetros que influyen en el desempeño energético en tres estudios de caso de sistemas fotovoltaicos instalados en el Sena Regional Caldas. Para evaluar el desempeño energético de los sistemas solares instalados en el Departamento de Caldas se analizaron tres sistemas del Servicio Nacional de Aprendizaje

SENA Regional Caldas: monocristalino conectado a la red de 2040 W, policristalino conectado a la red de 2115 W y policristalino de 1140 W aislado. Las variables que se midieron a cada uno de los tres sistemas fueron temperatura de los paneles, temperatura del inversor, tensión de entrada y salida, corriente de entrada y salida, potencia de entrada y salida, temperatura ambiente y radiación solar de la estación meteorológica instalada en el sitio. Los equipos empleados para la medición de las variables de los sistemas solares fotovoltaicos fueron:

- 3 multímetros aptos para descargar datos en computador
- Inversor ABB PVI-3.0-OUTD-S-US-A de 3000W
- Inversor cargador Out Back con regulador FLEXmax80
- Computadores
- Estación meteorológica DAVIS- Vantage PRO2

En la fotografía 9, se observa el inversor ABB, el cual registraba los valores de los dos sistemas conectados a la red, el policristalino y el monocristalino.

Fotografía 9. Inversor ABB sistemas ON GRID



Fuente: Propia

Del inversor se tomaron los siguientes datos:

- Corriente y tensión de entrada del arreglo 1.
- Corriente y tensión de entrada del arreglo 2.
- Potencia de entrada de cada arreglo (1,2)
- Temperatura del inversor y potencia de salida total del inversor

Fotografía 10. Características de entradas sistema solar fotovoltaico 1



Fuente: Propia

Fotografía 11. Características de entradas sistema solar fotovoltaico 2

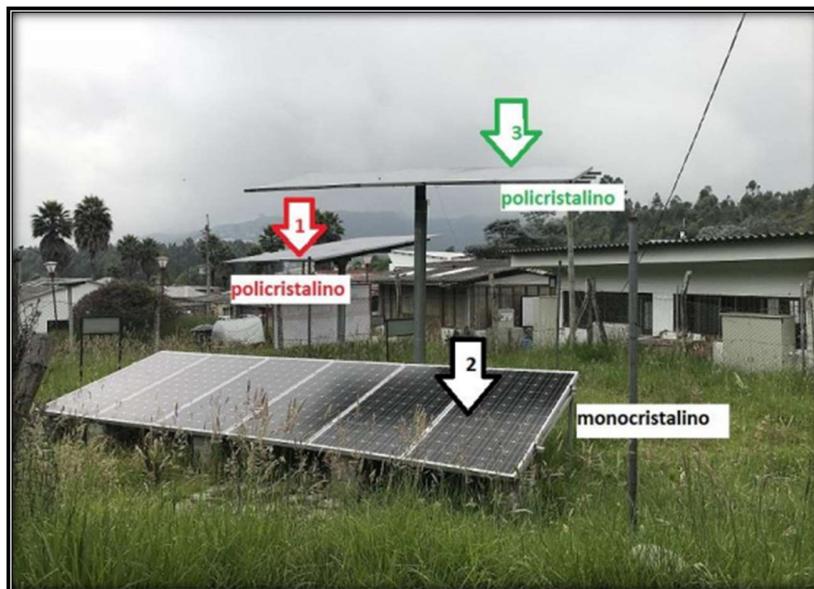


Fuente: Propia

En la fotografía 12, se puede observar una fotografía de la ubicación de los tres sistemas solares fotovoltaicos analizados, a los cuales se les midieron los parámetros antes mencionados que posteriormente fueron analizados.

Con el inversor cargador Out Back con regulador FLEXmax80 se registraron las variables del sistema solar fotovoltaico aislado.

Fotografía 12. Sistemas solares fotovoltaicos analizados SENA



Fuente: Propia

Fotografía 13. Inversor cargador Out Back con regulador FLEXmax80



Fuente: Propia

De este equipo se tomaron los datos del arreglo de paneles policristalino:

- Tensión de entrada
- Corriente de entrada
- Tensión de salida
- Corriente de salida
- Potencia generada en una hora

Al finalizar la recolección de datos se realizaron los análisis para los datos diarios a través de los siguientes modelos matemáticos, presentados previamente en el marco teórico de este trabajo:

- Energía solar diaria recibida por el generador fotovoltaico E_{solar} .
- Energía diaria generada en continua E_{DC}
- Energía diaria generada en alterna E_{AC}
- Rendimiento del generador η_{gen}
- Rendimiento del inversor

- Rendimiento del sistema
- Rendimiento energético de la instalación o performance ratio PR
- Productividad diaria o Yield

La toma de datos se realizó para los siguientes días en diferentes épocas del año, teniendo en cuenta la variabilidad climática que presenta el Departamento de Caldas, cada 10 minutos desde las 8:00 am hasta las 5:00 pm con un total aproximado de 500 datos tomados.

- 17, 19, 20 y 24 de abril de 2018
- 3 y 11 de mayo de 2018
- 21 y 22 de agosto de 2018
- 7, 13 y 14 de septiembre de 2018

Finalmente, se realizó una comparación de los tres sistemas en términos de su performance ratio y la eficiencia de los sistemas frente a las diferentes variables medidas y calculadas.

6. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de los análisis obtenidos para cada uno de los objetivos. Para el primer objetivo se presenta una descripción del análisis estadístico de la encuesta realizada en los diferentes municipios del departamento. Para el segundo objetivo, se especifica la variación de la radiación solar en las escalas temporales diaria, mensual y anual de las estaciones evaluadas. Finalmente, para el tercer objetivo se evaluó el desempeño energético de los tres sistemas analizados del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA Regional Caldas, monocristalino conectado a la red, policristalino aislado y policristalino conectado a la red.

6.1 CARACTERIZACIÓN DE TECNOLOGÍAS Y APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR EN CALDAS

En esta sección se presentan los resultados relacionados con el objetivo 1. Se realiza una descripción general de los sistemas solares FV encontrados en el Departamento de Caldas, posteriormente se presenta el análisis gráfico según los resultados obtenidos para cada una de las categorías.

8.1.1. Descripción general de los sistemas encontrados

En la tabla 4 se presentan los SSFV instalados en el Departamento de Caldas encontrados en el desarrollo de este trabajo.

Tabla 4. Descripción de los SSFV encontrados

Subregión	Municipio	Sitio de Instalación
Subregión Centro Sur	Manizales	Banco de la Republica
		Luminaria estación Uribe
		Universidad Nacional campus La Nubia-Bloque W
		Universidad Nacional campus La Nubia
		Iluminación Parque de la Mujer
		Servicios de Transito Manizales
		Sena Regional Caldas
		Casa residencial barrio Chipre
		Concentrados del Centro
	Casa residencial San Peregrino	
	Villamaría	Finca La Fonda
	Chinchiná	Estación meteorológica Las Pavas
		Agropecuaria La Pesebrera
Palestina	Confa-La Rochela	
Subregión Alto Occidente	Filadelfia	Finca San Fernando
		Finca Rural
	Riosucio	Restaurante La Roca
		Luminaria Parque Principal
	Colegio Cultural	
Subregión Bajo Occidente	Viterbo	Hotel El Samán
	Anserma	Colegio El Horro
Subregión Norte	Aguadas	Casa adulto mayor
	Pácora	Vivienda cra3 n°3-83
Subregión Magdalena Caldense	La Dorada	Barrio La Alameda
		Barrio Pancoger
		Barrio Pancoger
		Barrio Pancoger
		Sena seccional La Dorada

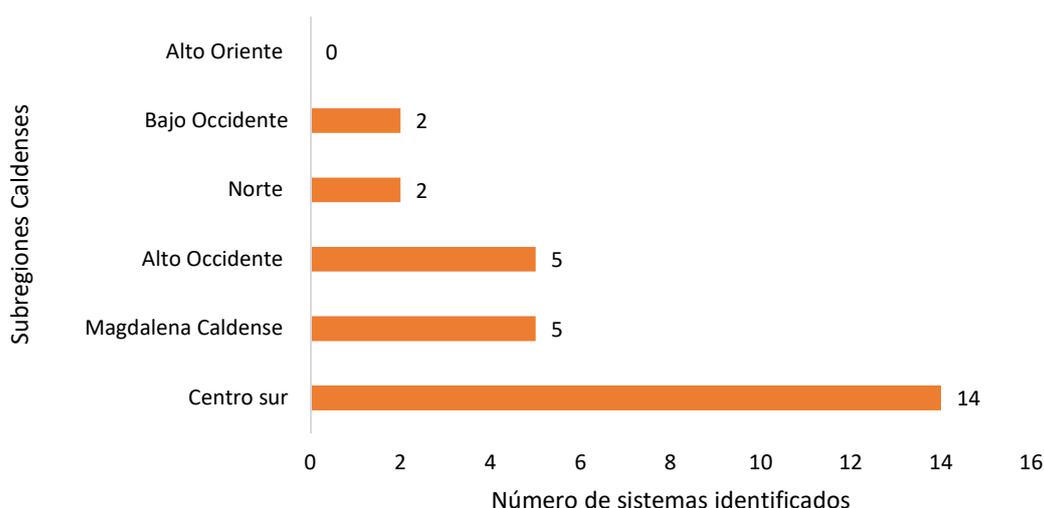
Fuente: Propia.

Es necesario destacar que las estaciones climáticas del IDEA e IDEAM cuentan con un sistema de generación solar para el suministro de energía que requieren las estaciones; en este trabajo sólo se incluyó uno de ellos ya que son sistemas similares. Además, se realizó una indagación puntual sobre el uso de SSFV con los representantes de las siguientes mesas sectoriales y de competitividad del Departamento de Caldas: metalmecánica, confección, masas, cítricos, agroclimática, lácteos. Por otra parte, se indagó con asociaciones de productores como: Asofrucol, Citricaldas, ASOMUMA y el Comité de Ganaderos; con la

Agencia de Desarrollo Rural y la Unidad de Desarrollo Rural. La Asociación Nacional de Industriales ANDI reporta que diferentes empresas tienen proyectos de generación con fuentes no convencionales, dos de ellas están en el Proyecto Nacional de Energía Solar fotovoltaica que es coordinado por la Cámara de Comercio de Bogotá y la ANDI, pero no hay reportes puntuales aun en Caldas.

Se encontró en este estudio, que en casi todas las regiones del Departamento de Caldas se presentan sistemas solares, con excepción del Alto Oriente donde no se identificaron sistemas, tal como se observa en la Figura 1. En esta región se encontró un alto grado de desconocimiento acerca de este tipo de generación de energía no convencional, la cual les pareció muy interesante luego de una breve explicación del tema. Las personas entrevistadas manifestaron que solo se logrará implementar este tipo de tecnología en la medida que, desde la academia y el gobierno, se elaboren planes de divulgación y estrategias claras para su aplicación.

Figura 1. Sistemas de energía solar fotovoltaicas en Caldas



Fuente: Propia

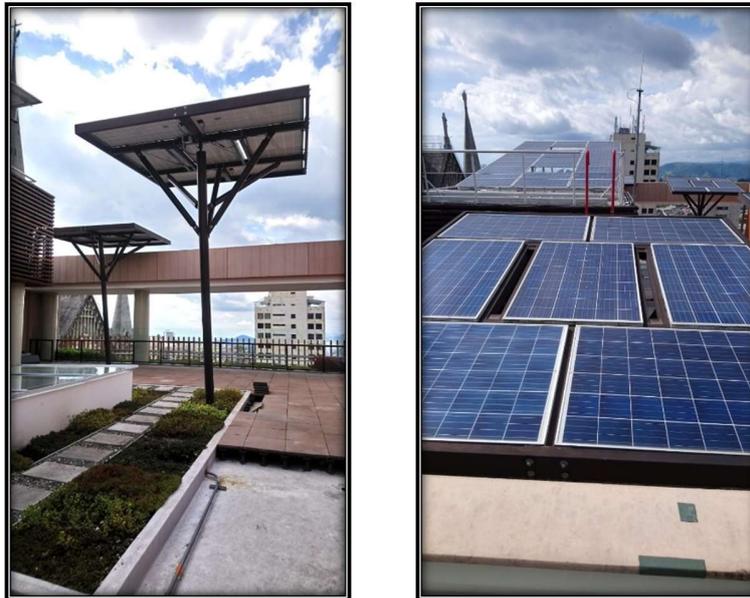
Se observa un mayor uso en la región Centro Sur que concentra el 50% de los sistemas detectados, seguida por las regiones Magdalena Caldense y Alto Occidente con un 18%, cada uno, y, finalmente, las regiones Bajo Occidente y Norte con un 7% cada uno.

A continuación, se presenta, una descripción de los sistemas de generación de energía solar fotovoltaicas instaladas en las subregiones del Departamento de Caldas.

- ***Subregión Centro Sur***

Las instalaciones de generación de energía solar de la región centro sur se encuentran principalmente en Manizales, capital del departamento, como es el caso del sistema solar fotovoltaico del Banco de la Republica (Fotografía 14) con 14kW de potencia instalada.

Fotografía 14. Sistema solar fotovoltaico Banco de la República



Fuente: Propia

En el municipio de Manizales, también se encontró una aplicación de generación de energía solar, la cual, entro en funcionamiento hace tres meses y cuenta con 36 paneles solares de 270W para un total de 9720W instalados como se observa en la fotografía 15.

Fotografía 15. SSFV Concentrados del Centro – Manizales



Fuente: Propia

En el Servicio Nacional de Aprendizaje SENA regional Caldas, se encontraron principalmente tres sistemas de generación de energía solar fotovoltaica a pequeña escala. Una de ellas es un sistema de 6 paneles monocristalinos de 340Wp cada uno para un total de 2040 W como se observa en figura 16, el cual funciona con un inversor ABB que permite tener dos SSFV en la entrada. El otro sistema conectado a dicho inversor posee 9 paneles policristalinos de 235Wp cada uno para un total de 2115 (Figura 17); ambos sistemas tienen conexión On Grid. Por otro lado, cuentan con sistema Off Grid de 1140W como puede observarse en la fotografía 17.

Fotografía 16. SSFV monocristalino 2040W



Fuente: Propia

Fotografía 17. SSFV policristalinos Off Grid (Derecha) y On Grid (Izquierda)



Fuente: Propia

En la zona rural del municipio de Manizales, se encontró un sistema de generación de energía solar para una vivienda que no tiene acceso a las redes de distribución del operador de red y quienes hasta antes de la implementación del sistema solo contaban con iluminación a la luz de la vela. Dicha instalación puede observarse en la fotografía 18.

Fotografía 18. SSFV vereda playa larga finca La Fonda



Fuente: Propia

En el municipio de Chinchiná, se encontraron varios sistemas de generación de energía solar fotovoltaica. Uno de ellos tiene un uso agropecuario (La Pesebrera), cuenta con 20 m² de paneles solares y está conectado a la red; también cuenta con una estación meteorológica cuyo funcionamiento es a través de energía solar, al igual que semáforos y cámaras como se observa en la fotografía 19.

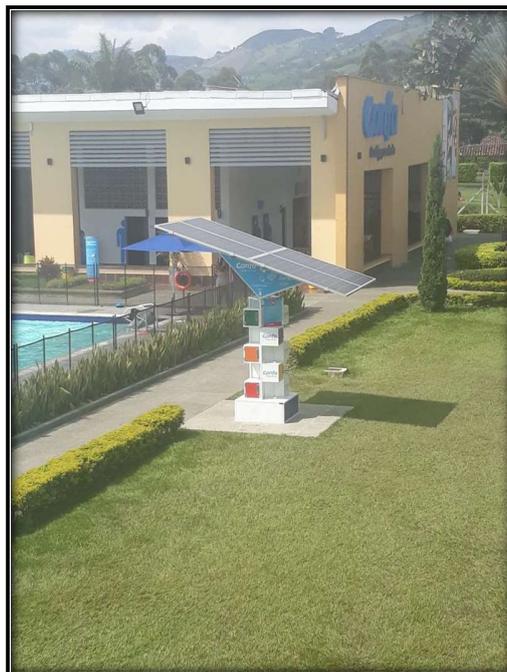
El sistema más grande instalado en el Departamento de Caldas se encuentra en el municipio de Palestina de la región centro sur con una capacidad de energía solar instalada de 24.4kW. Este sistema está ubicado en el centro recreacional de CONFA La Rochela, se encuentra conectada a la red y abastece la demanda generada en iluminación y electrodomésticos. Dicho centro recreacional también cuenta con un sistema de generación de energía solar para cargar equipos móviles tal como se muestra en la fotografía 20.

Fotografía 19. SSFV municipio de Chinchiná



Fuente: Propia

Fotografía 20. SSFV cargador de equipos móviles La Rochela



Fuente: Propia

- ***Subregión Alto Occidente***

En el área rural del municipio de Filadelfia se encontraron dos sistemas solares fotovoltaicos aislados (fotografía 21) con sistema de almacenamiento en dos viviendas residenciales que no contaban con suministro de energía por parte del operador de red, por lo cual, este sistema les da la posibilidad de poder suplir las necesidades básicas a las familias que las habitan.

Fotografía 21. Instalación solar fotovoltaica Finca rural Filadelfia



Fuente: Propia

En el parque de Riosucio se encuentra instalada una luminaria cuyo funcionamiento es exclusivo con energía solar (Fotografía 22). Esta luminaria es un préstamo de un proveedor de sistemas de energía solar, para que desde la alcaldía conocieran el sistema y a futuro se pudiera implementar de forma masiva como alumbrado público del municipio.

Fotografía 22. Luminaria con energía solar parque Riosucio



Fuente: Propia

En el municipio de Riosucio también se encontraron luminarias cuyo funcionamiento es con energía solar en el restaurante la Roca (fotografía 23). Este sistema cuenta con 12 luminarias para alumbrar las áreas comunes y el acceso al restaurante. Para los propietarios fue una muy buena solución, a la cual piensan realizarle ampliaciones en el corto plazo debido a los ahorros que presentan desde su implementación.

Cabe resaltar que en el municipio de Riosucio se encontraron empresas que se dedican a la instalación de sistemas solares fotovoltaicos, lo cual permite que la población tenga acceso al conocimiento en el tema y por tal motivo sea uno de los municipios que más cuenta con sistemas solares fotovoltaicos instalados a la fecha.

Fotografía 23. Luminarias restaurante La Roca Riosucio



Fuente: Propia

- ***Subregión Bajo Occidente***

En la subregión bajo occidente del Departamento de Caldas se encontraron dos aplicaciones de generación de energía SSFV, una en el municipio de Anserma en la institución educativa El Horro ubicada en el área rural, la cual cuenta con una capacidad de energía solar instalada 1500 Wp conectada a la red usada principalmente para mover maquinaria agrícola con la que cuenta el colegio.

En el municipio de Viterbo se realizó la encuesta en el hotel El Samán, el cual cuenta con una capacidad instalada de 750 Wp con energía solar y se usan exclusivamente para calentadores de agua en las habitaciones. Cabe resaltar, que en el municipio de Viterbo se

encuentran en construcción proyectos residenciales en las afueras del municipio que contarán con sistemas de generación de energía solar FV a pequeña escala para el autoconsumo.

- ***Subregión Norte***

En el municipio de Aguadas, en la región Norte del departamento, se encontró una instalación de generación de energía solar, la cual consiste en una vivienda que fue donada por un médico del municipio a dos hermanos de la tercera edad que no contaban con un lugar para vivir. Es una obra social que les permite a estas personas tener iluminación y televisor en cada uno de los cuartos; incluso, en los momentos en los cuales el municipio se queda sin energía es la única casa que continúa encendida ya que su funcionamiento en las noches se da a través del almacenamiento en baterías de la energía solar.

De igual manera, en el municipio de Pacora se encontraron las instalaciones en energía solar más antiguas del Departamento de Caldas. Estas consisten en unas luminarias de 5W aproximadamente con las cuales la propietaria de la vivienda ilumina el jardín, estas pequeñas luminarias fueron traídas por ella desde Estados Unidos hace más de 10 años y aún se encuentran en perfecto estado y funcionando.

- ***Subregión Magdalena Caldense***

En la región del Magdalena Caldense se encuentran instalados dos tipos de sistemas de generación de energía solar fotovoltaica: a nivel residencial en los barrios Pancoger y La Alameda, y a nivel institucional en el SENA sede La Dorada.

En el SENA sede La Dorada cuentan con tres paneles solares instalados, los cuales se encuentran en continuo monitoreo y actualmente solo se tienen para fines investigativos, es decir, que no se encuentran conectados a ninguna carga. Con los datos que tienen de radiación

solar de la estación meteorológica instalada cuentan con proyectos al corto plazo para suplir las necesidades de aire acondicionado que es la mayor fuente de consumo debido a las características de clima que se presentan en el municipio (Fotografía 24).

Fotografía 24. Sistema solar fotovoltaico SENA La Dorada



Fuente: Propia

En los barrios La Alameda y Pancoger del municipio de La Dorada se realizaron cuatro encuestas, pero se evidenciaron otros 15 sistemas, para un total de 19 viviendas con SSFV con las mismas características y potencias entre los 70 W y los 350 W, a los cuales, no se le realizaron encuestas debido a la dificultad de acceso. Dichos barrios, no cuentan con suministro de energía por parte del operador de red, es decir, no tienen infraestructura para la distribución de energía a través de las redes del sistema interconectado. Debido a lo

anterior, algunas de las viviendas de ambos barrios cuentan con sistemas solares fotovoltaicos, les permiten tener una mayor calidad de vida, al contar con iluminación y televisión para los momentos de esparcimiento. Dicha alternativa fue contemplada y puesta en marcha por los habitantes del barrio, en el momento en el que analizaron que el combustible diésel empleado por las pequeñas plantas de generación con las que contaban anteriormente, tenía costos mucho más altos, además de la contaminación auditiva que generaban por estar al interior de cada una de las viviendas. Todos los habitantes encuestados mostraron un grado de satisfacción alto con el uso de la energía solar FV (Fotografía 25).

Fotografía 25. Sistema solar fotovoltaico vivienda Pancoger La Dorada



Fuente: Propia

Luego de la utilización de alguna de las alternativas de generación de energía solar a lo largo del departamento, los usuarios concluyeron en que son una muy buena alternativa de

generación, que cada vez, se va haciendo económicamente más viable y accesible a los diferentes estratos sociales. Por otro lado, anotan que es una solución muy innovadora sobre todo para lugares aislados que no se encuentren en el sistema interconectado nacional de energía, y permitir que al cabo de un tiempo cuando se haya retornado la inversión, cuenten con una planta de generación de energía propia, y con un aporte importante a la reducción de gases de efecto invernadero.

A pesar de que hace algún tiempo, la utilización de fuentes de generación de energía no convencional como la energía solar era costosa para su implementación, con los avances tecnológicos y optimización de procesos, cada vez se hace más accesible como una alternativa de generación de energía y de esta manera suplir la demanda energética de la región y del país en momentos de escasas con las fuentes convencionales de generación.

8.1.2. Análisis por categorías de las respuestas dadas al instrumento

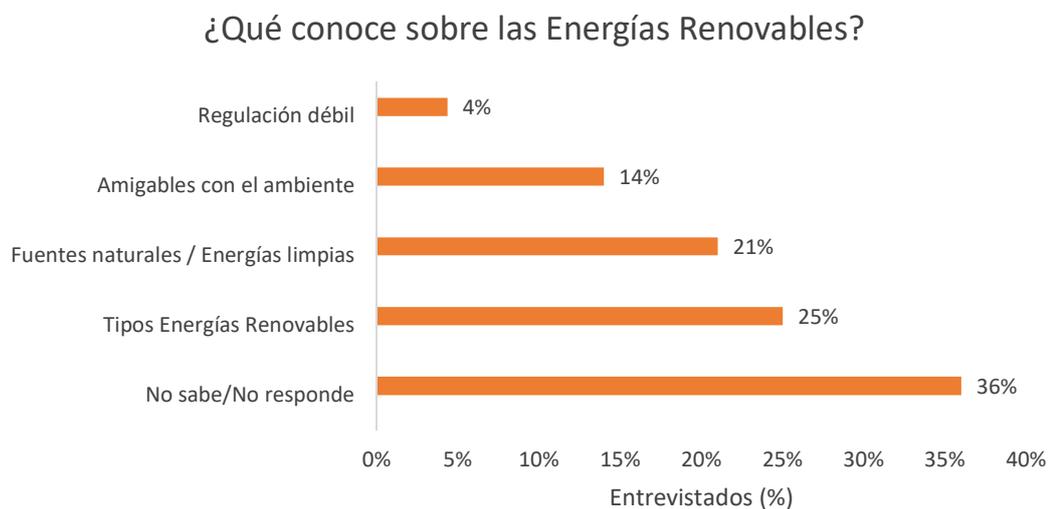
A continuación, se presentarán los resultados obtenidos después de la aplicación del instrumento de evaluación. Estos resultados se presentarán teniendo en cuenta los criterios de segmentación presentados en la metodología.

- ***Criterio de segmentación I. Preguntas generales***

Al realizar la indagación acerca de que tanto se conoce de los sistemas solares fotovoltaicos, se encontró que el 36% de los encuestados no conocía acerca de dicha alternativa de generación de energía no convencional, los 64% restantes estaban enterados de algunos de los tópicos relación con la energía solar fotovoltaica. Por ejemplo, en temas de regulación, un 4% opinó al respecto, aduciendo que hasta tanto no se tenga un camino claro del funcionamiento y operatividad de los sistemas solares fotovoltaicos, no se tendría un uso masivo en generación de energía solar. Todo esto da cuenta de que la ley 1715 fue

promulgada en mayo del 2014 pero solo hasta 3 de febrero del 2018 salió su reglamentación, la cual tiene como objeto el desarrollo y uso de fuentes no convencionales de energía dentro del sistema energético colombiano. De otra parte, reconocen tres aspectos básicamente: el beneficio de ser amigables con el medio ambiente, el significado de una energía renovable el cual catalogan como fuentes naturales y energías limpias y algunos tipos de generación de energía renovables tales como la solar, eólica, biomasa e hídrica. En la figura 2 se muestran los resultados en cuanto al conocimiento que poseen sobre energías renovables.

Figura 2. Conocimiento de las energías renovables no convencionales



Fuente: Propia

El conocimiento acerca de las energías renovables fue adquirido principalmente a través de empresas proveedores de estos sistemas de generación, así como del *voz a voz* de personas que ya contaban con alguna fuente de generación de energía renovable. Ejemplo de esto es el caso de La Dorada en los barrios Pancoger y La Alameda en el cual se hace mayor el uso a nivel residencial de la energía solar fotovoltaica como fuente de generación de energía, debido a que observan el buen funcionamiento de las viviendas vecinas. De igual

manera, la información también ha sido adquirida a través de búsquedas en internet, investigaciones y capacitaciones que se han dado principalmente hacia la capital del departamento.

- ***Criterio de segmentación II. Información de la empresa que suministra la energía eléctrica***

Para el Departamento de Caldas el operador de red que provee el suministro de energía eléctrica CHEC grupo EPM. Los precios en el costo de energía eléctrica varían desde los \$233 y los \$462 por kWh generado. En las encuestas realizadas en Filadelfia, las viviendas no se encontraban conectadas al sistema interconectado nacional, por lo cual no tenían energía en ningún momento del día, de igual manera sucede en los barrios Pancoger y La Alameda del municipio de la Dorada. Sin embargo, para el resto de los lugares donde se realizaron encuestas, contaban con suministro de energía eléctrica por parte del operador de red CHEC durante las 24 horas del día.

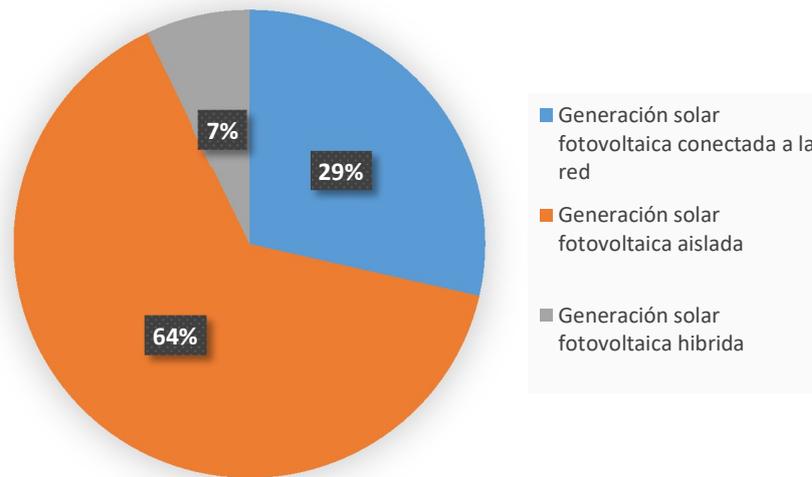
- ***Criterio de segmentación III. Información del sistema solar en particular que está usando y sus características.***

De las encuestas realizadas en el Departamento de Caldas se determinó que solo se cuenta con sistemas de generación de energía solar fotovoltaica, no se encontraron sistemas en uso con generación solar térmica. No obstante, se registra una pequeña aplicación térmica en la Buencafé Liofilizado que no fue incluida en el estudio ya que está enfocado a sistemas solares fotovoltaicos.

Según la Figura 3, el 64% de las aplicaciones corresponde a sistemas de generación de energía solar fotovoltaica aislada y son pequeñas aplicaciones. Un 29% de los SSFV

encontrados presenta un tipo de generación conectada a la red y se encuentran en la región Centro Sur, principalmente en la capital del departamento. Solamente, el 7% de las aplicaciones tiene generación híbrida; estos se encuentran muy cercanas Manizales.

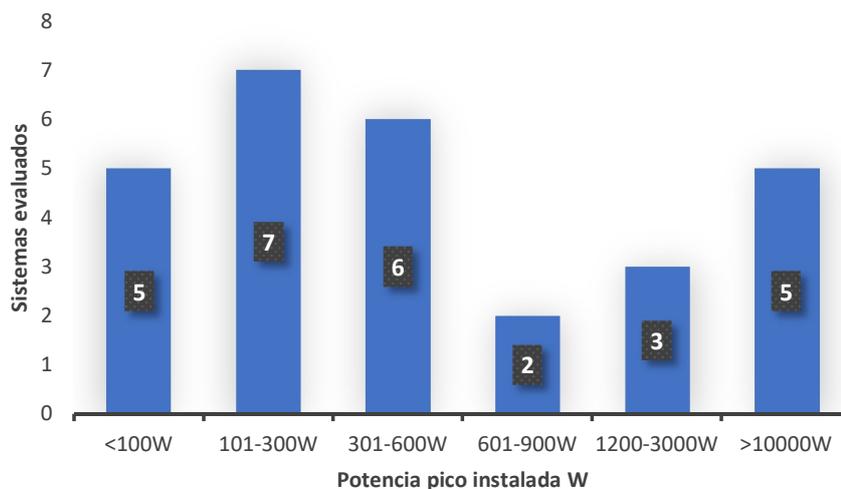
Figura 3. Tipo de generación solar fotovoltaica instalada



Fuente: Propia

La Figura 4 presenta la distribución de potencial pico instalada en los SSFV evaluados en el Departamento de Caldas. Los cuales todos se encuentran en la categoría de pequeña escala con generación entre 0 y 100 kW según la resolución CREG 030 de 2018 que entró en vigencia a partir del 1 de mayo.

Figura 4. Potencia pico instalada de los SSFV encontrados



Fuente: Propia

La mayoría de los sistemas instalados evaluados poseen una generación entre 100W y 600W (64% de los SSF encontrados); son aplicaciones a pequeña escala empleadas principalmente a nivel residencial y en viviendas sin conexión al sistema interconectado nacional. Los sistemas de menor potencia, menores a 100W, corresponden al 18% de los SSFV analizados; la energía es empleada para iluminación y para la carga de equipos pequeños como celulares y radios. Por otra parte, los sistemas con capacidades de generación de energía solar entre 1.200W - 3.000W representan el 11%; mientras que los mayores a 10.000W, el 18%; estos sistemas se encuentran en la capital del departamento. Sistemas con capacidad de generación entre 600 y 900 W se encontraron en una finca rural del municipio de Filadelfia y en la instalación del SENA regional La Dorada (Figura 4).

Las marcas empleadas en las aplicaciones de generación de energía solar para los paneles solares fueron: Gingly, E-Resky + EG Solar Ltda, Micro Aurora, Pbono Solar, Trina Solar, Solar Plus, Stion y Suntet, Green Day – Sky Day, Sunboyu-Gimco entre otras. La tecnología de paneles amorfos no se encontró en las SSFV evaluados y las que más se han

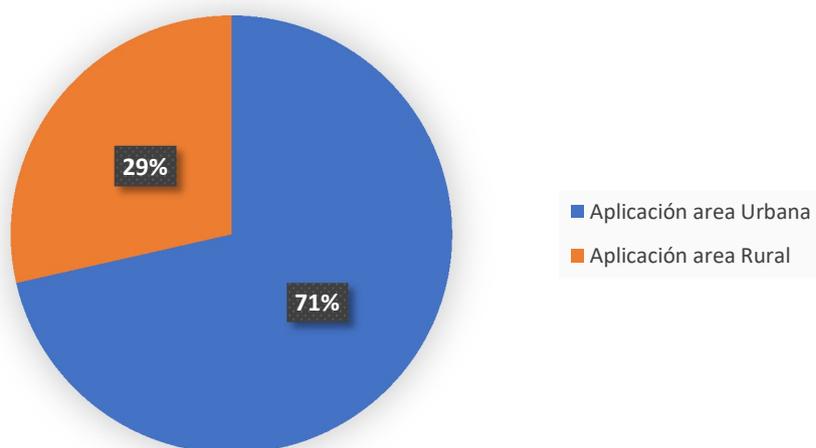
emplearon en los diferentes municipios del departamento fueron la tecnologías policristalina, predominantemente, seguida de la monocristalina.

- ***Criterio de segmentación IV. Usos dados a la energía solar fotovoltaica generada***

En la figura 5, se puede observar que la mayor parte de SSFV se encuentra en el casco urbano de los municipios. Las instalaciones en el área rural son en su mayoría viviendas que no se encontraban conectadas al sistema interconectado y aún tenían prácticas de iluminación a la luz de vela antes de la instalación del sistema.

Figura 5. Instalación del sistema en áreas rurales y urbanas

¿Aplicación instalada en el area urbana o rural?

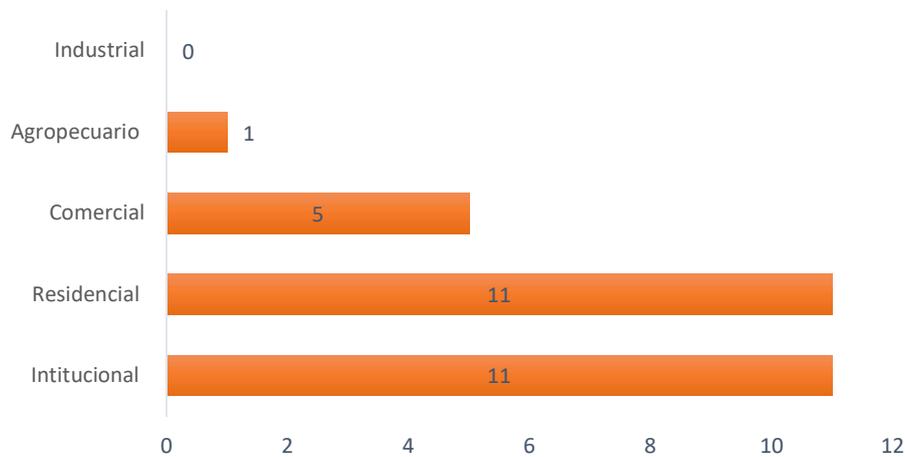


Fuente: Propia

Con relación a los sectores de la economía que cuentan con los SSFV, la Figura 6 ilustra la distribución para los sistemas evaluados.

