
**Análisis de la Factibilidad Técnica
para la Implementación de un
Sistema Fotovoltaico en el
Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla de
San Andrés**



Presentado por
Cristian Camilo Prado Suquilla
Juan David Rodríguez Aragón
David Santiago Velásquez Cifuentes

Fundación Universitaria Los Libertadores

Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas

Programa de Ingeniería Aeronáutica

Bogotá D.C, Colombia

2021

Página dejada en blanco intencionalmente.

**Análisis de la Factibilidad Técnica
para la Implementación de un
Sistema Fotovoltaico en el
Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla de
San Andrés**

LOS LIBERTADORES

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Presentado por

Cristian Camilo Prado Suquila

Juan David Rodríguez Aragón

David Santiago Velásquez Cifuentes

en cumplimiento parcial de los requerimientos para optar al título de

Ingeniero Aeronáutico

Dirigida por

Cristian Lozano Tafur

Codirectores

Aixa Ivone Ardila Avellaneda

Jaime Andrés González Lopera

Presentada a

Programa de Ingeniería Aeronáutica

Fundación Universitaria Los Libertadores

Bogotá DC, Colombia.

2021

Página dejada en blanco intencionalmente.

Notas de aceptación



LOS LIBERTADORES

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá DC, Diciembre de 2021.

Página dejada en blanco intencionalmente.



LOS LIBERTADORES

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Las directivas de la Fundación Universitaria Los Libertadores, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores y a los resultados de su trabajo.

Página dejada en blanco intencionalmente.

Dedicatoria



Este proyecto fruto del esfuerzo y compromiso de mis compañeros David y Juan, junto con el mío, se lo dedico a mis padres, ya que ellos son un ejemplo de perseverancia y compromiso para mi hermana y para mí, a mis abuelos de los que siempre he recibido apoyo, y a todas las personas que han sido parte de este gran proceso, brindando una palabra de ánimo y apoyo incondicional.

Cristian C. Prado S.

Con todo cariño dedico este trabajo a mis padres, mi pareja, mi hermano y demás colaboradores que me han apoyado de forma incondicional, para que mi formación como persona y profesional me permita estar más cerca de cumplir mis aspiraciones, objetivos y metas.

Juan D. Rodríguez A.

Este trabajo y cada uno de los esfuerzos realizados en este recorrido de preparación profesional los dedico con todo mi corazón a mi familia, a mis padres y hermanos, quienes con su apoyo e inspiración me han motivado y asistido para avanzar peldaño a peldaño en todas las áreas de mi vida.

David S. Velásquez C.

Página dejada en blanco intencionalmente.

Agradecimientos



Mi agradecimiento es enteramente a Dios por permitirme seguir adelante ante todas las adversidades presentadas, a mis padres, a mis abuelos, a la familia Suquila, quienes siempre me apoyaron en todos los procesos que he tenido, que por más cortos o largos, difíciles o fáciles siempre han estado a mi lado brindándome un apoyo de cualquier tipo. A mis amigos y compañeros de la vida, el trabajo y estudio, porque cada uno me brindó un conocimiento y consejo adicional, con los cuales siempre estaré agradecido. A mis profesores de la Fundación Universitaria Los Libertadores y la Universidad de São Paulo, quienes me formaron no solo como un profesional, sino como un persona integra y entregada. A David, Juan y Esteban quienes desde hace muchos años me brindaron su apoyo personal y profesional para continuar más fuerte que nunca.

Cristian C. Prado S.

Agradezco primeramente a Dios que me ha ayudado a levantar en medio de las dificultades por las que he pasado, aprendiendo de mis errores y mejorando como persona. Además, de poner en mi vida a las personas adecuadas como lo son mis padres, mi pareja y mi hermano que a través de su amor y apoyo incondicional he podido estar más cerca de mis sueños, anhelos y metas. Este trabajo de proyecto de grado es una gran bendición porque me ha permitido consolidar los conocimientos que he aprendido a través de mi formación como ingeniero aeronáutico. También me ha permitido conocer personas que han sido de gran inspiración para mi vida, no solo como ingeniero, sino también como persona. Como lo son los profesores que ven mas allá del estudiante, que a través de sus enseñanzas, paciencia y palabras de aliento me han motivado a seguir, avanzar y soñar con metas más grandes. Y, finalmente a mis compañeros Cristian y David, con quienes he compartido bastantes experiencias, como compañeros, amigos y hermanos.

Juan D. Rodríguez A.

Mi entera gratitud hacia Dios, a mis padres, mis hermanos, y a mi equipo de trabajo, Juan y Camilo, quienes en ningún momento han dejado de apoyarme y de creer que juntos y de la mano de Dios lograríamos las metas y objetivos propuestos a lo largo de nuestra carrera profesional. Agradezco a cada uno de ellos por sus consejos, sus palabras de aliento y fortaleza en los momentos duros que atravesamos, las correcciones y enseñanzas en cada experiencia vivida. A mis compañeros, por su disposición, entrega y compromiso, y a todas aquellas personas que indirectamente velaron por la realización de este proyecto mostrándonos siempre su apoyo y ánimo para llegar a la anhelada titulación.

David S. Velásquez C.

Queremos agradecer a la facultad de ingeniería, dirección de ingeniería aeronáutica, Spin-off Radiant, grupo de investigación en diseño, análisis y desarrollo de sistemas de ingeniería (GIDAD) y de manera especial a la Ingeniera Cindi Alvarado, por la oportunidad que nos brindaron de llevar a cabo este proyecto de grado y permitir que este trabajo pueda facilitar la investigación de interesados en el campo de energías verdes y su implementación en el sector aeronáutico.

Equipo de trabajo.

Página dejada en blanco intencionalmente.

Índice general

1. Introducción	1
2. Planteamiento del Problema	3
2.1. Objetivos	5
2.1.1. Objetivo General	5
2.1.2. Objetivos Específicos	5
2.2. Justificación	6
2.2.1. Alcance	7
2.2.2. Limitaciones	7
3. Marco Referencial	9
3.1. Historia	9
3.2. Antecedentes Internacionales	11
3.3. Antecedentes Nacionales	14
4. Marco Teórico	19
4.1. Radiación Solar	19
4.1.1. Espectro electromagnético	19
4.1.2. Constante solar	20
4.2. Componentes de la radiación solar	21
4.3. Elevación del sol y cambios debidos a movimientos de la Tierra	24
4.4. Energía solar fotovoltaica y su generación	25
4.5. Sistema solar fotovoltaico	27
4.5.1. Componentes del sistema solar fotovoltaico	27
4.5.2. Sistema interconectado	31
4.5.3. Sistema híbrido	32
4.6. Impactos ambientales	33
4.6.1. Destellos y deslumbramientos	35
5. Marco Legal	39
5.1. Reglamentación y Legislación de Energía en Colombia	40

5.2.	Diseño e Instalación de los Sistemas Eléctricos en Aeródromos	43
6.	Metodología	49
6.1.	Fase de investigación previa	49
6.2.	Fase de análisis de criterios de evaluación para la implementación de proyectos solares en aeropuertos	50
6.3.	Selección del aeropuerto	53
6.4.	Fase de cálculos y diseño	54
6.4.1.	Parámetros meteorológicos iniciales	55
6.4.2.	Dimensionamiento del sistema fotovoltaico	57
6.4.3.	Análisis de deslumbramientos mediante el software ForgeSolar	64
7.	Propuestas - SFV en el Aeropuerto Internacional Gustavo Rojas Pinilla de San Andrés	69
7.1.	Contextualización	69
7.1.1.	Selección de áreas para la instalación de módulos SFV	70
7.2.	Propuesta 1: Fuente Primaria	71
7.2.1.	Paneles solares rígidos	71
7.2.2.	Paneles solares en el techo de la terminal y en espacios del estacionamiento	72
7.3.	Propuesta 2: Fuente Secundaria	72
7.3.1.	Paneles solares mixtos (rígidos y flexibles)	73
7.3.2.	Paneles solares en el techo de la terminal y en espacios del estacionamiento	74
8.	Resultados y Análisis de Resultados	75
8.1.	Evaluación de las propuestas	75
8.2.	Propuesta 1: Fuente primaria	76
8.2.1.	Propuesta 1.1. Paneles solares rígidos en la Terminal de pasajeros	76
8.2.2.	Resultados de destellos y deslumbramientos	81
8.2.3.	Propuesta 1.2. Paneles solares rígidos en el techo de la terminal y en espacios del estacionamiento	83
8.3.	Propuesta 2: Fuente Secundaria	87
8.3.1.	Propuesta 2.1. Fuente secundaria (paneles rígidos y flexibles)	87
8.3.2.	Resultados de destellos y deslumbramientos	91
8.3.3.	Propuesta 2.2. Fuente secundaria en el terminal (paneles rígidos y flexibles) y en espacios del estacionamiento	94
8.4.	Análisis de resultados	98
8.4.1.	Análisis del diseño para el SFV	98

8.4.2. Análisis de resultados de destellos y deslumbramientos para las propuestas	104
9. Conclusiones	107
Apéndice A. Primer Apéndice	121
Apéndice B. Segundo Apéndice	123

Índice de figuras

3.1. Luces de pista con energía solar en Maiquetía. [22]	12
3.2. Proyectos SFV internacionales, configuración en suelo y tejado.	13
3.3. Porcentaje de proyectos activos según el tipo de energía.[27]	15
3.4. Mapa de Irradiación Solar Global para el 2017 sobre todo el territorio nacional. [28]	16
3.5. Maqueta del sistema fotovoltaico instalado en el Aeropuerto Internacional El Dorado. [33]	17
4.1. Espectro electromagnético de la radiación emitida por el Sol. [28]	20
4.2. Constante solar recibida en la superficie de la Tierra. [43]	21
4.3. Componentes de la radiación solar. Fuente: Autores	22
4.4. Descripción del Cenit y su ángulo. Editada por los autores. Fuente: ITE España y [46]	24
4.5. Solsticios y Equinoccios en el año. Fuente: Meteored y Autores	25
4.6. Paneles receptores de energía solar. Fuente: Meteored y Autores. [28]	26
4.7. Proceso de obtención de energía eléctrica por medio de SFV.[39]	27
4.8. Diversas configuraciones de módulos solares. Fuente: Autores	28
4.9. Presentación de eficiencias por cada tipo de módulo solar. [49]	29
4.10. Tipos de baterías más usadas en SFV. Fuente: Ecofener	31
4.11. Esquema de un SFV interconectado. [38]	32
4.12. Esquema de un SFV Híbrido. [38]	33
4.13. Superficies imaginarias que se encuentran en el espacio aéreo. [85]	36
4.14. Representación geométrica del potencial de deslumbramiento reflejado hacia torre de control. [87]	37
6.1. Aeropuerto Internacional Gustavo Rojas Pinilla. (Cortesía: Mr. Jhosimar) .	54
6.2. Interfaz principal de Meteoblue en ejemplo para Bogotá D.C. [96]	55
6.3. Historial del clima y días nublados en Meteoblue. [96]	56
6.4. Selección de parámetros iniciales para el proyecto. Fuente: ForgeSolar	65
6.5. Interfaz para configurar las variables del programa. Fuente: ForgeSolar	66

7.1. Áreas seleccionadas para instalación de módulos fotovoltaicos de las propuestas. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth	70
7.2. Módulo solar fotovoltaico rígido. Fuente: Autosolar	71
7.3. Áreas seleccionadas para instalación de módulos fotovoltaicos según la propuesta 2. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth	72
7.4. Módulo solar fotovoltaico flexible. Fuente: SungoldSolar	73
8.1. Parámetros climatológicos por MeteoBlue. [96]	75
8.2. Previsión de ocurrencia anual de deslumbramiento en el Umbral 06. Fuente: ForgeSolar	81
8.3. Previsión de ocurrencia anual de deslumbramiento en el Umbral 24. Fuente: ForgeSolar	82
8.4. Previsión de ocurrencia anual de deslumbramiento en torre de control. Fuente: ForgeSolar	83
8.5. Previsión de ocurrencia anual de deslumbramiento en el Umbral 06. Fuente: ForgeSolar	92
8.6. Previsión de ocurrencia anual de deslumbramiento en el Umbral 24. Fuente: ForgeSolar	93
8.7. Previsión de ocurrencia anual de deslumbramiento en torre de control. Fuente: ForgeSolar	94
8.8. Espacios adicionales en SKSP. Fuente: Autores	99
8.9. Porcentaje de energía generada, propuesta 1.1 y 1.2. Fuente: Autores . . .	100
8.10. Comparativa de resultados para las propuestas 2.1 y 2.2. Fuente: Autores .	103
8.11. Previsión de minutos al año de ocurrencia de deslumbramiento en las propuestas del proyecto. Fuente: ForgeSolar	105
8.12. Áreas que cumplen con la política de la FAA delimitadas por los marcos rojos y amarillos. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth . .	105

Índice de tablas

3.1. Breve Historia de la Tecnología Fotovoltaica. [15]	10
3.2. Proyectos solares vigentes en sus diferentes fases.	14
3.3. Proyectos vigentes hasta el primer semestre de 2021 según la UPME. [27]	14
3.4. Total histórico de proyectos de generación de electricidad. [27]	15
4.1. Niveles de deslumbramiento y cumplimiento de la política de la FAA. [87]	38
6.1. Parámetros específicos del aeropuerto de San Andrés. Fuente: Autores	68
8.1. Promedio de parámetros meteorológicos. Fuente: Autores	76
8.2. Gasto energético mensual de SKSP en los últimos 3 años. Fuente: Autores y SOPESA	76
8.3. Tensión de 48V. Fuente: Autores	77
8.4. Determinación aproximada de generadores. Fuente: Autores	77
8.5. Número de módulos en serie - JAM72S20 445-470 MR. Fuente: Autores	77
8.6. Número de módulos en paralelo - JAM72S20 445-470 MR. Fuente: Autores	78
8.7. Parámetros resueltos del inversor - Solis (100-110)K-5G-SA. Fuente: Autores	78
8.8. Capacidad de acumulación- 2V2000Ah. Fuente: Autores	79
8.9. Parámetros de acumuladores para la propuesta 1. Fuente: Autores	79
8.10. Capacidad del cableado - 2 Calibre 50mm. Fuente: Autores	80
8.11. Características técnicas para conductores de referencia TUV Solar Panel Wire Pv1 f. [96]	80
8.12. Producción total de energía, propuesta 1.2. Fuente: Autores	84
8.13. Determinación aproximada de generadores, propuesta 1.2. Fuente: Autores	84
8.14. Número de módulos en serie - JAM72S20 445-470 MR. Fuente: Autores	85
8.15. Número de módulos en paralelo - propuesta 1.2. Fuente: Autores	85
8.16. Capacidad de acumulación- 2V2000Ah. Fuente: Autores	85
8.17. Parámetros de acumuladores para la propuesta 1.2. Fuente: Autores	86
8.18. Parámetros resueltos del inversor - propuesta 1.2. Fuente: Autores	86
8.19. Capacidad del cableado - propuesta 1.2. Fuente: Autores	87
8.20. Determinación de energía total para la propuesta 2.1. Fuente: Autores	88

8.21. Comparación entre parámetros de los paneles flexibles vs paneles rígidos. Fuente: Autores	88
8.22. Capacidad de generación de los módulos. Fuente: Autores	89
8.23. Número de módulos en serie, propuesta 2.1. Fuente: Autores	89
8.24. Número de módulos en paralelo, propuesta 2.1 Fuente: Autores	89
8.25. Parámetros del inversor - Solis (100-110)K-5G-SA. Fuente: Autores	90
8.26. Número de acumuladores, propuesta 2.1. Fuente: Autores	90
8.27. Capacidad del cableado, propuesta 2.1. Fuente: Autores	91
8.28. Determinación de energía total para la propuesta 2.2. Fuente: Autores	95
8.29. Capacidad de generación de los módulos, propuesta 2.2. Fuente: Autores	96
8.30. Número de módulos en serie, propuesta 2.2. Fuente: Autores	96
8.31. Número de módulos en paralelo, propuesta 2.1 Fuente: Autores	96
8.32. Dimensionamiento del inversor, propuesta 2.2. Fuente: Autores	97
8.33. Número de acumuladores, propuesta 2.2. Fuente: Autores	97
8.34. Capacidad del cableado, propuesta 2.2. Fuente: Autores	98
A.1. Fuente de la información obtenida para cada aeropuerto.	121

Página dejada en blanco intencionalmente.