Figura 6. Sectores con aplicaciones de SSFV en el Departamento de Caldas

Sector de la economía que usa energía solar



Fuente: Propia

Uno de los sectores que más le está apuntando al desarrollo de fuentes de generación de energía no convencionales es el institucional con un 39%, lo cual presenta un buen escenario que marca el inicio de la implementación a mayor escala de fuentes de generación de energía no convencionales desde la investigación y análisis de la energía solar como fuente de generación. Las instituciones educativas que contaba con sistemas instalados fueron: el Servicio Nacional de Aprendizaje SENA regional Caldas en la sede Manizales y en la sede La Dorada, la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales y otras instituciones gubernamentales el Servicio de Transito de Manizales y la Alcaldía de Manizales.

El sector residencial también ocupa un porcentaje importante, 39% igualando al institucional, en instalación de SSFV en el Departamento de Caldas. En el sector residencial se tienen aplicaciones a pequeña escala y de bajo costo, en las cuales se emplean pocos paneles, pero con capacidad para generar energía para sistema de iluminación y potencia como en ese caso de televisores solares.

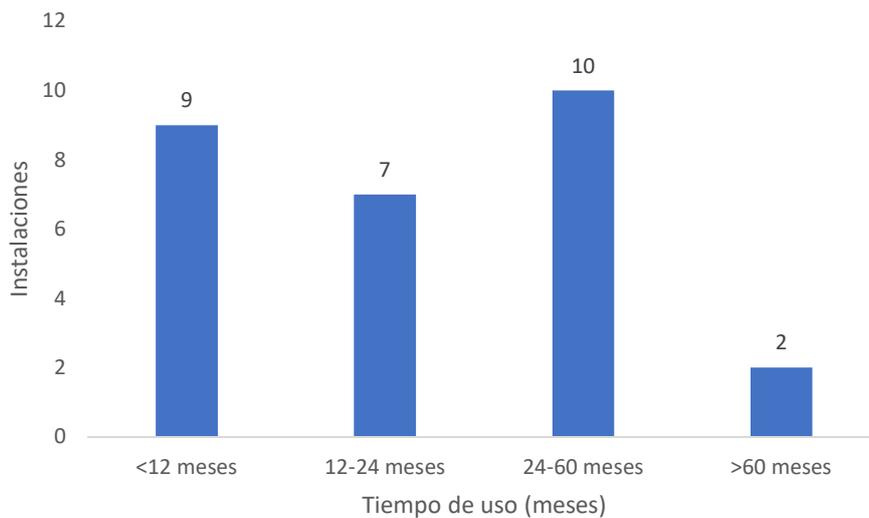
Es necesario resaltar que el principal uso dado a la energía solar FV en los sistemas instalados corresponde a los sistemas de iluminación con la tecnología LED; lo anterior ya que esta tecnología permite funcionamientos con baja potencia, lo que la hace muy eficiente e ideal para ser usada con energía solar. Se tienen además otros usos como semáforos, cargador de equipos móviles, radios, televisores y electrodomésticos de menor consumo.

Según las entrevistas, no se detectaron SSFV instalados o que se hubieran realizado aumentos de carga desde la implementación de tales sistemas.

- ***Criterio de segmentación V. Costos del sistema instalado***

En la figura 7, se observa el tiempo de uso que llevan los SSFV instalados, los sistemas con tiempo de uso menor a 12 meses se encuentran repartidos principalmente en tres regiones del departamento, Centro Sur, Alto Occidente y Magdalena Caldense; mientras que los sistemas que se están entre 12 y 24 meses se encuentran principalmente en Riosucio que corresponde a la región Alto Occidente. Los sistemas con uso entre 2 y 5 años se encuentran principalmente en la región Centro Sur y el Magdalena Caldense, las cuales llevan en funcionamiento un tiempo importante y representan el 36% de los sistemas, y los más antiguos se encuentran en la región norte en los municipios de Pacora y Aguadas con tiempos superiores a los 5 años de funcionamiento y con un porcentaje del 7%.

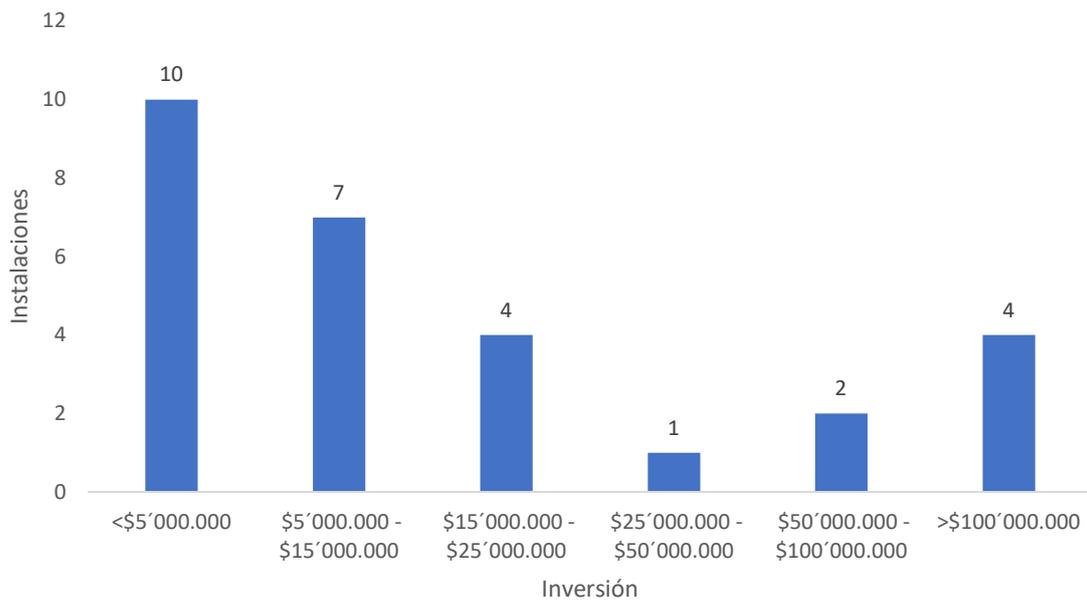
Figura 7. Tiempo de uso de los SSFV



Fuente: Propia.

Como se observa en la figura 8, un 36% de los SSFV instalados tuvieron costos menores a los \$5'000.000, lo cual es coherente a los análisis presentados anteriormente ya que la mayor cantidad de sistemas se usan a nivel residencial con generaciones a pequeña escala. Los sistemas con valores globales entre \$6'000.000 y \$25'000.000 son un poco más elaborados, en algunos casos cuentan con elementos de almacenamiento de energía, lo que hace que el coste global resulte mayor que para sistemas sin baterías. Por último, los SSFV con valores globales superiores a los \$50'000.000 fueron aquellos a escala mayores a los 10kW de potencia instalados y se encuentran principalmente a nivel institucional y comercial en la región centro sur del departamento.

Figura 8. Inversión en el SSFV instalado



Fuente: Propia

La mayor parte de los SSFV fueron instalados con recursos propios, a excepción de tres sistemas que tuvieron alguna fuente de financiación. Estos tres sistemas son:

- Semáforos con sistema de generación a través de energía solar del servicio de tránsito de Manizales quien contó con financiación de la Agencia nacional de seguridad vial.
- Colegio el Horro del municipio de Anserma quien recibió la donación del sistema de generación de energía solar de la Gobernación de Caldas.
- Sistemas de generación de energía solar instalados en el Servicio Nacional de Aprendizaje SENA quien recibió financiación a través de la estrategia de modernización de ambientes por la unidad de investigación, innovación y desarrollo tecnológico 'SENNOVA' del SENA.

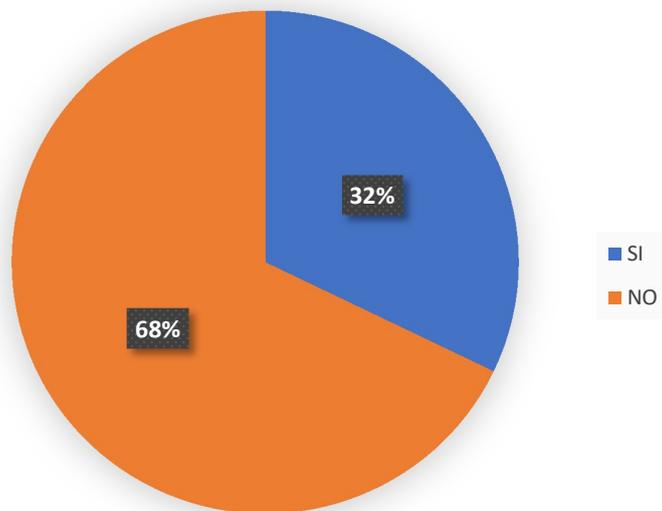
El tiempo de retorno de la inversión proyectado para los diferentes SSFV instalados en el Departamento de Caldas oscila entre los 4 y los 7 años. Este tiempo que corresponde a retornos de inversiones cada vez más bajos en comparación con los que se presentaban

anteriormente, debido a que el promedio total ponderado global del costo de instalación para la energía solar fotovoltaica a escala de utilidad cayó de USD 4394 / kW en 2010 a USD 1388 / kW en 2017 (IRENA, 2018).

Durante la realización de las encuestas, solo se encontró documentación de un par de SSFV que diera cuenta de la información suministrada y que correspondiera a los diseños y análisis iniciales para la implementación, en los casos restantes no se contaba con documentación y solo se tenía la información suministrada por el dueño del sistema.

Como se observa en la figura 9, la mayor cantidad de usuarios de los sistemas de generación instalados no realizan ningún tipo de mantenimiento al sistema, en algunos casos adujeron que no era necesario puesto que los paneles, al ser instalados con cierto grado de inclinación, permiten que el agua lluvia retire cualquier suciedad presente en ellos. Sin embargo, un 32% sí realizan mantenimiento a sus sistemas como limpieza con agua y jabón, procedimientos sencillos pero que permiten que el panel solar siempre esté funcionando con la mayor eficiencia posible.

Figura 9. Mantenimiento al sistema de generación de energía solar instalado



Fuente: Propia

A la pregunta de los costos de los mantenimientos correctivos, preventivos, costo de operación y costo de reemplazo, no se obtuvieron respuestas dado que como se observó en la figura 9, en la mayoría de los sistemas no se realiza ningún tipo de mantenimiento y en el caso contrario son los beneficiarios del sistema quienes realizan la limpieza. Las personas que manejan los SSFV son generalmente los propietarios de las instalaciones, no contratan personal calificado para el manejo de la instalación, ya que no lo consideran necesario.

Las principales fallas reportadas en los SSFV estuvieron relacionadas con las pérdidas por las partículas de polvo que se acumulan en la superficie del panel, y a nivel de la región centro sur por la ceniza que se acumula en los momentos de actividad volcánica. Se aclaró que no son fallas considerables ya que se solucionan de manera fácil y los sistemas aún se encuentran en funcionamiento.

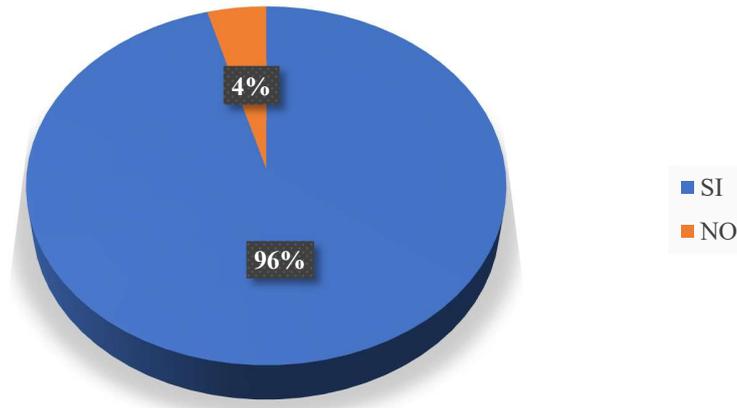
- ***Criterio de segmentación Área VI. Grado de Satisfacción***

De las encuestas realizadas en el Departamento de Caldas se encontró que en los lugares donde están haciendo uso de alguno de los SSFV casi la totalidad de ellas se

encuentran en funcionamiento y solo uno no se encuentra en uso dado que era una luminaria de alumbrado público como prueba piloto.

Figura 10. Estado actual de los SSFV

¿Está en uso la aplicación?

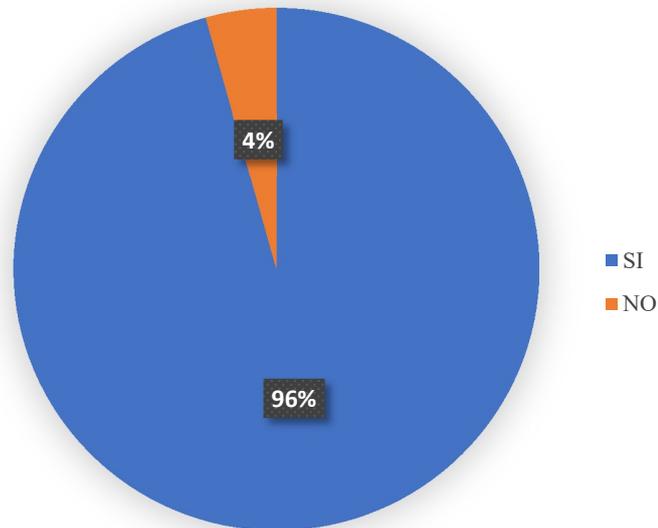


Fuente: Propia.

Cuando se les preguntó a los usuarios de los sistemas acerca del cumplimiento de las expectativas que tenían frente a la implementación de la energía solar, la respuesta fue en general positiva, solo un usuario no se encontraba conforme frente a las expectativas que tenía. Como se pudo observar en la figura 11, casi la totalidad de personas encuestadas tienen una muy buena percepción de la generación de energía no convencional.

Figura 11. Cumplimiento de expectativas del sistema solar

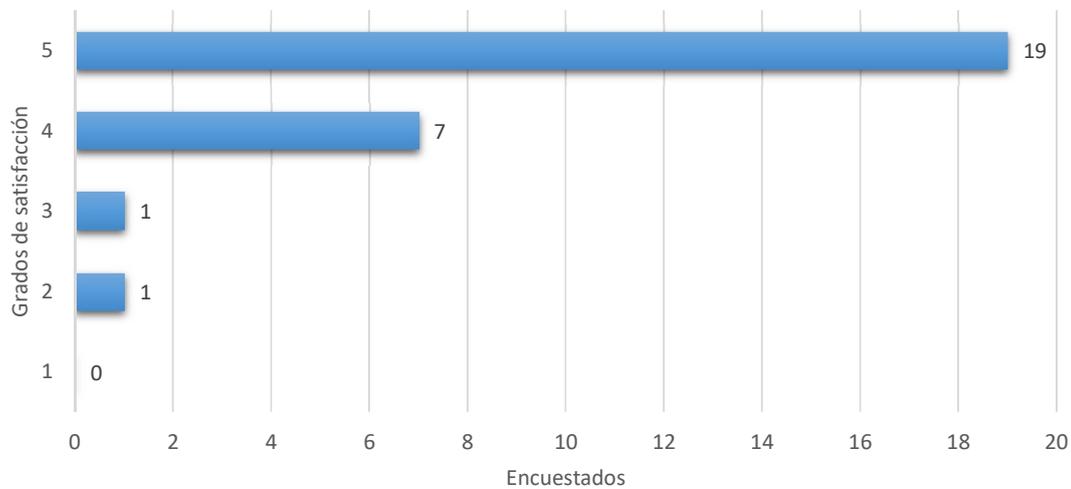
¿La instalación del sistema de generación de energía solar cumplió con las expectativas que tenía?



Fuente: Propia.

Al evaluar el grado de satisfacción de las personas que emplean los sistemas de generación de energía solar en una escala de 1 a 5 siendo 5 muy satisfactorio y 1 insatisfactorio, la mayoría de usuarios respondieron con grado de satisfacción alta de 4 y 5, con un 94%, y solo dos usuarios respondieron con un grado de satisfacción baja de 2 y 3 con porcentajes de 3% cada uno, estos últimos, atribuyeron su respuesta a los costos empleados en la instalación del sistema y a que el sistema instalado para cargar celulares no fue desarrollado en su totalidad.

Figura 12 Grado de satisfacción con el sistema instalado



Fuente: Propia.

Durante la investigación y la búsqueda de SSFV por todo el Departamento de Caldas, se pudo constatar mediante la búsqueda voz a voz, que la población se encuentra abierta a escuchar y conocer más a fondo el tema de generación de energía a través de fuentes no convencionales y les resulta muy novedoso el tema de aprovechar un recurso natural inagotable con el que se cuenta en el día a día: el sol.

6.2 ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE RADIACIÓN SOLAR

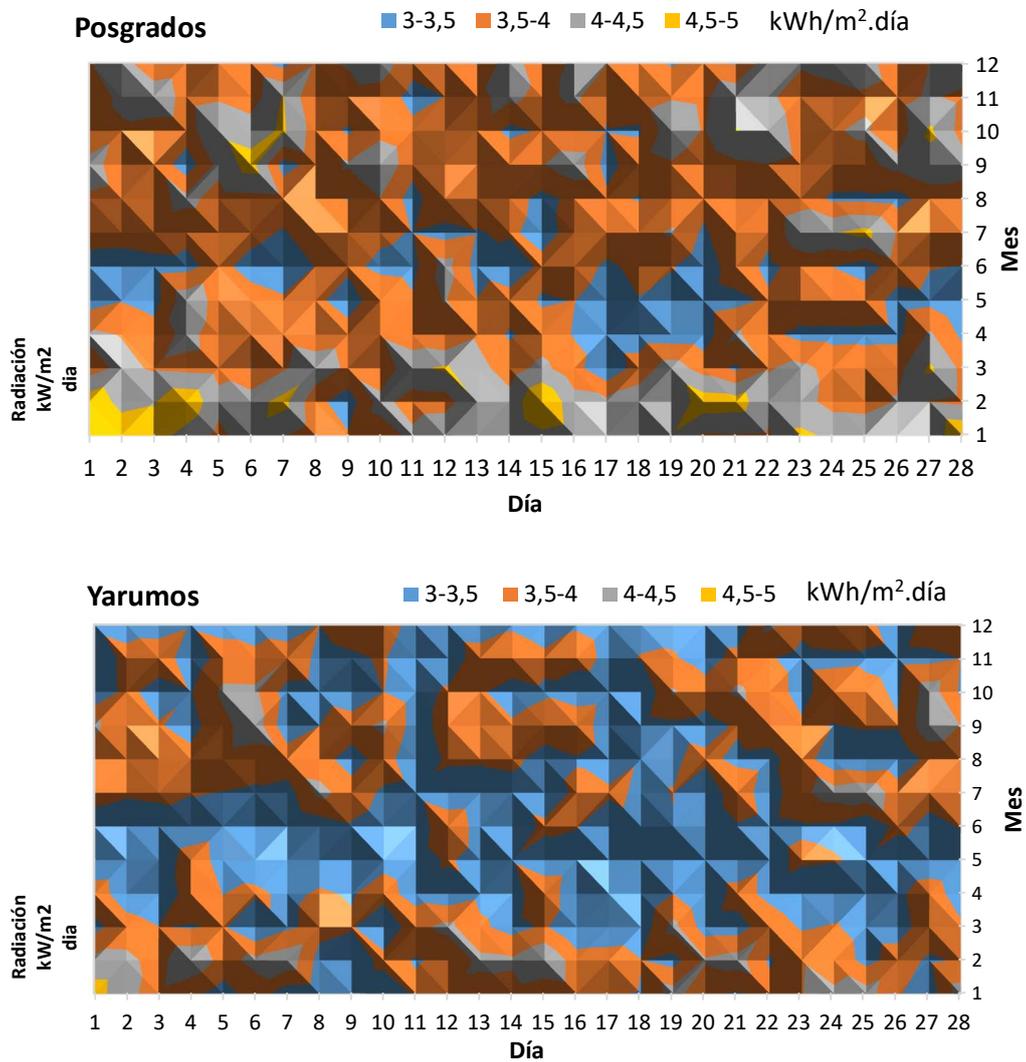
En esta sección se presentan los análisis realizados para dar cumplimiento al objetivo 2, teniendo en cuenta la información de seis estaciones remotas de dos bases de datos NASA y NSRDB, así como de tres estaciones meteorológicas del IDEA. Inicialmente se presenta el análisis de las estaciones meteorológicas que tienen un registro más corto y, seguidamente el de las estaciones remotas.

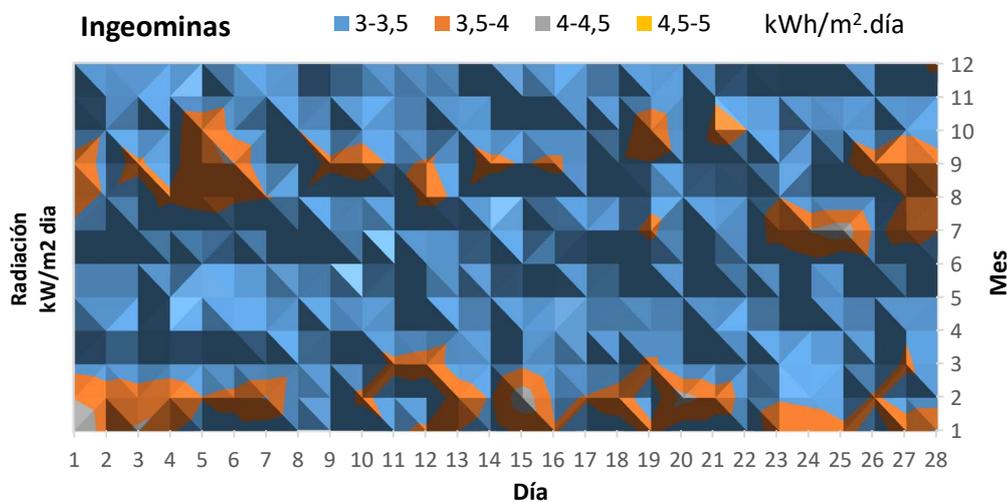
Finalmente, se analizan tres mapas de radiación del año 1981-2010 de tres fuentes diferentes y se realiza una comparación con las estaciones analizadas para determinar el comportamiento de la radiación solar en Caldas.

8.2.1. Radiación solar diaria estaciones meteorológicas

Para las estaciones meteorológicas de Posgrados, Yarumos e Ingeominas del IDEA se obtuvieron los análisis diarios desde 2005 hasta 2016 a partir de la radiación total horaria. El Comportamiento diario mensual multianual se presenta en la Figura 13.

Figura 13. Radiación solar diaria en estaciones meteorológicas de Manizales





Estación Posgrados 2005 – 2016, b) Estación Yarumos 2005 – 2016, c) Estación Ingeominas 2005 -2016

Fuente: Elaboración propia a partir CDIAC

Para la estación Posgrados, la radiación solar diaria media para el periodo 2005-2016 fue de 3,84 kW/m², con un coeficiente de variación del 32%. Como se observa en la figura 13a, el color predominante es naranja, por tanto, la radiación solar osciló entre 3.5 y 4.0 kW/m² en la mayor parte del tiempo. Los mayores valores promedio se registran en el mes de enero con 4.27 kW/m²; mientras que los menores se tienen en el mes de junio con promedios de 3.4 kW/m².

En la estación Yarumos, la radiación diaria media para el periodo 2005-2016 fue 3,48 kW/m², con un coeficiente de variación del 32%. Como se ilustra en la figura 13b, la mayor parte del tiempo la radiación solar osciló entre 3.0 y 3.5 kW/m² (color azul). La mayor radiación se presentó en el mes de febrero con un valor de 3.8 kW/m²; mientras que los menores valores promedio se registraron en mayo con 3.16 kW/m².

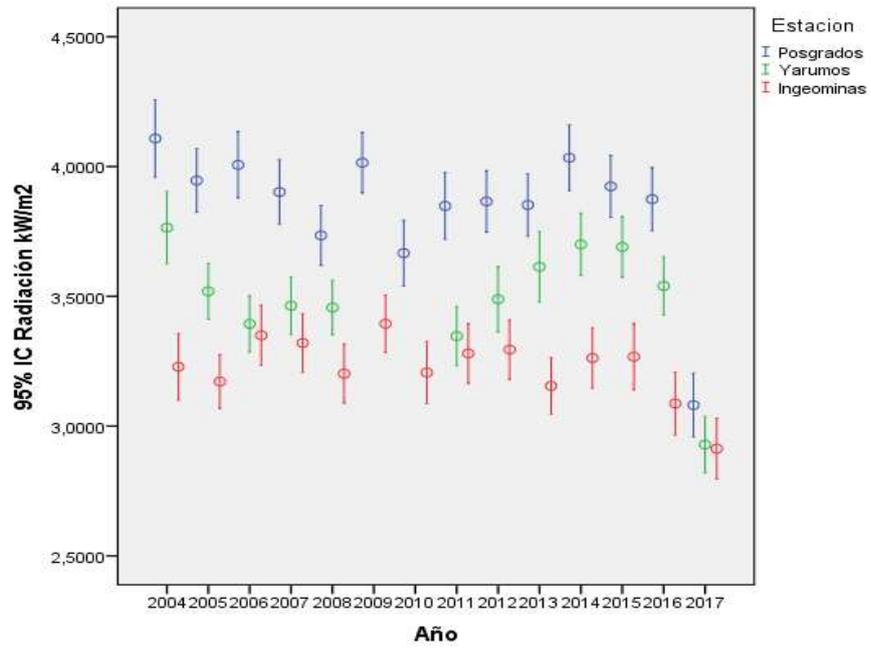
Por su parte, en la estación Ingeominas (Figura 13c), la radiación solar diaria para el periodo 2005-2016 fue 3,22 kW/m² con un coeficiente de variación del 34%. El color predominante es el azul, lo cual indica que la radiación solar diaria osciló entre 3.0 y 3.5 kW/m² en la mayor parte del tiempo. Los mayores valores diarios se registraron en el mes de febrero, con un valor de 3.81 kW/m². En el mes de mayo, se presentó la menor radiación solar, con un valor medio de 2.9 kW/m².

- ***Análisis comparativo radiación estaciones meteorológicas***

La figura 14 presenta los intervalos de confianza (95%) de la radiación solar diaria para los diferentes años analizados. Según el estadístico de Kolmogorov-Smirnof, la radiación solar diaria no sigue distribución normal (nivel de significación igual a 0.000), por tanto, se aplicaron las pruebas no Paramétricas para identificar diferencias estadísticamente significativas entre las estaciones. La prueba de Kruskal Wallis indica que al menos una estación es estadísticamente diferente (sig. 000). Al aplicar, la prueba U de Mann Whitney se confirman diferencias entre todas las estaciones en la radiación solar diaria; la Figura 14 confirma este análisis realizado a escala anual.

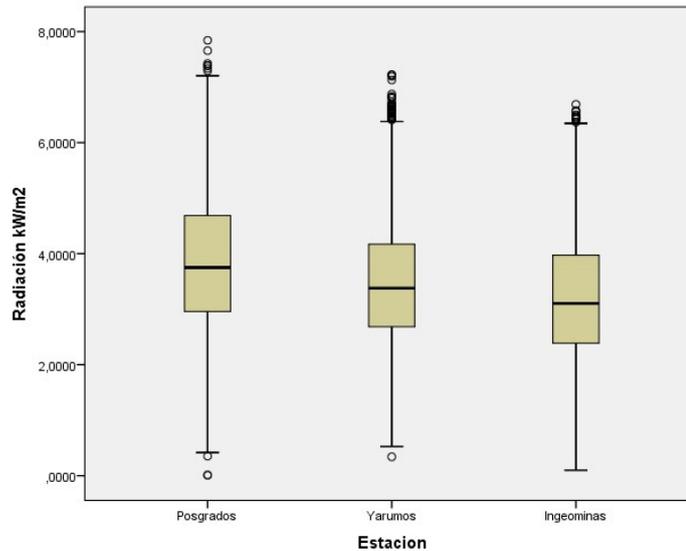
El diagrama de cajas que ilustra la variabilidad de la radiación solar diaria se compila en la Figura 15, se presentan valores extremos, tanto altos como bajos, en las tres estaciones meteorológicas analizadas; no obstante, son mayores los eventos extremos con alta irradiancia.

Figura 14. Radiación solar media estaciones IDEA 2005-2016



Fuente: Elaboración propia a partir CDIAC

Figura 15. Diagrama de cajas de la radiación solar en estaciones IDEA



Fuente: Elaboración propia a partir CDIAC

8.2.2. Radiación solar diaria estaciones remotas

A continuación, se presentan los resultados del análisis de los registros de la NASA y NSRDB para las estaciones Manizales, Chinchiná y Norcasia

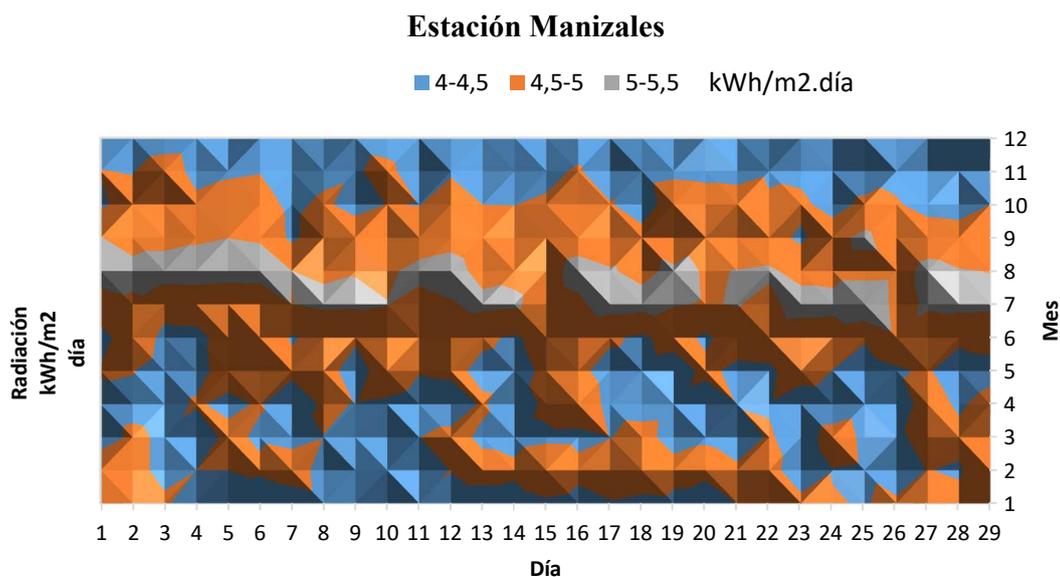
- **Estación Manizales**

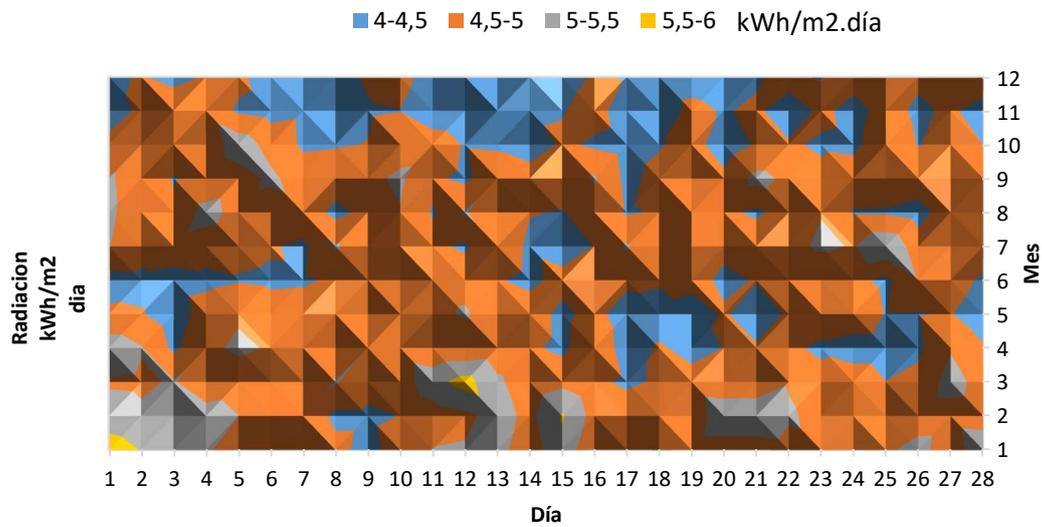
La Figura 16 compila la variación diaria mensual multianual en la estación Manizales considerando dos bases de datos remotas.

Considerando los registros de la NASA (Figura 16a), para el período 1988-2017 en la estación Manizales, se tiene un promedio diario de 4,49 kWh/m² con una desviación estándar de 0,99, que corresponde a un coeficiente de variación del 22%. La mayor radiación solar promedio se presentó en el mes de agosto, 5,024 kWh/m² (color gris en la figura), con un rango entre 4,81 kWh/m² y 5,24 kWh/m². Por el contrario, para el mes de diciembre se presentaron los valores más bajos (color azul) con un valor medio de 4,18 kWh/m²; mientras que el rango fue de 3,84 kWh/m² y 4,43 kWh/m², para este mes.

En la misma estación con la información de la NSRDB, para el período 1998-2015 (figura 16b), se registró una radiación promedio diaria de 4,68 kWh/m² con una desviación estándar 1,13, que representa un coeficiente de variación del 24%. La Figura 13b ilustra como el color predominante es naranja; lo cual indica que la radiación solar diaria osciló entre 4,5 y 5,0 kWh/m² en la mayor parte del tiempo. Para el mes de febrero se presentaron los mayores promedios diarios con 4.91 kWh/m². Por el contrario, el mes de noviembre se presentaron las menores radiaciones solares con promedios 4.40 kWh/m².