Análisis de la Factibilidad Técnica para la Implementación de un Sistema Fotovoltaico en el Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla de San Andrés

Los sistemas fotovoltaicos son fuentes de energía que producen electricidad a partir de radiación solar absorbida, basando su principio de funcionamiento en la transformación de energía gracias al efecto fotovoltaico, a los materiales que componen el sistema, y a sus diferentes configuraciones. A nivel mundial la implementación de este tipo de energía ha alcanzado al sector aeroportuario convirtiéndose en el referente para muchas industrias a la hora de utilizar energías limpias para el abastecimiento eléctrico de sus terminales. Aunque en Colombia la capacidad de producción eléctrica a través de proyectos solares es alta, la cantidad de proyectos relacionada con el sector aeronáutico es baja, razón por la cual se analiza la factibilidad de la implementación de este tipo de generación de energía en aeropuertos del país, buscando aprovechar el potencial con el que cuenta la nación tanto en generación de energía, como en desarrollo de tecnologías verdes. Debido a las alarmantes cifras de contaminación por el uso de combustibles fósiles en la generación de energía en zonas del país como la isla de San Andrés, se verificó la factibilidad técnica del uso de tecnologías verdes en el aeropuerto de la región, como estrategia de innovación de la isla y como iniciativa para el aporte en la lucha contra el impacto ambiental desde el sector aeronáutico.

Palabras claves: Aeropuertos, Energía Alternativa, Energía Renovable, Isla de San Andrés, Radiación Solar, Sistemas Fotovoltaicos.

Página dejada en blanco intencionalmente.

Abreviaturas

- ANLA** Autoridad Nacional de Licencias Ambientales.
- ATCT** Torre de control de tráfico aéreo.
- CFR** Código de Regulaciones Federales.
- COP** Peso Colombiano.
- FAA** Administración Federal de Aviación.
- FNCER** Fuentes no convencionales de energía renovable.
- GEE** Gestión eficiente de energía.
- GEI** Gases de efecto invernadero.
- IDEAM** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- MADS** Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- MME** Ministerio de Minas y Energía.
- NTC** Norma técnica colombiana.
- OACI** Organización de aviación civil internacional.
- OMM** Organización Meteorológica Mundial.
- OMS** Organización Mundial de la Salud.
- RAC** Reglamentos Aeronáuticos de Colombia.
- RETIE** Reglamento técnico de instalaciones eléctricas.
- SFV** Sistemas Solares Fotovoltaicos.
- SGHAT** Herramienta de análisis de peligros del deslumbramiento solar.
- SKSP** Código OACI del Aeropuerto Internacional Gustavo Rojas Pinilla de San Andrés.
- UAEAC** Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil o Aerocivil.
- UPME** Unidad de Planeación Minero Energética.
- USD** Dolar Estadounidense.
- UV** Ultravioleta.

Página dejada en blanco intencionalmente.

Capítulo 1

Introducción

El sol, como astro rey del sistema solar, es una fuente prácticamente inagotable de energía para la humanidad [1], esta fuente de energía es estudiada debido a la gran cantidad de usos que pueden obtenerse de ella, su correcto manejo y suministro energético puede mejorar la calidad de vida de las personas y de comunidades en general.

A nivel mundial se está promoviendo el uso de sistemas no convencionales que aporten al cuidado del medio ambiente dentro de un proceso de innovación incluyendo tecnologías verdes. En Colombia, se puede emplear una de las muchas opciones sostenibles como la energía eléctrica por celdas fotovoltaicas en el sector aeronáutico, con el fin de aportar favorablemente a la conservación del medio ambiente. Las fuentes comunes de energía se basan en las actividades mineras, la quema de combustibles fósiles e hidroeléctricas, al no requerirse ninguna de estas actividades para el funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos, su implementación en terminales aéreas representaría una gran reducción del impacto ambiental generado.

Con el paso del tiempo, y luego de investigaciones realizadas por académicos relacionados con el tema de energía solar, energías renovables y desarrollo ambiental, se ha evidenciado que la energía solar ha generado una gran relevancia por ser, según Herman Schheer, *“la única energía con futuro en sus numerosas formas, incluyendo el aprovechamiento del calor solar a baja temperatura, la producción de electricidad en centrales termosolares, en centrales e **instalaciones fotovoltaicas**, o a través de la energía eólica (que indirectamente es solar por ser el origen de las energías de los vientos), y se le atribuye que es la fuente de generación de otras fuentes energéticas”*. [2]

Las fuentes no convencionales de energía eléctrica renovable han tomado un gran auge en los últimos años; una de ellas es la solar fotovoltaica, fuente de energía que en muchos sectores de la industria ha sido de total viabilidad su implementación por el desarrollo de estrategias para la disminución de gases de efecto invernadero y el impacto ambiental

negativo. Colombia se encuentra ubicada en la región de los Andes sobre la línea ecuatorial, región en la que, según el Banco Mundial, se observa el mayor potencial de energía fotovoltaica a nivel mundial, siendo entre un 15-20 % más alto en comparación con otras regiones con condiciones climáticas similares en el mundo, como la Península Arábiga o el norte de África. [3] Los factores que aportan positivamente al potencial de energía fotovoltaica en esta ubicación geográfica son: las condiciones persistentes de cielo despejado, el aire limpio en comparación con potencias mundiales, baja temperatura del aire y zonas de gran altitud, lo que hace que la atmósfera sea más delgada y exista una mayor recepción de radiación solar.

Capítulo 2

Planteamiento del Problema

Uno de los temas de mayor discusión y causa de debate a nivel mundial es la contaminación causada por los métodos convencionales de generación de energía eléctrica, pues al basarse en el uso de combustibles fósiles para la generación de energía, las emisiones de CO_2 se han disparado en los últimos años a nivel mundial. En el año 2020, se reportó que Colombia emitió 90,25 megatoneladas de CO_2 , ubicándose en el puesto número 144 del ranking mundial de emisiones de CO_2 , el cual es formado por 184 países [4]. Este mismo año, se reportó la generación de 34.070 millones de toneladas de CO_2 a nivel mundial, lo que significa que Colombia aportó el 0,26 % de la generación de este gas contaminante [5].

En Colombia, en los últimos años la temperatura media se ha incrementado como consecuencia de los fenómenos del Niño y de la Niña, términos que se conocen para la fase fría y caliente del ENOS (fenómeno natural caracterizado por la fluctuación de las temperaturas del océano en la parte central y oriental del Pacífico ecuatorial, asociada a cambios en la atmósfera). Donde de acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial, durante los episodios del Niño, la temperatura de la superficie del mar en las partes central y oriental del Pacífico tropical suele ser muy superior a la normal, mientras que, en esas mismas regiones, durante los episodios de La Niña la temperatura es inferior a la normal provocando fluctuaciones en el clima del país, como por ejemplo, intensas lluvias o sequías [6]. También, se considera la excesiva generación de material particulado; material producido por el uso de combustibles como el diésel, tanto en motores de sistemas de transporte como en plantas de generación de energía [8]. Tan solo en la isla de San Andrés se estima que las plantas de generación de energía requieren aproximadamente 12 millones de galones anuales de diésel para abastecer eléctricamente la isla [9], sin embargo, esta cifra representa la producción de más de 134.000 toneladas de CO_2 , lo cual es una emisión significativa de gases de efecto invernadero, siendo el 0,14 % de las emisiones totales del país para el 2020.

Hoy en día se busca emplear métodos que promuevan el uso de tecnologías verdes con el fin de mitigar el impacto ambiental que ha generado el uso de combustibles fósiles a lo largo de la historia; estas tecnologías basan su funcionamiento en el uso y producción de energía que provengan de fuentes renovables. Las fuentes de energías renovables como la energía solar, eólica, hidráulica, de biomasa, entre otras [7]; éstas están presentes, y de manera accesible, en todo el mundo, pero aún escasean las estrategias y proyectos que permitan la producción y explotación de este tipo de energías y los beneficios que traen consigo. Teniendo en cuenta solamente la energía de tipo solar, Colombia cuenta con grandes cantidades de irradiación solar promedio anual, en comparación con países como Alemania, líderes en el aprovechamiento de la energía solar, lo que permitiría explotar de manera favorable esta fuente de energía alternativa sustituyendo las fuentes contaminantes de tipo convencional [28].

Con todo esto surgen incógnitas como ¿se está aprovechando el potencial de energía fotovoltaica del que dispone Colombia? ¿Se están desarrollando iniciativas o proyectos que procuren disminuir las cifras alarmantes de contaminación producida por fuentes convencionales como en la isla de San Andrés? La respuesta a muchas de estas preguntas es no, pues en Colombia el número de proyectos basados en la utilización de energías renovables es muy limitado, y la implementación de tecnologías verdes en las industrias de mayor producción de contaminantes aún se está realizando de manera pausada. Esta problemática alcanza también al sector aeronáutico, especialmente al sector aeroportuario, pues en la actualidad la mayoría de los aeropuertos de la nación son abastecidos eléctricamente por las redes de interconexión que nacen en las estaciones o subestaciones eléctricas, cuya energía proviene de hidroeléctricas o plantas a base de combustibles. Además de esto, los aeropuertos de la nación cuentan con fuentes secundarias o alternativas que son compuestas por conjuntos de plantas diésel, las cuales son responsables de los altos niveles de contaminación que generan los aeropuertos en las zonas a las cuales prestan sus servicios.

2.1. Objetivos

2.1.1. Objetivo General

Determinar la factibilidad técnica de energizar el Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla utilizando un sistema fotovoltaico como fuente alternativa de energía.

2.1.2. Objetivos Específicos

- Reconocer la capacidad de producción de energía eléctrica con la que cuenta Colombia gracias a su ubicación geográfica, lo cual permite la sustitución de métodos convencionales para la generación de energía por sistemas que utilicen energía renovable.
- Relacionar los principios de operación de los sistemas fotovoltaicos con el sistema de suministro eléctrico de terminales aéreas, con el fin de poner en funcionamiento tecnologías y configuraciones que aprovechen la energía solar en infraestructuras aeroportuarias.
- Crear una metodología que facilite el análisis de la factibilidad técnica para la implementación de un sistema fotovoltaico en aeropuertos, analizando las especificaciones técnicas de los mismos y evaluándolas a través de una matriz de criterios.
- Definir la configuración de la fuente de energía fotovoltaica que se ajuste a las condiciones del Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla, a través del dimensionamiento de un sistema fotovoltaico, y del análisis de destellos y deslumbramientos en el aeropuerto.

2.2. Justificación

A nivel mundial se está promoviendo el uso de fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER) que aporten al cuidado del medio ambiente dentro de un proceso de innovación que incluyen tecnologías verdes. En Colombia, se puede emplear una de las muchas opciones sostenibles como lo es el uso de energía fotovoltaica en el sector aeronáutico, con el fin de aportar favorablemente a la conservación del medio ambiente y a la disminución de emisiones de CO_2 . Las fuentes comunes de energía se basan en las actividades mineras, la quema de combustibles fósiles e hidroeléctricas, al no requerirse ninguna de estas actividades para el funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos, su implementación en terminales aéreas representaría una gran reducción del impacto ambiental generado.

Las fuentes de energía renovables se utilizan para producir electricidad, calefacción, refrigeración y para alimentar diversos medios de transporte. El archipiélago de San Andrés, es una de las zonas no interconectadas del territorio colombiano. Esto significa que abastece su demanda energética, casi en su totalidad con combustibles fósiles [9]. La mayoría de los aeropuertos de los países desarrollados compran electricidad a un proveedor de energía, lo que hace que el uso de energía sea un costo operativo importante para el aeropuerto [10]. Para el caso del aeropuerto de la isla, el implementar un SFV representaría una reducción en la huella de carbono que la isla aporta en su región, y la disminución de costos operativos relacionados a la compra de electricidad a la empresa prestadora de servicios.

Por la ubicación geográfica de la isla de San Andrés, y de Colombia en general, se cuenta con un gran potencial de energía fotovoltaica debido al bajo índice de estacionalidad calculado en la zona; este índice representa la variabilidad estacional en una determinada ubicación, es decir, cuánto afecta a la producción de energía fotovoltaica la presencia de estaciones climáticas y la ubicación dentro del globo terráqueo [3]. El bajo índice de estacionalidad calculado en Sudamérica y las islas del Pacífico y Caribe significa una producción de electricidad muy estable a lo largo del año, este cálculo tiene en cuenta la radiación solar, la temperatura del aire y el terreno para simular la conversión de energía y las pérdidas en los módulos fotovoltaicos.

La implementación de proyectos que hacen uso de energías renovables brinda múltiples beneficios en el aeropuerto, algunos de ellos son: la confiabilidad operativa y mitigación de riesgos, gestión de la volatilidad de precios, cumplimiento legislativo y regulatorio, objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), informes de responsabilidad social corporativa y comunicaciones con las partes interesadas, y oportunidades para generar ingresos adicionales [10].

2.2.1. Alcance

1. Determinar la propuesta de mayor factibilidad técnica para ser implementada en el Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla de San Andrés.
2. Las propuestas están contempladas teniendo en cuenta la investigación previa en el marco teórico y marco referencial. Además, cumpliendo con la normativa que se menciona en el marco legal.

2.2.2. Limitaciones

1. Obtención de datos para realizar el dimensionamiento de un SFV más cercano a la realidad, pues el acceso limitado a la información dificulta la investigación.
2. No se garantiza que los resultados teóricos sean los mismos resultados reales, es decir, en la práctica o pruebas de campo. Debido a que se han hecho estimaciones y la referencia de los instrumentos seleccionados podría variar.
3. Al utilizar herramientas electrónicas, como el Software de *ForgeSolar*, los resultados de los análisis se encuentran bajo una serie de parámetros ideales y omiten algunos factores que pueden afectar los resultados reales.
4. Debido a que muchos de los datos numéricos suministrados por las empresas de servicio público y concesionarias pertenecen a un cliente en específico, en este caso, el Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla, no pueden ser divulgados ni expuestos en este ni otros documentos. Esta fue la condición del personal técnico para obtener la información necesaria.

Página dejada en blanco intencionalmente.

Capítulo 3

Marco Referencial

Antes de entrar en detalle con los proyectos solares vigentes en Colombia, su alcance, aplicabilidad, y estadísticas proporcionadas por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), se presenta una breve reseña histórica, acontecimientos importantes en el desarrollo de este tipo de tecnología, y algunos de los ejemplos más representativos de sistemas fotovoltaicos en aeródromos internacionales y a nivel nacional.

3.1. Historia

Las energías renovables provienen de fuentes inagotables, principalmente el Sol y la Tierra. Un ejemplo de esto son las centrales mareo-motrices, las cuales aprovechan las corrientes marinas que dependen de la fuerza de marea en los océanos producida por variaciones periódicas en la atracción gravitacional ejercida por la rotación del planeta y por los cuerpos celestes; en mayor medida Tierra-Luna y en menor medida Tierra-Sol. Para el aprovechamiento de estas fuentes inagotables se consideran otros factores como las zonas donde el agua se encuentra entre obstáculos como lo son la entrada de bahías y ríos, o entre islas [11]. Otro ejemplo, son los parques eólicos que aprovechan las corrientes de aire debido al viento, en donde el viento, es el aire en movimiento a lo largo de la superficie de la Tierra afectado por áreas de alta presión y baja presión atmosférica. Esta diferencia de presión depende de los rayos solares que varían según la latitud y el tiempo, y si el suelo está cubierto de vegetación o no. A su vez, la rotación de la Tierra arrastra la atmósfera circundante provocando turbulencias en dichas corrientes [12]. Por lo tanto, debido a todos estos factores que influyen en estos tipos de energías la Tierra es considerada como fuente inagotable de energía. Las fuentes de energía renovable o no convencionales ofrecen una solución diferente o alternativa a las tecnologías tradicionales [13], además de los tipos de energía inmersos en los ejemplos anteriormente descritos, se destaca también la utilización de energía solar fotovoltaica, siendo éste el tipo de energía no convencional más utilizada y de mayor auge en la actualidad; esto debido al aprovechamiento de la radiación emitida por el sol para su posterior conversión en energía eléctrica [14]. Para tener un visión

general del avance y desarrollo de este tipo de energía, el cual es fundamental en este proyecto, se muestran en la tabla 3.1 los acontecimientos históricos relacionados a los sistemas fotovoltaicos hasta el siglo XX.

Tabla 3.1: Breve Historia de la Tecnología Fotovoltaica. [15]

Año	Acontecimiento
1839	Becquerel, físico francés, descubre el efecto fotovoltaico.
1877	Se observa el efecto fotovoltaico en selenio sólido. Se construye la primera célula de selenio.
1921	Albert Einstein gana el Premio Nobel por sus teorías explicativas sobre el efecto fotoeléctrico
1954	Se publican los resultados del descubrimiento de células solares de silicio con una eficiencia del 4.5 %.
1958	El 17 de marzo se lanza el Vanguard I, el primer satélite alimentado con energía solar fotovoltaica. Ese mismo año se lanzan los satélites Explorer III, Vanguard II, y Sputnik-3: todos ellos alimentados con energía solar fotovoltaica.
1960	Se consiguen células fotovoltaicas que alcanzan una eficiencia del 14 %.
1962	Se lanza el satélite Telstar; que fue el primer satélite comercial de telecomunicaciones.
1963	En Japón se instala un sistema fotovoltaico de 242W en un faro.
1973	La Universidad de Delaware construye "Solar One", una de las primeras viviendas con energía solar fotovoltaica.
1974	Se fundan las primeras compañías de energía solar. (1974-1977)
1981	Vuela el "Solar Challenger"; un avión no tripulado abastecido con energía solar fotovoltaica. Se instala en Jeddah, Arabia Saudita, una planta desalinizadora por ósmosis inversa abastecida por un sistema fotovoltaico de 8kW.
1983	La producción mundial de energía solar fotovoltaica supera los 21.3 MW, y las ventas superan los 250 millones de dólares. El Solar Trek, un vehículo alimentado por energía solar fotovoltaica (1 kW) atraviesa Australia; 4000 km en 20 días. Se construye una planta solar fotovoltaica de 6MW en California, en una extensión de 120 acres.
1992	Se instala un sistema fotovoltaico de 1.5 kW en Lago Hoare, Antártida, con baterías de 2.4 kWh. Se utiliza para abastecer el equipamiento de un laboratorio, iluminación, PCs e impresoras y un pequeño horno microondas.
1996	El "Ícaro", un avión no tripulado movido por energía solar fotovoltaica, sobrevuela Alemania. Las alas y la zona de la cola están recubiertas de 3000 células supereficientes con una superficie de $21m^2$.

3.2. Antecedentes Internacionales

Con el fin de relacionar el avance y desarrollo que ha traído la utilización de sistemas solares fotovoltaicos con la implementación de este tipo de tecnologías en el sector aeronáutico, se pretende en esta sección reconocer algunos de los ejemplos más destacados de la utilización de SFV como fuente de energía en tareas específicas de algunos aeropuertos a nivel internacional. A continuación se muestran los ejemplos de aeropuertos y escenarios que han incluido SFV como fuentes de innovación y generación de energía.

Celdas fotovoltaicas para descongelar el hielo en la pista: La universidad de Arkansas ha desarrollado un sistema que implementa las celdas fotovoltaicas como fuente de energía para descongelar las pistas en lugar de remover el hielo mecánicamente o aplicar productos químicos. Desde la batería que se carga por medio de la celda fotovoltaica, se envía la energía a unos electrodos incrustados en el cemento para derretir el hielo y mantener la superficie por encima del punto de congelación. Debido a los costos de los métodos comunes, esta opción es prometedora [16][17].

Celdas fotovoltaicas en fachadas de edificios: El aeropuerto de Ginebra instaló unas celdas fotovoltaicas en las barandillas de la terminal principal. Los paneles utilizan células solares sensibilizadas por tintes encapsuladas en vidrio, que se incorporaron en la fachada del terminal. Esta aplicación genera electricidad, y las nuevas ventanas pueden mejorar la eficiencia energética del espacio sin sacrificar la luz del día en el espacio interior [18].

Celdas fotovoltaicas para iluminación del aeropuerto: El departamento de defensa de los EE.UU. está utilizando luces de obstrucción alimentadas por energía solar en las bases de operación hacia adelante. La instalación de estas luces es rápida y fácil; las zanjas, cableado e interruptores son innecesarios. Las luces alimentadas por energía solar se pueden usar en luces de aproximación, pista y calle de rodaje, conos de viento, indicadores de aproximación de precisión, luces de aproximación; y luces elevadas de guardia de pista [19][20].

Aeropuerto Internacional Heathrow: El Aeropuerto de la capital del Reino Unido ha invertido dinero en luces de protección de pista, los sistemas de iluminación alimentados por energía solar, comúnmente conocidos como Wig-Wags, servirán como un sistema continuo de advertencia LED de 24 horas. Las luces pueden funcionar durante 120 días sin recargarse y reducirán significativamente el gasto de electricidad del aeropuerto [21]. Esto implicaría una reducción significativa en la emisión de carbono, ya que en el aeropuerto se ha reemplazado el uso de energía comercial y a base de plantas Diesel por un SFV de 6.3MW de potencia [14].

Aeropuerto Internacional Simón Bolívar, Venezuela: El Instituto Autónomo Aeropuerto Internacional Simón Bolívar en Maiquetía realizó la adquisición e instalación de balizas totalmente soportadas por energía solar para la calle de rodaje (Foxtrot) y las pistas 10-28 y 09-27, como se muestra en la figura 3.1. Para dicho trabajo se emplazaron unidades Modelo A650 (calle de rodaje) y unidades del modelo A704-5 (señalización del borde de pista), de la marca canadiense CARMANAH [22]. Este avance en tecnología para el aeropuerto de Maiquetía significó la reducción del 40 % en gastos para energía eléctrica y dio más de 100.000 horas de vida útil para los LEDs.



Figura 3.1: Luces de pista con energía solar en Maiquetía. [22]

Aeropuerto de Helsinki: Implementaron paneles solares en el techo del ala oeste del aeropuerto de Helsinki. Los paneles son parte de la propia planta de energía solar del aeropuerto, cuya primera parte fue inaugurada hace dos años aproximadamente. La extensión en su sistema de paneles comenzó a producir energía gradualmente a principios del verano de 2019. Su capacidad total es de aproximadamente 330 kW (la capacidad máxima producida por los paneles en circunstancias estándar)[24].

Aeropuerto Internacional Kempegowda de Bangalore: Planea convertirse en el mayor aeropuerto productor de energía solar de la India, con el objetivo de generar 14,6 MW de energía solar. El aeropuerto anunció en diciembre de 2015 que obtendrá el 40 % de su electricidad de la energía solar, compensando aproximadamente 17.000 toneladas de dióxido de carbono, o el equivalente de más de 3.200 vehículos de pasajeros cada año [25]. El aeropuerto está en funcionamiento pero cuenta con planes de expansión en su área de producción de energía con paneles solares.



(a) Granja Solar del Aeropuerto Chattanooga. [23]



(b) Instalación de 15.000 paneles solares en el Aeropuerto Internacional de Dubai. [26]

Figura 3.2: Proyectos SFV internacionales, configuración en suelo y tejado.

Aeropuerto Chattanooga de Tennessee: El aeropuerto de Chattanooga implementó una granja solar, la cual que consiste en filas de paneles fotovoltaicos como se muestra en la figura 3.2a, ocupando una área de 12 acres, es decir $48562m^2$. Esta granja solar genera 2,64 MW de electricidad, suficiente para satisfacer las necesidades totales de energía eléctrica del aeropuerto. Es el único aeropuerto en los Estados Unidos que opera completamente con energía renovable, aunque otros están adoptando impresionantes instalaciones solares como el Aeropuerto Internacional Daniel K. Inouye de Honolulu, el Aeropuerto Internacional de Denver y el Aeropuerto Internacional de Indianapolis, que cuenta con la granja solar más grande de los Estados Unidos [23].

Aeropuerto Internacional de Dubai: Trabaja en estrecha colaboración con Etihad Energy Services Company (Etihad ESCO) y la Autoridad de Electricidad y Agua de Dubai (DEWA), dicha sociedad han completado la instalación de un sistema de energía solar que comprende un total de 15.000 paneles fotovoltaicos, el SFV propuesto es para ser instalado en tejados, como se muestra en la figura 3.2b, estando situado en la parte superior de la Terminal 2; es el SFV más grande que se haya desplegado en cualquier aeropuerto de Oriente Medio. Con una capacidad de 5 MWp, se espera que el sistema genere 7'483.500 kWh de energía anualmente para los aeropuertos de Dubai, lo que resulta en ahorros por valor de AED 3,3 millones [26].

3.3. Antecedentes Nacionales

En la actualidad se han registrado alrededor de 1.525 proyectos que apuestan a la utilización de energías provenientes de fuentes renovables o alternativas [27]. Según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), estos proyectos se clasifican según la fase de desarrollo en la que se encuentran, según su capacidad de producción energética, y según el tipo de energía que involucre cada proyecto; estas tres categorías se han tenido en cuenta para el conteo total y parcial de proyectos vigentes, como se muestra en las tablas 3.2 y 3.3.

Las fases en las que se pueden clasificar los proyectos presentados ante la UPME son:

- **FASE 1 - Prefactibilidad:** Es la fase de análisis técnico-económico de las estrategias de inversión de un proyecto, se comprueba la prioridad y viabilidad inicial del proyecto, identificando posibles problemas y obstáculos en su realización, presentando vías de financiación y posibles resultados a esperar según sea la alternativa o estrategia utilizada para el desarrollo del proyecto.
- **FASE 2 - Factibilidad:** Se realizan estudios más completos que en la fase anterior con respecto a la mejor alternativa o estrategia identificada para el desarrollo del proyecto. Se incluyen los condicionantes del proyecto, el diseño de ingeniería en modo de anteproyecto, estimación de costos, viabilidad económica, estudios financieros y de impactos ambientales.
- **FASE 3 - Ingeniería de Detalle:** A este nivel se permite la ejecución del proyecto, se realiza la elaboración del diseño definitivo del proyecto, planos en detalle, especificaciones técnicas, cronogramas de ejecución y presupuestos especificados.

Tabla 3.2: Proyectos solares vigentes en sus diferentes fases.

Fase I	Fase II	Fase III	Total
82	133	4	219

Tabla 3.3: Proyectos vigentes hasta el primer semestre de 2021 según la UPME. [27]

Año	Biomasa	Eólico	Hidráulico	Solar	Térmico	Total
2019			13	25	25	38
2020	1	12	41	119	3	176
2021	1	12	11	75	3	102
Total	2	24	65	219	6	316

De los 1.525 proyectos registrados, solamente el 20,7% se encuentran vigentes en sus distintas fases según la UPME, y la distribución de estos (316) proyectos vigentes se muestra

en la figura 3.3, donde se evidencia que los proyectos solares ocupan el 69,7% de los proyectos de generación con 219 registros a fecha del 30 de junio del 2021. Adicionalmente, en la tabla 3.4 se muestra el registro oficial de la UPME de los proyectos de generación de electricidad según el tipo de energía renovable utilizado.

Tabla 3.4: Total histórico de proyectos de generación de electricidad. [27]

Año	Biomasa	Eólico	Geo-térmico	Hidráulico	Solar	Térmico	Total
2007				4		2	6
2008				9		21	30
2009	1			14			15
2010				15		1	16
2011	1			31		18	50
2012				64			64
2013	1			17		2	20
2014	2			42			44
2015		2	1	43		8	54
2016	6	1		44	96	4	151
2017	6	3		42	182	2	235
2018	6	6		60	178	24	274
2019	4	13		46	173	25	261
2020	1	12		52	135	3	203
2021	1	12		11	75	3	102
Total	29	49	1	494	839	113	1525

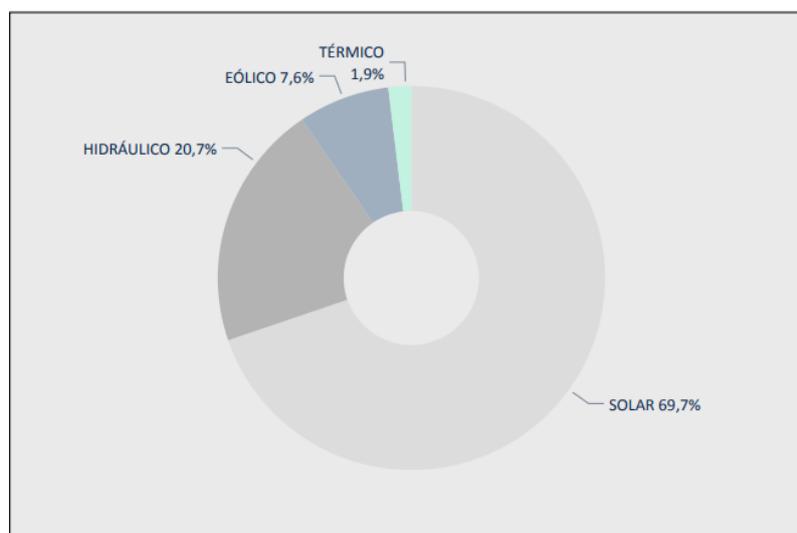


Figura 3.3: Porcentaje de proyectos activos según el tipo de energía. [27]

Estas estadísticas datan el número de proyectos solares en desarrollo a nivel nacional, los cuales buscan el **aprovechamiento del potencial de energía solar fotovoltaica en Colombia**, sin embargo, en los registros oficiales no existe proyecto alguno relacionado con terminales aéreas en el país además del Mega Proyecto Solar del Aeropuerto Internacional El Dorado. Como se observa en la figura 3.4, Colombia posee un gran potencial para el desarrollo de proyectos que involucren energías limpias, especialmente las relacionadas a la radiación solar; según Pablo Lo Zicchio, ejecutivo de la multinacional Global Segment Manager Photovoltaics de Weidmüller [31], se espera que en el país el 15% de la participación de la red de energía nacional sea cubierto por energía fotovoltaica para el año 2023.

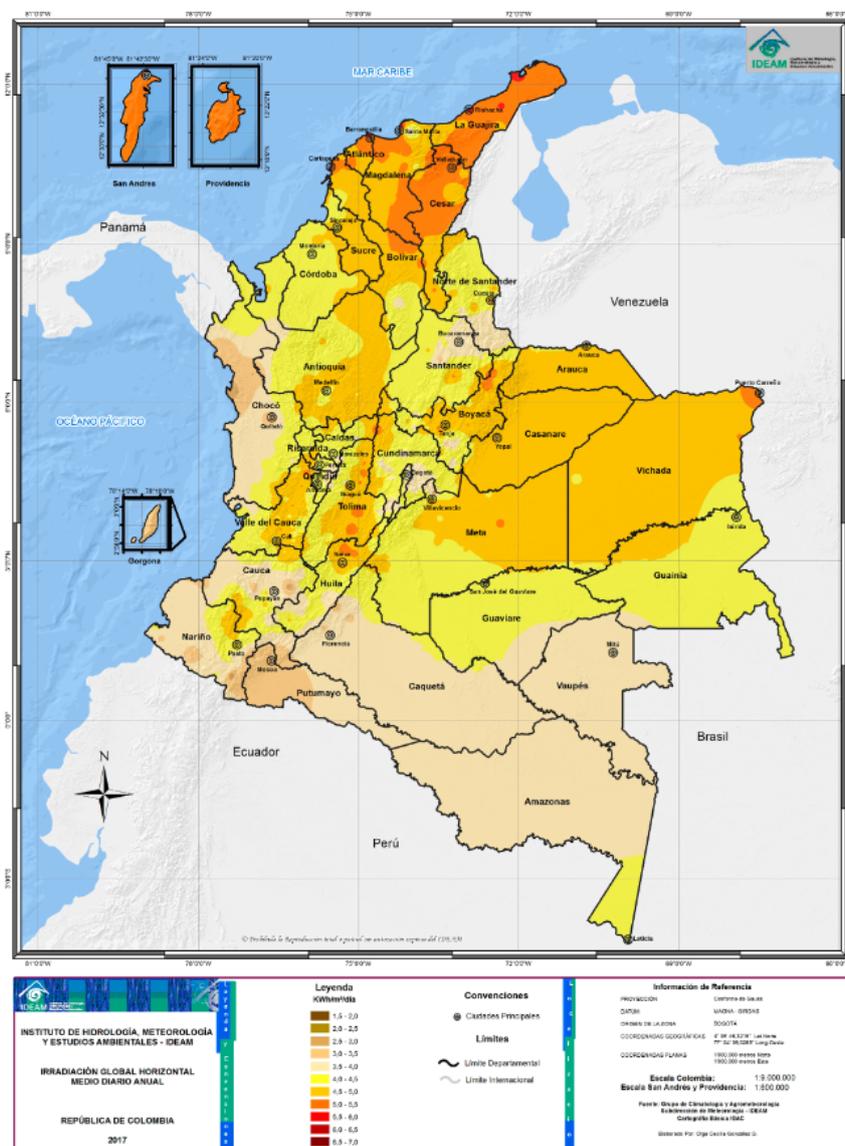


Figura 3.4: Mapa de Irradiación Solar Global para el 2017 sobre todo el territorio nacional. [28]

Actualidad del Sector Aeronáutico Colombiano

En Colombia los proyectos solares se encuentran en constante crecimiento en cada una de las fases de su ejecución como se ha demostrado a lo largo de esta sección 3.3, sin embargo esta tecnología aún se encuentra incursionando en el sector aeronáutico nacional a través de la utilización de sistemas fotovoltaicos o de celdas solares en instrumentos y sistemas de iluminación temporal, sistemas que incluyen cámaras térmicas y conjuntos de luces de PAPI y de pista como es en el caso del Aeropuerto Simón Bolívar de Santa Marta.

Aeropuerto Internacional El Dorado: Cuenta con un proyecto en desarrollo de la mano de las concesionarias Celsia y Odinsa las cuales buscan producir anualmente 3'800.000 kWh a través de 10.369 paneles solares instalados en la infraestructura de la terminal aérea, misma cantidad de energía que consumirían 1.500 hogares en un año, y con la que se podría evitar la emisión de hasta 1.375 toneladas de CO_2 [32].