Figura 16. Promedio diario mensual multianual en la estación Manizales



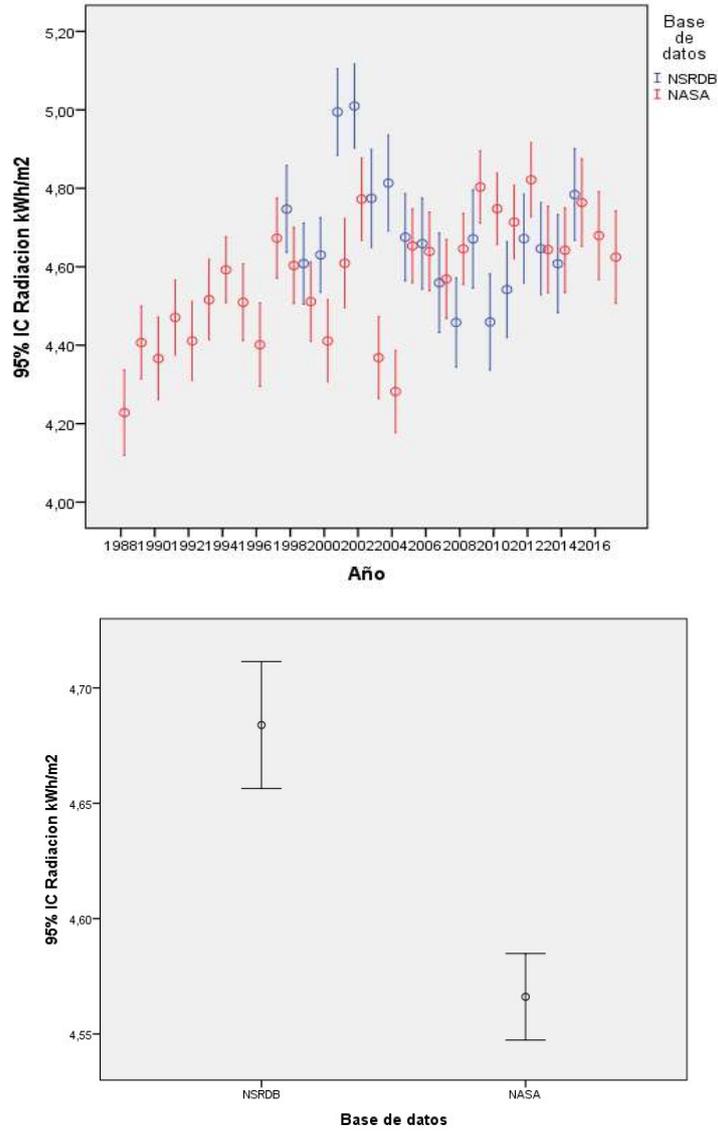


a) Base de datos NASA 1988 – 2017, b) Base de datos NSRDB 1998 - 2015

Fuente: Elaboración propia a partir NASA y NSRDB

Considerando un periodo homogéneo, 1998-2015, al aplicar, la prueba U de Mann Whitney se confirman diferencias entre las dos bases de datos (NASA y NSRDB) en la estación Manizales para la radiación solar diaria (sig. 000); la Figura 17 confirma este análisis.

Figura 17. Radiación solar media estación Manizales



Fuente: Elaboración propia a partir NASA y NSRDB

Como puede apreciarse, no solo en las figuras sino también en la descripción realizada, hay diferencias entre los meses de mayor y menor radiación para el promedio diario mensual entre ambas bases de datos. Esto puede deberse a que en la base de datos de la NASA el punto seleccionado para la cada estación abarca datos de otras regiones tales como Herveo, Casablanca y Murillo en el departamento del Tolima y Santa Rosa de Cabal y Marsella en el departamento de Risaralda por ser realizados en un rango de medida de 60 km x 60 km;

mientras que en la estación NSRDB, las regiones analizadas son mucho más exactas ya que el rango de medida es de 4 km x 4 km.

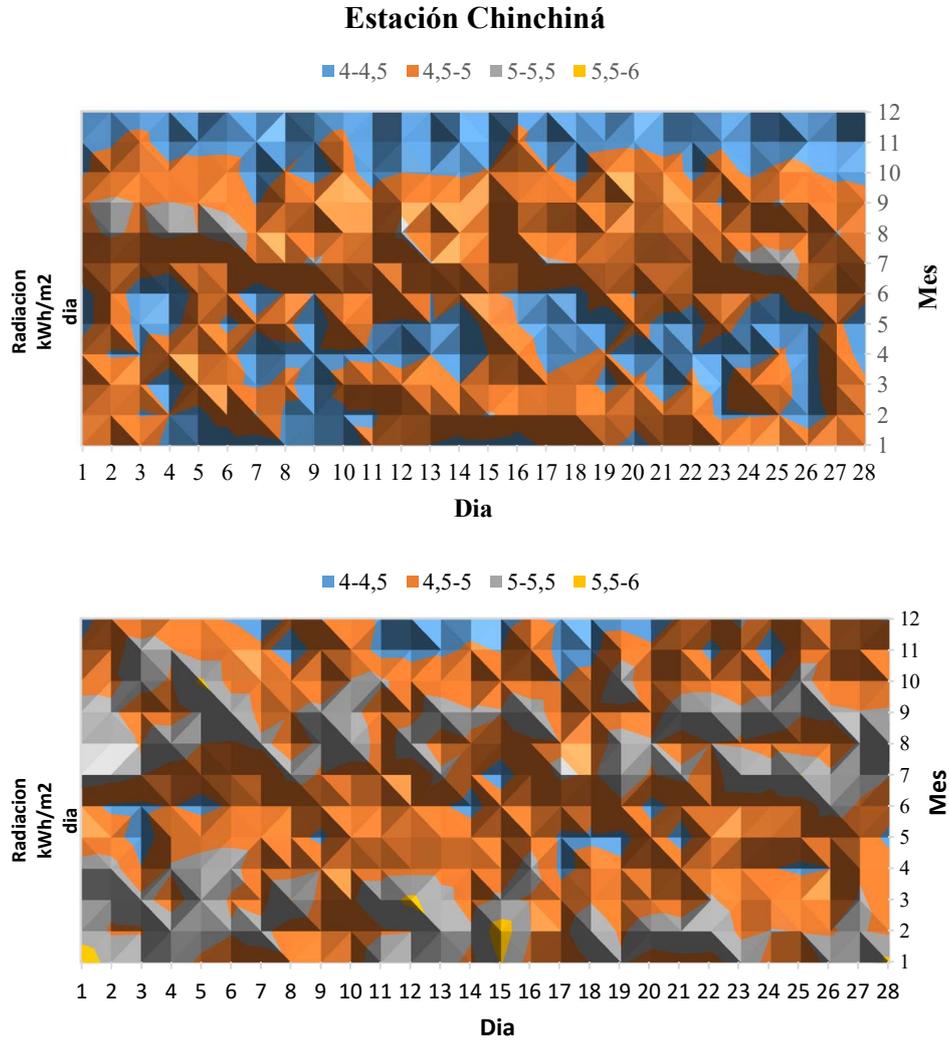
- ***Estación Chinchiná***

La Figura 18 compila la variación diaria mensual multianual en la estación Manizales considerando dos bases de datos remotas.

Considerando los registros de la NASA (Figura 18a), para el período 1988-2017 en la estación Chinchiná, se tiene un promedio diario de 4,54 kWh/m² con una desviación estándar de 0,95, que corresponde a un coeficiente de variación del 21%. La mayor radiación solar promedio se presentó en el mes de agosto, 4,86 kWh/m² (color naranja en la figura). Por el contrario, para el mes de diciembre se presentaron los valores más bajos (color azul) con un valor medio de 4,14 kWh/m².

En la misma estación con la información de la NSRDB, para el período 1998-2015 (figura 18b), se registró una radiación promedio diaria de 4,85 kWh/m² con una desviación estándar 1,08, que representa un coeficiente de variación del 22%. La Figura 18b ilustra como el color predominante es naranja; lo cual indica que la radiación solar diaria osciló entre 4,5 y 5,0 kWh/m² en la mayor parte del tiempo. Para el mes de febrero se presentaron los mayores promedios diarios con 5,1 kWh/m². Por el contrario, el mes de diciembre presentó las menores radiaciones solares con promedios 4,6 kWh/m².

Figura 18. Promedio diario mensual multianual en la estación Chinchiná

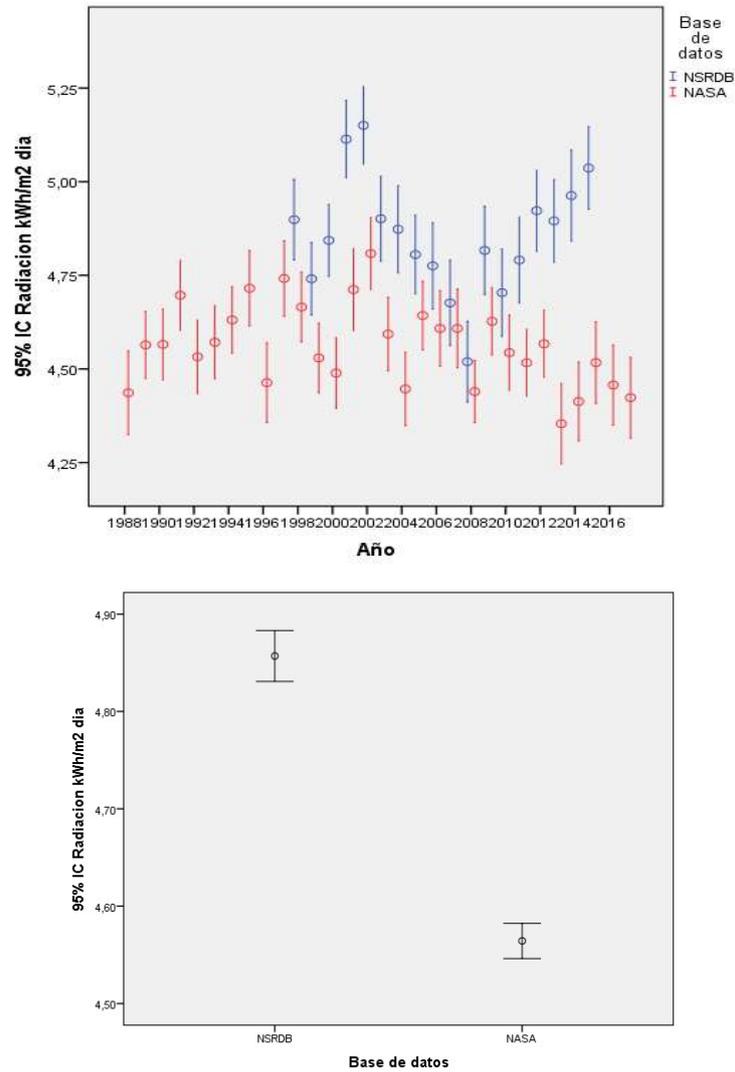


a) Base de datos NASA 1988 – 2017, b) Base de datos NSRDB 1998 - 2015

Fuente: Elaboración propia a partir NASA y NSRDB

Al aplicar, la prueba U de Mann Whitney se confirman diferencias entre las dos bases de datos (NASA y NSRDB) en la estación Chinchiná para la radiación solar diaria (sig. 000); la Figura 19 confirma este análisis.

Figura 19. Radiación solar media estación Chinchiná



Fuente: Elaboración propia a partir NASA y NSRDB

En esta estación los datos de ambas bases coinciden en cuanto al mes de menor radiación (diciembre); sin embargo, los valores son significativamente diferentes dado que para la NASA fue de 4,1 kWh/m² y para la NSRDB de 4.6 kWh/m². Es de anotar que la base de datos de la NASA tiene información de 10 años más que la de NSRDB; estos valores también inciden en las diferencias halladas entre ambas bases de datos ya que el

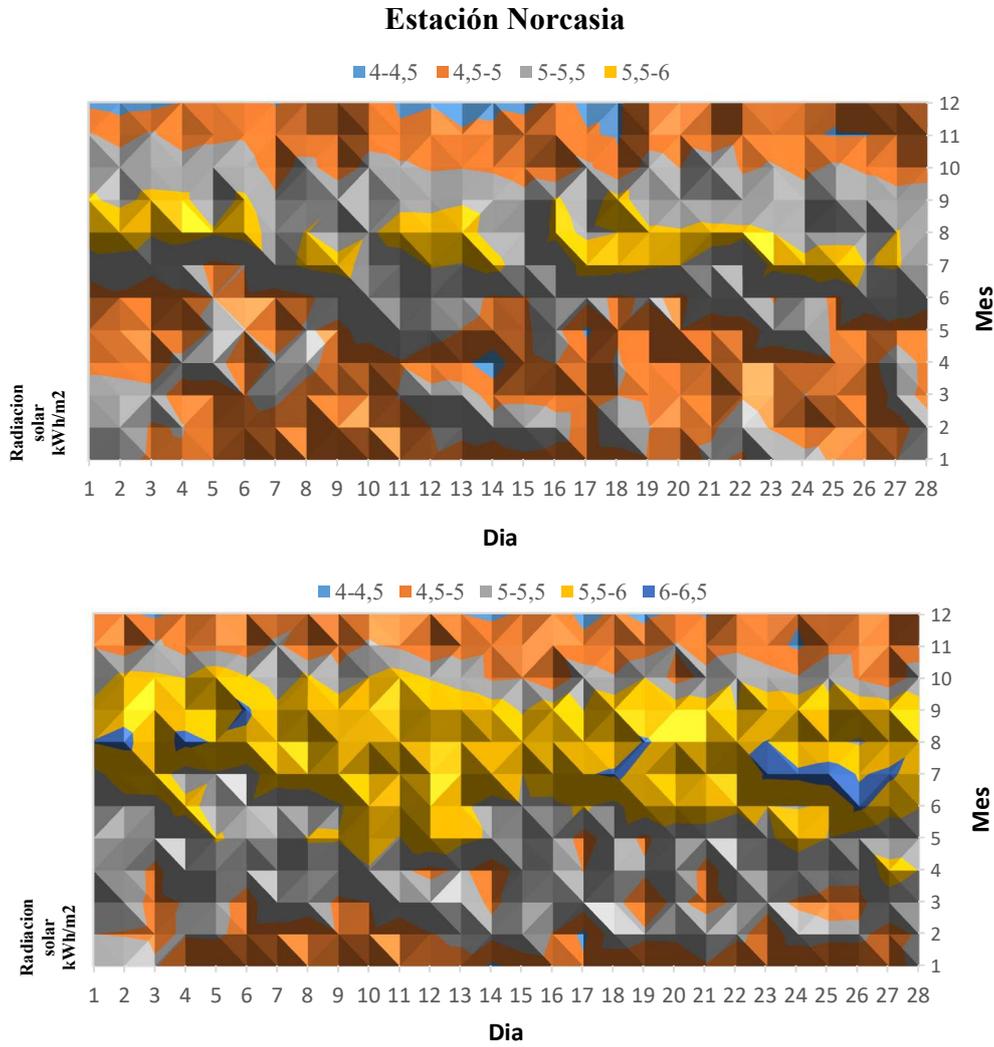
calentamiento global en esos 10 años es del orden de 0.35°C según el gráfico de la ONU acerca del calentamiento global.

- ***Estación Norcasia***

La Figura 20 compila la variación diaria mensual multianual en la estación Norcasia considerando dos bases de datos remotas. Considerando los registros de la NASA (Figura 20a), para el período 1988-2017 en la estación Norcasia, se tiene un promedio diario de $5,02 \text{ kWh/m}^2$ con una desviación estándar de $1,02$, que corresponde a un coeficiente de variación del 20%. La mayor radiación solar promedio se presentó en el mes de agosto, $5,49 \text{ kWh/m}^2$ (color gris en la figura). Por el contrario, para el mes de diciembre se presentaron los valores más bajos (color azul) con un valor medio de $4,5 \text{ kWh/m}^2$.

En la misma estación con la información de la NSRDB, para el período 1998-2015 (figura 20b), se registró una radiación promedio diaria de $5,25 \text{ kWh/m}^2$ con una desviación estándar $1,03$, que representa un coeficiente de variación del 19%. La Figura 20b ilustra como el color predominante es amarillo; lo cual indica que la radiación solar diaria osciló entre $4,5$ y $5,0 \text{ kWh/m}^2$ en la mayor parte del tiempo. Para el mes de agosto se presentaron los mayores promedios diarios con $5,80 \text{ kWh/m}^2$. Por el contrario, el mes de diciembre se presentaron las menores radiaciones solares con promedios $4,6 \text{ kWh/m}^2$.

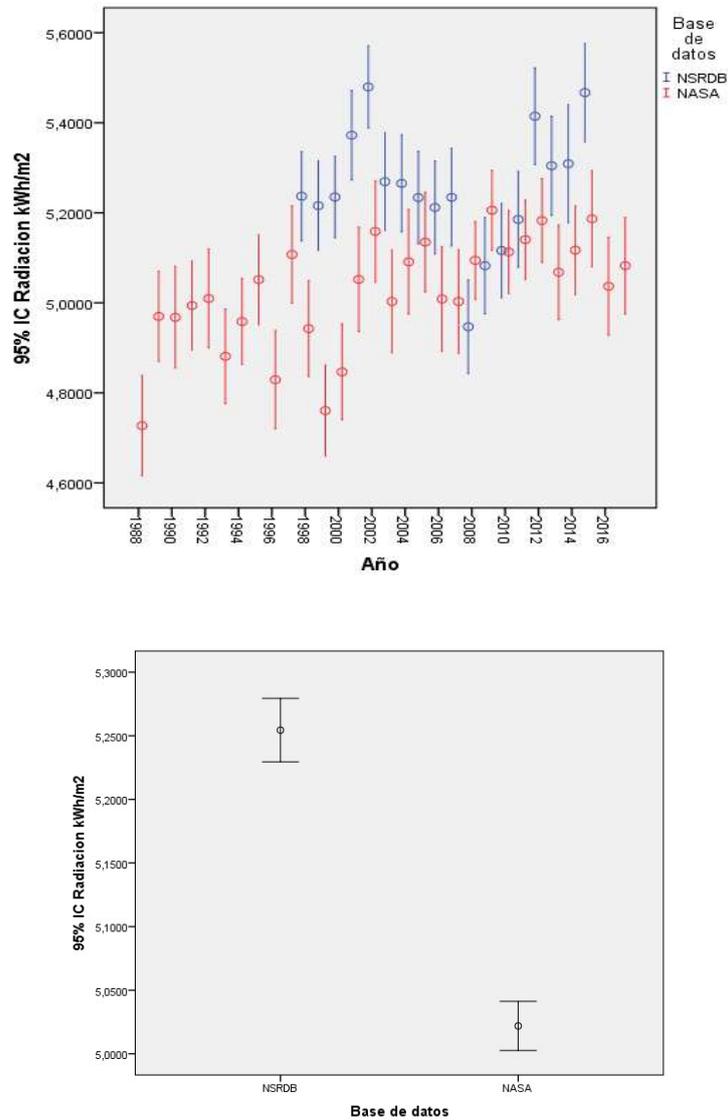
Figura 20. Promedio diario mensual multianual en la estación Norcasia



- a) Estación Norcasia de la base datos de la NASA desde 1988 hasta 2017
 - b) Estación Norcasia de la base datos de la NSRDB desde 1998 hasta 2015
- Fuente: Elaboración propia a partir NASA y NSRDB

Al aplicar, la prueba U de Mann Whitney se confirman diferencias entre las dos bases de datos (NASA y NSRDB) en la estación Norcasia para la radiación solar diaria (sig. 000); la Figura 21 confirma este análisis.

Figura 21. Radiación solar media estación Norcasia



Fuente: Elaboración propia a partir NASA y NSRDB

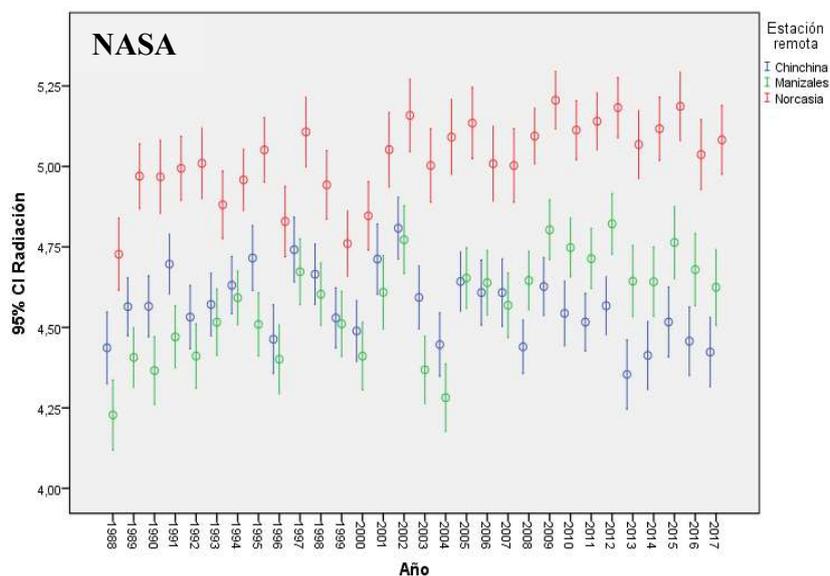
Para esta estación, los valores de promedio histórico diario mensual de radiación solar de ambas bases de datos coinciden no solo en el mes, sino también en los valores mismos, en los cuales las diferencias no son significativas. También se evidencia que la radiación es

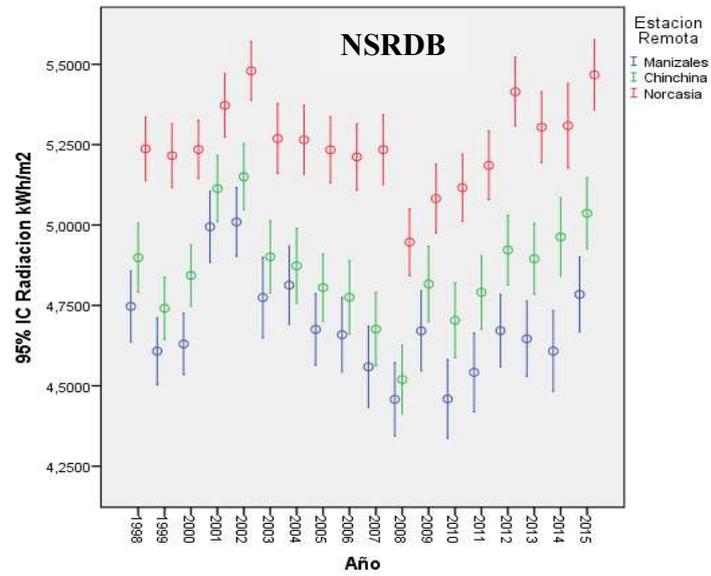
más intensa para esta región en particular como lo son también las temperaturas, como se explicará más adelante (Ver Figura 24).

- ***Análisis comparativo radiación estaciones remotas***

La figura 22 presenta los intervalos de confianza (95%) de la radiación solar diaria para los diferentes años analizados. Según el estadístico de Kolmogorov-Smirnof, la radiación solar diaria no sigue distribución normal (nivel de significación igual a 0.000), por tanto, se aplicaron las pruebas no Paramétricas para identificar diferencias estadísticamente significativas entre las estaciones. La prueba de Kruskal Wallis indica que al menos una estación es estadísticamente diferente (sig. 000). Al aplicar, la prueba U de Mann Whitney se confirman diferencias entre todas las estaciones en la radiación solar diaria; la Figura 20 confirma este análisis, realizado a escala anual.

Figura 22. Radiación solar estaciones remotas





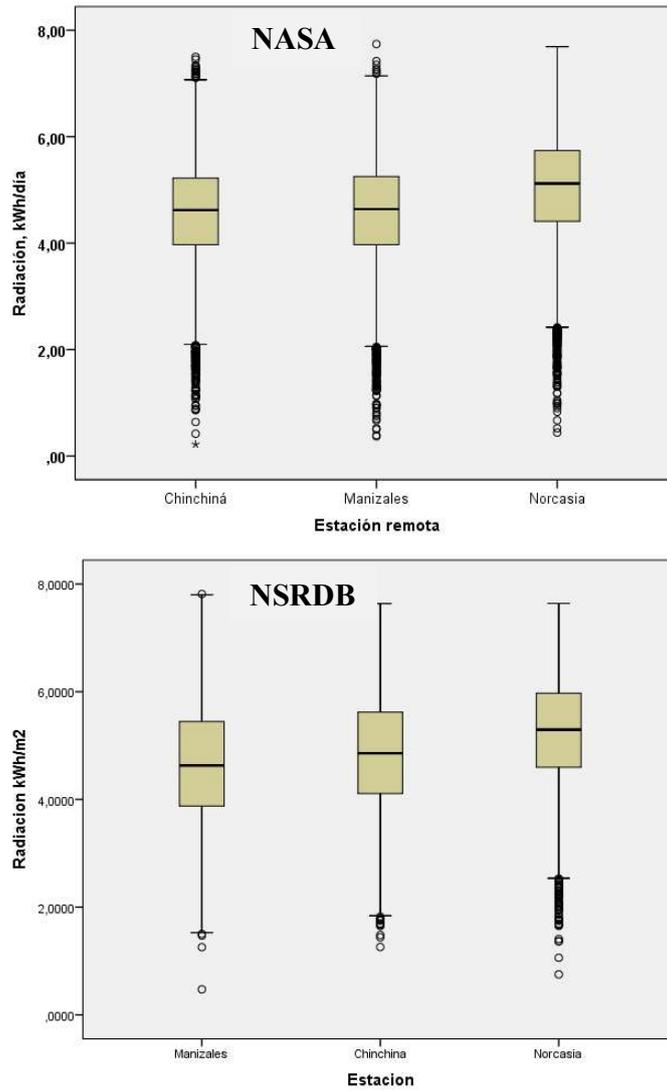
a) Radiación solar estaciones NASA 1988-2017

b) Radiación solar estaciones NSRDB 1998-2015

Fuente: Elaboración propia a partir NASA y NSRDB

El diagrama de cajas que ilustra la variabilidad de la radiación solar diaria se compila en la Figura 23, se presentan valores extremos, principalmente bajos, en las tres estaciones remotas analizadas; no obstante, son mayores los eventos extremos con baja irradiancia.

Figura 23. Diagrama de caja radiación solar estaciones remotas



a) Diagrama de caja radiación NASA 1988-2017

b) Diagrama de caja radiación NSRDB 1998-2015

Fuente: Elaboración propia a partir NASA y NSRDB

- **Análisis comparativo temperatura estaciones remotas**

El coeficiente de correlación de Spearman aplicado a los valores de radiación y temperatura, arrojó que existe una correlación entre ambas variables, sin embargo, presentó un nivel de significancia baja.

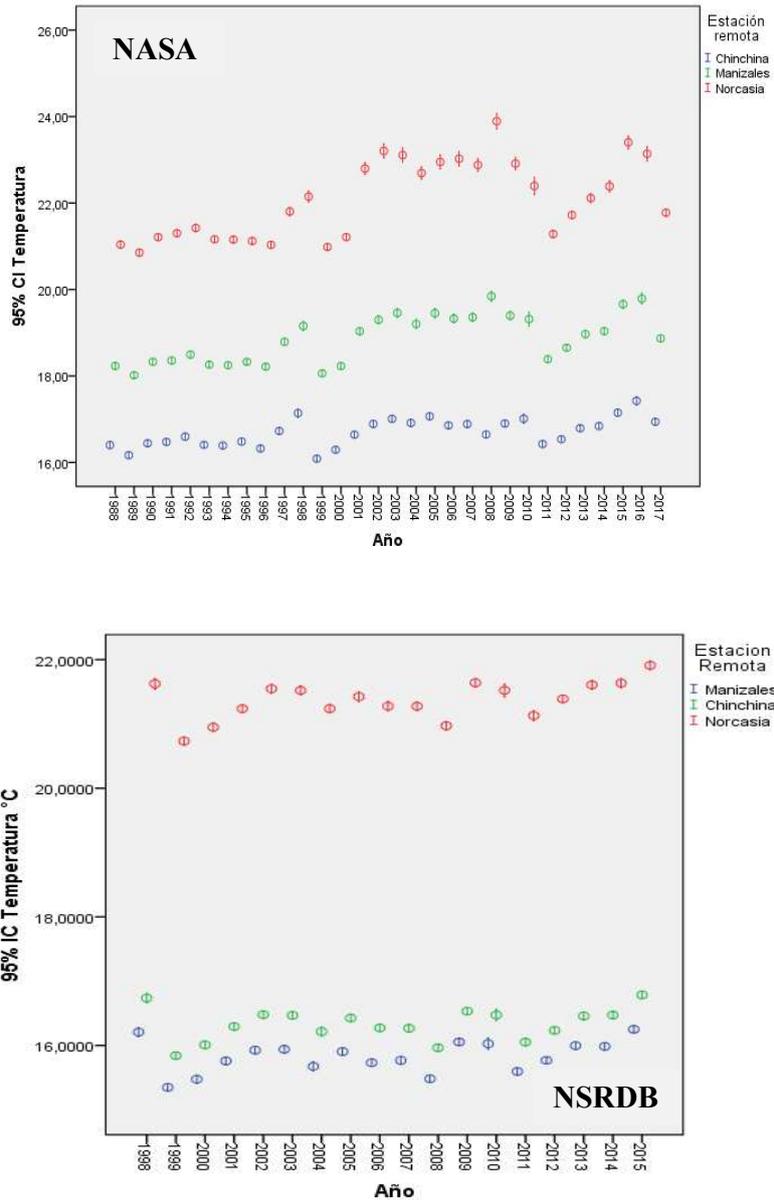
La figura 24 presenta los intervalos de confianza (95%) de la temperatura diaria para los diferentes años analizados. Según el estadístico de Kolmogorov-Smirnof, la temperatura diaria no sigue distribución normal (nivel de significación igual a 0.000), por tanto, se aplicaron las pruebas no Paramétricas para identificar diferencias estadísticamente significativas entre las estaciones. La prueba de Kruskal Wallis indica que al menos una estación es estadísticamente diferente (sig. 000). Al aplicar, la prueba U de Mann Whitney se confirman diferencias entre todas las estaciones en la temperatura diaria; la Figura 24 confirma este análisis, realizado a escala anual.

En la base de datos de la NASA, como se observa en la figura 24a, la temperatura, se comporta de manera directamente proporcional a la radiación, puesto que es la estación Norcasia nuevamente, la que presenta mayores temperaturas durante todos los años analizados con un intervalo de confianza de 95%. De igual manera, se puede observar que para las tres estaciones se presenta una línea de tendencia ascendente a través de los años. Esta tendencia coincide con el aumento en la temperatura superficial promedio de la Tierra, la cual subió aproximadamente 0,8 °C según un video publicado por la NASA en el que se muestran las subidas experimentadas por el mercurio desde 1880 hasta el 2014. La temperatura de Manizales se encuentra por encima de la temperatura de Chinchiná, lo cual no coincide con la realidad de estas regiones; esto se sustenta en el hecho de que la base de datos de la NASA presenta una resolución de 60km x 60km que implica que se tome en cuenta la temperatura de municipios de los departamentos de Tolima y Risaralda, y no exclusivamente de los municipios de Manizales o Chinchiná.

Para la base de datos de la NSRDB se puede observar (figura 24b) que se presenta una diferencia entre las temperaturas de las estaciones Chinchiná y Manizales con valores

mayores para Chinchiná como es de esperarse. Las temperaturas entre 15 y 17°C para Chinchiná y Manizales son menores significativamente que la de Norcasia que se encuentra entre 21 y 22°C.

Figura 24. Temperatura estaciones remotas



a) Temperatura estaciones NASA 1988-2017

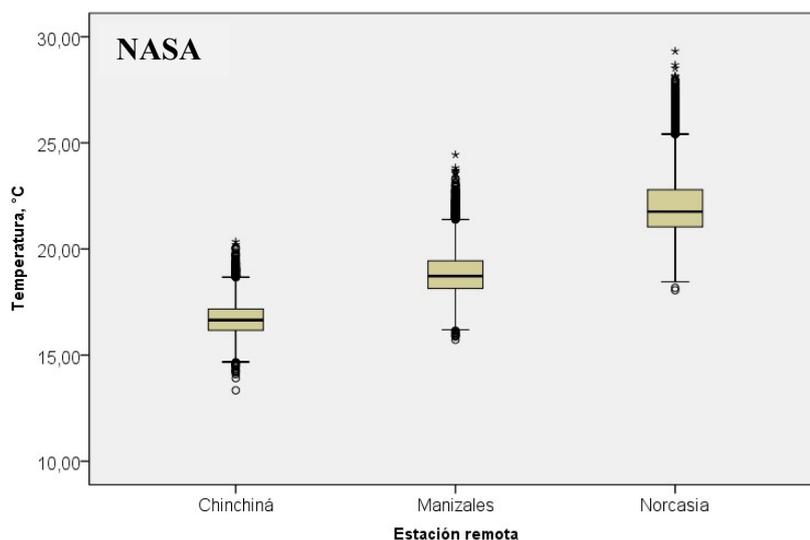
b) Temperatura estaciones NSRDB 1998-2015

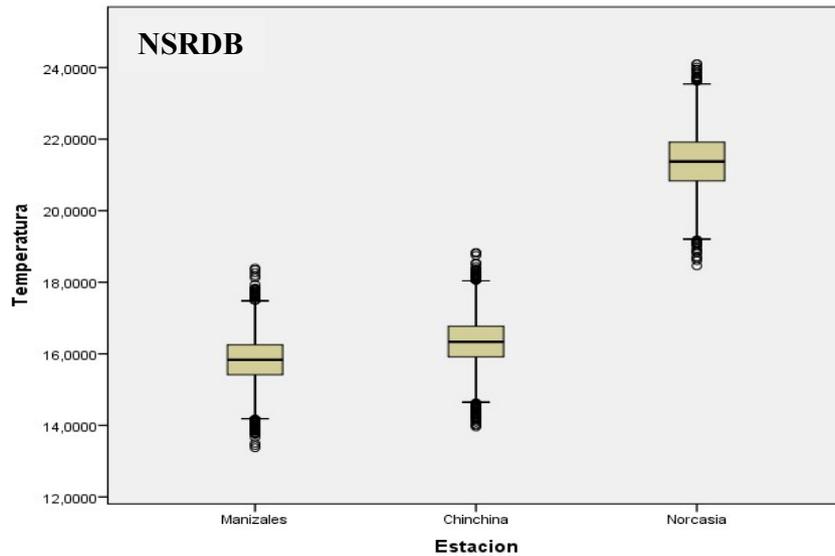
Fuente: Elaboración propia a partir NASA y NSRDB

El diagrama de cajas que ilustra la variabilidad de la temperatura se compila en la Figura 25, se presentan valores extremos, tanto altos como bajos, en las tres estaciones meteorológicas analizadas; no obstante, son mayores los eventos extremos con alta temperatura.

En la figura 25, se presenta el diagrama de caja de la estación remota de la NASA. Se observa el comportamiento de los datos de cada una de las estaciones, evidenciándose una mayor cantidad de datos atípicos en altas temperaturas para las tres estaciones analizadas. De otra parte, en la base de datos de la NSRDB los diagramas de caja muestran valores atípicos en ambos extremos de los valores de temperatura, y se puede observar nuevamente que la estación Norcasia es la que presenta la mayor temperatura con respecto a las estaciones de Manizales y Chinchiná, encontrándose la temperatura de Chinchiná por encima de la de Manizales.

Figura 25. Diagrama de caja temperatura estaciones remotas





a) Diagrama de caja temperatura NASA 1988-2017

b) Diagrama de caja temperatura NSRDB 1998-2015

Fuente: Elaboración propia a partir NASA y NSRDB

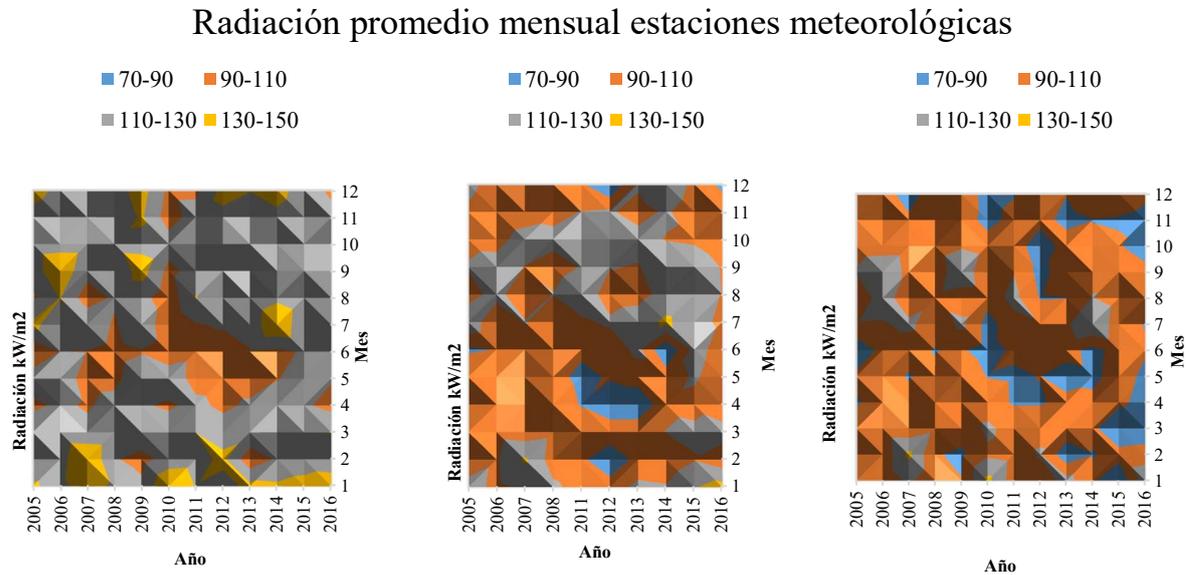
8.2.3. Radiación solar mensual estaciones meteorológicas

Para la estación Posgrados, como se observa en la figura 26a, el mes que mayor radiación mensual presentó durante los años analizados fue enero con un valor de 133 kWh/m². El mes que menor radiación solar mensual fue junio con un valor de 105 kWh/m².

Para la estación Yarumos, como se observa en la figura 26b, el mes que mayor radiación mensual presento durante los años analizados fue enero con un valor de 114 kWh/m². El mes que menor radiación solar mensual presento fue abril con un valor de radiación solar promedio mensual de 86 kWh/m².

Para la estación Ingeominas, como se observa en la figura 26c, el mes que mayor radiación mensual presento durante los años analizados fue septiembre con un valor de 105 kWh/m². El mes que menor radiación solar mensual presento fue junio con un valor de 91 kWh/m².

Figura 26. Radiación solar mensual estaciones meteorológicas



Estación Posgrados de la base datos del IDEA desde 2005 hasta 2016

Estación Yarumos de la base datos del IDEA desde 2005 hasta 2016

Estación Ingeominas de la base datos del IDEA desde 2005 hasta 2016

Fuente: Elaboración propia a partir de IDEA

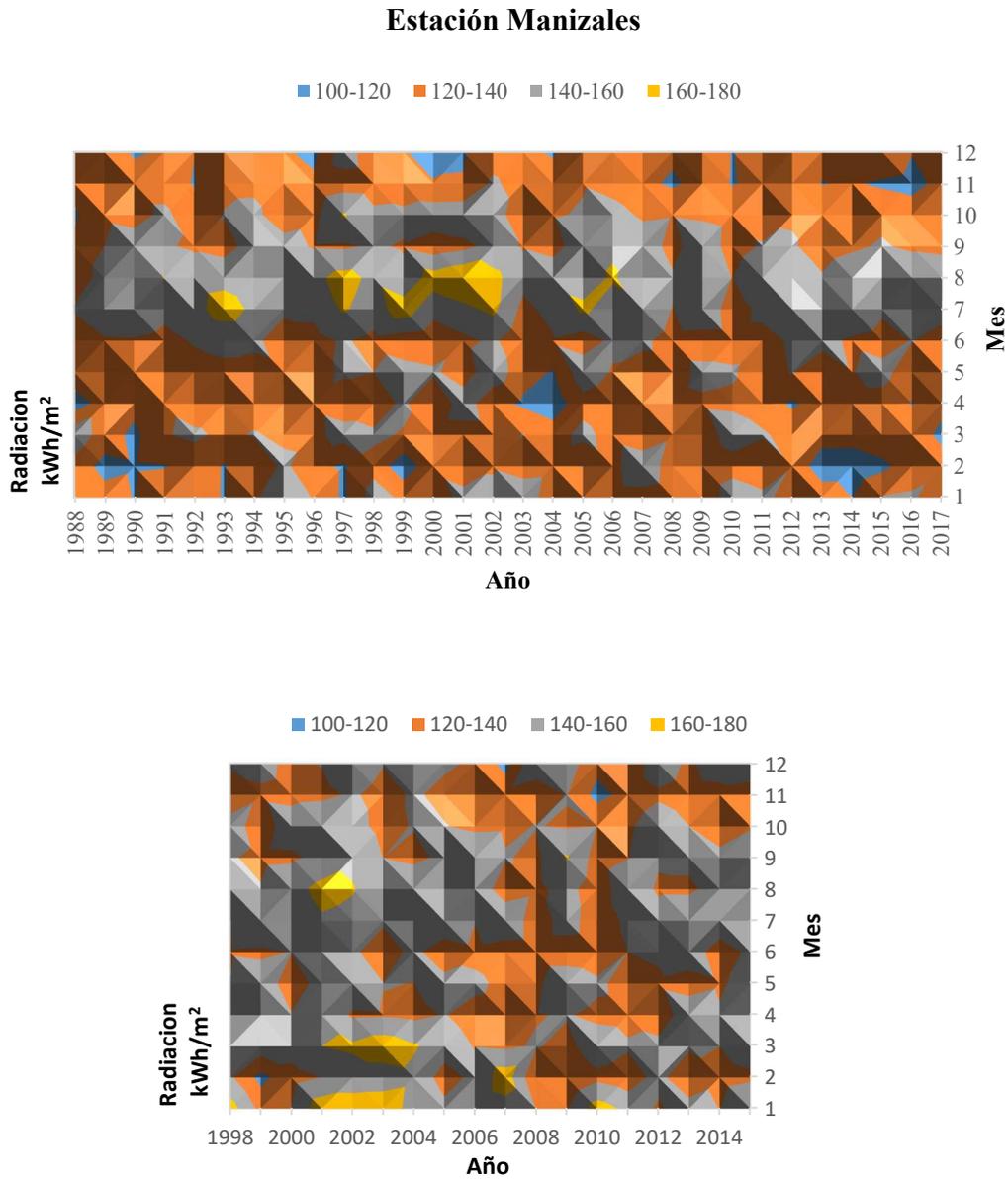
8.2.4. Radiación solar mensual estaciones remotas

- **Estación Manizales**

De acuerdo con los datos reportados para la estación Manizales por la base de datos NASA, como se observa en la figura 27a, los meses de mayor radiación mensual en el período de análisis (1988 a 2017) fueron julio y agosto con valores de 151,27 kWh/m² y 152,63 kWh/m² respectivamente. Los meses de menor radiación fueron febrero y diciembre con valores de 125,91 kWh/m² y 126,43 kWh/m² respectivamente.

Para la base de datos de la NSRDB en la estación Manizales, como se observa en la figura 27b, el mes que mayor radiación presentó de 1998 a 2015 fue enero con un valor 152 kWh/m². El mes de menor radiación fue noviembre con un valor de 132 kWh/m².

Figura 27. Radiación mensual estación remota Manizales



- c) Estación Manizales de la base datos de la NASA desde 1988 hasta 2017
- d) Estación Manizales de la base datos de la NSRDB desde 1998 hasta 2015

Fuente: Elaboración propia a partir NASA y NSRDB

Se observan diferencias en los meses de menor y mayor radiación mensual, así como en los valores puntuales, corroborando las razones expuestas anteriormente asociadas a la magnificación de las ambas bases de datos. En Manizales para el 2003 se presentó un

incremento en la temperatura como se observa en la fig.24, lo cual está de acuerdo con las altas radiaciones reportadas por la base de datos NSRDB y no se evidencia en la base NASA ya que esta toma datos más allá de los límites propios de Manizales.

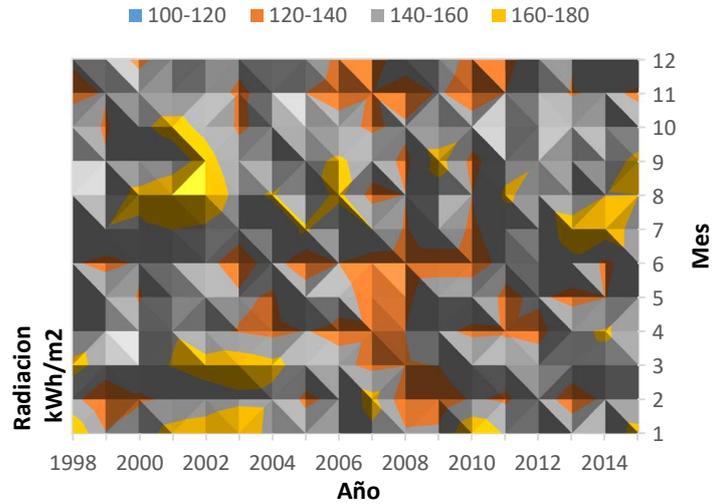
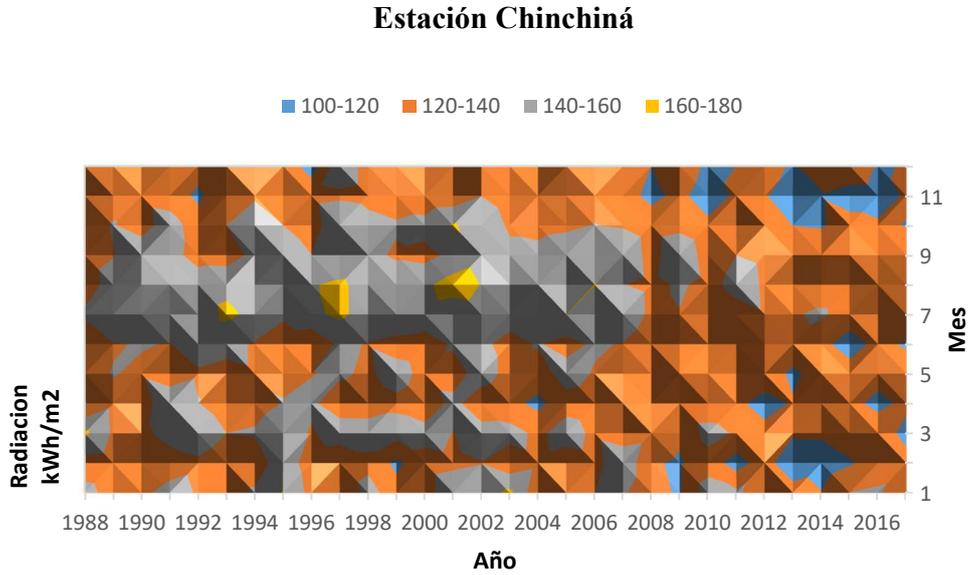
- ***Estación Chinchiná***

Para la estación Chinchiná de la base de datos de la NASA, como se observa en la figura 28a, los meses que mayor radiación mensual presentaron fueron julio y agosto con valores de 146,95 kWh/m² y 147,47 kWh/m² respectivamente. Los meses de menor radiación fueron febrero y noviembre con valores de 128,05 kWh/m² y 126,41 kWh/m² respectivamente.

Para la estación Chinchiná de la base de datos de la NSRBD, como se observa en la figura 28b, el mes de mayor radiación mensual fue enero con un valor de 157 kWh/m². El mes de menor radiación fue noviembre con un valor de 138 kWh/m².

Para esta estación se observan diferencias significativas entre ambas bases de datos no solo en los meses sino también en los valores de radiación mensual debido a que la base NASA toma solo unos km de Chinchiná y otros km de los departamentos de Tolima y Risaralda que son menos cálidos.

Figura 28. Radiación mensual estación remota Chinchiná



- a) Estación Chinchiná de la base datos de la NASA desde 1988 hasta 2017
- b) Estación Chinchiná de la base datos de la NSRDB desde 1998 hasta 2015

Fuente: Elaboración propia a partir NASA y NSRDB

- **Estación Norcasia**

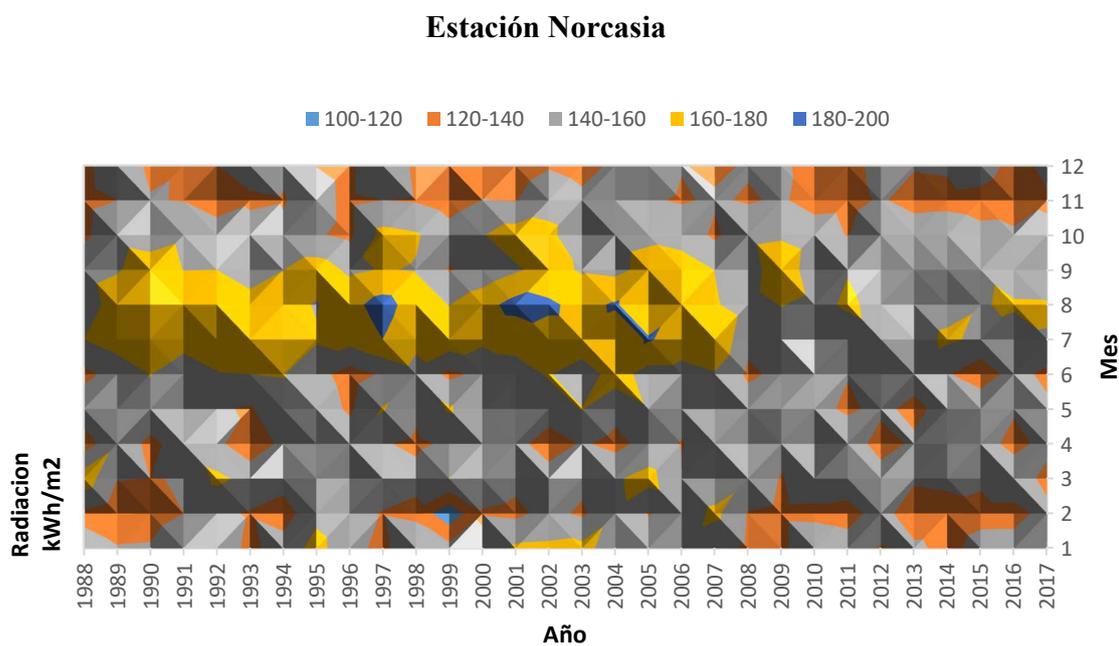
Para la estación Norcasia de la base de datos de la NASA, como se observa en la figura 29a, los meses de mayor radiación mensual fueron julio y agosto con valores de 164,69

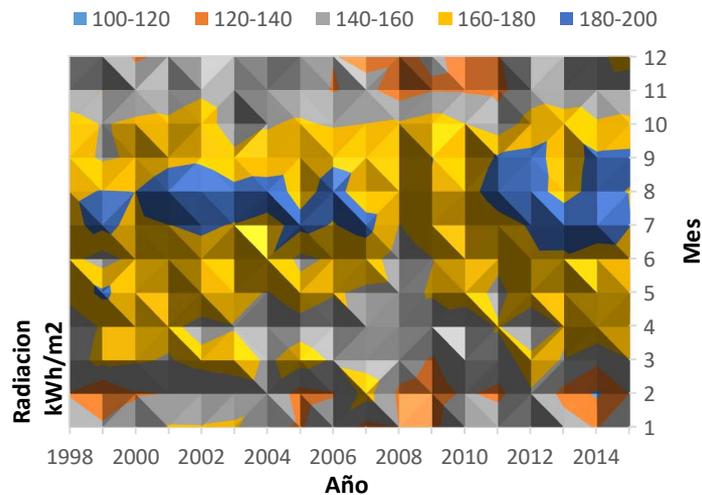
kWh/m² y 166,96 kWh/m² respectivamente. Los meses de menor radiación fueron febrero y noviembre con valores de 137,89 kWh/m² y 137,97 kWh/m² respectivamente.

De acuerdo con los datos de la NSRBD para la estación Norcasia, como se observa en la figura 29b, el mes de mayor radiación mensual fue agosto con un valor de 180 kWh/m². El mes de menor radiación fue febrero con un valor de 139 kWh/m².

Para esta estación, los valores de ambas bases de datos coinciden en cuanto a los meses de menor y mayor radiación mensual promedio, aunque numéricamente son mayores los valores de la base NSRDB. Lo anterior, ya que como se ha venido explicando la base NASA toma en su radio de medida otras regiones que incluyen zonas más frías.

Figura 29. Radiación mensual estación remota Norcasia





- a) Estación Norcasia de la base datos de la NASA desde 1988 hasta 2017
- b) Estación Norcasia de la base datos de la NSRDB desde 1998 hasta 2015

Fuente: Elaboración propia a partir NASA y NSRDB

8.2.5. Radiación solar anual estaciones meteorológicas

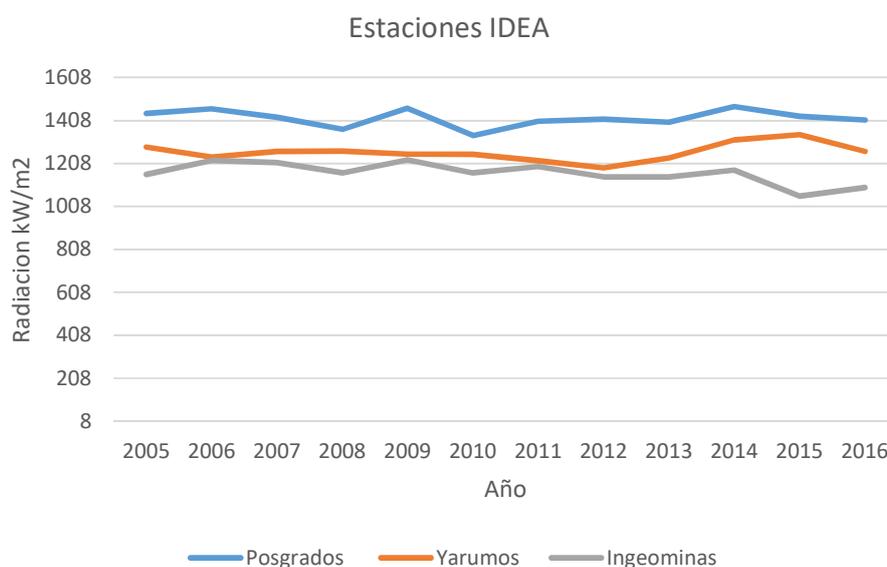
Como se observa en la figura 30, la estación meteorológica del IDEA que mayor histórico de radiación solar presentó fue la estación Posgrados con un promedio anual desde 2005 hasta 2016 de 1418 kWh/m². Las estaciones remotas de Yarumos e Ingeominas, presentaron valores de 1260 kWh/m² y 1163 kWh/m² respectivamente. La radiación solar anual más baja fue en el año 2015 registrado en la estación meteorológica Ingeominas de 1055 kWh/m², mientras que el valor más alto de 1472 kWh/m² se presentó en la estación Posgrados para el año 2014.

8.2.1. Radiación solar anual estaciones remotas

Como se muestra en la figura 31, la estación remota de la base de datos NASA que mayor histórico de radiación solar anual presenta fue la estación Norcasia con un promedio anual (desde 1988 hasta 2017) de 1974 kWh/m². Las estaciones remotas de Manizales y Chinchiná presentaron promedios anuales similares de 1631 kWh/m² y 1630 kWh/m² respectivamente.

La radiación solar anual más baja en el rango de años histórico analizado fue en el 2013 registrado en la estación remota Chinchiná de 1471 kWh/m², mientras que el valor más alto de radiación solar anual fue de 1882 kWh/m², y se presentó en la estación Norcasia para el año 2002.

Figura 30. Radiación solar anual estaciones meteorológicas-IDEA

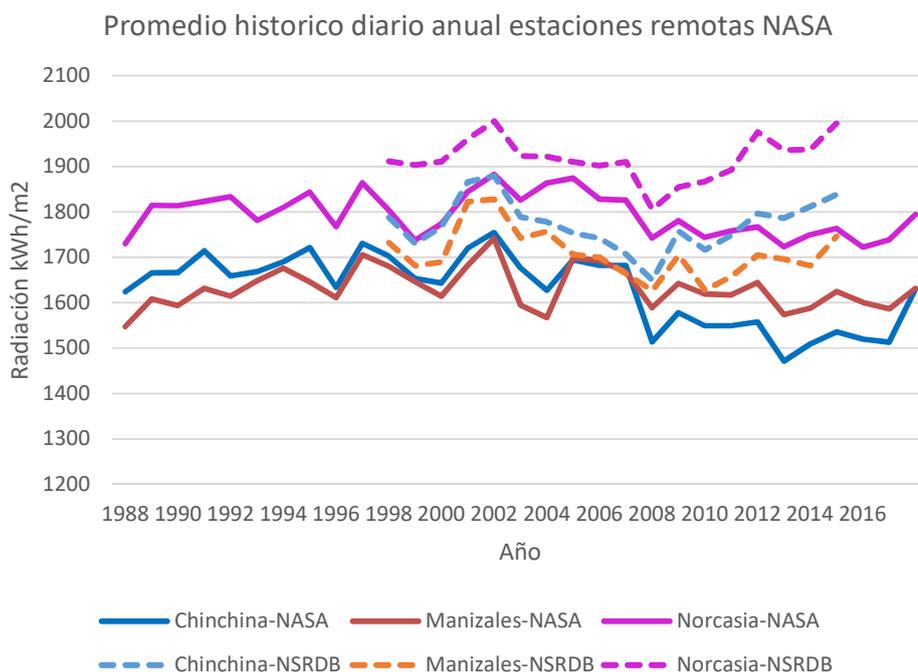


Fuente: Elaboración propia a partir de IDEA

Como se observa en la figura 31, la estación remota de la base de datos de la NSRDB que mayor histórico de radiación solar presentó fue la estación Norcasia con un promedio anual (desde 1998 hasta 2014) de 1918 kWh/m². Las estaciones remotas de Manizales y Chinchiná presentaron promedios anuales similares de 1709 kWh/m² y 1772 kWh/m² respectivamente. La radiación solar anual más baja en el rango de años histórico analizado fue en el año 2008 registrado en la estación remota Manizales de 1627 kWh/m², mientras que el valor más alto de radiación solar anual de 2000 kWh/m² se presentó en la estación Norcasia para el año 2002.

Lo valores de radiación de la base de datos NSRDB son, en general, mayores que los de NASA para todo el periodo común de análisis. Para la base de datos NASA los valores son muy similares para la estación Chinchiná y Manizales, mayores en Manizales para los últimos 10 años no así para los primeros 10. Mientras en la NSRDB son mayores las radiaciones anuales reportadas para la estación Manizales que para la Chinchiná como se esperaría, de acuerdo con las diferencias en temperatura de ambas regiones. En ambas bases de datos la radiación entre la estación Norcasia y las demás es evidentemente más alta como era de esperarse por la topografía y características de dicha la región. Lo anterior indica que es necesario tener datos más puntuales de radiación para un buen diseño de SSFV y no tomando datos tan generales.

Figura 31. Radiación solar histórica anual estaciones remotas



Fuente: Elaboración propia a partir NASA y NSRDB

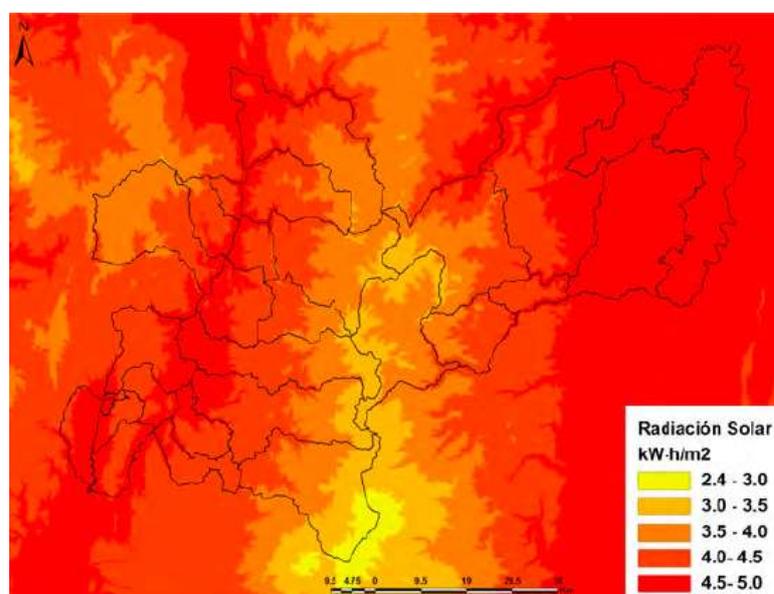
Como se muestra en la figura 31, las estaciones remotas de la base de datos de la NSRDB presentan los mayores valores de radiación solar, y dado que, esta estación tiene una

resolución de 4km por 4km, nos permite obtener datos más específicos para la región, ya que el análisis se realiza de manera más puntual.

8.2.2. Mapas de radiación solar

La fotografía 26, muestra la variabilidad climática del Departamento de Caldas la cual está influenciada por su orografía, se presentan mayores valores de radiación en los valles de los ríos Magdalena y Cauca y menores valores en las regiones montañosas de la cordillera central.

Fotografía 26. Mapa de radiación solar 1981-2010



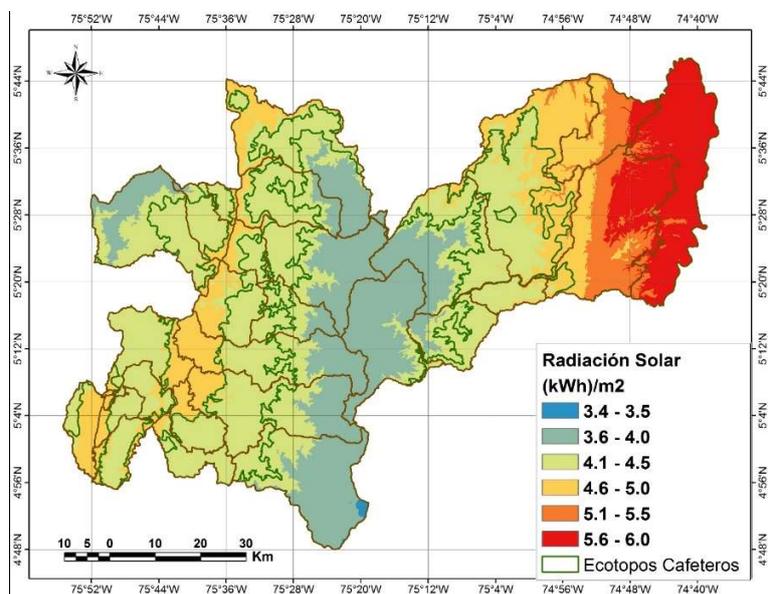
Fuente: Entendimiento de fenómenos ambientales mediante análisis de datos

La fotografía 27, ilustra el comportamiento de la radiación solar de manera más detalles para las diferentes regiones del departamento, este mapa es tomado de un trabajo de investigación reciente (Ocampo, 2018). En la región Magdalena Caldense se presenta la mayor radiación solar, la cual se encuentra entre 5,6 – 6,0 kWh/m². Norcasia presenta, de acuerdo con este mapa, una radiación entre

5,1 y 5,5 kWh/m², la cual concuerdan con los valores reportados por las estaciones remotas analizadas en este trabajo los cuales se resumen en la tabla 5.

En este mapa, también es posible identificar la diferencia en los valores de radiación incluso dentro del mismo municipio, como es el caso de Manizales, en el cual, se corroboran que los valores de radiación solar dependen del sitio, sobre todo por la particular topografía de la región. En la tabla 6 se presenta un resumen de los valores reportados por las estaciones meteorológicas analizadas en este trabajo. La estación posgrados coincide con el rango de radiación solar presentada en el mapa de la fotografía 27, la cual está entre 3,6 – 4 kWh/m². Las estaciones Yarumos e Ingeominas presentan valores de radiación solar menores a los de referencia. Sin embargo, siguen una escala mayor a menor radiación según las características de orografía de cada una en la cual, la estación Ingeominas se encuentra en una zona de alta nubosidad, lo cual explicaría el hecho del valor medio más bajo.

Fotografía 27. Radiación solar Departamento de Caldas 1981-2010

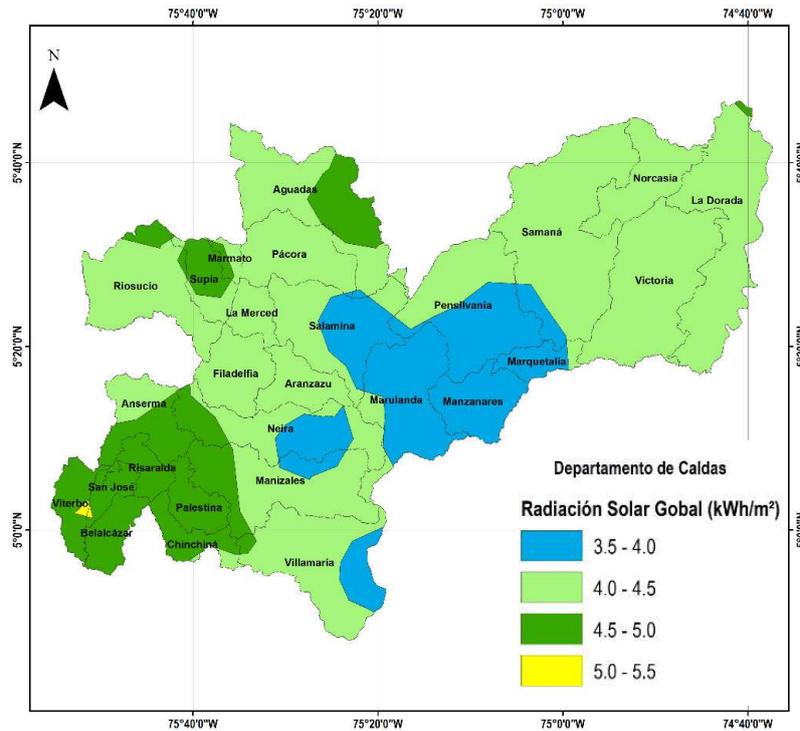


Fuente: (Ocampo, 2018)

En la fotografía 28, se presenta el mapa del IDEAM para el año 2010 en el cual se observa la variabilidad climática para los distintos municipios del departamento. De acuerdo

con este mapa, la radiación en Chinchiná es mayor que en Manizales, lo que coincide con la estación remota NSRDB, sin embargo, en Norcasia no se observan las diferencia reflejadas en el análisis con las bases de datos remotas.

Fotografía 28. Mapa de radiación solar global Departamento de Caldas 2010



Fuente: SCNCC-IDEAM

Tabla 5. Resumen valores de radiación solar estaciones remotas NASA y NSRDB

Estación remota	Base de datos	Mes de mayores promedios diarios de radiación kW/m ²		Mes de menores promedios diarios de radiación kW/m ²		Promedio diario de radiación solar kWh/m ²
		Mes	Valor	Mes	Valor	
Norcasia	NASA	Agosto	5,49	Diciembre	4,50	5,02
Norcasia	NSRDB	Agosto	5,80	Diciembre	4,60	5,25
Chinchiná	NASA	Agosto	4,86	Diciembre	4,14	4,54
Chinchiná	NSRDB	Febrero	5,10	Diciembre	4,60	4,85
Manizales	NASA	Agosto	5,02	Diciembre	4,18	4,49
Manizales	NSRDB	Febrero	4,91	Noviembre	4,40	4,68

Fuente: Elaboración propia a partir NASA y NSRDB

Tabla 6. Resumen valores de radiación solar estaciones meteorológicas IDEA

Estación remota	Base de datos	Mes de mayores promedios diarios de radiación kW/m ²		Mes de menores promedios diarios de radiación kW/m ²		Promedio diario de radiación solar kWh/m ²
Posgrados	IDEA	Enero	4,27	Junio	3,40	3,84
Yarumos	IDEA	Febrero	3,80	Mayo	3,16	3,48
Ingeominas	IDEA	Febrero	3,81	Mayo	2,90	3,22

Fuente: Elaboración propia a partir IDEA

6.3 DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE ALGUNOS SSFV

INSTALADOS EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS

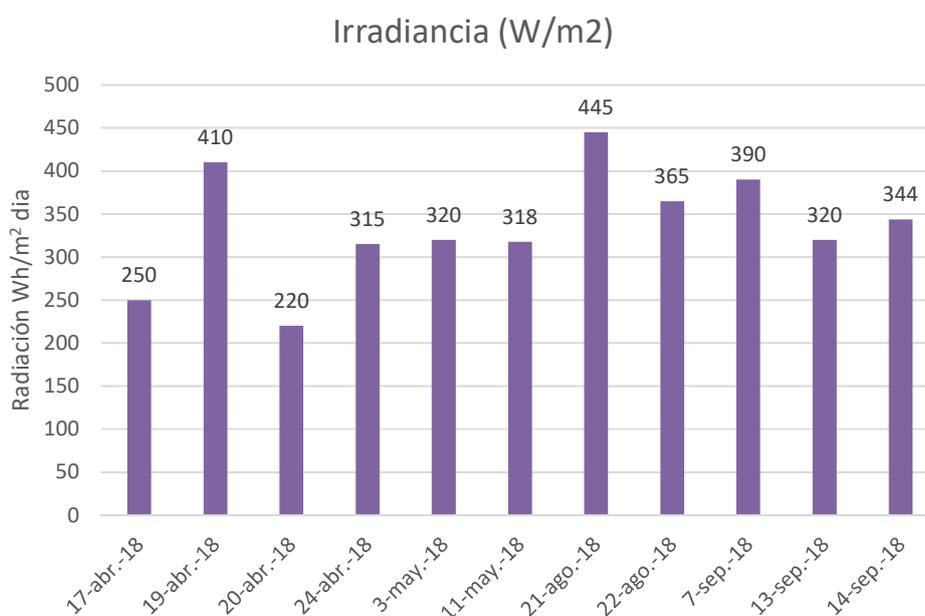
En esta sección se presentan los resultados de las medidas realizadas durante 11 días a tres SSFV instalados en el Sena Regional Caldas, los cuales se seleccionaron dado que como se analizó en el objetivo 1, la mayor cantidad de sistemas se encontraron a nivel residencial e institucional y tenían potencias pico menores a los 10kW rango en el que se encontraban 23 de los 28 proyectos analizados. Se calcularon 14 parámetros para cada sistema que permiten determinar el desempeño y la eficiencia los sistemas bajo estudio, es decir, se realizaron 500 análisis a partir de las expresiones matemáticas planteadas en el marco teórico. Cada uno de los cálculos realizados y los resultados para cada parámetro, para un día y un sistema en particular, se presentan en el Anexo 2. A continuación, se presentan los resultados globales obtenidos para los tres sistemas y se establece una comparación entre ellos.

6.3.1 Irradiancia para los tres sistemas solares fotovoltaicos

Como se observa en la figura 32, los valores más bajos de irradiancia se presentan principalmente en el mes de abril, pero también en este mes se tiene el segundo día con mayor irradiancia, se observó, que el mes de abril fue el que presentó mayores características de

nubosidades. Por el contrario, agosto fue el mes de mayor irradiancia con un valor medio de 405 W/m² y con días parcialmente despejados.