Figura 3.5: Maqueta del sistema fotovoltaico instalado en el Aeropuerto Internacional El Dorado. [33]

Se dice que este es el proyecto fotovoltaico más importante en el sector aeronáutico de latinoamérica [33], el cual contiene 27.000 m^2 cubiertos por paneles solares que generarían el 12% del consumo energético actual de este importante aeropuerto.

Página dejada en blanco intencionalmente.

Capítulo 4

Marco Teórico

4.1. Radiación Solar

La radiación solar es la energía emitida por el Sol la cual se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas, y es ocasionada por los fenómenos de fusión que se dan al interior del núcleo solar, allí los gases se mueven a grandes velocidades ocasionando colisiones, consumiendo la masa misma y desprendiendo inmensas cantidades de energía [36]. Así pues, el Sol se convierte en la principal fuente de energía, la cual permite que los seres vivos puedan existir aprovechando cerca del 0,1 %, que es el porcentaje correspondiente al proceso de fotosíntesis, siendo este el motor del medio ambiente [40] ya que es bien conocido que los árboles, plantas marinas y vegetación en general son los mayores productores de oxígeno en la Tierra, elemento que dota de vida a este planeta.

4.1.1. Espectro electromagnético

Definiendo una onda electromagnética como la propagación simultánea tanto de los campos eléctricos como de los campos magnéticos generados por una carga eléctrica, y aclarando que estas se caracterizan por no necesitar un medio para propagarse, así como por ser perpendiculares entre sí; se puede definir el espectro electromagnético como el conjunto de todas las frecuencias posibles a las que se produce radiación electromagnética [34].

Este espectro fue desarrollado debido a que no todas las ondas electromagnéticas tienen el mismo comportamiento ya que pueden variar su frecuencia debido a su medio de propagación, procedencia o forma de interacción con la materia, por lo cual fue dividido en bandas de frecuencias como se muestra en la figura 4.1 donde teóricamente el límite inferior es 0 mientras que el límite superior es infinito; no obstante, actualmente el límite de frecuencia más bajo detectado es de 30 Hz mientras que el más alto es de $2,9 * 10^{27} Hz$ [1].

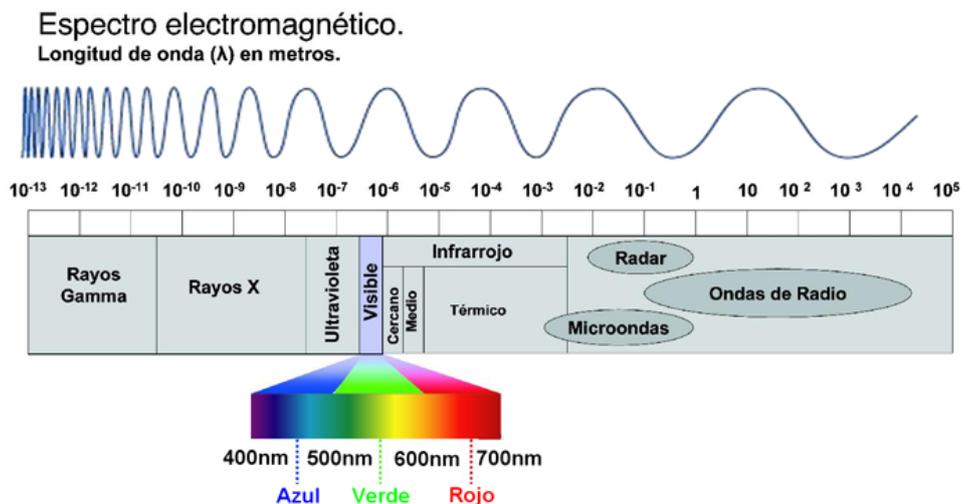


Figura 4.1: Espectro electromagnético de la radiación emitida por el Sol. [28]

Conociendo que el Sol emite principalmente energía en las bandas ultravioleta, visible e infrarrojo [28], se usan estos rangos dentro de los propósitos referenciales y teóricos de este análisis ya que a la superficie terrestre llega aproximadamente el 99 % de la radiación producida por el Sol esta contenida en longitudes de onda entre $0,2 \mu\text{m}$ a $4 \mu\text{m}$ [28], es decir en su mayor parte perteneciente a la banda de luz visible e infrarroja.

Teniendo en cuenta esto, el fotón es la partícula elemental de la luz visible e infrarroja, así como de las demás bandas dentro del espectro electromagnético. Estas partículas viajan en el vacío a velocidad constante, carecen de masa y transportan la radiación electromagnética, mediante la cual interactúan con otro tipo de partículas como los electrones [35] para en este caso generar movimiento en ellos y pueda producir energía eléctrica, como se apreciará en la sección de Energía solar y su generación.

4.1.2. Constante solar

Se define por las letras G_{sc} e incide instantáneamente sobre una superficie de área unitaria, y es así como teóricamente se determina la constante solar como el flujo de energía de onda corta interceptada por una superficie en dirección normal al Sol (W/m^2) [28], es decir, este atraviesa una superficie perpendicular a los rayos solares cuando la Tierra se encuentra a la distancia media del Sol ($1\text{UA} = 149$ millones de km) [42].

Aunque mundialmente se conoce como constante, esta tiene fluctuaciones que varían según como se comporte el Sol durante el año, ya que estos valores se registran en el tope de la atmósfera y finalmente entran a la superficie después de determinar pérdidas debido a fenómenos de reflexión, refracción y difracción; además, esta medida relaciona todos los tipos de radiación, no solamente el espectro visible.

Así pues, el valor de 1366 W/m^2 es el que se ha mantenido en los últimos años como se observa en la figura 4.2, sin embargo, cada 11 años es donde este valor es máximo [28].

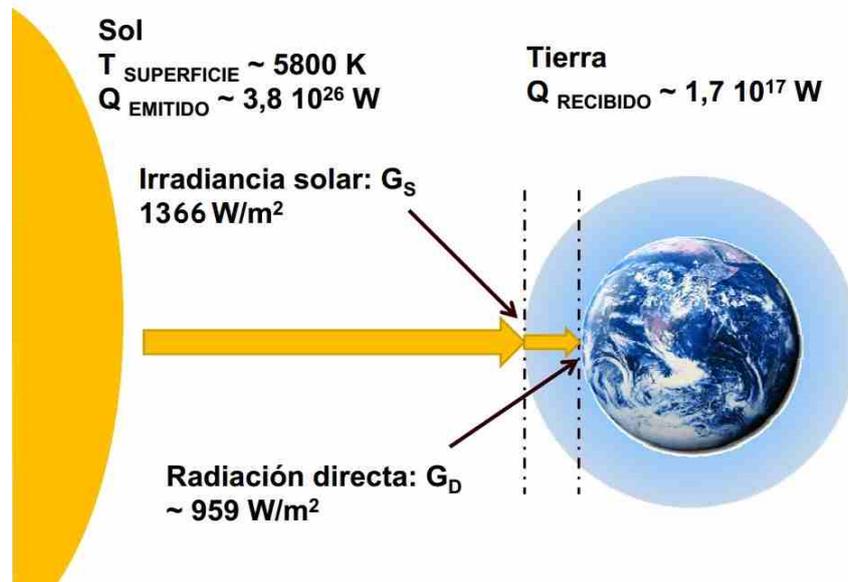


Figura 4.2: Constante solar recibida en la superficie de la Tierra. [43]

En su movimiento de traslación, la Tierra presenta cambios en la constante solar con una desviación promedio de $1,6 \text{ W/m}^2$ y máxima de 7 W/m^2 [28], aunque también, debido a su distancia al Sol, es decir en el Perihelio, que es el punto más cercano a esta estrella ($0,97 \text{ UA}$), se registran valores de hasta 1398 W/m^2 , mientras que, para el Afelio, que es el punto más alejado del Sol en el año, la constante se registra con un valor de 1308 W/m^2 [28].

Para mantener una temperatura relativamente promedio en la superficie terrestre, esta constante no debería variar en más de 1% [44] ya que esto implicaría el aumento de radiación que llega al planeta, y por consiguiente un cambio brusco en la capacidad de supervivencia y calidad de vida.

4.2. Componentes de la radiación solar

La constante solar se mantiene hasta la parte superior de la atmósfera, no obstante, al momento de ingresar a la Tierra, las ondas se ven afectadas por los gases y objetos que se encuentren en camino hacia la superficie terrestre. Debido a esto, existen 3 conceptos de radiación, los cuales de acuerdo al IDEAM en el desarrollo del Atlas de Radiación Solar [28] y Cutrera en su documento para la investigación de energías renovables y medio ambiente [29] se definen como componentes de radiación solar, de acuerdo a como y con que se vean afectados como se muestra en la figura 4.3.

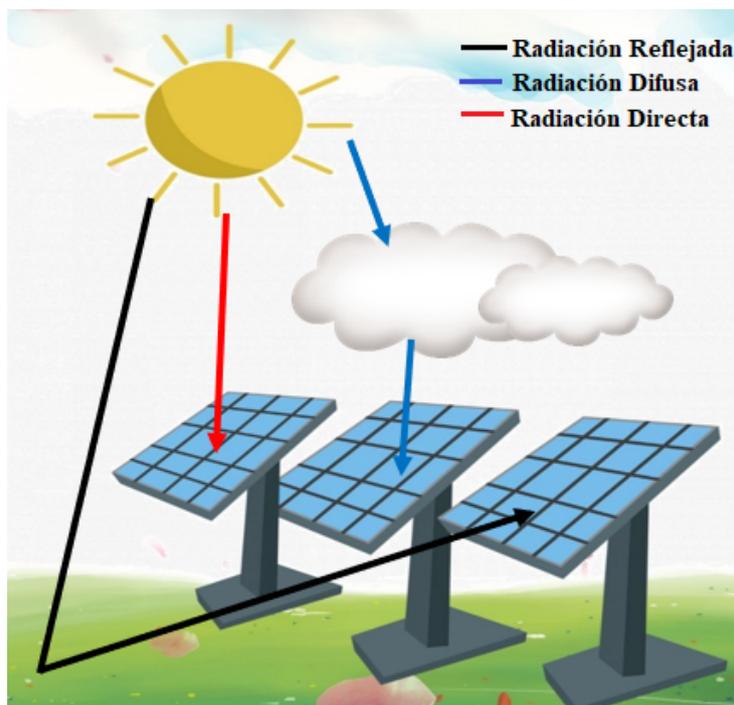


Figura 4.3: Componentes de la radiación solar. Fuente: Autores

- **Radiación solar directa:** Son aquellas ondas que atraviesan la atmósfera de la Tierra sin llegar a afectar su dirección, es decir, esta llega del Sol sin haber sufrido cambio alguno en su dirección y sin interactuar con nada [14].

También se define como, la emisión de ondas recibida del Sol que no ha sido absorbida ni dispersada, cuando los rayos de este astro cruzan la atmósfera, una fracción de ellos se absorbe o disipa, mientras que el restante logra afectar la superficie planetaria de manera directa [45]. Además, es la mayor y la más importante componente en las aplicaciones fotovoltaicas, tanto en su funcionamiento como en su rendimiento.

Sobre la superficie del planeta, el flujo de la radiación directa depende de los siguientes factores: la constante solar, ya que esta presenta fluctuaciones debido a el comportamiento del Sol, la altura del Sol sobre el horizonte (h) y la transparencia atmosférica en presencia de gases absorbentes, nubes y niebla en las últimas capas antes de llegar a tierra [28].

- **Radiación solar reflejada:** Este componente es resultado de la reflexión de la radiación directa en los elementos del entorno o superficie de la Tierra. Esta cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie, llamado albedo, es decir, de su capacidad de reflejar la luz. Las superficies verticales son las que más radiación de esta clase reciben [38]. La figura 4.3 muestra de forma gráfica este componente de radiación solar dentro de la atmósfera.

Así que, brevemente se define como la radiación directa y difusa que se recibe por reflexión en el suelo u otras superficies próximas [44]. La irradiación proveniente del Sol, que llega a la Tierra, es intensamente reflejada por los cuerpos claros o “*blancos*”, tales como las nubes, el agua, la nieve, el hielo, los desiertos y las planicies; mientras que los cuerpos opacos o “*negros*”, tales como los bosques, las selvas y las ciudades, son relativamente malos reflectores de la luz. La nieve es probablemente el mejor cuerpo natural que refleja la luz, tiene un gran albedo.

- **Radiación solar difusa:** Es producto de la interacción con los componentes atmosféricos, como polvo atmosférico, montañas, arboles, edificios, etc. como consecuencia de esto la radiación difusa va en todas direcciones. Las superficies horizontales son las que mayormente reciben esta clase de radiación [14].

También, por dispersión atmosférica, es radiación difusa la que se recibe a través de las nubes, así como la que proviene del cielo azul. En dado caso de no estar presente la radiación difusa, el cielo se vería negro aún de día [44], debido a la NO disipación de ondas y por ende la NO creación del espectro visible.

Así pues, la radiación solar difusa diaria es la cantidad de este componente entre las seis de la mañana y las seis de la tarde y sus valores oscilan entre 300 y 5.500 Wh/m² al día. [28] En la superficie de la Tierra, según el IDEAM, la radiación difusa depende de factores como:

- **La altura del Sol sobre el horizonte:** Si aumenta la altura, aumenta la cantidad de radiación difusa.
- **Cantidad de partículas en la atmósfera:** Al existir una mayor cantidad de partículas, mayor será la componente difusa; por lo que aumentará con la contaminación.
- **Nubosidad.** Aumenta con la presencia de capas de nubes blancas relativamente delgadas.
- **Altura sobre el nivel del mar:** Al aumentar la altura, el aporte de la radiación difusa es menor debido a que disminuye el espesor de las capas difusoras en la atmósfera.

La suma de todos estos componentes, demostrada en la ecuación 1, es el resultado de la irradiación global que es la radiación total incidente sobre una superficie.

$$Irradiancia\ Solar\ Global = Directa + Difusa + Reflejada \quad (1)$$

4.3. Elevación del sol y cambios debidos a movimientos de la Tierra

La orientación e inclinación de los paneles solares tienen afectaciones directas en cuanto radiación solar es captada por los módulos debido a que deben estar en un ángulo lo más neutral posible dependiendo la posición del lugar a analizar; y para esto, la orientación dependerá de la latitud en la que se encuentre el sector en análisis, y la inclinación dependerá de la latitud, de la época del año y probablemente de un grupo electrógeno propio. No obstante, habrá un punto donde la inclinación de los mismos no será posible tenerla por lo cual se tendrá que evaluar cuanta será la pérdida de radiación incidente en los paneles fotovoltaicos. Para que se presente una óptima captación de energía por parte del Sol, es necesario que haya una perpendicularidad casi perfecta entre el panel y los rayos incidentes de radiación solar [52].

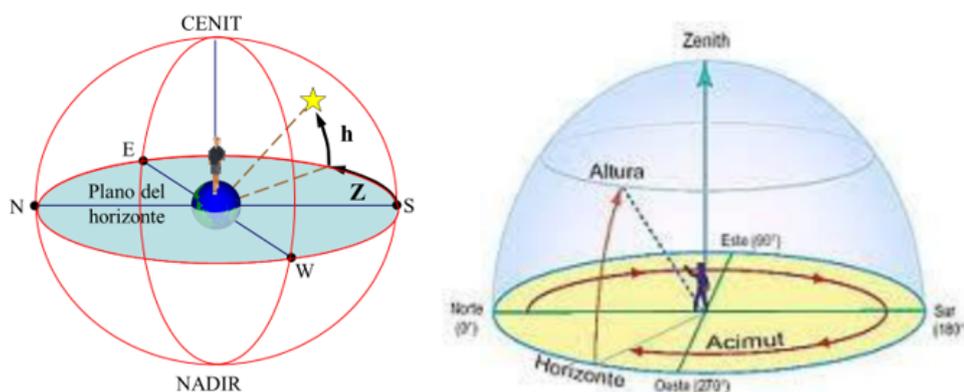


Figura 4.4: Descripción del Cenit y su ángulo. Editada por los autores. Fuente: ITE España y [46]

Ahora, para saber cual es la elevación del Sol es indispensable conocer cual es el Norte para cada caso, así como el Azimut del sector en estudio, ya que de estos valores depende la obtención del primero. Así pues, el Azimut se define como el ángulo formado por la proyección en el plano horizontal del rayo solar y la línea que divide la Tierra de Norte a Sur. [50] De igual manera, el Cenit se define como la línea perpendicular formada por el horizonte y el observador, y a su vez, el ángulo formado por el rayo solar y esta línea se denomina como el ángulo de Cenit representado por Z como se observa en la figura 4.4.