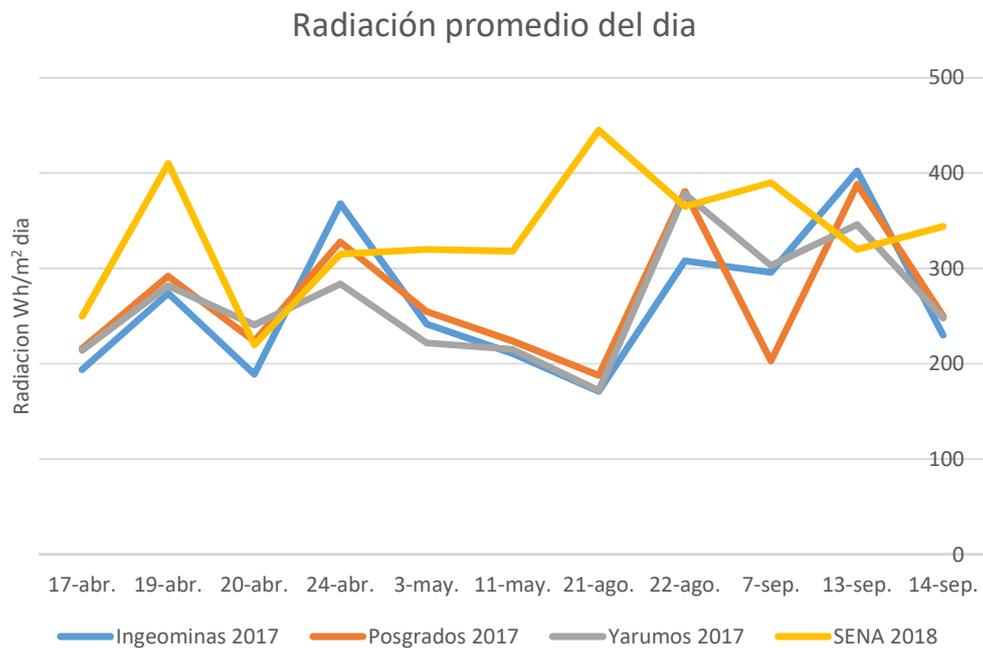
Figura 32. Irradiancia



Fuente: Propia

Como se muestra en la figura 33, las estaciones meteorológicas analizadas en el objetivo 2 para el año 2017, coinciden con los picos altos y bajos de radiación con la estación meteorológica del SENA en los meses del primer semestre del año, mientras que, en los meses del segundo semestre del año los picos altos y bajos se presentaron en días diferentes de cada mes. Sin embargo, como se ha venido mencionando, cada estación en particular presenta valores diferentes de radiación.

Figura 33. Radiación promedio del día estaciones metrológicas



Fuente: Propia

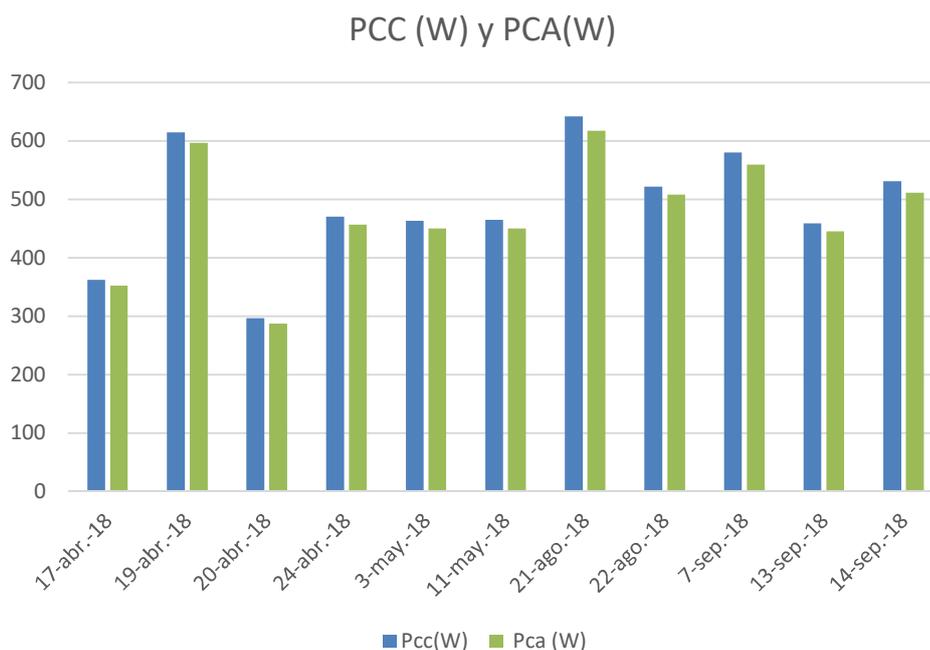
6.3.2 *Análisis SSFV monocristalino On Grid*

- ***Análisis de la potencia del inversor***

En la figura 34, se presenta el comportamiento del promedio de la potencia calculado con el teorema del valor medio para cada uno de los días analizados, tanto en continua como alterna para el SSFV monocristalino On Grid. Se puede observar que ambas gráficas están muy cercanas entre sí. Esta cercanía disminuye en las horas de altos valores de irradiancia, donde la temperatura ambiente es mayor, y el rendimiento del inversor disminuye. Así mismo, entre mayores sean los valores de la potencia en continua, el porcentaje correspondiente al rendimiento del inversor se traduce en un valor diferencial de potencia mayor, contribuyendo así al mayor alejamiento de las curvas. Se puede concluir que el inversor se encuentra funcionando adecuadamente, ya que los valores de potencia a la entrada

y a la salida son aproximadamente proporcionales. Se puede observar que las mayores potencias presentadas corresponden con los máximos valores de irradiancia el 19 de abril y el 21 de agosto de 2018.

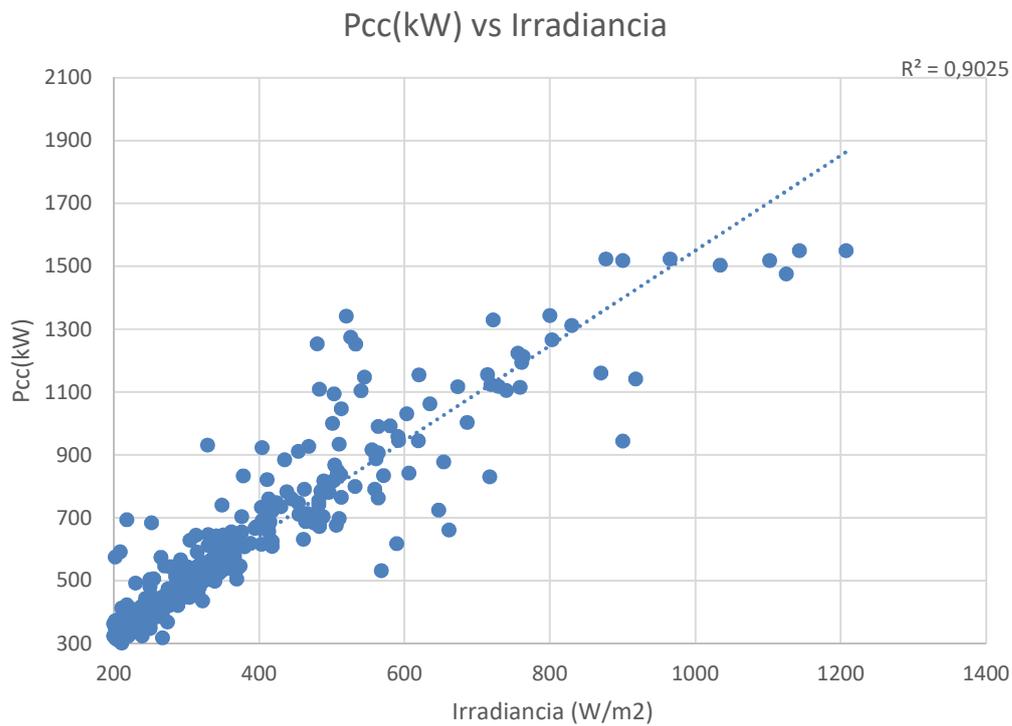
Figura 34. Pcc y Pca SSFV monocristalino On Grid



Fuente: Propia

En la figura 35, se presenta la potencia en corriente continua en función de la irradiancia para todos los días analizados. Se puede observar que la potencia en continua es proporcional a la irradiancia debido a que se obtuvo un buen coeficiente de correlación $R^2=0,9025$. Por otra parte, se puede observar que la mayor parte de los aproximadamente 500 puntos se encuentran muy cercanos a la línea de tendencia, lo que se significa que se presentaron pocas pérdidas por efecto sombreado.

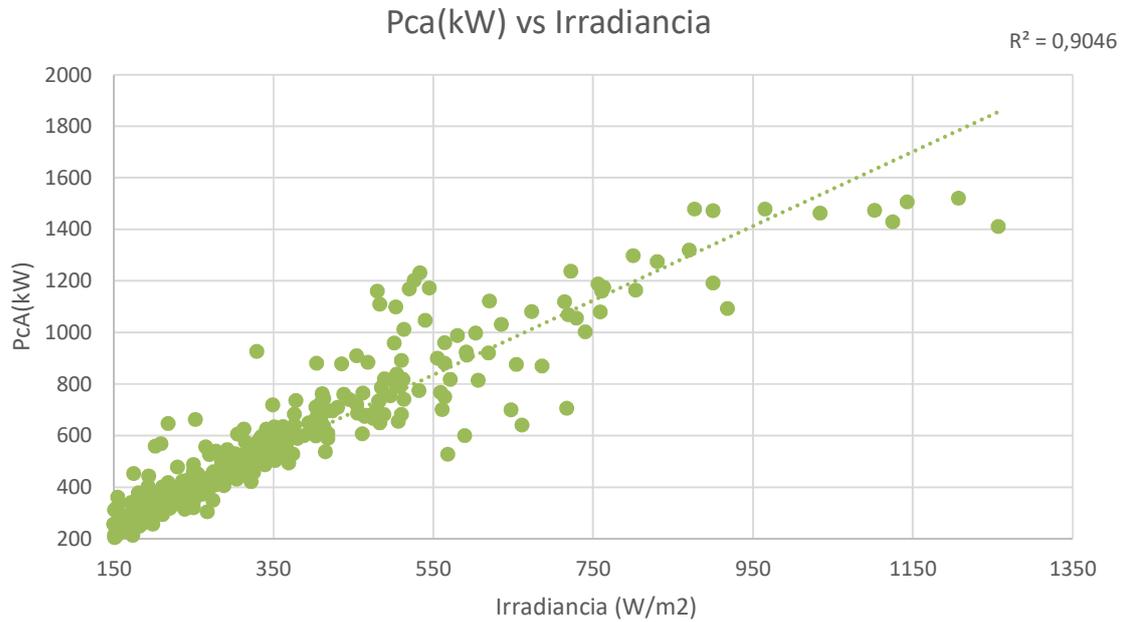
Figura 35. Pcc en función de la irradiancia del SSFV monocristalino On Grid



Fuente: Propia

En la figura 36, se presenta la potencia en corriente alterna en función de la irradiancia. Se puede observar que la potencia en alterna es proporcional a la irradiancia debido a que se obtuvo un buen coeficiente de correlación $R^2=0,0946$. Así mismo, el cableado empleado para la conexión se encuentra bien dimensionado y en buen estado, se puede observar que las pérdidas son mínimas, puesto que los cerca de 500 puntos se encuentran sobre la línea de tendencia.

Figura 36. Pca en función de la irradiancia del SSFV monocristalino On Grid

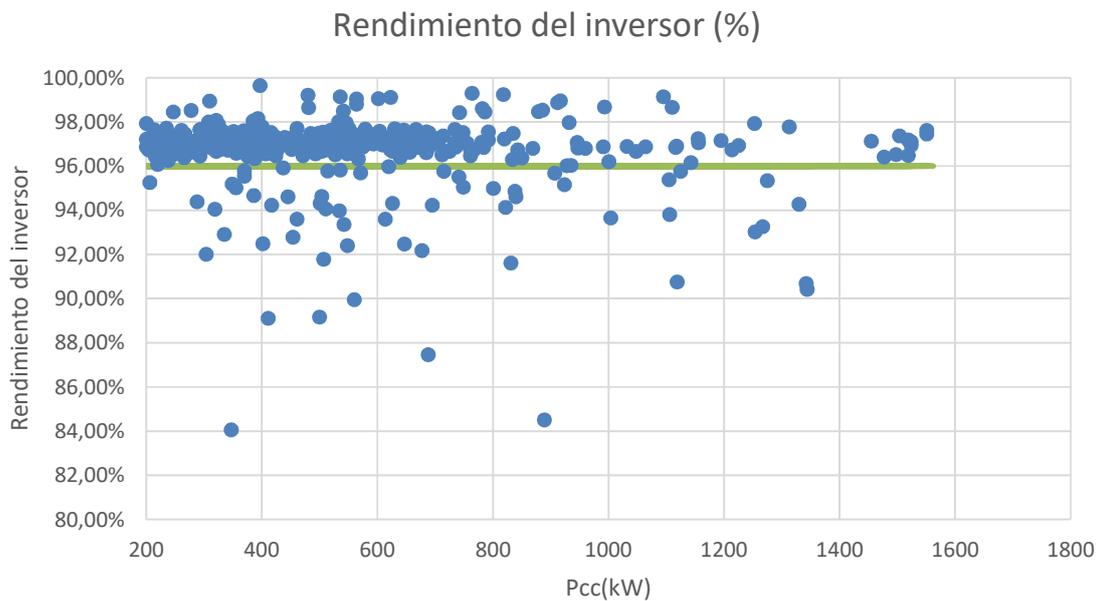


Fuente: Propia

■ Rendimiento del inversor

Se puede observar que el rendimiento del inversor se encuentra por encima del 96% que es el valor europeo estipulado en la ficha del inversor para la mayoría de los aproximadamente 500 puntos, y presenta un rendimiento promedio de 96,98%, lo cual, es debido a que el inversor tiene poco tiempo de uso y a que la temperatura ambiente no influye de manera significativa sobre el rendimiento.

Figura 37. Rendimiento del inversor del SSFV monocristalino On Grid

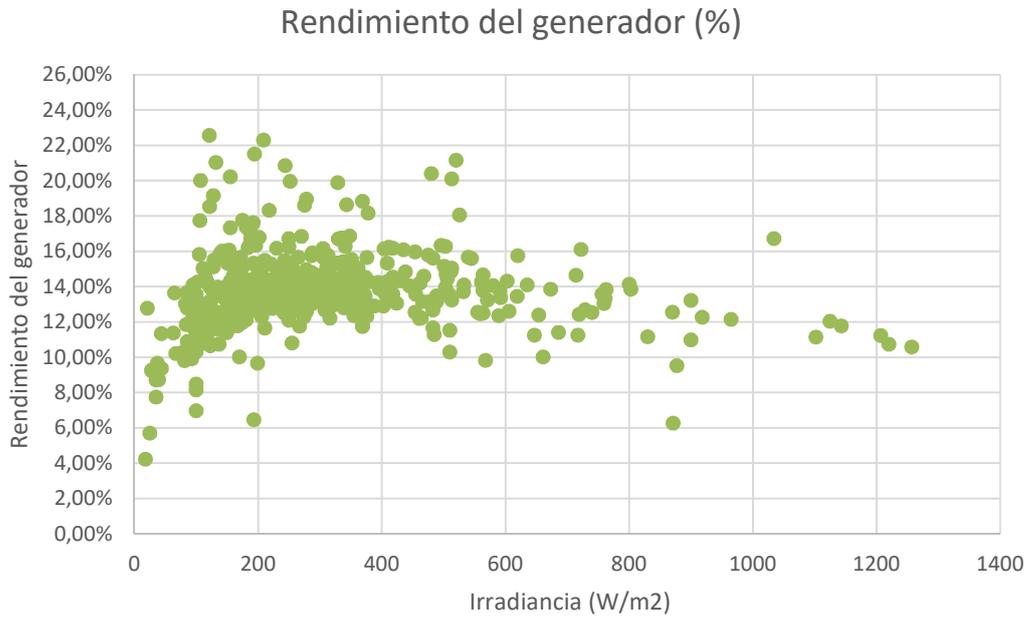


Fuente: Propia

■ Rendimiento del generador en función de la irradiancia y la temperatura del módulo

En la figura 38, se presenta el rendimiento del generador en función de la irradiancia. Se puede observar que los rendimientos más bajos se obtienen para irradiancias por debajo de 100 W/m^2 . Esto es debido a que estas bajas irradiancias se obtienen en las primeras y últimas horas del día, donde el ángulo de incidencia de los rayos solares con la superficie es bajo, haciendo que haya una pérdida notable por el efecto coseno. Por otro lado, para altas irradiancias el rendimiento disminuye debido a que estas altas irradiancias producen altas temperaturas sobre el generador, disminuyendo su rendimiento debido al corrimiento de su punto de máxima potencia.

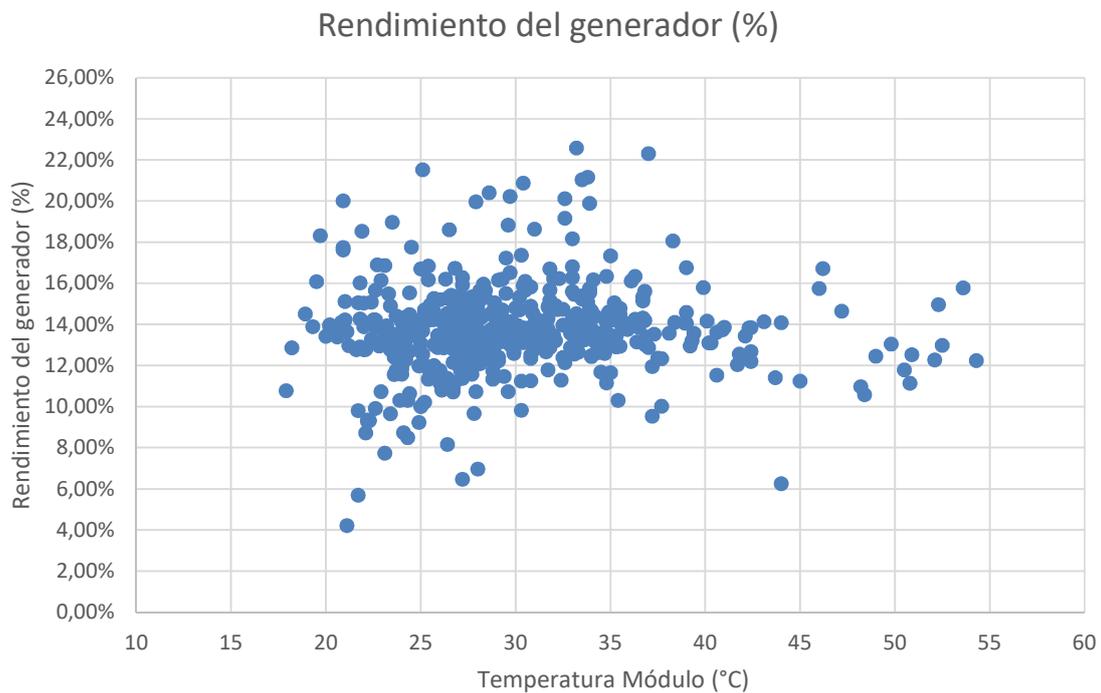
Figura 38. Rendimiento del generador del SSFV monocristalino On Grid en función de la irradiancia



Fuente: Propia

En la figura 39, se observa el comportamiento del rendimiento del generador en función de la temperatura del módulo. Este rendimiento presenta un valor diario medio de 13,23%, que como vemos es mayor del 12.1% el cual es el valor que tienen los módulos utilizados en condiciones estándar, STC.

Figura 39. Rendimiento del generador del SSFV monocristalino On Grid en función de la temperatura del módulo.

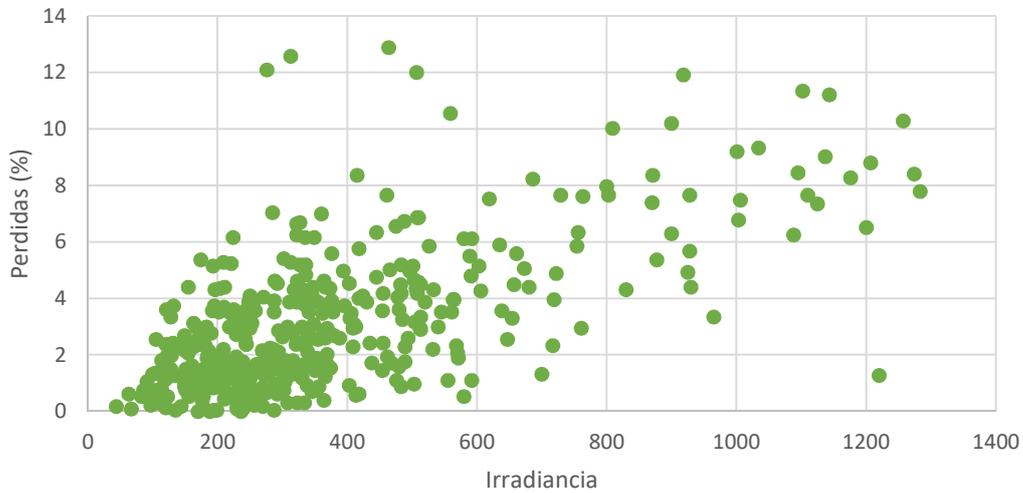


Fuente: Propia

En la figura 40, se muestran las pérdidas instantáneas por temperatura para el SSFV monocristalino On Grid. Estas pérdidas fueron del orden del 3% en promedio, lo cual representa un porcentaje bajo y es consecuente con que la irradiación durante el tiempo analizado no supero los $500\text{W}/\text{m}^2$, lo cual permite que las pérdidas por temperatura sean muy cercanas a cero. Para altas irradiancias se comprueba que las pérdidas en el generador empiezan a ser significativas por encima del 8%.

Figura 40. Pérdidas instantáneas por temperatura SSFV monocristalino On Grid

Perdidas por temperatura sistema monocristalino On Grid



Fuente: Propia

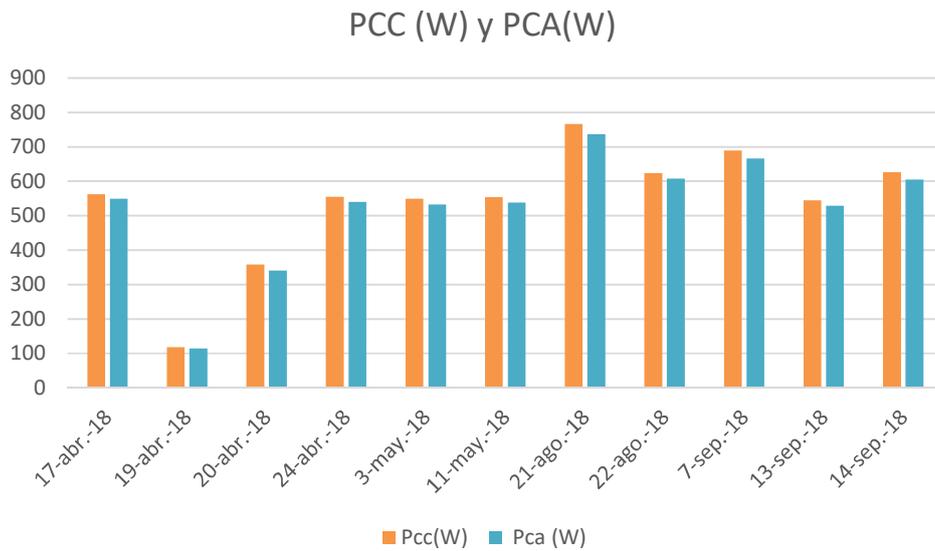
6.3.3 *Análisis SSFV policristalino On Grid*

■ *Análisis de la potencia del inversor*

En la figura 41, se presenta el comportamiento del promedio de la potencia calculado con el teorema del valor medio para cada uno de los días analizados, tanto en continua como alterna para el SSFV policristalino On Grid. Se puede observar que ambas gráficas están muy cercanas entre sí. Esta cercanía disminuye en las horas de altos valores de irradiancia, donde la temperatura ambiente es mayor, y el rendimiento del inversor disminuye. Así mismo, entre mayores sean los valores de la potencia en continua, el porcentaje correspondiente al rendimiento del inversor se traduce en un valor diferencial de potencia mayor, contribuyendo así al mayor alejamiento de las curvas. Otra conclusión de esta gráfica es que el inversor está funcionando adecuadamente, ya que los valores de potencia a la entrada y salida de él son

aproximadamente proporcionales. Se puede observar que la mayor potencia generada corresponde con el punto de mayor irradiancia, el cual se presentó el 21 de agosto de 2018.

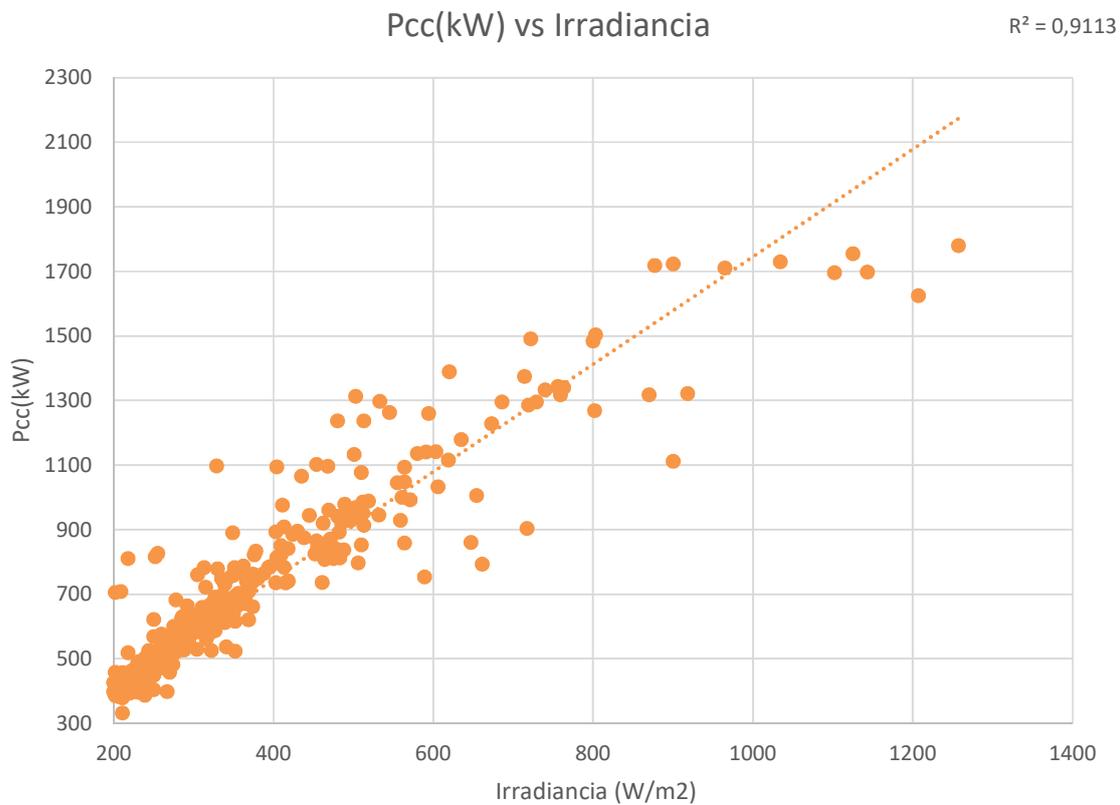
Figura 41. Pcc y Pca SSFV policristalino On Grid



Fuente: Propia

En la figura 42, se presenta la potencia en corriente continua en función de la irradiancia para todos los días analizados. Se puede observar que la potencia generada por los módulos es proporcional a la irradiancia debido a que se obtuvo un buen coeficiente de correlación de $R^2=0,9113$. Por otra parte, se puede observar que la mayor parte de los aproximadamente 500 puntos se encuentran muy cercanos a la línea de tendencia, lo que se traduce en que se presentaron pocas pérdidas por efecto sombreado.

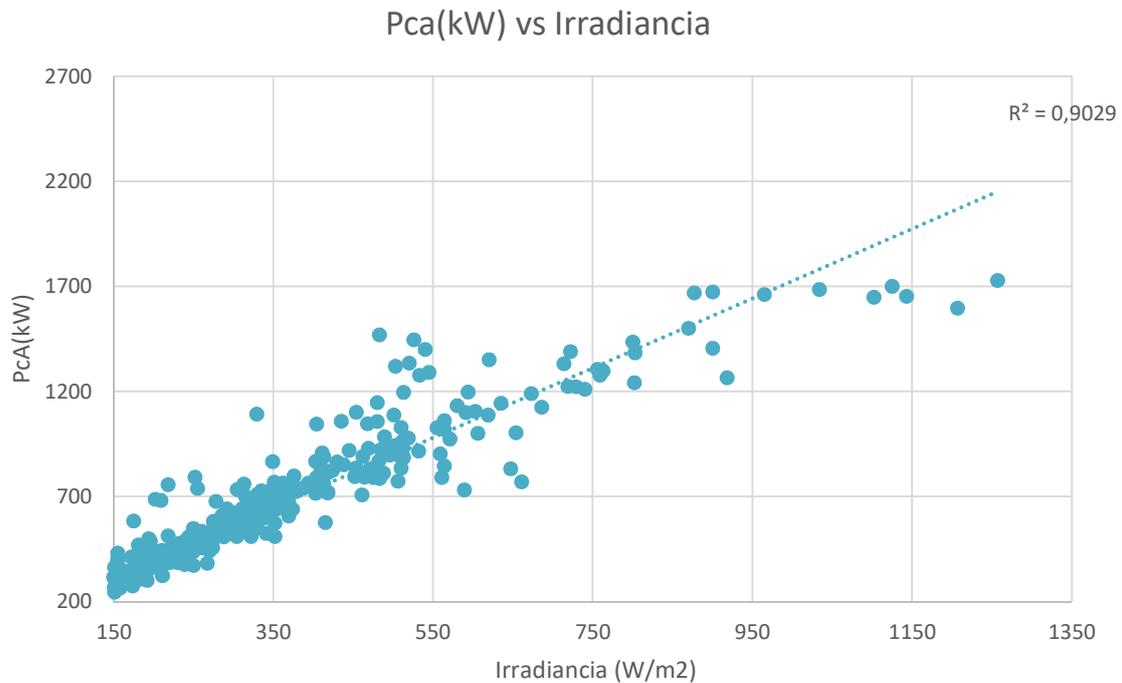
Figura 42. Pcc en función de la irradiancia del SSFV policristalino On Grid



Fuente: Propia

En la figura 43, se presenta la potencia en corriente alterna en función de la irradiancia. Se puede observar que la potencia a la salida del inversor es proporcional a la irradiancia debido a que se obtuvo un buen coeficiente de correlación $R^2=0,9029$. Así mismo, el cableado empleado para la conexión se encuentra bien dimensionado y en buen estado, puesto que los cerca de 500 puntos se encuentran sobre la línea de tendencia.

Figura 43. Pca en función de la irradiancia del SSFV policristalino On Grid

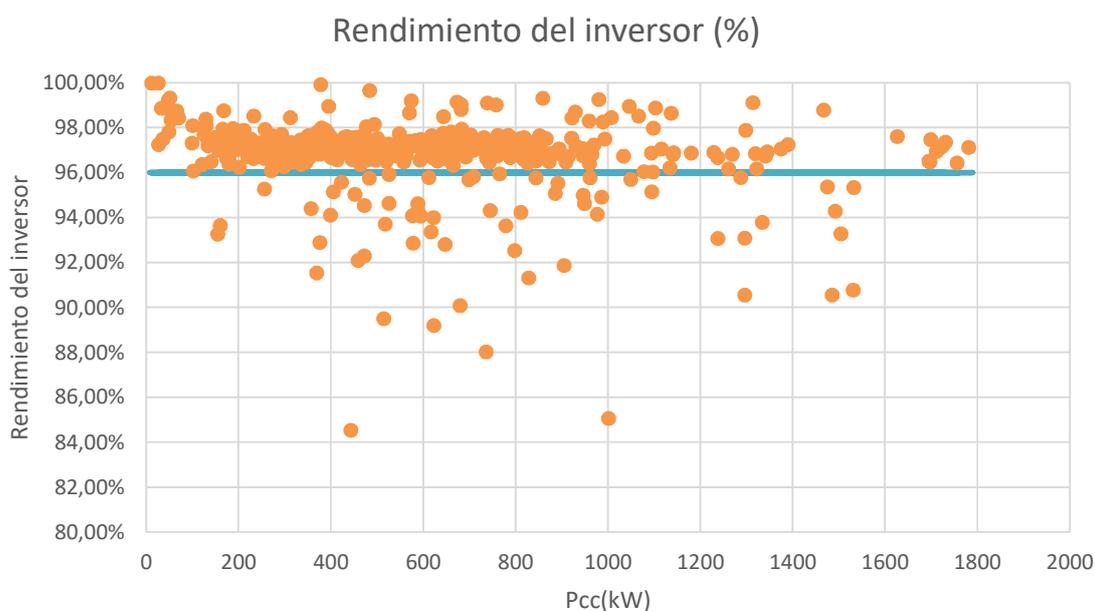


Fuente: Propia

■ Rendimiento del inversor

Se puede observar que el rendimiento del inversor se encuentra por encima del 96% que es el valor europeo estipulado en la ficha del inversor para la mayoría de los aproximadamente 500 puntos, y presenta un rendimiento promedio de 97,08%. Dicho rendimiento es el mayor de los tres SSFV analizados incluso por encima de la eficiencia presentada en el sistema monocristalino On Grid, lo cual, es debido a que el inversor tiene poco tiempo de uso y que la temperatura ambiente no influye de manera significativa sobre el rendimiento.

Figura 44. Rendimiento del inversor del SSFV policristalino On Grid

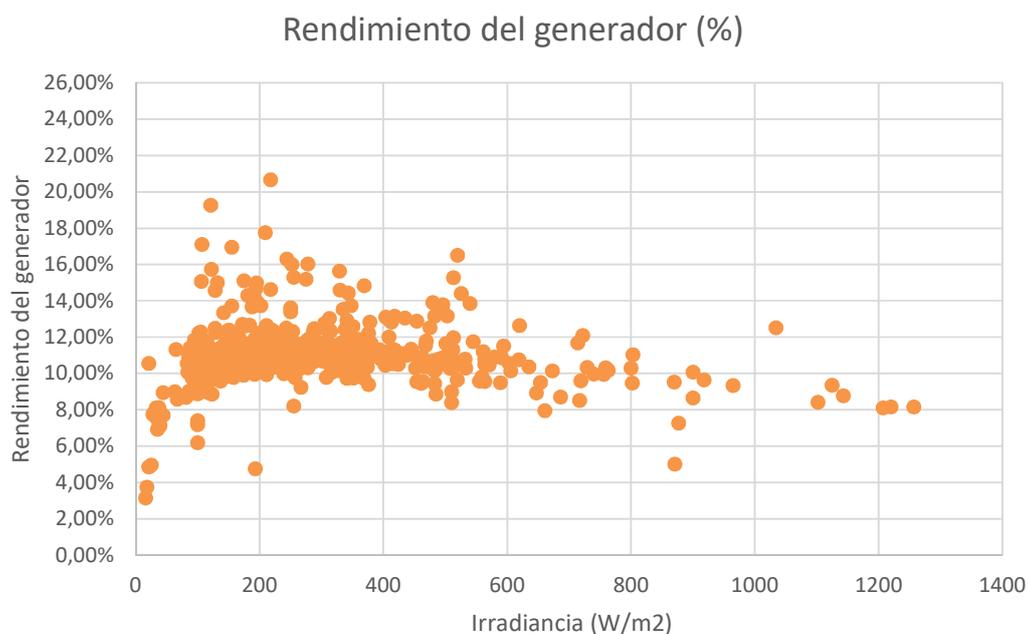


Fuente: Propia

■ **Rendimiento del generador en función de la irradiancia y la temperatura del módulo**

Se puede observar en la figura 45, que los rendimientos más bajos se obtienen para irradiancias por debajo de 100 W/m^2 . Esto es debido a que estas bajas irradiancias se obtienen en las primeras y últimas horas del día, donde el ángulo de incidencia de los rayos solares con la superficie es bajo, haciendo que haya una pérdida notable por el efecto coseno. Por otro lado, para altas irradiancias el rendimiento disminuye debido a que estas altas irradiancias producen altas temperaturas sobre el generador, disminuyendo su rendimiento debido al corrimiento de su punto de máxima potencia.