Por otra parte, los movimientos de la Tierra como lo son la rotación y la traslación de la misma, influyen positiva o negativamente dentro del aporte en radiación solar hacia el planeta. Dentro del eje de rotación de la Tierra se encuentra una inclinación respecto del plano orbital de este planeta, por lo cual, a medida que gira alrededor del Sol, expone directamente a los rayos solares el hemisferio norte, el ecuador y el hemisferio sur; es

decir, cuando la Tierra se encuentra en el Perihelio de su órbita Elíptica el sur del planeta estará más cerca del Sol, mientras que el norte se encontrará más lejos y será entonces su época de invierno, por consiguiente, se definen así los solsticios y los equinoccios en el año, mostrados en la figura 4.5.

Para Colombia, y los demás países ecuatoriales la radiación solar es en su mayoría constante, no obstante, debido a esta inclinación de aproximadamente 23,45 grados [47], se definen las estaciones, aunque estas no serán tan marcadas como en los países ubicados hacia alguno de los hemisferios, condición que los convierte en lugares ideales para la implementación de sistemas fotovoltaicos.

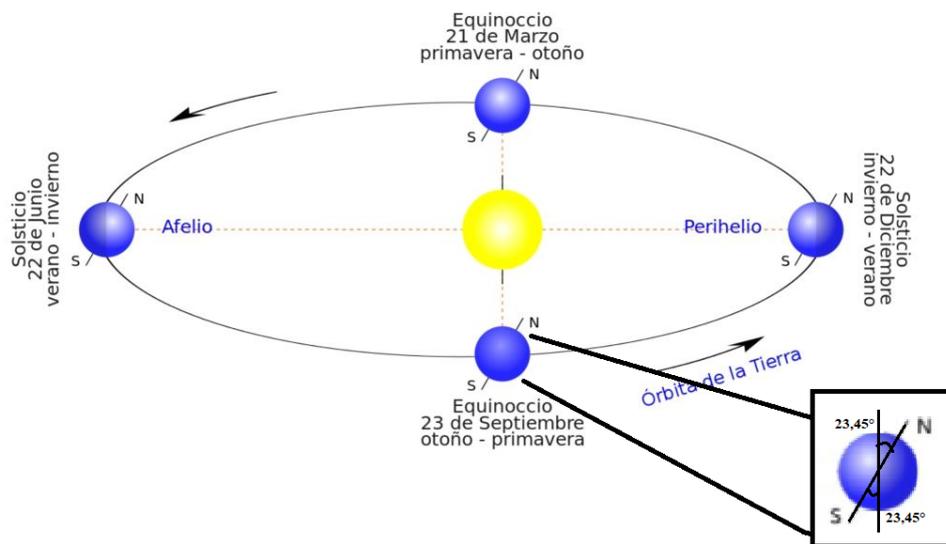


Figura 4.5: Solsticios y Equinoccios en el año. Fuente: Meteored y Autores

4.4. Energía solar fotovoltaica y su generación

Algunos de los métodos de generación de energía tienen efectos negativos según su fuente, que pueden abarcar desde la generación excesiva de CO_2 hacia la atmósfera, hasta la utilización de reservas hídricas para generación de energía, provocando el desvío de ríos e incluso la escasez de agua para ciertas poblaciones, por ello, se han creado normas ambientales mucho más rigurosas, con el objetivo de proteger el medio ambiente en pro de los ecosistemas [60] y quienes hacen parte de ellos.

La energía solar fotovoltaica es una de las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCR) más utilizadas y de mayor auge en la actualidad [27], como se muestra en la figura 3.3; y esto se debe a que es una fuente alternativa que aprovecha directamente la radiación solar para la generación de energía eléctrica [14], utilizando sistemas fotovoltaicos por medio de paneles receptores, como los mostrados en la figura 4.6, los cuales

reciben la luz solar generando un campo de electricidad entre las células fotovoltaicas o láminas delgadas compuestas de un material semiconductor.



Figura 4.6: Paneles receptores de energía solar. Fuente: Meteored y Autores. [28]

La potencia de generación así como la captación de fotones para generar electricidad depende de las propiedades de los materiales semiconductores de que están hechas las células fotovoltaicas [52], ya que estas están formadas por dispositivos tipo diodo en los que artificialmente se ha creado un campo eléctrico constante (mediante una unión p-n), que al recibir la radiación solar, se excitan y provocan salto eléctrico, generando una diferencia de potencial en sus extremos [53], por lo cual, entre más radiación puedan captar mayor será la producción energética de las células y el módulo.

Los paneles fotovoltaicos convierten la luz solar en energía eléctrica. Este sistema no requiere mantenimiento, es insonoro y no produce partículas contaminantes a la atmósfera. Las matrices se pueden acoplar sobre edificios, estacionamientos o en postes. Los conjuntos pueden producir corriente continua (DC), que puede convertirse en corriente alterna (AC) de calidad de red, usarse para cargar baterías o suministrarse directamente después de ser convertida a AC, como se puede ver en la figura 4.7 ; además de que la celda solar puede convertir el 14 % de la energía solar que se refleja en ella, en energía útil [51].

El costo de la electricidad fotovoltaica se ha reducido de 15 a 20 veces menos en los últimos 40 años. Los sistemas fotovoltaicos conectados en red se venden por USD\$0,20/kWh–USD\$0,32/kWh en 2011, o alrededor de USD\$5/Wp USD\$8/Wp, incluidas estructuras de soporte y equipos de acoplamiento de energía. Los costos reportados para proyectos foto-

voltaicos están disminuyendo rápidamente, por lo que un instalador solar local puede ser la mejor fuente de información de costos actual. Los costos de operación y mantenimiento se reportan a USD\$0,008/kWh producido, o al 0,17 % del costo de capital sin seguimiento y 0,35 % con seguimiento [54]. Los sistemas son muy confiables y duran 20 años o más [55].

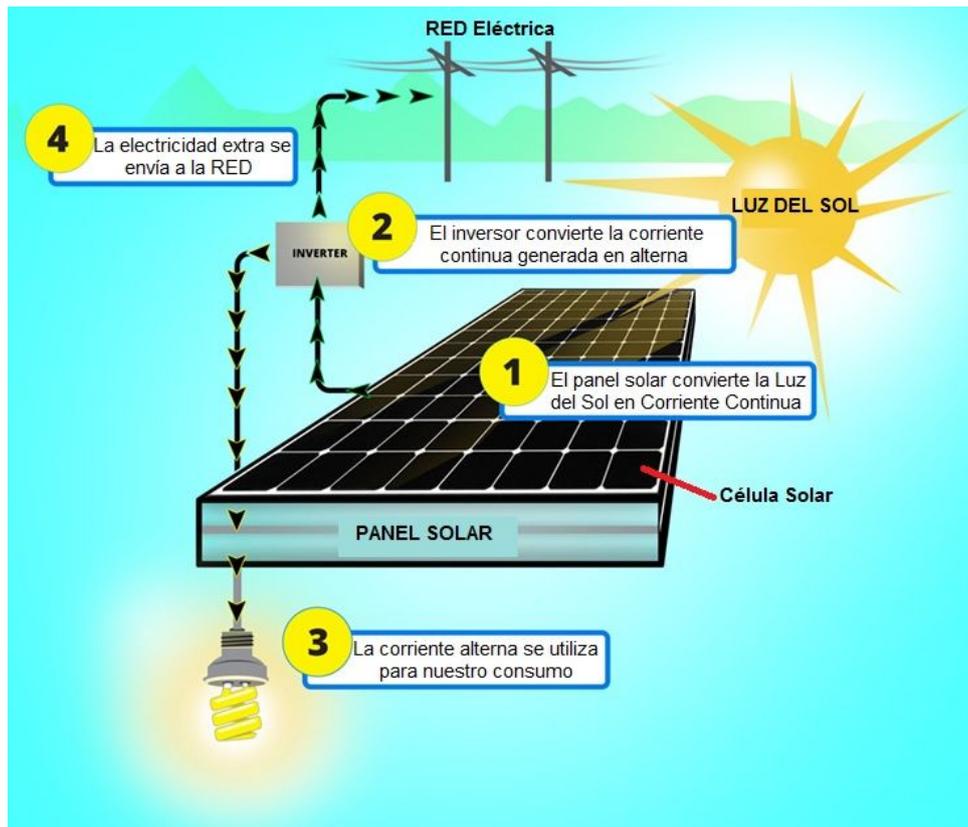


Figura 4.7: Proceso de obtención de energía eléctrica por medio de SFV.[39]

4.5. Sistema solar fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico es un conjunto de elementos interconectados entre si, que aprovechan la energía producida por el sol para ser convertida en energía eléctrica, estos elementos pueden ser: módulos, reguladores, baterías, inversores y convertidores [56]. Además, basan su funcionamiento en el efecto fotoeléctrico, lo cual no emite gases nocivos, su mantenimiento es mínimo y no genera contaminación auditiva, por consiguiente, es tecnología totalmente confiable y su instalación industrial y residencial es sencilla [60].

4.5.1. Componentes del sistema solar fotovoltaico

A continuación, se realiza una breve descripción de los principales componentes y los sistemas interconectados que hacen parte de un sistema solar Fotovoltaico.

- **Módulos fotovoltaicos.** Están compuestos por un conjunto de celdas fotovoltaicas protegidas por un marco de vidrio y aluminio anodizado. La celda fotovoltaica es el componente que capta la energía contenida en la irradiación solar y la transforma en una corriente eléctrica, estas son hechas principalmente de un material semiconductor, donde el silicio es el más usado. El marco de vidrio y aluminio tienen la función principal de soportar mecánicamente las celdas además de protegerlas de la intemperie [14]. Sin embargo, existen otro tipo de módulos, como los mostrados en la figura 4.8, que son adaptados a formas más conocidas y utilizadas, esto con el fin de ahorrar espacio y peso en trabajos en instalación.



Figura 4.8: Diversas configuraciones de módulos solares. Fuente: Autores

No obstante, los componentes químicos y sus materiales tienden a ser similares a los módulos convencionales, por lo cual también se dividen por composición de la siguiente manera:

- **Silicio Amorfo:** En estos módulos, el factor de eficiencia se presenta dentro del 4 % y el 11 %, y aunque su desarrollo por celda es más económico y presenta un buen comportamiento frente a la temperatura, tienen desventajas que son de mucho cuidado como lo son el deterioro temprano, una alta degradación (disminución del factor de rendimiento), y más materiales para su fabricación [48]. Es aconsejable utilizar este tipo de módulos en áreas que requieren poca cobertura de energía y bastante recurso solar como la Región Caribe e Insular, para así aprovechar al máximo su rendimiento.
- **Silicio Monocristalino (m-Si):** Las células monocristalinas se diseñan en películas delgadas de cristal continuo compuesto de silicio, con colores uniformes entre azul y negro como se muestra en la figura 4.9 [49]. Presentan rendimientos en el orden del 14 % al 17 % con un máximo fabricado de 21 %

[48], lo cual los posicionan como los más vendidos y preferidos por la industria en general. No obstante, su precio de fabricación y venta es más elevado que el fabricado en silicio amorfo. Para aprovechar sus ventajas al máximo, se aconseja utilizarlos en zonas como la Región Amazónica y Pacífica pues se puede alcanzar una potencia instalada con una radiación solar aceptable.

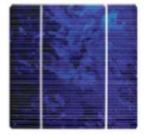
CÉLULA		EFICIENCIA EN LABORATORIO	EFICIENCIA DIRECTA
	Mono-cristalina	24%	14-17 %
	Poli-cristalina	19-20%	11-14%
	De película delgada (amorfas)	16%	<10%

Figura 4.9: Presentación de eficiencias por cada tipo de módulo solar. [49]

- **Silicio Policristalino (p-Si):** Los módulos construidos con base a este material presenta un rendimiento entre el 11 % y 14 % con un máximo construido de 16 %, y sus principales ventajas frente a los demás son un coste inferior de fabricación, mucho más sencilla y mejor optimización del espacio, no obstante, son complejos a la hora de ejecutar su instalación y poseen una alta sensibilidad a impurezas [48]. Es aconsejable su uso en Regiones como la Andina y Orinoquía pues se alcanzan potencias óptimas con rangos de radiación intermedios, de gran utilizada para sistemas interconectados.
- **Arseniuro de galio (GaAs):** Son quizá los módulos con la eficiencia más alta ya que presentan rendimientos del orden del 25 % y son resistentes a altas temperaturas, sin embargo, son los menos usados debido a una gran desventaja en su fabricación, como lo es la toxicidad en sus componentes y baja disponibilidad de los mismos, lo que a su vez aumenta exponencialmente su costo. Es aconsejable utilizarlos en condiciones extremas, donde la radiación solar es muy poca comparada a la potencia instalada necesaria [48].
- **Reguladores:** Son dispositivos electrónicos, encargados de controlar tanto el flujo de la corriente de carga proveniente de los módulos hacia la batería, como el flujo de la corriente de descarga que va desde la batería hacia los dispositivos que consuman

la energía producida. Si la batería ya está cargada, el regulador interrumpe el paso de corriente de los módulos hacia esta, y si ella ha alcanzado su nivel máximo de descarga, el regulador interrumpe el paso de corriente desde la batería hacia los demás dispositivos y cargas [14].

Además, si el voltaje desciende de un valor preestablecido por el fabricante, el regulador debe enviar una señal de desconexión al sistema principal para que se ejecute la desconexión de las cargas conectadas a la batería y permita que esta vuelva a cargarse [58]. De igual manera, existen dos tipos de reguladores que según sus especificaciones pueden cumplir sus funciones de manera óptima, estos son:

- **Regulador Modulador de ancho de pulso (PWM):** Son reguladores que tienen la capacidad de controlar la corriente de carga de las baterías, cuidando que no se supere el voltaje nominal de la batería. Para este caso, la señal de salida es continua, por lo que son llamados también convertidores DC/DC. En estos dispositivos se varía el ancho de pulso con el objetivo de que el promedio de la señal no supere el voltaje nominal de la batería [58].
 - **Reguladores MPPT:** Maximum Power Point Tracking por sus siglas en inglés, son dispositivos de última tecnología que ajusta el voltaje de entrada que se recibe de los módulos fotovoltaicos para extraer la máxima potencia posible, y, a diferencia de los otros reguladores, los MPPT son convertidores DC/DC que pueden reducir o amplificar el voltaje de entrada manteniéndolo constante a la salida para así adaptar la señal de salida y ajustarla al punto de máxima potencia de los paneles. Su eficiencia se encuentra entre el 93 % y el 99 % [58] por lo que los convierte en los mejores del mercado.
 - **Inversores:** Un inversor es un dispositivo electrónico que permite transformar una señal de tipo continua en una señal alterna, la cual puede ser de tipo sinusoidal pura aplicado en sistemas conectados directamente a la red, onda cuadrada o sinusoidal modificada [14].
- Los módulos fotovoltaicos proveen corriente de tipo directa (DC) de diferentes voltajes, no obstante, muchos de los dispositivos electrónicos que son de uso común utilizan energía con base a la corriente alterna (AC) y es aquí donde el inversor realiza la conversión y evita dejar obsoleta esa energía obtenida por el SFV.
- **Baterías:** Son dispositivos que permiten almacenar energía de forma electroquímica, en los sistemas fotovoltaicos se utiliza generalmente como sistema de almacenamiento energético, debido al desplazamiento que puede existir entre los periodos de generación (durante el día) y los periodos de consumo (como en la noche), permi-

tiendo la operación de las cargar cuando el generador fotovoltaico por sí mismo no puede generar la potencia suficiente para abastecer el consumo [59].



Figura 4.10: Tipos de baterías más usadas en SFV. Fuente: Ecofener

Para los SFV, las baterías secundarias son las más adecuadas por el uso tan exigente y vida útil que estas pueden brindar, y, además, ofrecen un ciclo de descarga profundo de hasta un 90 % para cada ciclo carga-descarga. Las más económicas y confiables son las que se fabrican de plomo-acido, ya que pueden soportar alrededor de 2000 ciclos de carga-descarga, es decir cerca de 6 a 10 años de vida útil [58].

Teniendo en cuenta estos componentes que son indispensables para el funcionamiento óptimo del sistema solar fotovoltaico, este a su vez se puede clasificar en dos: Sistemas interconectados y sistemas híbridos.

4.5.2. Sistema interconectado

Este es un sistema de co-generación que se encuentra interconectada a la red eléctrica, el cual utiliza la energía generada por los paneles solares se directamente en el edificio o predio a evaluar, mientras que el excedente se transfiere a la red cuando la producción supera la demanda. Una de las principales ventajas en este tipo de sistema es que toda la energía requerida por la instalación no tiene que ser generada. Son ideales para generar un auto consumo, ya que su función es de suplencia; toman o entregan energía a la red dependiendo de la demanda de carga, un ejemplo básico de este sistema se muestra en la figura 4.11. También, este sistema se caracteriza por estar siempre conectado a la red, por lo cual no es necesario un banco de baterías, ya que, si no se alcanza el pico de potencia necesaria, la conexión a red puede suplir esa potencia [38].