Figura 45. Rendimiento del generador en función de la irradiancia del SSFV policristalino On Grid



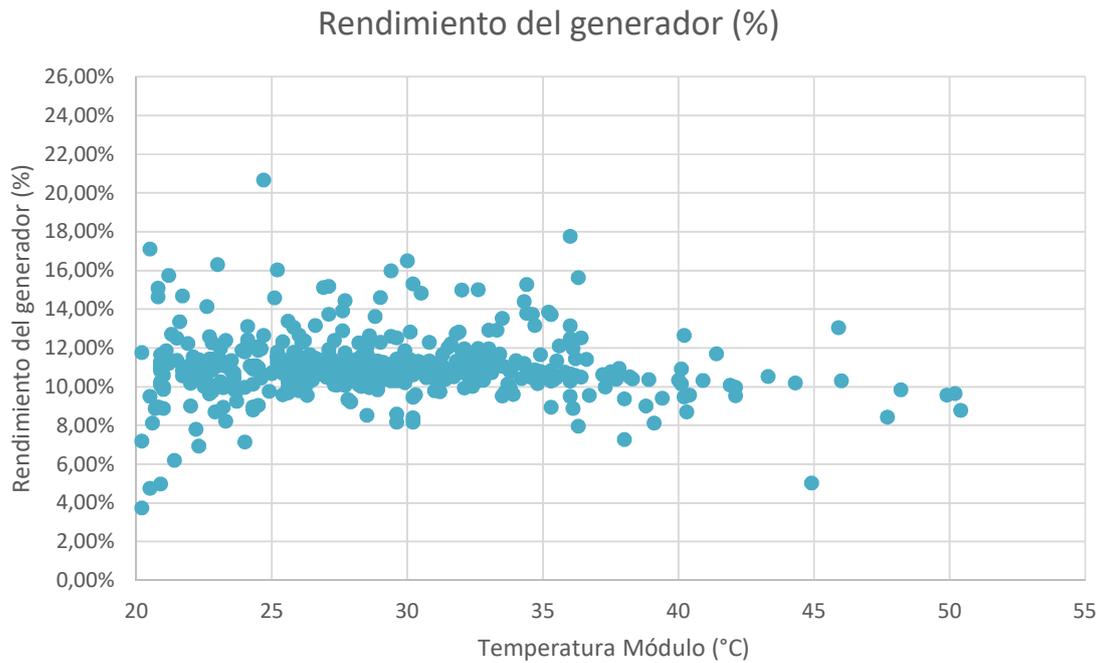
Fuente: Propia

En la figura 46, se observa el comportamiento del rendimiento del generador en función de la temperatura del módulo. Este rendimiento presenta un valor diario medio de 10,98%, que como vemos es menor del 12.1 % el cual es el valor que tienen los módulos utilizados en condiciones estándar, STC.

En la figura 47, se muestran las pérdidas instantáneas por temperatura para el SSFV policristalino On Grid. Estas pérdidas fueron del orden del 1.79% en promedio, lo cual representa un porcentaje bajo y es consecuente con que la irradiación durante el tiempo analizado no superó los 500W/m² en promedio, lo cual permite que las pérdidas por

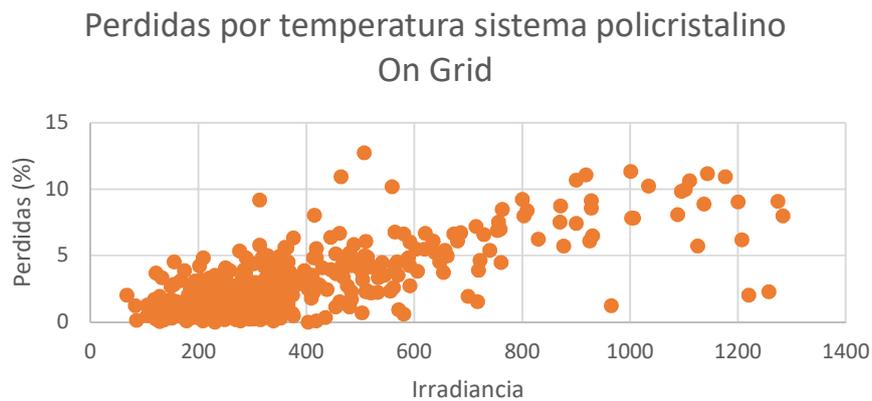
temperatura sean muy cercanas a cero. Para altas irradiancias se comprueba que las pérdidas en el generador empiezan a ser significativas por encima del 8%.

Figura 46. Rendimiento del generador en función de la temperatura del módulo del SSFV policristalino On Grid



Fuente: Propia

Figura 47. Pérdidas instantáneas por temperatura SSFV policristalino On Grid



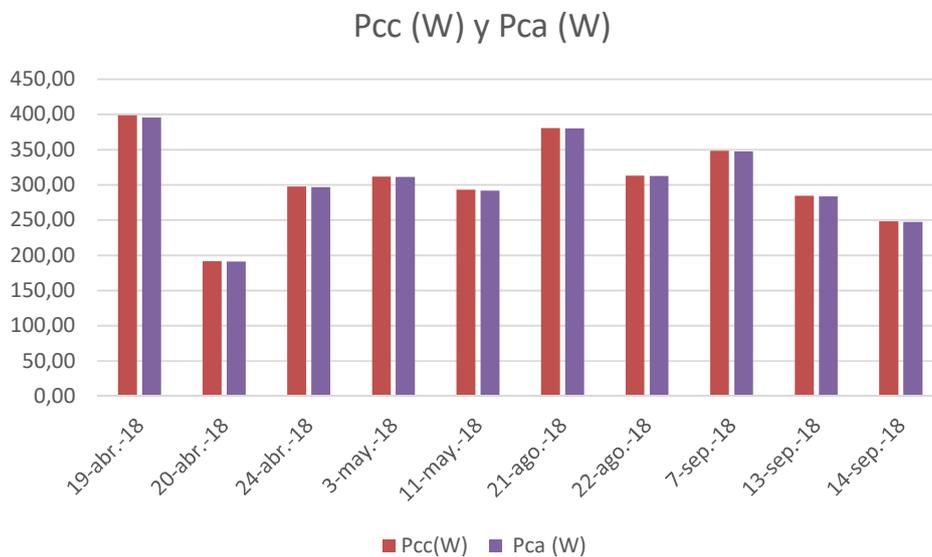
Fuente: Propia

6.3.4 Análisis SSFV policristalino Off Grid

Análisis de la potencia en el inversor

En la figura 48, se presenta el comportamiento del promedio de la potencia calculado con el teorema del valor medio para cada uno de los días analizados, tanto en continua como en alterna para el SSFV policristalino off grid. Se puede observar que ambas gráficas están muy cercanas entre sí en todos los momentos medidos, lo cual indica que el rendimiento del inversor no se vio afectado en ningún momento del día por la irradiación. El inversor está funcionando adecuadamente, ya que los valores de potencia a la entrada y salida de él son aproximadamente proporcionales. Se puede observar la mayor potencia generada corresponde con uno de los puntos de mayor irradiancia, el cual se presentó el 19 de abril de 2018.

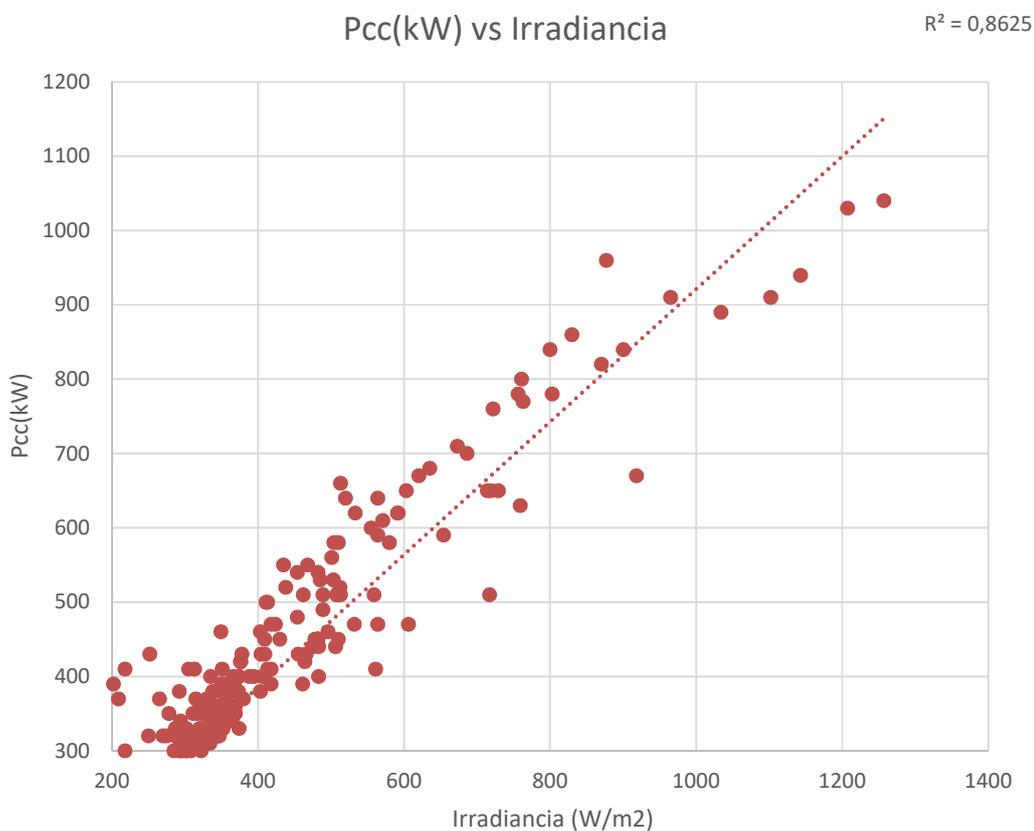
Figura 48. Pcc y Pca SSFV policristalino Off Grid



Fuente: Propia

En la figura 49, se presenta la potencia en corriente continua en función de la irradiancia para todos los días analizados. Se puede observar que la potencia generada por los módulos es proporcional a la irradiancia debido a que se obtuvo un buen coeficiente de correlación de $R^2=0,8625$. Por otra parte, se puede observar que la mayor parte de los aproximadamente 500 puntos se encuentran muy cercanos a la línea de tendencia, lo que se traduce en que se presentaron pocas pérdidas por efecto sombreado.

Figura 49. Pcc en función de la irradiancia del SSFV policristalino Off Grid

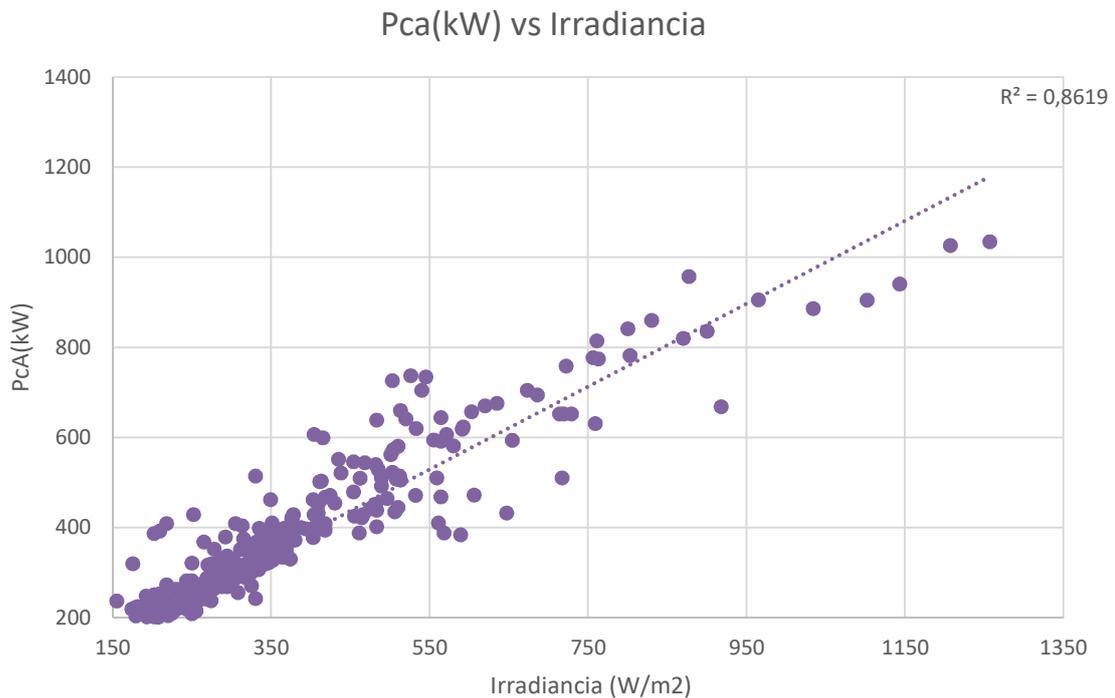


Fuente: Propia

En la figura 50, se presenta la potencia en corriente alterna en función de la irradiancia. Se puede observar que la potencia a la salida del inversor es proporcional a la irradiancia

debido a que se obtuvo un buen coeficiente de correlación $R^2=0,8619$. Así mismo, el cableado empleado para la conexión se encuentra bien dimensionado y en buen estado, puesto que se puede observar que las pérdidas son mínimas, puesto que los cerca de 500 puntos se encuentran sobre la línea de tendencia.

Figura 50. Pca en función de la irradiancia del SSFV policristalino Off Grid



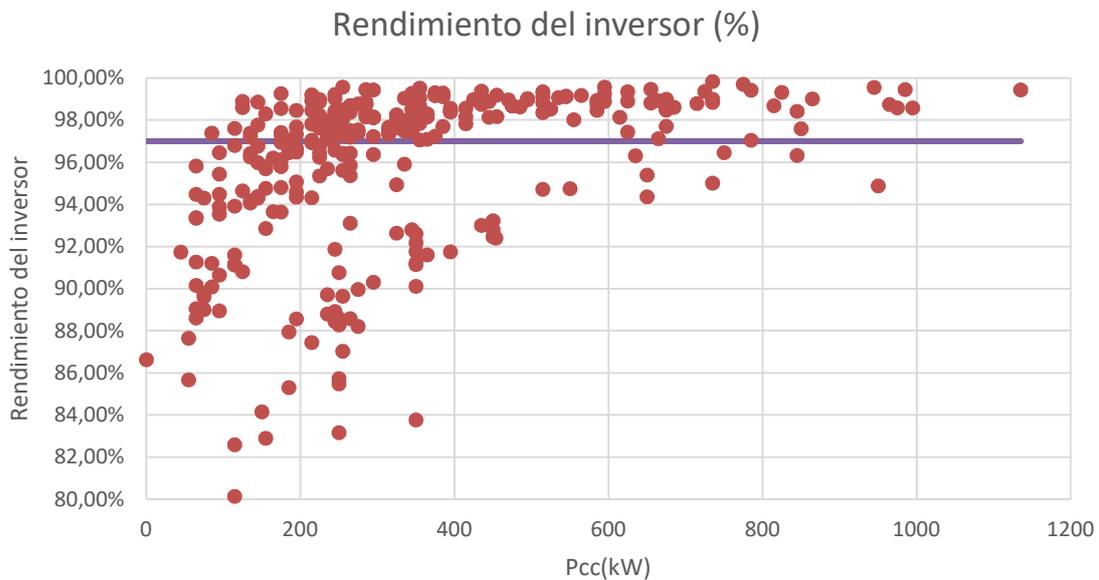
Fuente: Propia

■ Rendimiento del inversor

Se puede observar que el rendimiento del inversor se encuentra por encima del 97% para la mayoría de puntos, el cual, es el valor europeo estipulado en la ficha del inversor, y presenta un rendimiento promedio de 95,5%, dicha eficiencia es la menor en comparación con la eficiencia que presento el sistema monocristalino On Grid y el sistema policristalino

On Grid. También es evidente la relación directa con la potencia de entrada del inversor, la cual hace que se tengan mayores eficiencias.

Figura 51. Rendimiento del inversor del SSFV policristalino Off Grid

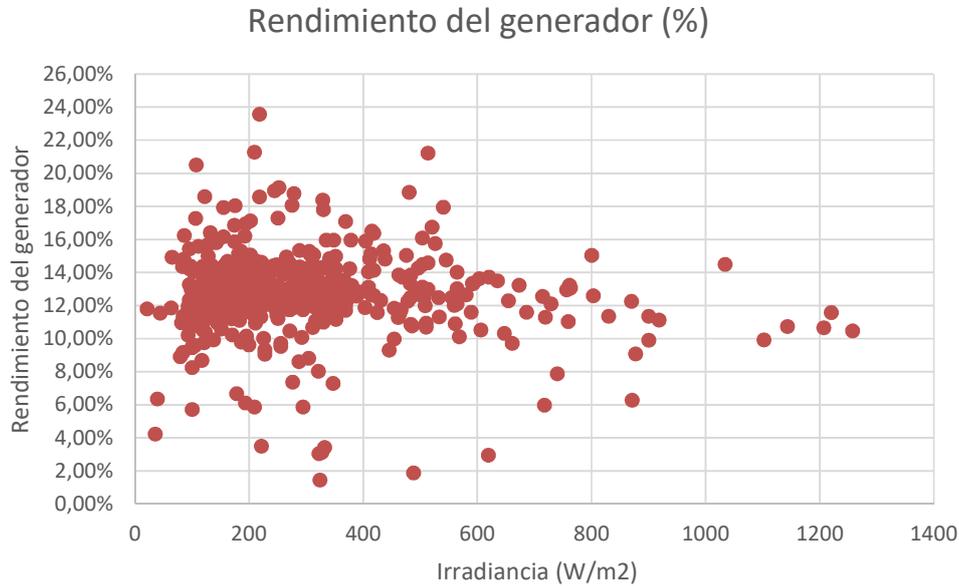


Fuente: Propia

Rendimiento del generador en función de la irradiancia y la temperatura del módulo

Se puede observar que los rendimientos más bajos se obtienen para irradiancias por debajo de 200 W/m². Esto es debido a que estas bajas irradiancias se obtienen en las primeras y últimas horas del día, donde el ángulo de incidencia de los rayos solares con la superficie es bajo, haciendo que haya una pérdida notable por el efecto coseno. Por otro lado, para altas irradiancias el rendimiento disminuye debido a que estas altas irradiancias producen altas temperaturas sobre el generador, disminuyendo su rendimiento debido al corrimiento de su punto de máxima potencia.

Figura 52. Rendimiento del generador en función de la irradiancia del SSFV policristalino Off Grid

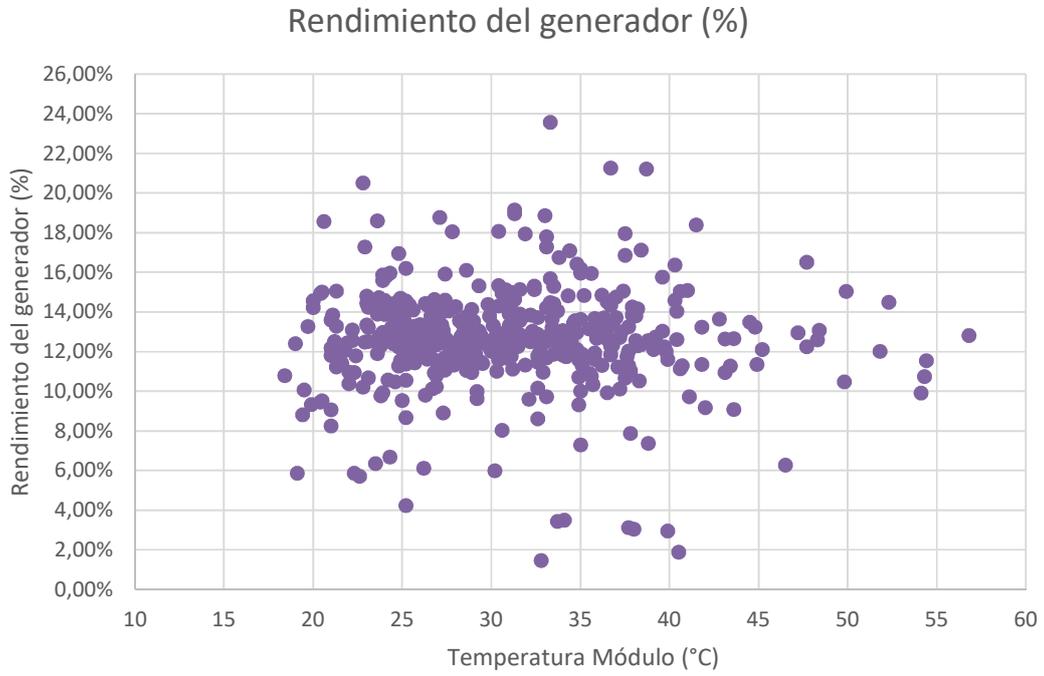


Fuente: Propia

En la figura 53, se observa el comportamiento del rendimiento del generador en función de la temperatura del módulo. Este rendimiento presenta un valor diario medio de 12,64%, que como vemos es mayor del 12.1 % el cual es el valor que tienen los módulos utilizados en condiciones estándar, STC.

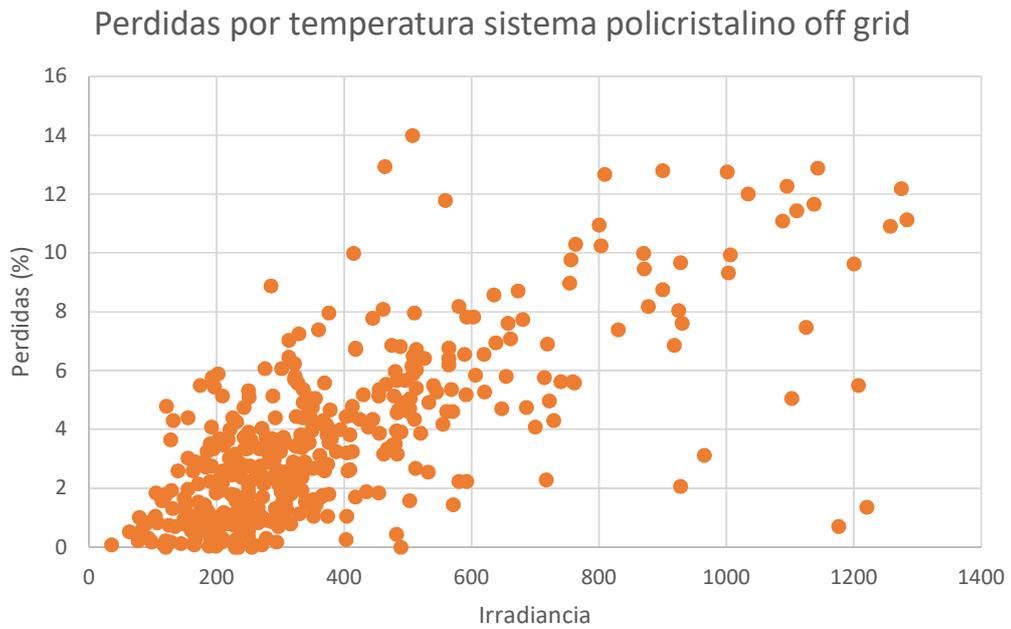
En la figura 54, se muestran las pérdidas instantáneas por temperatura para el SSFV policristalino off grid. Estas pérdidas fueron del orden del 2.6% en promedio, lo cual representa un porcentaje bajo y es consecuente con que la irradiación durante el tiempo analizado no supero los 500W/m² en promedio, lo cual permite que las pérdidas por temperatura sean muy cercanas a cero. Para altas irradiancias se comprueba que las pérdidas en el generador empiezan a ser significativas por encima del 10%.

Figura 53. Rendimiento del generador en función de la temperatura del módulo del SSFV policristalino Off Grid



Fuente: Propia

Figura 54. Pérdidas instantáneas por temperatura SSFV policristalino off grid



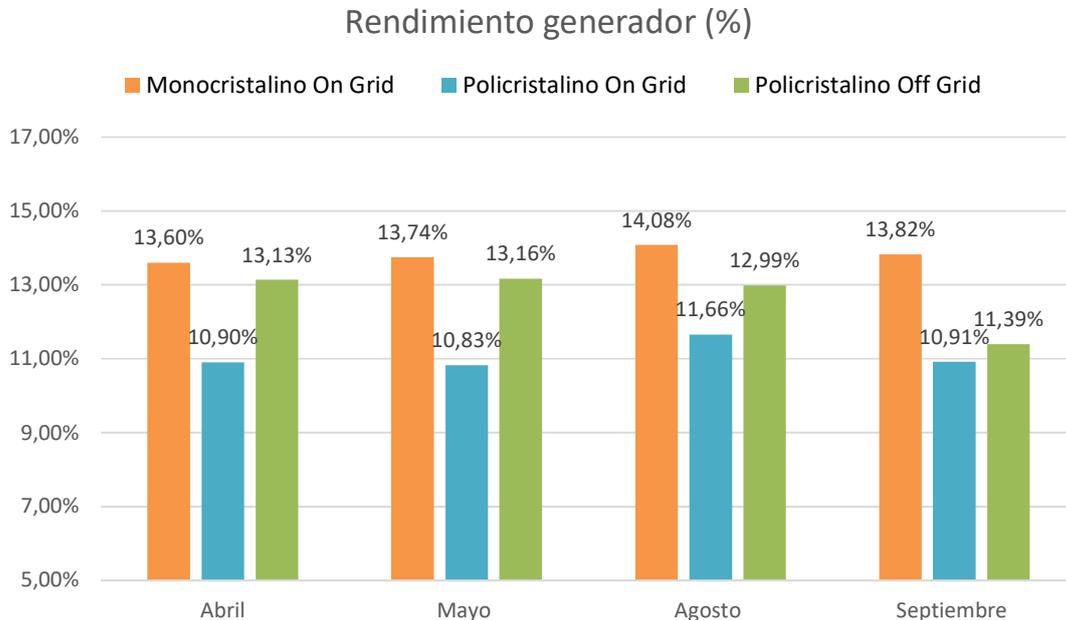
Fuente: Propia

6.3.5 Comparación del rendimiento de los tres sistemas analizados

Rendimiento de los generadores de energía

En la figura 55, se observa el comportamiento del rendimiento de los tres generadores. Se puede observar que los rendimientos de los tres sistemas solares fotovoltaicos estuvieron por debajo del 15%, lo cual es significativamente bajo debido que las eficiencias registradas en las fichas técnicas corresponden a 19% para los paneles monocristalinos y a 18% para los paneles policristalinos, esto obedece principalmente a las pérdidas por efecto sombreado y a las pérdidas por temperatura. Sin embargo, los paneles monocristalinos fueron los que presentaron un mejor rendimiento para cada uno de los días analizados con valores que oscilaban entre 13,60% y el máximo rendimiento presentado de 14,08% en el mes de agosto.

Figura 55. Rendimiento de los generadores de energía

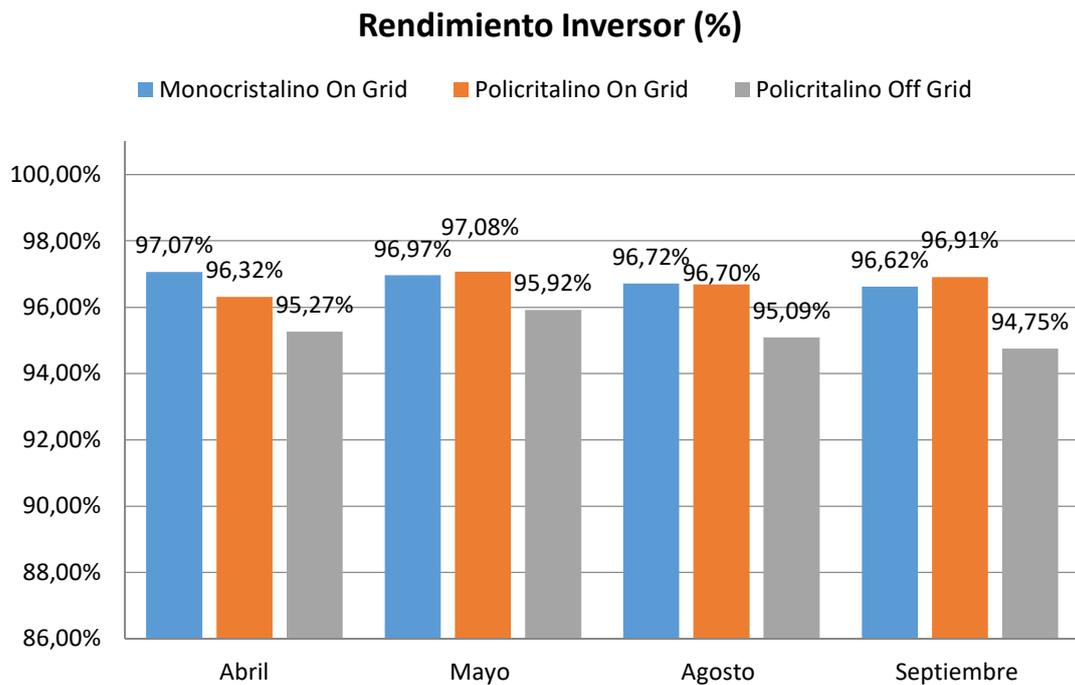


Fuente: Propia

Rendimiento de los inversores

En la figura 56, se observa el comportamiento del rendimiento de los inversores para los tres sistemas. Los tres sistemas de generación de energía solar fotovoltaica funcionaron de manera óptima, puesto que sus eficiencias fueron mayores a las registradas en la ficha técnica tanto para el inversor On Grid como para el inversor off grid. Este resultado se debe principalmente a que son sistemas con poco uso de vida y que no registran pérdidas por temperatura. Sin embargo, el mayor rendimiento lo presenta el inversor cargador off grid con valores cercanos al 100% de rendimiento.

Figura 56. Rendimiento de los inversores

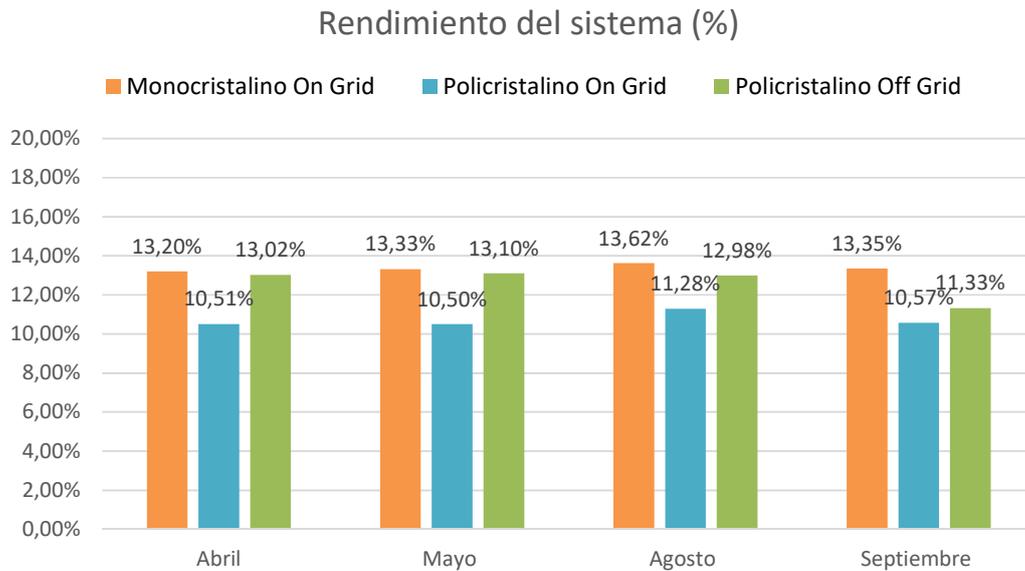


Fuente: Propia

Rendimiento de los sistemas

El mayor rendimiento general del sistema se presentó para el SSFV monocristalino On Grid con un porcentaje mínimo de 13,2% en el mes de abril, y con un rendimiento máximo de 13,62% para el mes de agosto, esto es debido a que la tecnología monocristalina presenta mejores características y eficiencias respecto a las demás características. Aunque los rendimientos son similares entre el monocristalino On Grid y el policristalino off grid, no lo es para el policristalino On Grid, que fue en general menor. Como se ha venido mencionando anteriormente, el mayor rendimiento presentado por los tres sistemas analizados se dio para el mes de agosto.

Figura 57. Rendimiento de los sistemas

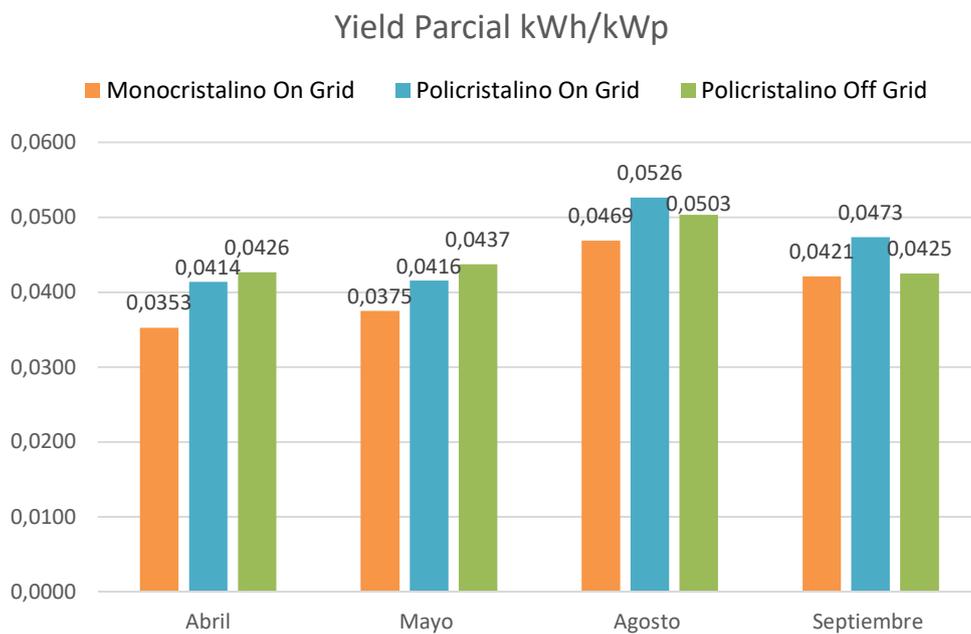


Fuente: Propia

Yield parcial de los sistemas

Se puede observar que la mayor energía generada se dio en agosto, mes de mayor irradiancia, por lo cual, se presenta la mayor generación de energía por potencia pico instalada para cada uno de los sistemas.

Figura 58. Yield parcial de los sistemas



Fuente: Propia

Como se observa en la figura 58, la mayor energía generada la presentó el sistema fotovoltaico policristalino ON GRID. Esto es debido a que el Yield Parcial muestra la generación de energía por potencia pico instalada, y dado que, este sistema tiene una potencia 2115 W, el valor es mayor que los demás sistemas que tienen una potencia pico menor (2040 W y 1140 W).