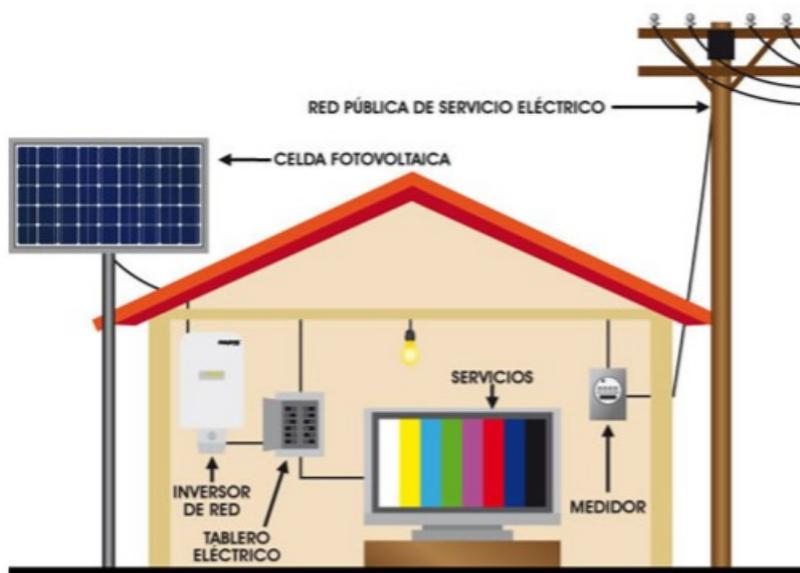


Figura 4.11: Esquema de un SFV interconectado. [38]

4.5.3. Sistema híbrido

Este tipo de sistemas se caracterizan principalmente por poder combinarse con una o más fuentes de energía ya sea convencional, por generadores diesel o energía eólica, el cual puede ir tomando energía de una fuente o de otra según la disponibilidad y la necesidad del usuario que depende de la demanda requerida y de la capacidad de almacenamiento de los sistemas o fuentes conectadas.

El uso de estos sistemas es muy reciente, por lo cual ciertos países como lo son España y Alemania, son quienes están siendo pioneros en ello [38], sin embargo, el sistema conectado a la red es una alternativa bastante prometedora ya que implica que el banco de baterías se reduzca en un porcentaje considerable, lo cual indica reducción de costos y espacio necesario para instalaciones; la configuración general de este tipo de sistemas se muestra en la figura 4.12.

También, este tipo de sistema se conecta directamente a la red, sin embargo, se tiene un sistema de almacenamiento de respaldo. Al momento de generar de electricidad mediante los paneles solares se empieza a cargar el banco de baterías almacenando la capacidad calculada de energía, el remanente o energía extra producida por el sistema es entregada a la red pública, teniendo así una mayor relación beneficio-costado dado que el respaldo de energía almacenado en las baterías puede ser utilizado en horas de la noche en iluminación o cualquier otra actividad, por lo tanto el suministro energético por parte de la red pública se reduce considerablemente [60].

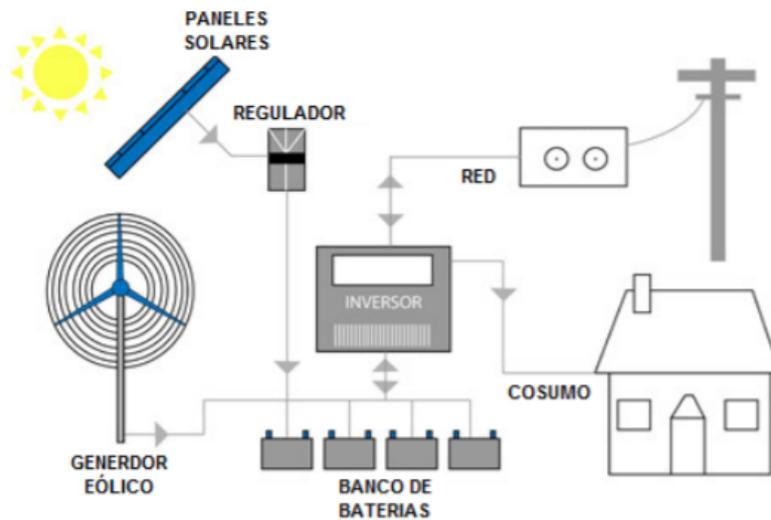


Figura 4.12: Esquema de un SFV Híbrido. [38]

Estos sistemas enfocan su prioridad en los módulos fotovoltaicos así como en la fuente de energía principal, ya sea generadores diésel o red pública, debido al uso de un inversor bidireccional los cuales tienen un componente cargador de baterías con el fin de cargar el banco de baterías y así suplir la energía suficiente en los momentos de baja irradiancia, además de incluir un regulador que se encarga de proteger la batería en estados críticos, por medio de la monitorización del estado de carga de las mismas [38].

4.6. Impactos ambientales

Si bien es conocido el gran beneficio que se obtiene al trabajar con energía solar, por la información ya presentada y de igual manera por los resultados próximos a ver, los impactos medioambientales son bastantes con respecto a la generación de energía por medios convencionales. En primer lugar, se tiene que entender que independientemente la forma de cómo se obtenga energía por métodos no convencionales, estos NO serán 100 % renovables ya que depende de su construcción, implementación, vida útil y reutilización de los materiales.

■ Construcción

En esta fase de implementación de la energía solar y en su defecto de paneles solares fotovoltaicos, se encuentra la afectación al paisaje, por un lado, en la alteración de la armonía y estética del área circundante, ya que debido a su tamaño genera un rango visual o una atención negativa debido al brillo, por lo cual es necesario revisar el lugar en que se implementaran, así como su tamaño [61].

Las placas solares, dada su composición y características, son difícilmente integrales en un entorno sin construcciones, no obstante, como media correctiva se puede implementar la creación de pantallas vegetales que se interpongan entre los observadores y el sistema de paneles solares [62].

■ Implementación y operación

En este caso, los impactos más relevantes que se atenderían y que, a corto y largo plazo se observarían son en la disminución de generación de CO_2 y gases contaminantes, porque según estudios por cada 1kWh de energía solar producida, traduciría a 80 kg de carbón NO quemado, 150 kg de CO_2 no emitidos y 500 litros de agua ahorrada [63]; lo cual, implicaría un impacto climatológico positivo de gran magnitud ya que, en consecuencia de lo anterior la producción de gases de efecto invernadero se reducirá significativamente [64].

Otro de los factores importantes es el suelo, ya que puede o no producir erosión, pues esto depende del sitio donde se vayan a operar los paneles solares, donde normalmente no tendría porque presentarse este fenómeno porque estos no producen vertidos, ni movimientos de tierra, ni contaminantes hacia la misma [64]; sin embargo, nuevamente, el estudio del área donde posiblemente se operará es esencial ya que si se necesita eliminar una gran cobertura vegetal, por circulación de vehículos y maquinaria [61], lo cual posiblemente a largo plazo podría generar problemas de erosión.

Las posibilidades de contaminación del suelo durante la fase de construcción o funcionamiento son escasas si se toman las precauciones necesarias durante la implantación y las labores de mantenimiento. Se deben también extremar las precauciones en la nivelación de los suelos de los parques, con el objeto de preservar la capa de tierra fértil para el acondicionamiento posterior de toda la instalación, [65] y con ello la posible estabilidad de flora y fauna que abunda en el sector en estudio.

La implementación de esta tecnología conlleva a posibles riesgos en la fauna, dado que se han presentado casos en granjas solares en donde se reportaron muertes de aves en estas instalaciones. Muchas de las alas se habían derretido o quemado por el calor reflejado de los espejos de la granja solar [66]. Además de esto, se ha detectado inesperadamente, especies de aves que dependen del agua para alimentarse, reproducirse y/o descansar, como garzas, garcetas y especies que están obligadas al agua que no pueden volar desde tierra, en instalaciones solares. Algunos investigadores han llegado a proponer que esto se debe a que las aves confunden el agua de lagos, charcos u otros estanques de agua con las instalaciones fotovoltaicas, esto se puede entender como la hipótesis del efecto lago [67].

■ Vida útil y reutilización

La fabricación de un panel solar requiere materiales que no impliquen una elaboración muy excesiva tales como aluminio, vidrio, acero, entre otros [68] y que por consiguiente también se encuentran en la industria convencional, lo que supone una gran reutilización. Las células fotovoltaicas se fabrican con silicio, elemento obtenido de la arena, muy abundante en la naturaleza y del que no se requieren cantidades significativas [64].

Además, los paneles solares en la actualidad se pueden reciclar en un 88 %, aunque, “las últimas innovaciones tecnológicas permiten recuperar hasta el 95 % de ciertos materiales semiconductores y el vidrio, así como los materiales ferrosos o no ferrosos, utilizados en estos módulos” según ECOASIMELEC (Fundación perteneciente a RECYCLIA) [69].

Los más modernos modelos de paneles solares en el mercado se fabrican bajo una garantía de operación de 20 a 25 años, sin embargo, su vida útil puede llegar a los 40 años [70], claro está afectando su desempeño al pasar mucho más tiempo en servicio.

4.6.1. Destellos y deslumbramientos

La reflectividad en aeropuertos de acuerdo con la FAA se refiere a la luz que se refleja en las superficies del aeródromo. Los efectos potenciales de la reflectividad son el destello (un destello momentáneo de luz brillante) y el deslumbramiento (una fuente continua de luz brillante). Estos dos efectos pueden provocar una breve pérdida de visión. Las fuentes de deslumbramiento existentes provienen de ventanas de edificios, automóviles, techos y cuerpos de agua. Además en los últimos años, se han sumado los paneles solares a estas fuentes [85].

En Colombia la Aerocivil dada a la falta de desarrollo de aeropuertos que empleen energías renovables en sus instalaciones, aún no ha desarrollado su marco normativo que regule estas tecnologías. Sin embargo, a nivel internacional la Aerocivil tiende a adaptar u homologar medidas ya tomadas por otras entidades como lo son la FAA y la OACI. La FAA como se menciona mas adelante en el marco legal, a través del CFR 14 - Parte 77 establece los estándares para determinar obstrucciones en el espacio aéreo navegable.

Existen superficies imaginarias que se extienden desde la pista de una manera que puede reflejar donde se encuentran aeronaves volando y a su vez se adapta a maniobras imprevisibles que requieran hacer las aeronaves, tal como se muestra en la figura 4.13. La altura sobre el suelo de la superficie imaginaria es más baja cerca de la pista y aumenta a la distancia de la pista. El espacio aéreo comienza a 200 pies (61 metros) sobre el nivel del suelo. Los aeropuertos deben mantener zonas verdes, evitar la construcción y controlar

cualquier actividad de construcción temporal para cumplir con los estándares de la parte 77.

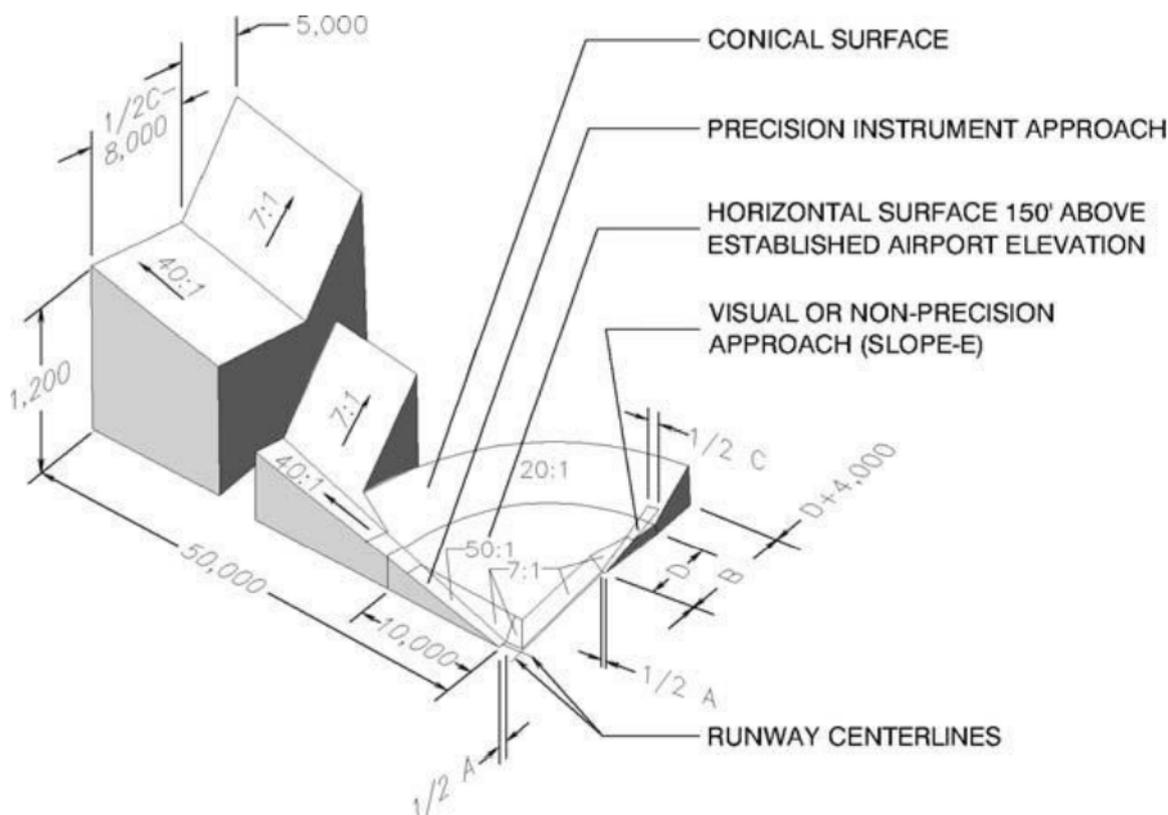


Figura 4.13: Superficies imaginarias que se encuentran en el espacio aéreo. [85]

Los paneles solares, cuando se inclinan correctamente hacia el sol orientado al sur, se extienden a una altura de tan solo 3 pies (0,91 metros), lo que permite ubicarlos cerca de las pistas sin penetrar una superficie imaginaria. El perfil bajo de los paneles solares permite encontrar una mayor flexibilidad para encontrar la ubicación más adecuada en el aeropuerto para la generación de electricidad. No obstante, un sistema solar fotovoltaico puede generar riesgos peligrosos debido a destellos y deslumbramientos causados por la reflexión del sol en matrices fotovoltaicas que pueden causar una imagen secundaria o imagen superpuesta cuando se mira hacia una luz brillante y después se mira en otra dirección, por lo que se determina que produce un peligro potencial para la navegación aérea. Debido a que los SFV introducen nuevas superficies visuales en un entorno de aeropuerto donde la reflectividad puede resultar en un deslumbramiento que puede causar ceguera por destello a aquellos que requieren una visión clara y sin obstrucciones, por lo cual, los proyectos que involucren matrices fotovoltaicas en aeropuertos deben evaluar la reflectividad durante la ubicación y diseño del proyecto.

El estándar de la FAA prohíbe cualquier deslumbramiento que impacte la torre de control del aeropuerto, sin embargo, permite un bajo potencial de imagen secundaria para los pilotos. A continuación se presenta la clasificación según el color para los tipos de deslumbramiento.

- **Verde:** Bajo potencial de imagen superpuesta.
- **Amarillo:** Potencial de imagen superpuesta y riesgo de quema de retina.
- **Rojo:** Potencial de quema de retina.

En la figura 4.14 se puede observar una representación geométrica del potencial de deslumbramiento del sol hacia torre de control y el ángulo en que este provoca reflexión en la matriz fotovoltaica.