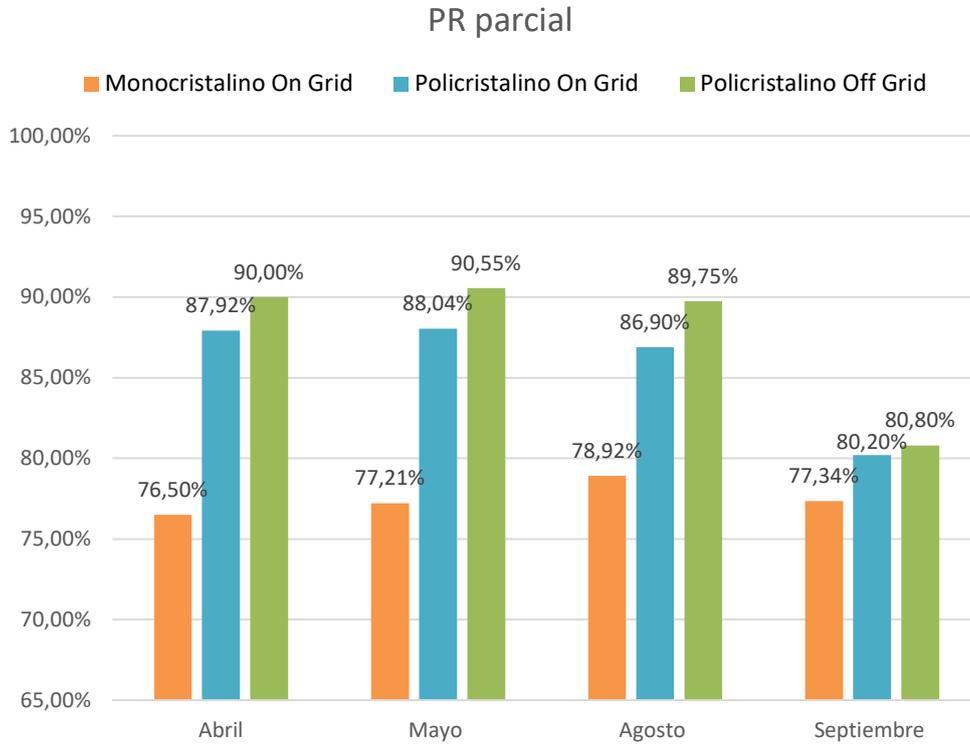
6.3.6 Performance ratio de los tres sistemas analizados

El performance ratio más bajo lo presentó el sistema de generación de energía solar fotovoltaico monocristalino On Grid y es aproximadamente 77,49%, lo que indica que respecto a lo que generan los módulos en condiciones estándar el sistema tuvo pérdidas globales del 22,51%. El sistema de generación de energía solar fotovoltaico policristalino On Grid presentó un performance ratio medio en comparación con los otros dos sistemas de aproximadamente 85,77%, lo que indica, que respecto a lo que generan los módulos en condiciones estándar, el sistema tuvo pérdidas globales del 14,23%.

El sistema de generación de energía solar fotovoltaico policristalino Off Grid fue el sistema de generación de energía que presentó el performance ratio más alto de los tres sistemas de 87,77%, lo que indica, que respecto a lo que generan los módulos en condiciones estándar, el sistema tuvo pérdidas globales del 12,23%. Estos valores de PR se pueden explicar en el hecho de que tuvieron un buen diseño del sistema, un buen rendimiento del inversor y el grado de limpieza de los módulos fue bueno.

Se puede observar también que las pérdidas globales por temperaturas fueron bajas para los sistemas solares policristalinos, lo cual podría indicar que los módulos tienen alto rendimiento en estas condiciones ambientales. El sistema solar fotovoltaico monocristalino fue el sistema que mayores pérdidas presentó por encima del 20%, esto podría significar que el hecho de que los paneles se encontraran tan cercanos a la superficie del suelo impidió que el aire circulara libremente bajo ellos y de esta manera se presentaron temperaturas altas en el generador.

Figura 59. Performance ratio de los sistemas



Fuente: Propia

El performance ratio muestra la relación de rendimiento real de cada sistema en comparación con el rendimiento ideal que debería tener. Dado que el análisis se realiza de manera independiente a características como tecnología orientación e irradiación, éste permite comparar instalaciones fotovoltaicas incluso con SSFV en otras regiones. Por lo anteriormente mencionado, podemos concluir que el mayor rendimiento energético lo presenta el sistema policristalino On Grid.

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como se mostró en los resultados, los SSFV instalados en el Departamento de Caldas se encuentran principalmente en la región centro sur donde está localizada la capital del departamento. Fue precisamente en Manizales donde se encontraron los sistemas de mayor generación fotovoltaica, los cuales se instalaron con recursos propios. El panorama para continuar la instalación de SSFV en el departamento y el país es alentador puesto que a partir de este año, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible expidió la Resolución 1303 del 13 de julio de 2018, la cual modificó la Resolución 1283 de 2016, que establecía el procedimiento y los requisitos para la expedición de la certificación de beneficio ambiental por nuevas inversiones en proyectos de FNCER y GEE, necesarios para obtener los beneficios tributarios incluidos en la Ley 1715 de 2014.

A partir del conocimiento de los casos de éxito identificados, la percepción de la población frente a las energías renovables, y de los lineamientos de las políticas se puede decir que las perspectivas para la instalación de la FNCER en el departamento son alentadoras. Las aplicaciones con generación de energía solar fotovoltaica a pequeña escala fueron las que predominaron en los recorridos por los municipios del Departamento de Caldas, los cuales han sido satisfactorios y han cumplido y superado las expectativas con las que se contaban antes de la instalación. Las energías renovables, como la energía solar fotovoltaica, son una alternativa y una oportunidad de hacer llegar energía limpia a estas ZNI y mejorar la calidad de vida de los habitantes, como sucedió en el barrio Pancoger y la Alameda del municipio de La Dorada. Estos sistemas son una alternativa de generación de

energía que ayuda a minimizar el impacto de las emisiones de dióxido de carbono en el medio ambiente y genera una alternativa energética tanto para las ZNI, como para el SIN.

La energía solar fotovoltaica está facilitando el acceso a la energía de muchos habitantes y esta tecnología ya aplicada en alguna de estas zonas aisladas se está implantando con éxito en las comunidades. Uno de los grandes problemas o impedimentos que tienen algunas energías renovables es el elevado coste de inversión inicial. Sin embargo, según un nuevo informe de GTM Research, los precios de las instalaciones de energía solar van a seguir decayendo hasta un 27% para el año 2022 e irán cayendo los precios en un 4,4% de hasta llegar al 27%.

De otra parte, las bases de datos de las estaciones remotas analizadas mostraron unas diferencias importantes en sus valores de radiación debido a la resolución de cada una de ellas. Puesto que la base de datos de la NASA presenta una resolución de 60 km x 60 km, frente a un 4 km x 4 km para la base de datos de la NSRDB y debido a la no uniformidad geográfica del Departamento de Caldas son más cercanos a la realidad los valores reportados por la base de datos NSRDB. Lo anterior ha sido corroborado con los datos de las estaciones localizadas en la ciudad de Manizales los cuales son más comparables a los de la base NSRDB que los de la NASA. Al analizar las estaciones meteorológicas del IDEA, las cuales son estaciones puntuales, estas presentan diferencias incluso siendo del mismo municipio, esto es debido a las características topográficas que presenta el departamento, de esta manera, se puede inferir que cada lugar del departamento presenta condiciones diferentes de radiación solar en el sitio.

Como se pudo observar en el desempeño de los sistemas solares fotovoltaicos analizados, un buen diseño del sistema de generación es clave a la hora de medir los

rendimientos de cada uno de los elementos que intervienen en el sistema, ya que cada proyecto debe calcularse con las características específicas del lugar en el que va a ser instalado para que su performance ratio sea el más alto posible.

El Departamento de Caldas presenta una condición climática ideal para la generación de energía solar fotovoltaica, puesto que a pesar de que la temperatura es directamente proporcional a la radiación solar, en las estaciones remotas analizadas de las bases de datos de la NASA y NSRDB la temperatura promedio no supera los 25°C, lo cual explica el hecho de que las pérdidas por temperatura fueran bajas en los tres SSFV analizados en el SENA regional Caldas.

Los tres sistemas de generación de energía solar fotovoltaica presentaron buenos estándares de calidad, ya que los equipos empleados para cada instalación en específico contaron con las características ideales en cada una de las tecnologías. La afirmación anterior se sustenta en el hecho de que los Performance Ratio para la tecnología policristalina fue superior al 80% en todos los meses analizados y para la tecnología monocristalina fue superior al 75% en la mayoría de los meses analizados. En el sistema monocristalino se pudo evidenciar que presentaba las pérdidas por temperatura más altas, respecto a los demás sistemas, dado que contaba con una baja refrigeración debido a que no permitía un flujo de aire bajo el sistema, puesto que se encontraba instalado sobre la superficie del piso sin una separación considerable.

En general, Manizales cuenta con condiciones climáticas favorables para la instalación de sistemas solares fotovoltaicos puesto que, en el análisis de pérdidas por temperatura evaluadas en cada uno de los sistemas, no fueron considerables en el desempeño óptimo de los módulos de generación fotovoltaica, debido a que la temperatura ambiente

pocas veces supero los 25° que es la temperatura registrada en placa para la operación optima de los módulos.

El sistema de generación solar fotovoltaico policristalino off grid presento el mayor PR analizado con un promedio de 88%, lo cual indica que el sistema mencionado tuvo el mejor diseño y el desempeño de los módulos fue el óptimo, y las pérdidas por temperatura fueron bajas dadas las condiciones climáticas de la ciudad que presenta temperaturas en el rango de los 25°C.

Todo lo anterior pone de manifiesto que el interés de la población del Departamento de Caldas con relación al uso de FNCER está creciendo cada día, que las condiciones de políticas están dadas para su implementación, y que se cuenta con un potencial de radiación importante para hacer eficientes los SSFV que se instalen. Es de anotar que se requieren datos de radiación para cada región en particular, que permitan hacer diseños más precisos y óptimos, y que es necesario considerar las condiciones propias de cada lugar para garantizar desempeños óptimos de los sistemas.

8. CONCLUSIONES

- Se encontraron más de 28 SSFV instalados y funcionando en el Departamento de Caldas ubicados especialmente en el sector centro sur, en zona urbana. En su mayoría son sistemas aislados y a pequeña escala, es decir, para generación por debajo de 600 W que no han superado los 15 millones de pesos. Sus usos son principalmente a nivel institucional y residencial y tienen en su mayoría tiempos de uso menores a dos años.
- En el municipio de La Dorada se encontraron cerca de 20 sistemas aislados con potencias pico entre los 70W y los 350W para viviendas que no cuentan con acceso a las redes de distribución del operador de red CHEC, lo que les permite tener acceso a las necesidades básicas. Se evidencia una tendencia al crecimiento de este tipo de instalaciones especialmente para estas ZNI y una buena percepción de la comunidad caldense frente a este tipo de sistemas de generación de energía eléctrica.
- En la estación remota analizada de la subregión Magdalena Caldense, Norcasia, se presentaron los mayores promedios diarios de radiación entre 5,0 y 5,5 kWh/m² de acuerdo con las bases de datos remotas. La base de datos remota NSRDB presenta una exactitud mayor respecto a la NASA ya que tiene un rango de medida de 4km x 4km, valores que se encuentran por encima del rango presentado en el mapa global del IDEAM para el departamento.

- Según la base de datos de la NSRDB, que presenta una mayor exactitud, se pueden evidenciar claramente las diferencias en la radiación solar para cada una de las estaciones remotas analizadas: Manizales 4,60 kWh/m², Chinchiná 4,85 kWh/m² y Norcasia 5,25 kWh/m². Lo anterior da cuenta de la necesidad de analizar las variables climáticas para el diseño de cada sistema solar en específico, dado que, el departamento tiene una orografía particular, lo que implica que como en el caso de Manizales y Norcasia, se presenten rangos de radiación diferentes dentro del mismo municipio.
- En las estaciones meteorológicas analizadas para el municipio de Manizales de la base de datos del IDEA que cuenta con una resolución puntual del lugar, se encontraron diferencias en la radiación solar promedio diaria según la zona de análisis. La estación Posgrados de la zona centro de Manizales presento 3,84 kWh/m², la estación Yarumos de la zona norte 3,48 kWh/m² y la estación Ingeominas de la zona occidental 3,22 kWh/m², lo que sigue dejando en evidencia la necesidad de analizar cada lugar en específico sin generalizar valores de radiación estándar.
- Se puede decir que los SSFV del Sena Regional Caldas están en buen funcionamiento ya que tanto las pérdidas por temperatura en los paneles como en el inversor son bajas, lo cual permite que los paneles solares generen el máximo de energía posible. Esto se debe a que la temperatura ambiente que se registró en la mayor parte del tiempo está por debajo de los 25°C que es la temperatura ideal a la que deben funcionar los módulos fotovoltaicos.
- El SSFV policristalino off grid presentó el mejor performance ratio de los tres sistemas lo cual se debe, posiblemente, a que tiene el mejor diseño en cuanto a

dimensionamiento, orientación, inclinación y están instalados a una altura considerable de la superficie, que permite que exista una circulación de aire bajo los paneles y que de esta manera las pérdidas por temperatura sean más bajas en comparación con los otros dos sistemas. En general los tres sistemas tienen buenos estándares de calidad dado que tuvieron PR por encima del 70%.

- Los factores que más afectan el rendimiento de los SSFV son las pérdidas por temperatura y las pérdidas en el inversor, de igual manera, se debe contar un buen diseño adecuado para cada demanda de energía en particular. En el caso de los tres sistemas analizados, dichos factores no afectaron significativamente su rendimiento dada la temperatura ambiente del lugar y el buen diseño de cada uno, lo cual se evidencia en los PR superiores al 70%. Sin embargo, en el caso del SSFV monocristalino se pudo evidenciar que, al no permitir un flujo de aire bajo el sistema, las pérdidas por temperatura aumentaron, siendo superiores a los otros dos sistemas analizados que si contaban con una circulación de aire.
- De acuerdo con la aceptación de la comunidad frente al uso de energía solar, a las excelentes condiciones de radiación del Departamento de Caldas, y al buen desempeño energético que presentan los SSFV (mono y policristalinos analizados) bajo las condiciones ambientales propias de esta región, se puede decir que hay excelentes perspectivas para la implementación a mayor escala de SSFV en el Departamento de Caldas.

9. RECOMENDACIONES

Para poder analizar de forma conjunta las bases de datos tanto de las estaciones remotas como de las estaciones meteorológicas es necesario contar con valores en el mismo rango de años y con las mismas características.

Para determinar la variación de pérdidas por temperatura dependiendo la zona del departamento en el que se encuentre el SSFV, es necesario, realizar la evaluación del desempeño energético en sistemas instalados en zonas de la región Magdalena Caldense que presenta temperaturas muy superiores a la Centro Sur y de esta manera determinar la relación de un lugar a otro.

Para dar a conocer las fuentes no convencionales de generación de energía, es necesario realizar una divulgación a gran escala de los significados, ventajas y desventajas, como primera medida para introducir otras alternativas de generación en el mercado energético de Caldas.

Dado que solo tres SSFV encontradas en el Departamento de Caldas contaron con algún tipo de financiación, se puede pensar que con la entrada en vigencia de la resolución 1303 de 13 de julio de 2018 en lo relacionado con los requisitos específicos de la solicitud para la obtención de la certificación de beneficios ambientales para la deducción especial de renta y complementarios, permitiría que más personas puedan acceder a los incentivos tributarios y de esta manera reducir los costos de las aplicaciones.

10.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SolarPower Europe. (2014). Global Market Outlook for Solar Power 2015-2019. *Global Almonacid, F., Rus, C., Pérez-Higueras, P., & Hontoria, L. (2011). Calculation of the energy provided by a PV generator. Comparative study: Conventional methods vs. artificial neural networks. Energy, 36(1), 375–384. https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.10.028*
- Energy, S. (2018). Photovoltaics report, (August).
- Fotovoltaica, A. (2017). La guía solar.
- IDEAM. (2015a). Mapa Brillo Solar De Colombia Multianual, 1.
- IDEAM, I. de H. M. y E. A. (2015b). *ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR, ULTRAVIOLETA Y OZONO DE COLOMBIA*.
- IEC International Standard. (1998). International Standard. Photovoltaic system performance monitoring – Guidelines for measurement, data exchange and analysis. *ISO. 9241-11. First Edition*.
- IRENA. (2018). *Renewable Power Generation Costs in 2017. IRENA - International Renewable Energy Agency. International Renewable Energy Agency. https://doi.org/10.1007/SpringerReference_7300*
- Laboratory, E. N. R. (2018). National Solar Radiation Database. Retrieved from <https://nsrdb.nrel.gov/nsrdb-viewer>
- Mulcué-Nieto, L. F. (2014). *DESARROLLO DE HERRAMIENTAS PARA EL DIMENSIONAMIENTO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN COLOMBIA. APLICACIÓN A LA CIUDAD DE MANIZALES, CALDAS*.
- NASA. (2018). POWER Data Access Viewer v1.0.9 Overview. Retrieved from <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Power, F. S. (2018). Connecting African and European.
- UPME. (2018). *Informe de registro de proyectos de generación*.
- Vazquez, M., Hallack, M., Andreão, G., & Tomelin, A. (n.d.). Financiamiento de la transición a energía renovable en la Unión Europea , América Latina y el Caribe Financiamiento de la transición a energía renovable en la Unión Europea , América Latina y el Caribe. <https://doi.org/10.12858/0818ES>
- Market Outlook*, 32. https://doi.org/10.1787/key_energ_stat-2014-en
- European Photovoltaic Industry Association (EPIA). Situación actual de la energía solar fotovoltaica en el mundo según el Plan de Energías Renovables PER 2011-2020. <https://suelosolar.com/newsolares/newsol.asp?id=6209>

- International Energy Agency. (2015). Tracking Clean Energy Progress 2013. *Technology*, 1–82. https://doi.org/10.1787/energy_tech-2014-en
- Filial de ISA, X. (2016). Informe de operacion del SIN y administración del mercado. Retrieved from <http://informesanuales.xm.com.co/2015/SitePages/operacion/2-6-Capacidad-efectiva-neta.aspx>
- IDEAM, I. de H. M. y E. A. (2010). *Atlas climatológico de Colombia*. Retrieved from <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>
- TIEMPO, R. EL. (2015). La energía natural que mueve al mundo. Bogota. Retrieved from <http://www.eltiempo.com/contenido-comercial/especiales-comerciales/energia-solar-en-colombia/15901037>
- Congreso De Colombia. (2014). LEY 1715 Mayo de 2014. *Presidencia de La Republica*, (May), 26. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Goetzberger, A., Hebling, C., & Schock, H.-W. (2003). Photovoltaic materials, history, status and outlook. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 40(1), 1–46. [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(02\)00092-X](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(02)00092-X)
- Repins, I., Contreras, M., Romero, M., Yan, Y., Metzger, W., Li, J.,... Noufi, R. (2008). Characterization of 19.9%-efficient CIGS absorbers. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2008.4922628>
- Gong, C., Song, Q. L., Yang, H. Bin, Li, J., & Li, C. M. (2009). Polymer solar cell based on poly. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(11), 1928–1931.
- King, R. R., Law, D. C., Edmondson, K. M., Fetzer, C. M., Kinsey, G. S., Yoon, H., Karam, N. H. (2007). 40% efficient metamorphic GaInPGaInAsGe multijunction solar cells. *Applied Physics Letters*, 90(18), 98–100. <https://doi.org/10.1063/1.2734507>
- González, B., Zumeta, I., Docteur, S., & Vigil, E. (n.d.). Estudios para optimizar las celdas solares sensibilizadas (DSSC). *Facultad de Física de La Universidad de La Habana, Cuba*. Retrieved from <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar16/HTML/articulo01.htm>
- O’regan dan Grätzel, M. (1991). A Low Cost, High Efficiency Solar Cell Based On Dye-Sensitized Colloidal TiO₂ Films. *Nature*, 353(6346), 737–740.
- Nahle Sabag, N. (2011). Radiación Solar en la Capa exterior de la Atmósfera Terrestre y sobre la Superficie Terrestre (Suelo y Océano). *Biology Cabinet*.
- IDEAM, I. de H. M. y E. A. (2015). *Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia*.

- IDEAM. (2015). Mapa Brillo Solar De Colombia Multianual, 1.
- Escobar, D. I. (2013). Estudio Técnico - Económico Para La Implementación Masiva De Sistemas Solares Fotovoltaicos Para Los Estratos Cinco Y Seis De La Ciudad De Cali, 1–118.
- Buendia, A. (2014). Caracterización y evaluación económica para la inversión en plantas menores a 20 MW conectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN) de Colombia a partir de fuentes de energías renovables eólica y solar., 116.
- Gutiérrez Bolaños, J. A., & Gutiérrez Patiño, J. F. C. (2011). Diseño de un sistema solar fotovoltaico de 20 KWp conectado a la red, 193. Retrieved from <http://bdigital.uao.edu.co/bitstream/10614/3140/1/TEL01009.pdf>
- García, H., Corredor, A., Calderón, L., & Gómez, M. (2013). Análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia. *Document Prepared Para WWF World Wildlife Fund*, 90. Retrieved from http://www.fedesarrollo.org.co/wp-content/uploads/2011/08/WWF_Analisis-costo-beneficio-energias-renovables-no-convencionales-en-Colombia.pdf
- Congreso de Colombia. (2001). LEY 697 DE 2001. *Registro Distrital 44573 Del 5 de Octubre de 2001*. Retrieved from <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Normal.jsp>
- El Congreso de Colombia. (2002). LEY 788 DE 2002. *Diario Oficial 45046 de Diciembre 27 de 2002*, Artículo 207-2. Retrieved from <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Normal.jsp>
- Mulcué-Nieto, L. F., & Mora-López, L. (2015). Methodology to establish the permitted maximum losses due to shading and orientation in photovoltaic applications in buildings. *Applied Energy*, 137(July 2016), 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.088>
- Mulcué-Nieto, L. F., & Mora-López, L. (2014). A new model to predict the energy generated by a photovoltaic system connected to the grid in low latitude countries. *Solar Energy*, 107(September), 423–442.
- Ocampo, O., Vélez, J., & Londoño, A. (2014). Análisis de Vulnerabilidad hídrica de la cuenca del río Chinchiná. *Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales*.
- Jaramillo-Robledo Álvaro. (2005). Clima andino y café en Colombia. *Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Centro Nacional de Investigaciones Del Café, CENICAFE*.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2015). *proyecciones departamentales de población 2015*.
- Caldas, C. H. de. (2015). Informe de sostenibilidad nuestra empresa CHEC.

- Roca, J. A. (2016). La capacidad instalada global de energía solar a gran escala supera los 75 GW a mediados de 2016. *El Periódico de La Energía*. España.
- Almonacid, F., Rus, C., Pérez-Higueras, P., & Hontoria, L. (2011). Calculation of the energy provided by a PV generator. Comparative study: Conventional methods vs. artificial neural networks. *Energy*, *36*(1), 375–384. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.10.028>
- Energy, S. (2018). Photovoltaics report, (August).
- Fotovoltaica, A. (2017). La guía solar.
- IDEAM. (2015a). Mapa Brillo Solar De Colombia Multianual, 1.
- IDEAM, I. de H. M. y E. A. (2015b). *ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR, ULTRAVIOLETA Y OZONO DE COLOMBIA*.
- IEC International Standard. (1998). International Standard. Photovoltaic system performance monitoring – Guidelines for measurement, data exchange and analysis. *ISO. 9241-11. First Edition*.
- IRENA. (2018). *Renewable Power Generation Costs in 2017*. IRENA - International Renewable Energy Agency. International Renewable Energy Agency. https://doi.org/10.1007/SpringerReference_7300
- Laboratory, E. N. R. (2018). National Solar Radiation Database. Retrieved from <https://nsrdb.nrel.gov/nsrdb-viewer>
- Mulcué-Nieto, L. F. (2014). *DESARROLLO DE HERRAMIENTAS PARA EL DIMENSIONAMIENTO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN COLOMBIA. APLICACIÓN A LA CIUDAD DE MANIZALES, CALDAS*.
- NASA. (2018). POWER Data Access Viewer v1.0.9 Overview. Retrieved from <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Power, F. S. (2018). Connecting African and European.
- UPME. (2018). *Informe de registro de proyectos de generación*.
- Vazquez, M., Hallack, M., Andreão, G., & Tomelin, A. (n.d.). Financiamiento de la transición a energía renovable en la Unión Europea , América Latina y el Caribe Financiamiento de la transición a energía renovable en la Unión Europea , América Latina y el Caribe. <https://doi.org/10.12858/0818ES>

11.ANEXOS

11.1 ANEXO 1. INSTRUMENTO DE EVALUACIÓN DISEÑADO

DIAGNÓSTICO DE SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS INSTALADOS EN EL DEPARTAMENTO DE CALDAS Y VALLE DEL CAUCA

I. Preguntas generales

1. ¿Qué conoce sobre energías renovables?

2. ¿Cómo adquirió tal información?

3. ¿Qué tipo de energía renovable está empleando en este momento?

Solar ___ Eólica ___ Biomasa ___ Otra ___

Cual? _____

II. Información de la empresa que suministra la energía eléctrica

1. ¿Cuál es la empresa que le provee el suministro de energía eléctrica?

2. ¿Cuál es el costo del kWh?

3. ¿Cuál es el tipo de contrato que tiene con esta empresa?

4. ¿Cuál es la potencia del sistema (generado)?

5. ¿Cuál es el nivel de Tensión del sistema?

6. La planta es:

Propia

Consesión

Comodato

7.Cuál es su demanda de energía KWh/mes?

8. En que horarios funciona su operador de red?

III. Información del sistema solar en particular que está usando y sus características

1. ¿Qué tipo de sistema solar está empleando en este momento?

Instalación solar fotovoltaica

Instalación solar térmica

Otro. ¿Cual?

2. ¿Cuál es el tipo de generación solar fotovoltaica con el que cuentan actualmente?

Generación solar fotovoltaica conectada a la red

Generación solar fotovoltaica aislada

Generación solar fotovoltaica híbrida

Otro. ¿Cuál?

3. ¿Qué característica tiene el sistema solar fotovoltaico instalado?

Área instalada

Número de paneles

Potencia pico instalada

Cantidad de CO2 que se deja de emitir

Marca de los paneles solares instalados

Marca del inversor

Otros

IV. Usos dados a la energía solar fotovoltaica generada

1. ¿Qué tipo de uso tiene su instalación de generación de energía solar fotovoltaica?

Urbano	_____	Rural	_____
Residencial	_____		
Comercial	_____		
Institucional	_____		
Industrial	_____		
Agropecuario	_____		

2. ¿Cuáles son las aplicaciones en las que emplea la energía solar fotovoltaica generada por el sistema instalado?

Iluminación _____

Electrodomésticos _____

Cercas Eléctricas _____

Calentador de agua _____

Bombeo _____

Alumbrado Publico _____

Riego de Plantaciones _____

Otro. ¿Cuál? _____

¿Ha realizado alguna ampliación al sistema? (número de paneles, potencia instalada)

Si _____ No _____

Explique: _____

4. ¿Ha aumentado los consumos del sistema desde su implementación?

Si _____ No _____

Explique: _____

V. Costos del sistema instalado

1. ¿Cuánto tiempo tardo la instalación del sistema solar fotovoltaico con el que cuentan?

Desde la idea hasta la decisión _____

Desde la decisión hasta la implementación
Tiempo que lleva usándolo

2. ¿Cuál fue el costo global de la instalación del sistema de generación de energía solar instalado?

3. ¿Cuánto es el tiempo de retorno de inversión proyectado para el sistema de energía solar instalado?

4. Tiene usted documentación que den cuenta de los costos de la inversión del proyecto o instalación solar FV?

Si _____ No _____

6. ¿Contó con algún subsidio o sistema especial de financiamiento para la construcción del sistema de generación de energía solar?

7. Realiza mantenimiento al sistema?

Si _____ No _____

8. ¿Qué tipo de mantenimiento realiza?

9. ¿Cuál es la frecuencia con la que se realiza mantenimiento al sistema?

10. ¿Cuál es el costo del mantenimiento y operación del sistema?

Mantenimiento correctivo

Mantenimiento preventivo

Costo de operación _____

Costo de reemplazo _____

11. ¿Cuáles considera que son las principales falla y problemas del sistema?

12. ¿Qué personal maneja el sistema y que formación tiene y que dificultades encuentra en el manejo?

VI. Grado de Satisfacción

1. ¿Está en funcionamiento el sistema actualmente?

Si _____

No _____

Porque? _____

2. ¿Cuál es su percepción sobre las energías renovables ahora que usa una de ellas?

3. ¿La instalación del sistema de generación de energía solar cumplió con las expectativas que tenía?

Si _____

No _____

Porque? _____

4. Indicadores de satisfacción

Número de nuevos empleos generados con el sistema _____

Porcentaje en la reducción de costos de la energía eléctrica _____

Número de actividades de difusión de su sistema con la comunidad

Otros beneficios obtenidos con la implementación del sistema

5. ¿Ampliaría usted la capacidad instalada del sistema actual?

Si

No

Porque?

6. ¿Complementaría el sistema actual con otro tipo de energía renovable?

Si

No

Cual?

Porque?

7. En una escala de 1 a 5, siendo 5 muy satisfactorio y 1 insatisfactorio, como califica su grado de satisfacción con el sistema que tiene instalado?

Nota: Tomar fotos y copias de los documentos en caso de ser posible. Les anexo el formato de autorización de fotos y grabación, favor cambiarle los nombres. Pregunte si es posible tomar la grabación de la entrevista.

Si aparece en la foto la persona pedir la fotocopia de la cédula, deben estar firmadas las autorizaciones.

11.2 ANEXO 2. METODOLOGÍA PARA DESCARGAR BASES DE DATOS

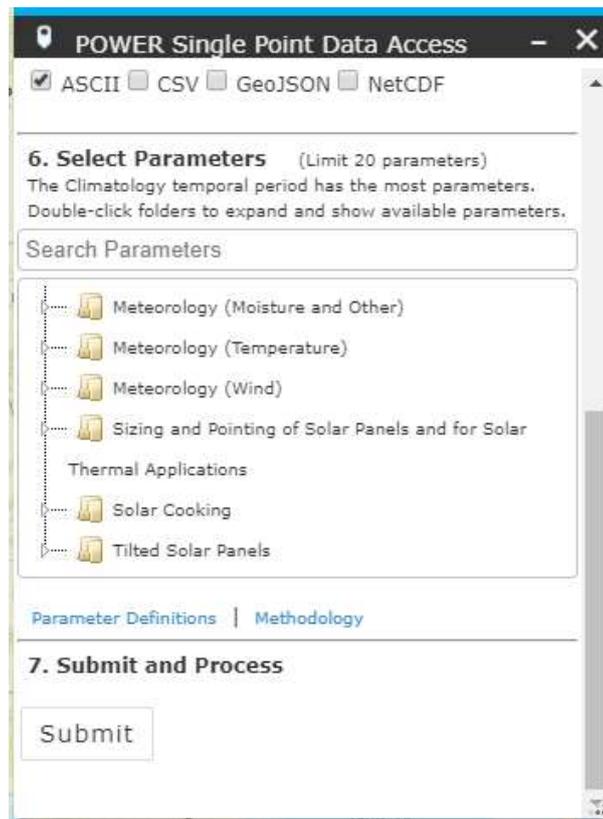
Base de datos IDEA

1. Ingresar al CDIAC Manizales (<http://cdiac.manizales.unal.edu.co/inicio/>)
2. Ingresar a sistema indicadores y consultas
3. Seleccionar sistema generador de indicadores
4. Ingresar a Indicadores Clima
5. Proceder con la selección de la estación a consultar y el rango de años.
6. Posteriormente seleccionar los indicadores climatológicos
7. Finalmente, se selecciona el periodo de tiempo en el que desea ver de los indicadores.

Base de datos NASA

1. Ingresar a la NASA POWER Data Access Viewer Prediction Of Worldwide Energy Resource a través del siguiente link: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.
2. En la parte izquierda de la pantalla aparece la siguiente interfaz:

3. La interfaz permite ingresar en el ítem 2, la escala temporal en la que se desean los datos.
4. En el ítem 3, se deben ingresar las coordenadas del lugar del mapa del que se desean los datos. Deben ingresarse tanto la latitud como la longitud en grados decimales.
5. El ítem 4, permite seleccionar el rango de años del que se desea la base de datos.



6. Finalmente en el ítem 6, se pueden seleccionar los parámetros de búsqueda donde se encuentran las variables.

Base de datos NSRDB

1. Ingresar a la National Solar Radiation Database a través de link: <https://nsrdb.nrel.gov/nsrdb-viewer>.
2. Seleccionar Launch the NSRDB viewer
3. Al ingresar aparece la siguiente interfaz, la cual permite seleccionar el lugar específico del cual se desea descargar la base de datos.

Select and Query Data

Download Data

NSRDB Data Viewer

NSRDB Data Download (Point) •

Download resource data from the National Solar Radiation Database by point. This tool will return data for the station closest to the point drawn.

NSRDB Data Download (Box) ■

Download resource data from the National Solar Radiation Database by box. This tool will return data for all stations falling within the drawn region.

4. Luego de realizar la selección del lugar, se debe registrar en la página e ingresar el correo al cual se le enviara la base de datos. Posteriormente al registro, aparece la siguiente interfaz:

Data Download Wizard

Spectral TMY
Spectral TMY India
PSM v2
PSM v3
SUNY
MTS2
Spectral On-demand

Physical Solar Model (PSM3)

The National Solar Radiation Database (NSRDB) is a serially complete collection of hourly and half-hourly values of the three most common measurements of solar radiation—global horizontal, direct normal, and diffuse horizontal irradiance—and meteorological data. These data have been collected at a sufficient number of locations and temporal and spatial scales to accurately represent regional solar radiation climates.

Supported by the U.S. Department of Energy's SunShot Initiative, the NSRDB is a widely used and relied-upon resource. The database is managed and updated using the latest methods of research by a

[Documentation](#)

Dr. Manajit Sengupta
National Renewable Energy Lab
Contact

Select Years Select All Clear All

<input type="checkbox"/> 1998	<input type="checkbox"/> 1999	<input type="checkbox"/> 2000	<input type="checkbox"/> 2001	<input type="checkbox"/> 2002	<input type="checkbox"/> 2003
<input type="checkbox"/> 2004	<input type="checkbox"/> 2005	<input type="checkbox"/> 2006	<input type="checkbox"/> 2007	<input type="checkbox"/> 2008	<input type="checkbox"/> 2009
<input type="checkbox"/> 2010	<input type="checkbox"/> 2011	<input type="checkbox"/> 2012	<input type="checkbox"/> 2013	<input type="checkbox"/> 2014	<input type="checkbox"/> 2015

Select Attributes Select All Clear All

The minimum required attributes for the SAM PV and CSP models have been selected by default.