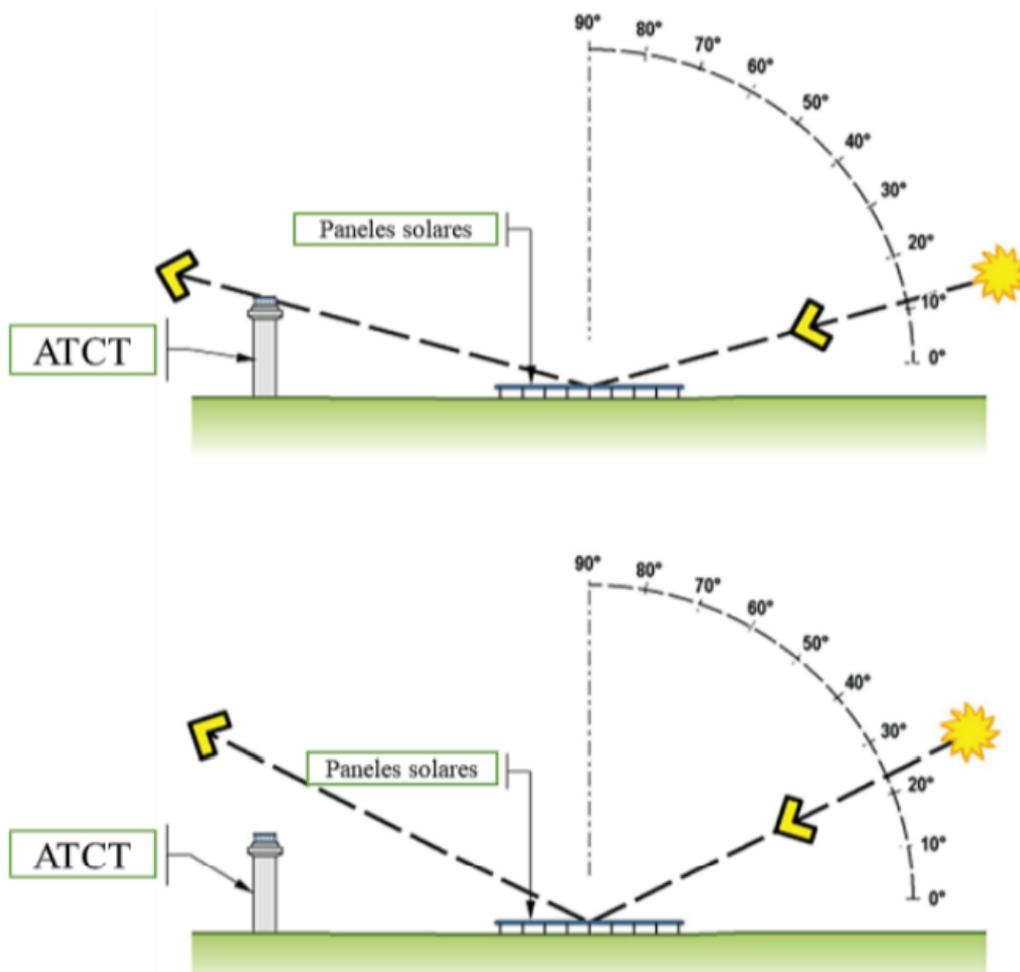


Figura 4.14: Representación geométrica del potencial de deslumbramiento reflejado hacia torre de control. [87]

La tabla 4.1 presenta los receptores sensibles del aeropuerto que deben evaluarse para detectar deslumbramiento, los resultados potenciales informados por el modelo y si el resultado cumple con la política solar provisional de la FAA.

Tabla 4.1: Niveles de deslumbramiento y cumplimiento de la política de la FAA. [87]

Nivel de deslumbramiento	Clase de deslumbramiento	¿Cumple con la política de la FAA?
Receptor Sensible: Torre de Control		
Sin deslumbramiento.	Ninguno	Si
Bajo potencial de imagen superpuesta.	Verde	No
Potencial de imagen superpuesta.	Amarillo	No
Potencial de daño visual permanente.	Rojo	No
Daño permanente.		No
Receptor Sensible: Aproximación de la Aeronave		
Sin deslumbramiento	Ninguno	Si
Bajo potencial de imagen superpuesta.	Verde	Si
Potencial de imagen superpuesta.	Amarillo	No
Potencial de daño visual permanente.	Rojo	No

Capítulo 5

Marco Legal

Muchos de los gobiernos y autoridades aeronáuticas están colaborando mediante planes de acción e implementación de medidas para tener un crecimiento neutro en carbono, lo que se refiere según la ONU, al proceso de reducir o evitar las emisiones de gases de efecto invernadero o eliminar el dióxido de carbono de la atmósfera para compensar las emisiones en otros lugares, es decir, las emisiones continuarán, pero se equilibrarán absorbiendo una cantidad equivalente de la atmósfera [86]. Tomando como año de referencia a partir de 2020 en base a fuentes no convencionales de energía renovable (FNCR) [87]. Los sistemas solares fotovoltaicos han sido uno de los tipos de fuentes no convencionales de energía renovable que han tenido mayor auge de implementación en la industria aeroportuaria y que en algunos casos ya son más de 100 aeropuertos a nivel mundial que poseen instalaciones de sistemas de energía solar fotovoltaica [10]. Por lo cual organismos que regulan la actividad aérea como la OACI, EASA y FAA, están desarrollando seminarios, normas y regulaciones para controlar dichas tecnologías a la vez de incentivar su uso a nivel global.

El potencial uso de los sistemas solares fotovoltaicos no solo permiten alcanzar un crecimiento neutro de carbono sino, además, mejoran la confiabilidad y seguridad operativa de los aeropuertos. Uno de los casos más comunes y por el cual la energía solar se empezó a implementar en aeropuertos, fue por un incidente reciente, en donde las luces de pista fallidas causaron un apagón en el Aeropuerto Internacional de Glasgow, lo que resultó en aterrizajes y despegues abortados [71]. Hoy en día este aeropuerto cuenta con luces de borde de pista totalmente funcionales con energía solar.

A pesar de los beneficios que ofrece equipar las instalaciones de los aeropuertos con tecnologías solares, es importante regular la producción y manipulación de estas [21]. De manera que se logren evitar fallas eléctricas en los dispositivos, teniendo una excelente autonomía y larga vida útil.

Este capítulo, considera el aspecto legal de Colombia, así como los requisitos de las auto-

ridades aeronáuticas a nivel internacional. Por lo tanto, el marco normativo se divide en los siguientes apartados.

5.1. Reglamentación y Legislación de Energía en Colombia

La reglamentación y legislación de energía en Colombia que se evidencia a lo largo de este apartado permite contextualizar el panorama del manejo y gestión que se tiene en el país sobre las FNCER. Por lo tanto, el objetivo de este, es identificar las principales leyes que permiten mostrar el esfuerzo que está haciendo Colombia para reducir o evitar las emisiones de CO_2 , así como los incentivos económicos que proporciona el gobierno a cualquier ciudadano que desee implementar este tipo de proyectos en el país. Sin embargo, a pesar de que este documento aborda una perspectiva de factibilidad técnica; esta revisión permite evidenciar las leyes que promueven la investigación de energías renovables en el país, además de seleccionar y comparar los equipos, módulos e instrumentos en relación al costo-beneficio en el dimensionamiento de un SFV para un análisis económico que se desarrolle en futuras investigaciones sobre este caso.

A lo largo de los últimos 30 años, el sector eléctrico colombiano ha estado desarrollando estrategias para mejorar las condiciones de producción de energía eléctrica renovable. A través de organismos reguladores como el Ministerio de Minas y Energía (MME), la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), y la Comisión Reguladora de Energía y Gas (CREG), quienes se comprometen con la legislación y decretos [72], entre estos:

- El Gobierno Nacional de Colombia promulgó la Ley No. 29 de 1990 y el Decreto No. 393 de 1991, para promover la investigación en el URE (Uso Racional de la Energía) realizada por Colciencias.
- En 1992 el Ministerio de Minas y Energía (MME), desarrolló un documento titulado “*Políticas en fuentes alternativas de energía, presente y futuro*” [48]. Dirigido a políticas en el ámbito de las energías alternativas no convencionales para la población urbana y rural. Este documento señala las funciones que le confiere el artículo 63 de la Ley No. 1 de 1984, correspondientes a:
 - Promover la aplicación de fuentes de energía alternativas utilizando la energía disponible localmente, especialmente en áreas con servicios públicos insuficientes.
 - Evaluar y supervisar la implementación de proyectos en áreas remotas.
 - Evaluar el potencial de las Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE).

- Realizar investigaciones para el desarrollo de las FNCE con el propósito de formular políticas a nivel nacional.
- Por medio de la Ley No. 164 de octubre de 1994 y el artículo 1ro de la Ley No. 7 de 1994. El Congreso de la República aprobó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático de 1992. Tiene como objetivo abordar los GEI (gases de efecto invernadero), junto con el cambio climático a través de una política global.
- En 1994 se reorganizó la promulgación de las Leyes No. 142 y No. 143, entre las que se establecieron restricciones a las actividades operativas de la industria eléctrica: generación, transmisión, distribución y comercialización para las SIN y ZNI. A la UPME se le asignó realizar el Plan Nacional de Energía (PEN) y el plan de expansión del sector eléctrico [73].
- INEA elaboró un plan de desarrollo de energías alternas entre 1996-1998, publicado en febrero de 1995. Consiste en una recopilación de proyectos [72].
- El plan Energético Nacional (PEN) de Autosuficiencia Energética Sostenible creado entre 1997 y 2010. Es un documento en donde se plantean ideas, visiones, desafíos, requisitos y capacidades para el desarrollo futuro del sector energético colombiano, se aprobó y se ratificó la convención marco sobre emisiones de gases de efecto invernadero.
- En diciembre de 2000 se aprobó la Ley No. 620 sobre el Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, que beneficia a Colombia en el uso del mecanismo de desarrollo limpio estipulado en el protocolo [74].
- Colombia aceptó el “*Protocolo de Kyoto*” ratificado por la Ley No. 697 del 2000. Dirigido a reducir el impacto del cambio climático causado por la contaminación ambiental [74], [75].
- A través de la Ley No.697 de 2001, el país promovió el uso racional y eficiente de la energía (URE). Entre ellos, se utilizan normas y estrategias para garantizar que se satisfaga la demanda de energía (Eficiencia) [76].
- Con el fin de promover el uso de fuentes alternativas de energía (energía solar fotovoltaica), en 2003 se promulgaron los Decretos No. 3652 y No. 3683, que establecen un plan para el uso racional y eficiente de la energía y otras formas de energía no convencionales [76].
- Por medio de la resolución 18 0919 de junio de 2010, se promueve el uso de energías alternativas. [76].

- Hoy en día, la Ley No. 143 de 1994, establece un sistema de actividades de generación, interconexión, transmisión, distribución, y comercialización de electricidad, de acuerdo a actividades legales correspondientes al Ministerio de Minas y Energía [77].
- La ley 1715 de 2014, creada con el objetivo de reglamentar la integración de energías no convencionales renovables al sistema energético nacional, delega a la CREG fijar unas tarifas para la energía solar fotovoltaica, además de regular la venta de créditos o excedentes de energía que son entregados a la red de distribución y transporte para generadores automáticos que produzcan menos de 5 MW, apoya el uso de fuentes locales para producción de energía por medio del fondo de Energías no Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE) [78], [7].
- Las directrices generales de la política energética vigente se encuentran en el PEN 2050, que presenta las ideas, perspectivas, desafíos, requisitos, capacidades y descripción general del sector energético [79].
- En la Resolución 1283 del 8 de agosto de 2016, se establece el procedimiento y requisitos para la certificación de beneficio ambiental por nuevas inversiones en proyectos de energías renovables - FNCER y gestión de la energía, que permiten los beneficios tributarios tratados en la ley 1715 de 2015 y se adoptan otras determinaciones [80].
- En la Resolución 703 del 14 de Diciembre de 2018, se establece el procedimiento para obtener el aval del proyecto de fuentes no convencionales (FNCE), con el fin de obtener el beneficio de la exclusión del IVA y la exención de gravamen arancelario tratados en los artículos 12 y 13 de la ley 1715 de 2014, además de adoptar otras disposiciones [80].
- A través de la guía práctica *“Invierta y Gane con Energía”*[7], permite identificar el marco normativo y orientar a las personas naturales, jurídicas o empresas que desean acceder a los incentivos que ofrece el gobierno. En el marco normativo se incluye la ley que establece los incentivos (Ley 1715 de 2014, artículos: 11, 12, 13 y 14), el decreto que desarrolla los incentivos previstos en la ley (Decreto 2143 de 2015) y las resoluciones que reglamentan el procedimiento para acceder a los incentivos (Resoluciones: 520 y 638 de 2007, 143 de 2016, 045 de 2016, 1283 de 2016 y 186 de 2012).

La guía práctica presenta las entidades a las cuales se deben entregar las solicitudes y procedimientos de las certificaciones para acceder a estos incentivos en proyectos de fuentes no convencionales de energía (FNCE) y de gestión eficiente de energía (GEE). Dichas entidades son la unidad de planeación del minero energética (UPME) y la autoridad nacional de licencias ambientales (ANLA).

Dentro de los incentivos que presenta la guía a través del marco normativo ilustrado se encuentran:

1. **Deducción especial en la determinación del impuesto sobre la renta:** Los contribuyentes declarantes del impuesto sobre la renta que realicen nuevas erogaciones en FNCE o GEE, tendrán derecho a deducir hasta el 50 % de la renta líquida del contribuyente.
2. **Depreciación acelerada:** Gasto que la ley permite que sea deducible en el momento de declarar el impuesto sobre la renta, por una proporción del valor del activo que no puede superar el 20 % anual.
3. **Exclusión de bienes y servicios de IVA:** Por la compra de bienes y servicios, equipos, maquinaria, elementos y/o servicios nacionales o importados.
4. **Exención de gravámenes arancelarios:** Exención del pago de los derechos arancelarios de importación de maquinaria, equipos e insumos destinados exclusivamente para labores de pre inversión y de inversión de proyectos con FNCE.

No obstante, estos incentivos, además de las solicitudes y procedimientos; poseen limitaciones y posibilidades de pérdida del incentivo como lo son:

- Si los activos objeto de la inversión son enajenados antes de que finalice su periodo de depreciación o amortización, los beneficiarios de la deducción deberán restituir el incentivo incorporándolo como renta líquida por recuperación de deducciones en el año en que se perfeccione la enajenación.
- Tampoco se procederá el incentivo respecto de aquellos activos que se enajenen y que luego sean readquiridos por el mismo contribuyente.
- El incentivo de depreciación acelerada aplica exclusivamente para las nuevas inversiones en las etapas de preinversión, inversión y operación de proyectos a partir de FNCE.

5.2. Diseño e Instalación de los Sistemas Eléctricos en Aeródromos

Para el diseño e instalación de sistemas eléctricos en cualquier terreno, obra, edificio, terminal, aeródromo, etc. Existen requisitos y recomendaciones que varían dependiendo de cada país y autoridad aeronáutica que permiten garantizar la protección contra riesgos de origen eléctrico o cualquier otro que surja de estos sistemas. Por ello, para realizar

el dimensionamiento de un SFV que permita analizar la factibilidad técnica de su implementación, se deben tener presente los siguientes documentos en Colombia y a nivel internacional para cualquier aeropuerto que cuente con las condiciones meteorológicas aptas como, por ejemplo, contar con mayor cantidad de días en que se aprovechen más horas de sol, es decir, contar con menos días nublados o de lluvia para este tipo de sistemas. Así pues, dichos documentos son:

1. **RETIE:** Es el reglamento técnico de instalaciones eléctricas emitido por el Ministerio de Minas y Energía como máxima autoridad en Colombia en materia energética.
2. **NTC-2050:** Es el código eléctrico Colombiano emitido por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
3. **FAA Airport Solar Guide:** Es una guía preparada por la Administración Federal de Aviación (FAA), orientada a evaluar tecnologías solares en aeropuertos para satisfacer las necesidades normativas, información del personal de la entidad que regula la aviación a nivel nacional (UAEAC) y los patrocinadores de los aeropuertos interesados en la evaluación de proyectos solares. Además de incluir temas técnicos sobre la tecnología solar, infraestructura de la red eléctrica, regulaciones de seguridad de la FAA y las alternativas de financiamiento.
4. **Anexo 14 - Aeródromos Vol I, Diseño y operaciones de aeródromos. 7ma Edición:** Este anexo preparado por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) contiene normas y métodos recomendados que prescriben las características físicas y las superficies limitadoras de obstáculos con que deben contar los aeródromos, instalaciones y servicios técnicos en un aeródromo.
5. **Manual de Proyecto de Aeródromos - Parte 5, Sistemas Eléctricos:** Este manual preparado por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) está destinado a ser una guía de las prácticas de ingeniería eléctrica recomendadas para el diseño e instalación de sistemas eléctricos. Examina las características generales de las prácticas e instalaciones eléctricas con énfasis en aquellas características que están involucradas con menos frecuencia o tienen una importancia especial para las operaciones de aeródromos.

A continuación, se presenta una pequeña revisión sobre el contexto de cada documento mencionado arriba correspondiente al diseño e instalación de los sistemas eléctricos en aeródromos. Sin embargo, se tiene en cuenta el rango que representa en el sector nacional como el sector internacional.

- **Sector Nacional:** En Colombia, se cuenta con el Reglamento técnico de instalaciones eléctricas “*RETIE*” correspondiente a todo tipo de infraestructuras en el sector nacional como lo son por ejemplo: Requerimientos generales de las instalaciones eléctricas, compatibilidad electromagnética, sistemas de puesta a tierra, etc [92].