<input type="checkbox"/> Cloud Type	<input checked="" type="checkbox"/> Dew Point	<input type="checkbox"/> Solar Zenith Angle
<input type="checkbox"/> Fill Flag	<input checked="" type="checkbox"/> Surface Albedo	<input checked="" type="checkbox"/> Wind Speed
<input type="checkbox"/> Precipitable Water	<input type="checkbox"/> Wind Direction	<input checked="" type="checkbox"/> Relative Humidity
<input checked="" type="checkbox"/> Temperature	<input checked="" type="checkbox"/> Pressure	

Select Download Options Select All Clear All

<input type="checkbox"/> Include Leap Day	<input checked="" type="checkbox"/> Convert UTC to Local Time	<input checked="" type="checkbox"/> Half Hour Intervals
---	---	---

Download Limit Indicator

Edit User Info
Download Data

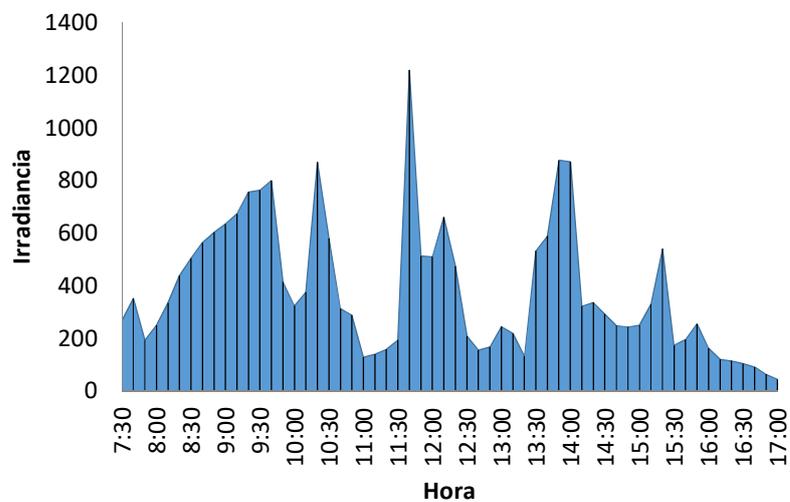
5. El ítem 1, permite ingresar el año o el rango de años de la base de datos.
6. El ítem 2, permite seleccionar las variables que están disponible en el rango de años seleccionados.
7. Finalmente, se selecciona la escala temporal para los datos y selecciona Download Data para que la base de datos sea enviada al correo ingresado anteriormente.

11.3 ANEXO 3. ANÁLISIS DIARIO SSFV

El día presentado es el 19 de abril de 2018 del sistema monocristalino ON-GRID de 6 paneles de 340 W para un total del sistema de 2040 W.

Irradiancia (W/m²)

Figura 60. Irradiancia



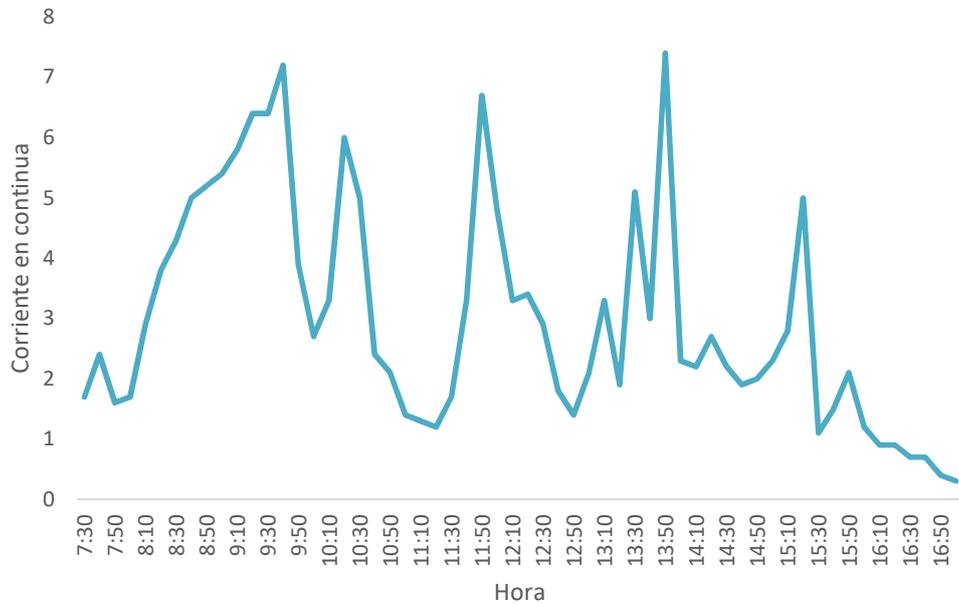
Fuente: Propia

Los valores más bajos de irradiación se presentan principalmente en horas de la tarde entre las 16:10 y las 17:00.

El área bajo la curva representa la irradiación total incidente en los módulos en ese día. Este valor fue de 3695 Wh/m². Y la energía solar resulta de multiplicar este valor por el área de los módulos, dando como resultado 42 kWh.

Corriente continua I_{cc} (A)

Figura 61. Corriente continua



Fuente: Propia

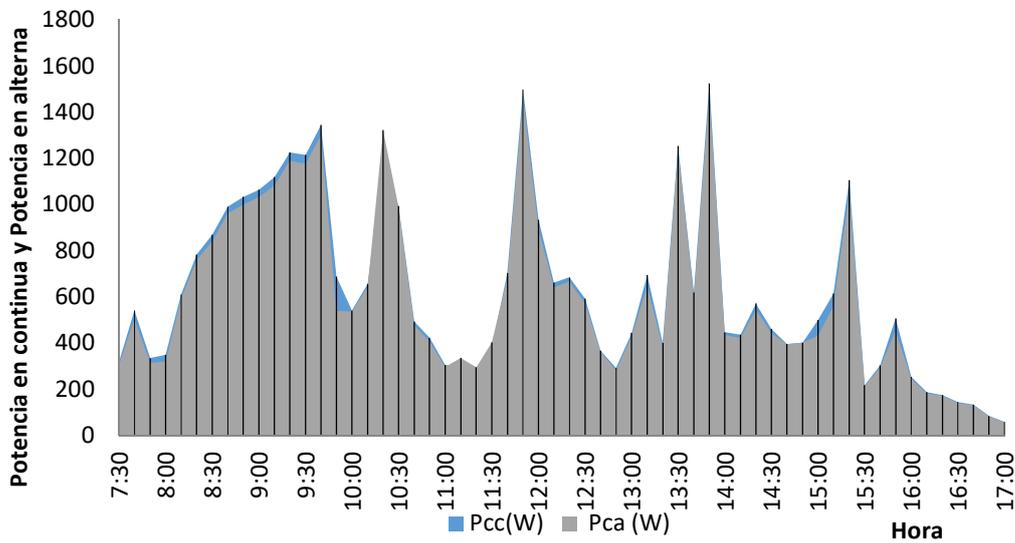
Se puede observar que la gráfica de la corriente continua tiene la misma forma que la de la irradiancia. Sin embargo, en la hora de mayor irradiancia, la 11:40, la corriente generada debería ser la mayor de todas, pero esto no es así.

Lo anterior se puede explicar en el hecho de que la fuerte irradiación sobre los módulos en esta hora, genera aumento de temperatura, por lo cual la eficiencia de los módulos disminuye, traduciéndose en un valor un poco menor de corriente generada debido al coeficiente de temperatura de la corriente del punto de máxima potencia.

Otra conclusión de esta gráfica es que el generador está funcionando adecuadamente, ya que los valores de corriente producida son aproximadamente proporcionales a la irradiancia incidente sobre él, así mismo, los efectos de sombras o suciedad son despreciables.

Potencia en corriente continua y potencia en corriente alterna (kW)

Figura 62. Potencia en corriente continua y potencia en corriente alterna



Fuente: Propia

Se puede observar que ambas curvas, la Pcc y la Pca, están muy cercanas entre sí. Esta cercanía disminuye en las horas de altos valores de irradiancia, donde la temperatura ambiente es mayor, y el rendimiento del inversor disminuye.

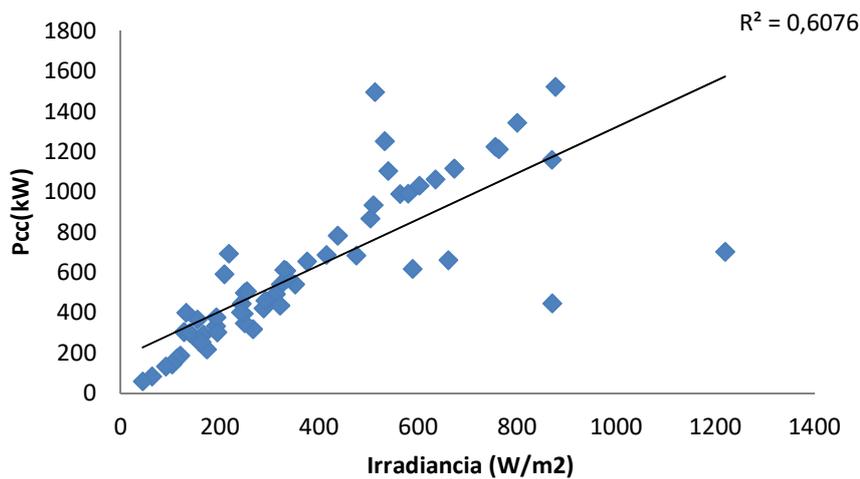
Así mismo, entre mayores sean los valores de la potencia en corriente continua, el porcentaje correspondiente al rendimiento del inversor se traduce en un valor diferencial de potencia mayor, contribuyendo así al mayor alejamiento de las curvas.

Otra conclusión de esta gráfica es que el inversor está funcionando adecuadamente, ya que los valores de potencia a la entrada y salida de él son aproximadamente proporcionales.

El área bajo cada curva representa la energía producida en corriente continua y en alterna. Estos valores son 35,7 kWh y 34,6 kWh, respectivamente.

Potencia en corriente continua vs Irradiancia

Figura 63. Potencia en corriente continua vs Irradiancia

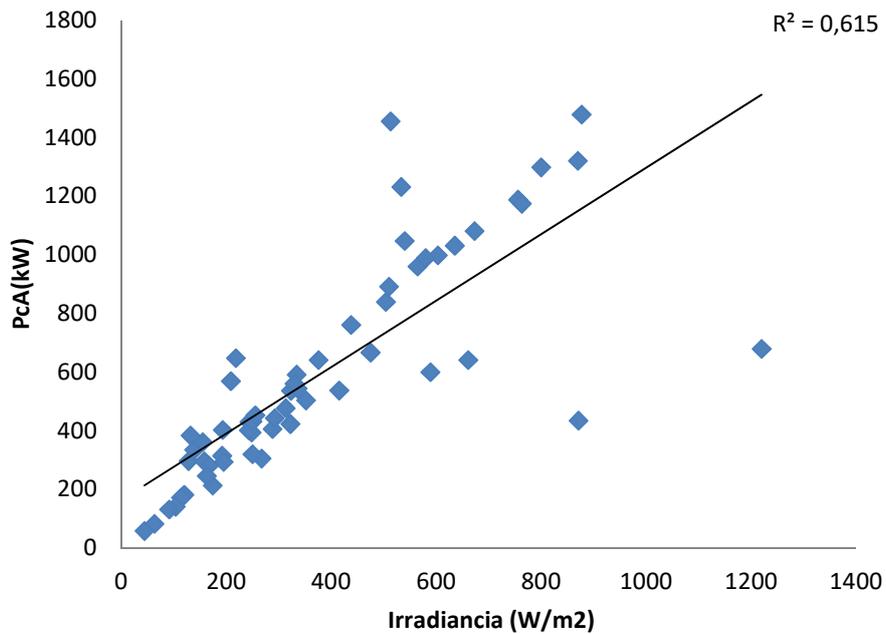


Fuente: Propia

Se puede observar que entre las variables potencia en continua y la irradiancia solo existe una relación lineal moderada $R^2=0,607$.

Potencia en corriente alterna vs Irradiancia

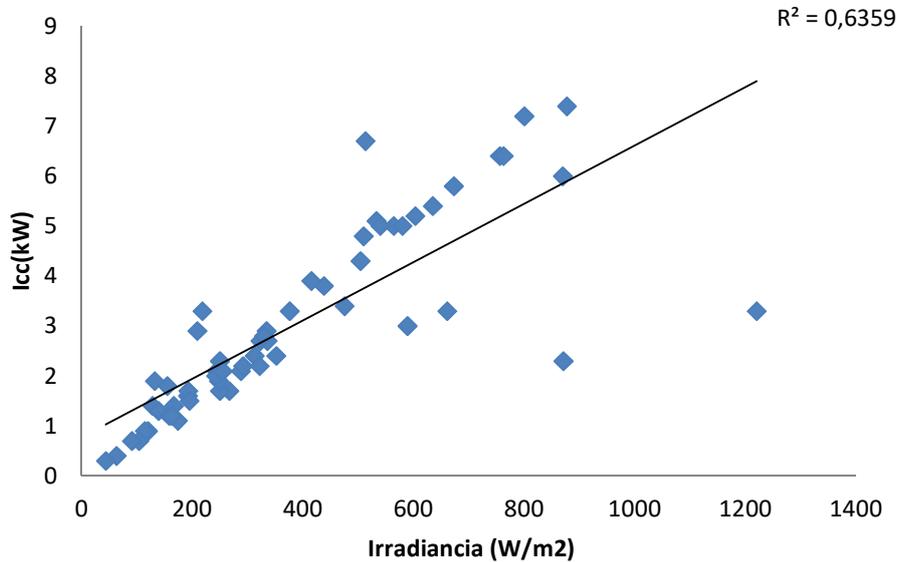
Figura 64 .Potencia en corriente alterna vs Irradiancia



Fuente: Propia

Se puede concluir de la gráfica que la potencia en alterna tiene solo una relación lineal moderada con respecto a la irradiancia, debido a que se obtuvo un coeficiente de correlación $R^2=0,615$, así mismo se puede concluir que los cables empleados para la conexión corriente alterna, y las conexiones del inversor, están en buen estado.

Figura 65. Corriente continúa vs Irradiancia



Fuente: Propia

Se puede observar que la potencia en alterna tiene solo una relación lineal moderada con respecto a la irradiancia, debido a que se obtuvo un coeficiente de correlación $R^2=0,6359$.

El ajuste es mejor que en los casos anteriores, según lo indica el valor de R cuadrado. Esto se da debido a que la corriente de cortocircuito es directamente proporcional a la irradiancia.

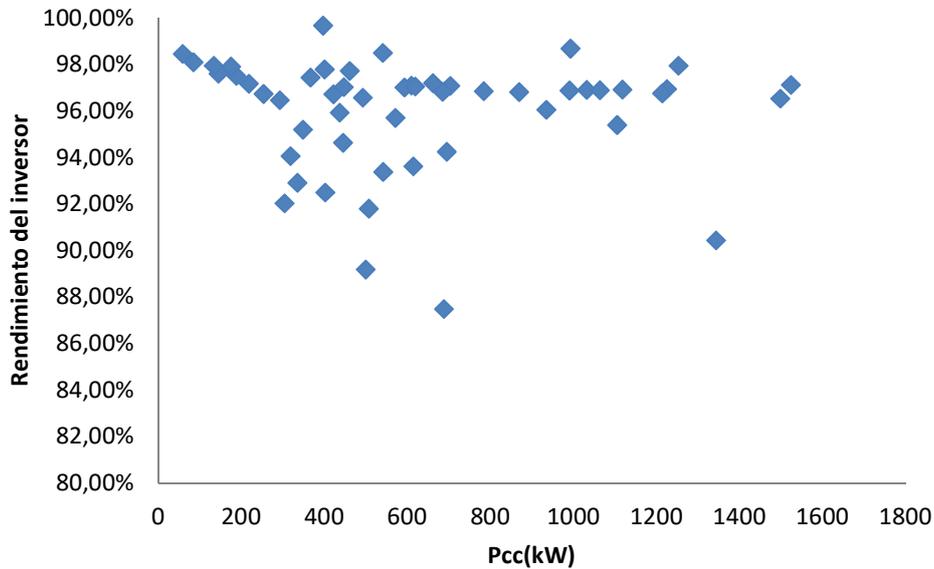
Porcentaje de rendimiento del inversor

$$E_{ca\ parcial}(Wh) = P_{ca}(W) * Base\ trapecio\ (h)$$

$$E_{dc\ parcial}(Wh) = P_{cc}(W) * Base\ trapecio\ (h)$$

$$\eta_{inv} = \frac{E_{ca\ parcial}}{E_{dc\ parcial}} * 100$$

Figura 66. Porcentaje de rendimiento del inversor



Fuente: Propia

Se puede observar que el rendimiento del inversor está por encima del 90% para la mayoría de puntos. Y presenta un rendimiento promedio de 97,14%.

Otra conclusión que se puede hacer es que el inversor está funcionando correctamente, excepto en algunos puntos, ya que todo valor de potencia tiene su correspondiente valor de rendimiento diferente de cero, y la gráfica está de acuerdo con lo que indica la teoría.

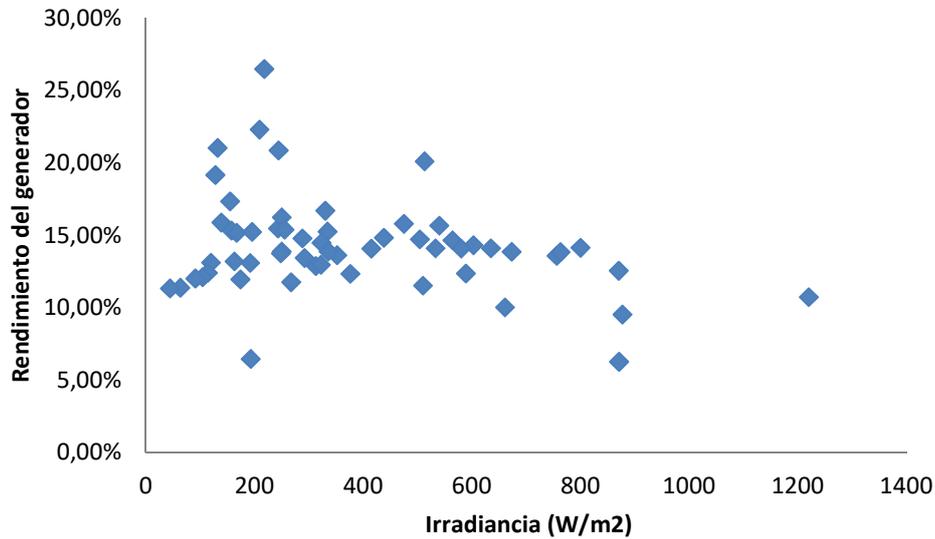
Porcentaje de rendimiento del generador en función de la irradiancia.

$$Edc\ parcial(Wh) = Pcc(W) * Base\ trapecio\ (h)$$

$$Esolar\ parcial\ (Wh) = Irradiación_{parcial} * (area\ modulo * numero\ de\ modulos)$$

$$\eta_{gen} = \frac{E_{dc \text{ parcial}}}{E_{solar \text{ parcial}}} * 100$$

Figura 67. Porcentaje de rendimiento del generador en función de la irradiancia



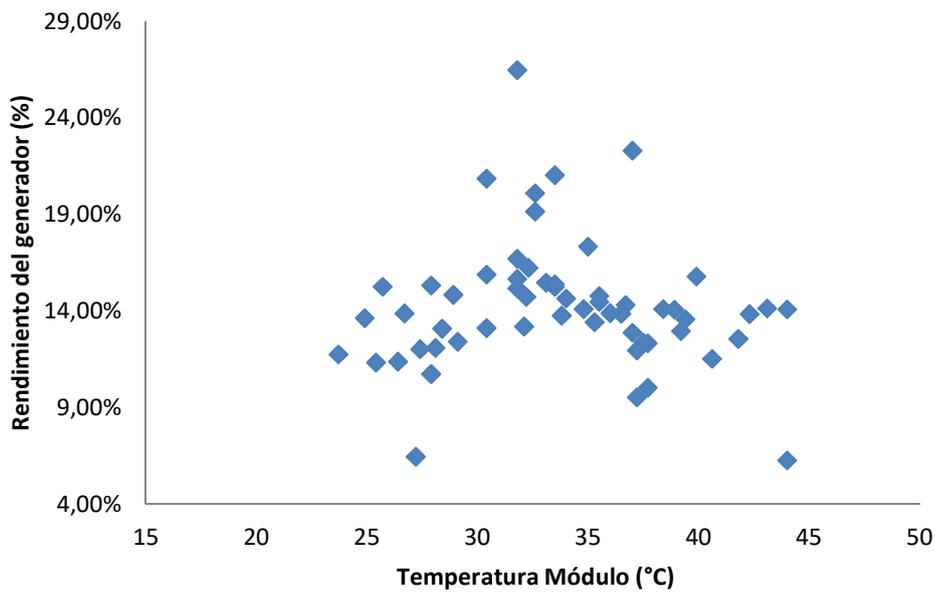
Fuente: Propia

Los bajos porcentajes de rendimiento en el generador se deben a las bajas irradiancias que se tienen en las primeras y últimas horas del día, donde el ángulo de incidencia de los rayos solares con la superficie es bajo, haciendo que haya una pérdida notable por el efecto coseno.

Por otro lado, para altas irradiancias el rendimiento disminuye un poco de nuevo, debido a que estas altas irradiancias producen altas temperaturas sobre el generador, disminuyendo su rendimiento debido al corrimiento de su punto de máxima potencia.

Porcentaje de rendimiento del generador en función de la temperatura del módulo.

Figura 68. Porcentaje de rendimiento del generador en función de la temperatura del modulo



Fuente: Propia

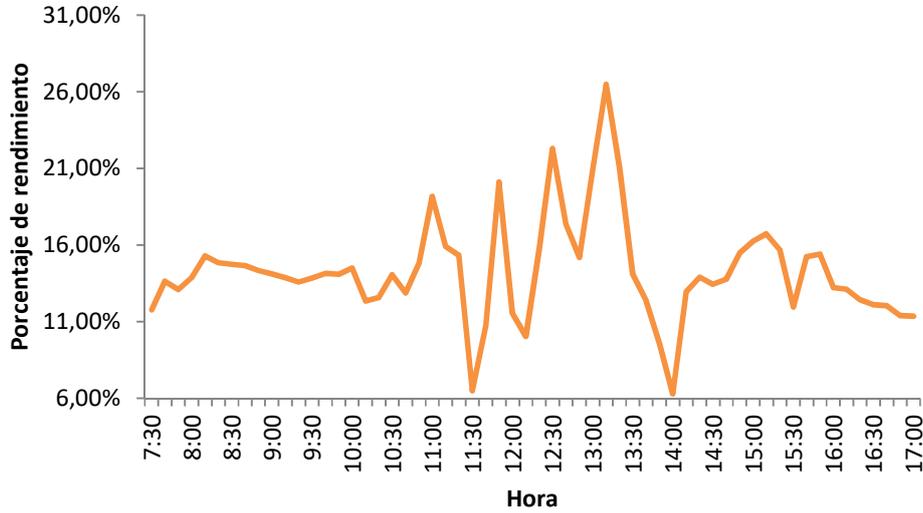
El rendimiento del sistema oscila entre 6% y 26% aproximadamente, para un valor diario medio de 14,28%. Como vemos es mayor del 12.1 % el cual es el valor que tienen los módulos utilizados en condiciones estándar, STC.

Así mismo, se puede observar que para temperaturas por encima de 30°C, se presentan rendimientos muy bajos debido a las pérdidas por temperatura. Los rendimientos más bajos se presentan en temperaturas inferiores a 28 °C, esto se puede explicar en el hecho de que estas temperaturas corresponden a irradiancias bajas, por debajo de 200 W/m², las cuales se dan en las primeras y últimas horas del día. Esto provoca pérdidas por efecto coseno, lo que hace disminuir el rendimiento.

Por otro lado, para altas temperaturas el rendimiento disminuye un poco de nuevo, debido a las pérdidas por temperatura originadas en el corrimiento del punto de máxima potencia.

Figura 69. Porcentaje de rendimiento del generador durante el día

Porcentaje de rendimiento del generador durante el día.



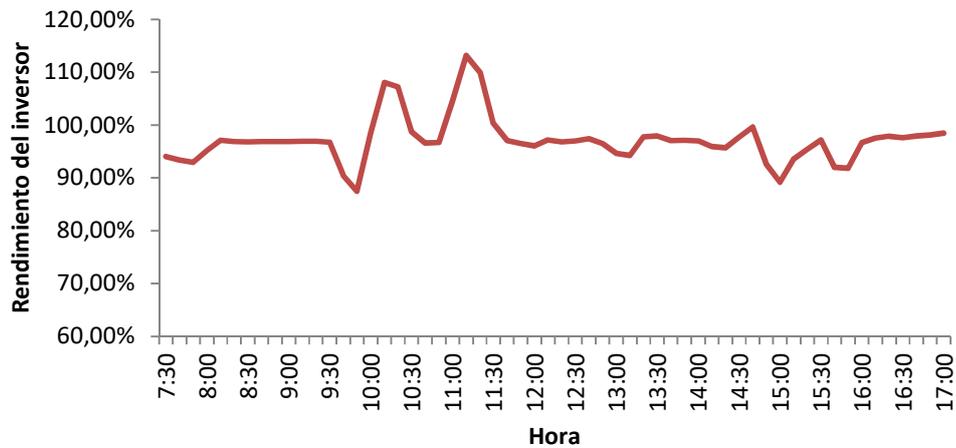
Fuente: Propia

Se puede observar que los rendimientos más bajos se obtienen para los primeros y últimos minutos del día, al igual que dos picos bajos a las 11:30 y 14:00, estas últimas debidas a los cambios de clima. Esto es debido a que estas horas el ángulo de incidencia de los rayos solares con la superficie es bajo, haciendo que haya una pérdida notable por el efecto coseno.

La energía solar que reciben los módulos es de 43,4 kWh. De esta energía el generador convierte la electricidad en continua 5,9 kWh, es decir, el 13,63%. Este valor es el rendimiento real diario del generador, el cual está por encima del rendimiento de los módulos en condiciones estándar de 12.1%.

Porcentaje de rendimiento del inversor durante el día

Figura 70. Porcentaje de rendimiento del inversor durante el día



Fuente: Propia

Se puede observar que el rendimiento del inversor está por encima del 90% en la mayoría de momentos del día, lo cual indica que es un muy buen inversor, y que su funcionamiento es óptimo, aún en altas temperaturas de trabajo, presentando un rendimiento diario del inversor es del 97,02%.

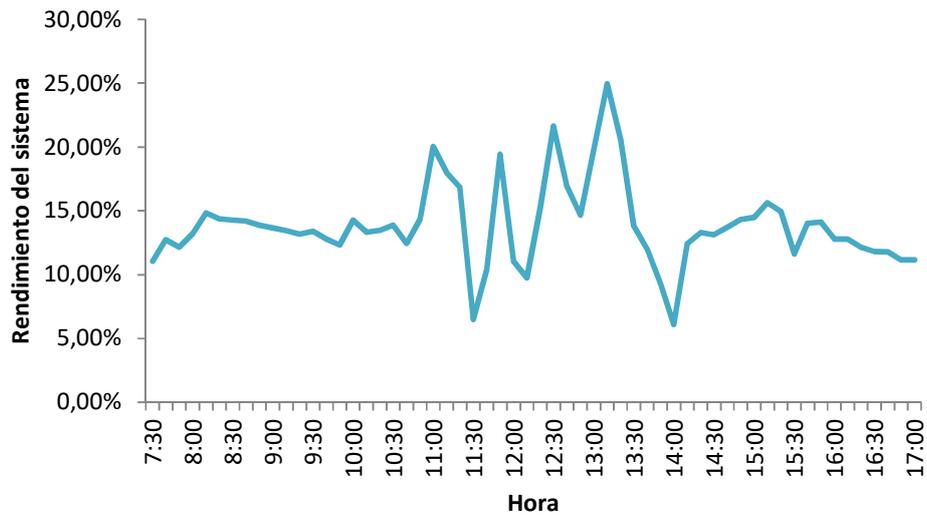
Porcentaje de rendimiento del sistema durante el día

$$E_{ca\ parcial}(Wh) = P_{ca}(W) * Base\ trapecio\ (h)$$

$$E_{solar\ parcial}\ (Wh) = Irradiación_{parcial} * (area\ modulo * numero\ de\ modulos)$$

$$\eta_{sis} = \frac{E_{ca\ parcial}}{E_{solar\ parcial}} * 100$$

Figura 71. Porcentaje de rendimiento del sistema durante el día



Fuente: Propia

Se puede observar que los rendimientos más bajos se obtienen para los primeros y últimos minutos del día, al igual que dos puntos bajos a las 11:30 y 14:00. Esto es debido a que en estas horas el ángulo de incidencia de los rayos solares con la superficie es bajo, haciendo que haya una pérdida notable por el efecto coseno, lo que provoca bajos rendimientos del generador. Así mismo a estas horas del día el inversor también tiene bajo rendimiento, debido a las bajas potencias a su entrada.

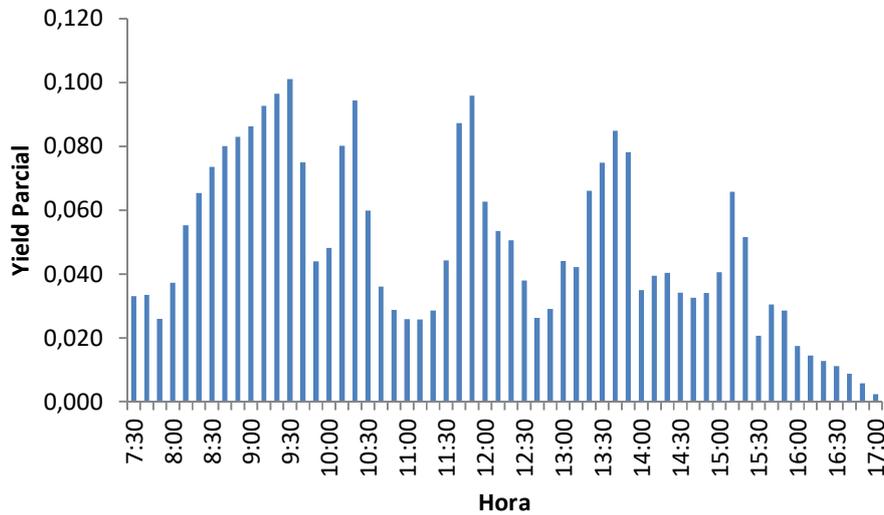
El valor medio diario de la energía suministrada a la red es de 5,7 kWh, lo cual representa aproximadamente el 13,22% de la energía incidente, es decir, es el rendimiento del sistema. Este porcentaje indica que de cada 100W que inciden en el generador, 13.28W se convirtieron en electricidad.

Yield parcial durante el día (Wh/Wp)

$$Eca\ parcial(Wh) = Pca(W) * Base\ trapecio\ (h)$$

$$Yield\ parcial = \frac{E_{ca\ parcial}}{Numero\ de\ modulos * potencial\ de\ modulo}$$

Figura 72. Yield parcial durante el día



Fuente: Propia

Se puede apreciar que hay un pico en las 9:30 horas, el cual se explica en el hecho de que este valor de Yield parcial se calculó en un alto valor de irradiancia, y por lo tanto de energía AC producida.

La sumatoria de los YIELD parciales es el YIELD diario, que es en total 2,815 Wh/Wp, el cual representa el 76,7% del Yield de referencia calculado de 3,67 Wh/Wp. Este porcentaje indica el PR del sistema.

Performance ratio durante el día

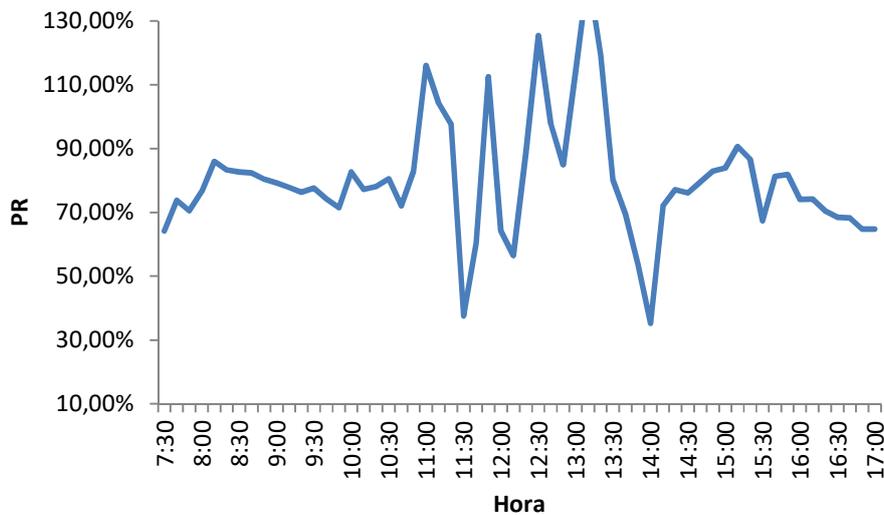
$$\eta_{STC\ modulo} = \frac{Potencia_{STC\ modulo}}{Irradiancia_{STC} * Area\ modulo\ m^2}$$

$$E_{ideal\ parcial} = E_{solar\ parcial} * \eta_{STC\ modulo}$$

$$E_{ca\ parcial}(Wh) = P_{ca}(W) * Base\ trapecio\ (h)$$

$$PR\ parcial = \frac{E_{ca\ parcial}}{E_{ideal\ parcial}} * 100$$

Figura 73. Performance ratio durante el día



Fuente: Propia

El performance ratio diario es aproximadamente 76,63%. Los valores bajos del PR al principio y final del día obedecen a las pérdidas por efecto coseno, y a las bajas potencias a la entrada del inversor, lo cual repercute en forma dramática en su eficiencia.

El performance ratio diario es aproximadamente igual a 76,63%, lo que indica que respecto a lo que generan los módulos en condiciones estándar el sistema aprovecha el 76,63%, o dicho de otra manera, las pérdidas globales del sistema son del 23,37%.

Se obtuvieron dos PR muy bajos en el día, uno se presentó a las 11:30 de la mañana, el cual fue ocasionado por una baja irradiación que se traduce en una baja potencia en

continua. Por otro lado, se tuvo otro pico bajo a las 14:00 el cual fue ocasionado por una alta temperatura en el módulo que ocasiono grandes pérdidas por temperatura y de esta manera un PR bajo a pesar de contar con una irradiación alta. Este alto valor de PR se puede explicar en el hecho de un muy buen diseño del sistema, un buen rendimiento del inversor y el grado de limpieza de los módulos. Se puede observar también que las pérdidas globales por temperaturas son bajas, lo cual podría indicar que los módulos tienen alto rendimiento en estas circunstancias.

11.4 ANEXO 4. PUBLICACIONES Y PARTICIPACIÓN EN

EVENTOS

1. Ponencia oral en el Congreso de Mecatrónica AMDM 2018 aceptada el 3 de octubre de 2018 con el trabajo titulado “Evaluación del desempeño energético de sistemas solares fotovoltaicos instalados en el Departamento de Caldas”. Se presentará el 7 de noviembre de 2018.
2. Ponencia oral en el Congreso de Mecatrónica AMDM 2018 aceptada el 3 de octubre de 2018 con el trabajo titulado “Estado de la investigación en energía en Colombia”. Se presentará el 7 de noviembre de 2018.
3. Artículos científicos en proceso:
 - Estado de la investigación en Colombia en temas de energía a partir de la información proporcionada por los grupos de investigación.
 - Evaluación del desempeño energético de sistemas solares fotovoltaicos en el Departamento de Caldas, Colombia
 - Sistemas Solares Fotovoltaicos instalados en el Departamento de Caldas.