También, el RETIE presenta un artículo en el cuál se indica que para el diseño, montaje e instalación de paneles solares se debe hacer conforme a la norma técnica Colombiana 2050 “*NTC-2050*” que dentro de este se encuentran algunas secciones de interés como lo son [93]:

1. **Sección 480. Baterías de acumuladores:** El contenido y alcance de esta sección aplica para todas las instalaciones estacionarias con baterías de acumuladores.
2. **Sección 690. Sistemas solares fotovoltaicos:** El contenido y alcance de esta sección se aplican a los sistemas fotovoltaicos de generación de energía eléctrica, incluyendo circuitos eléctricos, unidades de regulación y controladores de los sistemas. Estos sistemas pueden estar interconectados con otras fuentes de energía eléctrica o ser autónomos y tener o no acumuladores. La salida de estos sistemas pueden ser de corriente continua o corriente alterna.
3. **Sección 705. Fuentes de generación de energía eléctrica interconectadas:** Esta sección trata de la instalación de una o más fuentes de generación de energía eléctrica operando en paralelo con una o varias fuentes primarias de electricidad.

- **Sector Internacional:** En Colombia la entidad que regula la aviación a nivel nacional es la Aerocivil (UAEAC). Si bien la UAEAC cuenta con el RAC 14 que es la parte de los reglamentos aeronáuticos de Colombia encargada de reglamentar los aeródromos, aeropuertos y helipuertos. No obstante, en materia de diseño e instalación de sistemas fotovoltaicos en aeropuertos; este no posee regulaciones sobre estos y muchas de las medidas que se implementan sobre sistemas eléctricos son adoptadas de los documentos de la OACI ya mencionados.

La UAEAC suele implementar la reglamentación no solo de la OACI sino también de la FAA. Por lo tanto, la guía de aeropuertos solares de la FAA [85], permite orientar y evaluar tecnologías solares en aeropuertos satisfaciendo las necesidades legales. A continuación se presenta el material normativo que utiliza esta guía:

1. **AC/150-5345-50B:** Esta circular de asesoramiento proporciona especificaciones para luces portátiles de pista y calle de rodaje, pautas adicionales sobre iluminación portátil de aeródromos para uso temporal y aplicaciones solares que pueden incluir la carga solar de baterías [88].

2. **AC/150-5070-6B:** Esta circular de asesoramiento trata sobre los planes maestros que se desarrollan a través de un proceso de colaboración para involucrar al aeropuerto, agencias, empresas y partes interesadas en la planificación del futuro del aeropuerto. El propósito del plan maestro es identificar problemas críticos relacionados con la infraestructura del aeropuerto y dirigir recursos financieros para abordar esos problemas. A través del plan de diseño del aeropuerto (ALP) se modifica el plan maestro para incluir futuros proyectos de mejora de infraestructura identificados en este [89].
3. **CFR 14 - Parte 77:** Este documento establece los estándares para determinar obstrucciones en el espacio aéreo navegable, requisitos para notificar a la FAA o en su caso la UAEAC sobre una construcción propuesta o alteración de estructuras existentes [90].
4. **AC/150-5360-9:** Es una circular de asesoramiento de planificación y diseño de instalaciones en terminales de aeropuertos en ubicaciones no Hub. Esta circular hace mención sobre la arquitectura solar y como puede incorporarse para reemplazar o complementar los sistemas eléctricos en un aeropuerto no Hub [91].

A través de la OACI, en el anexo 14 y el manual de proyecto de aeródromos parte 5, existen una serie de regulaciones a seguir con respecto al diseño y desarrollo necesarios para que un aeropuerto pueda operar. Se pueden destacar los siguientes puntos para su concepción:

- El sistema de suministro puede incluir conexiones a una o más fuentes externas de suministro de energía eléctrica, a una o más *“instalaciones locales de generación y a una red de distribución, que incluye transformadores y dispositivos conmutadores”*. En el momento de planificar el sistema de energía eléctrica en los aeródromos se debe tener en cuenta las demás instalaciones del aeródromo que dependan del mismo sistema [81].
- Los Dispositivos de conexión de alimentación de energía eléctrica a las instalaciones que requieran de una fuente secundaria de energía eléctrica, deben disponerse de forma que en caso de falla de la fuente primaria de energía eléctrica, *“las instalaciones se conmuten automáticamente a la fuente secundaria de energía eléctrica”* [81].
- En caso de falla de la fuente principal, la fuente secundaria debe ser apta de suministrar energía a las siguientes instalaciones:
 - Lámpara de señales y alumbrado mínimo necesario para que el personal de servicios de control de tránsito aéreo pueda ejercer su trabajo.

- Luces de obstáculos que sean indispensables según la autoridad competente para garantizar la seguridad de las operaciones de las aeronaves.
 - Iluminación de aproximación, de pista y de calle de rodaje.
 - Equipo Meteorológico.
 - Iluminación indispensable para fines de seguridad, capítulo 9. Sección 9.11. [81].
 - Equipos e instalaciones fundamentales de las agencias que atienden casos de emergencia en el aeródromo.
 - Iluminación con proyectores de los puestos aislados que sean designados para estacionamiento de aeronaves.
 - Iluminación de las áreas de la plataforma en donde puedan caminar los pasajeros.
- La fuentes primarias, son alimentadores procedentes de una red eléctrica ampliamente interconectada situada fuera del aeródromo. La energía eléctrica puede provenir de un grupo generador local o de un sistema de distribución limitado [82].
 - En aeródromos grandes, es conveniente que las fuentes de alimentación sean dos independientes. Deben proceder de secciones de la red eléctrica separadas y fuera del aeródromo siendo controladas por circuitos independientes para la integridad de las instalaciones [82].
 - Es preferible que las fuentes tengan alimentadores de distintos procedentes de subestaciones separadas y generadores diferentes. Naturalmente, se pueden usar otros sistemas de alimentación, *“según la seguridad, fiabilidad, estadísticas o factores económicos de la situación que se trate”* [82].
 - Hay sistemas de radio-navegación y computadoras que no permiten interrupción de corriente. En este caso se debe disponer de una fuente de alimentación ininterrumpible o casi permanente que atienda estos equipos cuando falle la fuente de alimentación primaria. Algunos sistemas, no permiten más que fluctuaciones muy limitadas de la frecuencia o tensión y requieren una fuente totalmente ininterrumpible [82].
 - En caso de una red independiente de servicio público, mediante un circuito con itinerario diferente del de la fuente normal de suministro de energía y en caso de falla simultánea, es necesario tener una o varias fuentes de energía eléctrica de reserva, constituidas por grupos electrógenos, baterías, etc. Para adquirir energía eléctrica [81].

- Cuando la fuente secundaria de energía utilice sus propias líneas de transporte de energía, *“estas serán física y eléctricamente independientes”* con el fin de lograr el nivel de disponibilidad y autonomía necesarios [81].
- Para la fuente secundaria de energía, la Tabla 8.1 del Anexo 14 de la OACI, establece el tiempo máximo de conmutación para las ayudas luminosas, a su vez la tabla C-9 del anexo 10 del adjunto C de dicho documento, establece el tiempo máximo de conexión para las radioayudas [81][84].
- Es posible que las fuentes alternativas no solo estén en estado de reserva y pueden suministrar energía eléctrica a otras instalaciones del aeródromo. No obstante, debería tener la capacidad adecuada para proporcionar la energía necesaria para las ayudas de iluminación del aeródromo esenciales cuando sea necesario [83].
- Los sistemas eléctricos de suministro de energía, de luces y control de luces que están en la Tabla 8.1 del anexo 14 de la OACI, deben estar diseñados de forma que en caso de falla no se proporcione al piloto guía visual inadecuada ni información engañosa [81].
- Es necesario realizar pruebas eléctricas de los circuitos con el fin de determinar si está absolutamente libre de derivaciones a tierra y si la calidad de la instalación es aceptable, además de cumplir las condiciones operacionales. Es preferible realizar las pruebas con tierra humedecida, con el propósito de que las pruebas sean aptas tanto en tiempo seco como en condiciones posteriores a lluvia intensa [82].
- Para las baterías y su almacenamiento, el paquete de baterías debe estar bien ventilado para evitar acumulación de gas hidrógeno y debe protegerse de arcos, chispas o llamas que podrían causar una explosión de cualquier gas acumulado. Las baterías de níquel-cadmio pueden usarse cuando las condiciones especiales justifiquen su alto costo inicial. El paquete de baterías se suele suministrar con bastidores de dos estantes, pero si el espacio está limitado, pueden ser necesarios bastidores de tres estantes [82][83].
- Cámaras y abrigos para los equipos eléctricos. La mayoría de los equipos eléctricos para la iluminación de aeropuertos y otras instalaciones se encuentran en bóvedas o refugios especiales para protegerse del clima y aumentar su seguridad. Casi todas las cámaras para equipos eléctricos están sobre el terreno y se fabrican de materiales ignífugos. Materiales como el hormigón armado para los pisos y el hormigón en masa, y/o el ladrillo para las paredes; son capaces de reducir el riesgo de descarga eléctrica, cortocircuito de circuitos eléctricos y riesgo de incendio [82][83].

Capítulo 6

Metodología

La metodología utilizada para el análisis de la factibilidad técnica de la implementación de un sistema fotovoltaico en aeropuertos se fundamenta en una revisión bibliográfica, el desarrollo de cálculos, análisis y aproximaciones de datos, y la presentación de un producto final que determine el resultado de la aplicación de las propuestas que se realizarán en el aeropuerto seleccionado.

Para el desarrollo general del proyecto se tuvieron en cuenta las siguientes fases: investigación previa, análisis de los criterios de evaluación para la selección del aeropuerto insignia del proyecto, desarrollo de cálculos y diseño del sistema a proponer; todo esto con el fin de reunir la mayor información posible, y así, analizar y determinar la factibilidad técnica de la implementación de este tipo de energía en el aeropuerto seleccionado. También, se incluirán en esta sección los procesos que se deben realizar para el desarrollo de las propuestas de la próxima sección y así poder analizar los resultados obtenidos.

6.1. Fase de investigación previa

Según la Real Academia Española, investigar se define como la realización de actividades que permitan aumentar los conocimientos sobre una determinada materia, por esto es de suma importancia esta fase inicial dentro del desarrollo del proyecto, pues a partir de ésta se han construido los marcos del documento y el fundamento teórico de las propuestas del proyecto. Esta fase tiene también como finalidad profundizar en los conocimientos de los sistemas fotovoltaicos y su implementación en aeropuertos, tanto en Colombia como a nivel internacional. Se desarrolló esta fase con revisiones de bases de datos especializadas y repositorios tales como el de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, bibliotecas de la UPME, IDEAM y del Banco Interamericano de Desarrollo, así como de fuentes externas (empresas privadas de SFV) y entidades gubernamentales como lo son el Ministerio de Minas y Energía (MME), la UAEAC, Empresas Públicas de Medellín (EPM), el Concesionario Aeropuertos de Oriente S.A.S, entre otras. De igual manera, se consultó las normativas, estándares, y los reglamentos internacionales avalados por la

OACI, FAA y Aerocivil, con el objetivo de incluirlos dentro de la investigación, teniendo en cuenta así cada uno de los estatutos incluidos en estas normas para la implementación y análisis de factibilidad dentro de aeropuertos.

El resultado de las actividades de investigación realizadas fue la publicación de un artículo de revisión titulado “**Actualidad de los sistemas fotovoltaicos en el sector aeronáutico colombiano**”, en el cual se realizó una breve introducción al presente proyecto, brindando información valiosa sobre el avance de los proyectos más importantes en el país en cuanto a energías renovables, así como sus diversas fases para una exitosa implementación. Actualmente este artículo se encuentra publicado en la revista de divulgación aeronáutica AeroErmo en su edición No. 36 [94] y es la base del marco referencial descrito en el capítulo 3.

6.2. Fase de análisis de criterios de evaluación para la implementación de proyectos solares en aeropuertos

A continuación se presentarán los criterios de evaluación seleccionados junto con su respectiva explicación. Estos criterios fueron tenidos en cuenta en el proceso de selección del aeropuerto y fueron evaluados en el proceso de determinación de factibilidad sobre el aeropuerto finalmente seleccionado. El resultado de la aplicación y evaluación de los criterios que se presentan a continuación se encuentra registrado dentro de la matriz del **apéndice A**.

Criterios relacionados directamente con el aeropuerto:

- **Administración del aeropuerto:** Se considera la dependencia administrativa del aeropuerto, si se encuentra bajo una concesión, o la Aerocivil es su principal y único administrador. Este criterio es evaluado para saber ante qué entidad es presentado un proyecto de este tipo para su estudio, análisis e implementación. Ha sido considerado este criterio dentro de la matriz puesto que al presentar el proyecto ante el equipo de ingeniería de Aerooriente, informaron que dependiendo la administración del aeropuerto variarían las limitaciones y condiciones para implementar este tipo de proyectos en un aeródromo, esto afectaría el análisis de factibilidad, pues se contarían con zonas de concesión compartida, zonas públicas y zonas totalmente privadas, lo que limitaría el espacio disponible y extendería el análisis de implementación de SFV al tener que proponerse el proyecto a más entidades.

- **Propiedad del predio y disponibilidad de espacios para un SFV:** Antes de realizar un dimensionamiento de un sistema fotovoltaico en un determinado espacio, es primordial realizar el estudio de espacios y mapeo para determinar las zonas disponibles del aeropuerto para una posible instalación de SFV dentro de los límites de la propiedad. Es de gran importancia la evaluación de este criterio puesto que determinará si se diseñará un sistema en tierra, en tejados, en superficies planas, inclinadas, curvas, etc. De no contar con espacios disponibles se debe analizar la posible adquisición de predios aledaños o el arrendamiento de zonas próximas al aeropuerto, proponiendo así la mejor recomendación posible.

- **Proyección de pasajeros y operaciones:** Es importante conocer el promedio de operaciones de transporte de pasajeros y carga, tanto nacional como internacional si aplica, teniendo en cuenta las afectaciones de la pandemia mundial por el COVID 19, pues de esta manera se podrá incentivar la implementación de este tipo de tecnologías y se determinará la posibilidad de contar con los suficientes recursos para la administración y mantenimiento de los sistemas propuestos en el proyecto. Se considera este criterio dentro del resumen ejecutivo y plan maestro de cada aeropuerto, pues estas estadísticas determinan la proyección de demanda de operaciones a mediano y largo plazo. Es de gran importancia considerar este criterio pues como se mencionó anteriormente, de este análisis dependerá la proyección de costos y fondos disponibles para instalar y mantener un SFV en el aeropuerto.

- **Fuentes de energía del aeropuerto:** Para considerar un SFV como fuente de energía en un aeropuerto es necesario identificar cuáles son las fuentes de energía con las que actualmente trabaja el mismo, pues así se tiene un punto de partida para el dimensionamiento del SFV sabiendo cuál es la meta a alcanzar con la implementación del nuevo sistema, cuál fuente se reemplazará, o con cuál fuente se interconectará el SFV, según sea el caso específico.
 - **Fuente Primaria:** Se realiza la trazabilidad de la energía de mayor consumo en el aeropuerto, llegando así a su fuente o proveedor principal con el fin de conocer cuál es su origen, si es energía a base de combustibles fósiles, energía proveniente de hidroeléctricas, energía de subestaciones interconectadas, etc. Para ello se realiza una consulta con las respectivas entidades prestadoras de servicios, electrificadoras, y administradoras del suministro eléctrico del aeropuerto.
 - **Fuente Secundaria:** Como es conocido, por normativa y seguridad, se deben contar con fuentes back-up o plantas secundarias que sean el respaldo preciso

para abastecer energéticamente al aeropuerto en casos de emergencia o cuando la fuente principal falle, esto con el fin de velar la continua operación del aeropuerto y no dejar ninguna de las áreas o equipos del aeropuerto sin suministro eléctrico. En este caso, siguiendo las fichas técnicas de cada aeropuerto y la información suministrada por el personal técnico encargado, se consultan las referencias de las plantas secundarias en uso, su medio de generación de energía, sus capacidades y sus limitaciones, con el fin de analizar su posible sustitución por SFV según sea conveniente para cada aeropuerto específico.

- **Impacto ambiental:** Siendo uno de los criterios más importantes en este proyecto, se analiza cuál es el impacto del aeropuerto al ambiente con el uso de las fuentes de energía tanto primarias como secundarias. También, de la mano del último resumen ejecutivo de cada aeropuerto, se busca relacionar la implementación de los SFV como parte de las posibles soluciones a los impactos ambientales previamente identificados por los administradores del aeropuerto.
- **Impacto socio-económico:** En aras del crecimiento tecnológico y económico de la sociedad se tienen en cuenta proyectos e innovaciones como lo son el uso de energías renovables, a través de este criterio se busca identificar los pro y los contra de la implementación de los SFV en aeropuertos con relación a su entorno inmediato a un corto, mediano, y largo plazo. De manera general se analizan los incentivos económicos por la utilización de este tipo de energía, pero también se tendrán en cuenta los posibles impactos tanto positivos como negativos a la población por causa de la implementación de SFV en la zona seleccionada.

Criterios externos al aeropuerto:

- **Nivel de radiación solar de la zona:** Un criterio imprescindible a la hora de implementar un SFV es el nivel de radiación al cual está expuesta la zona de estudio, de esto dependerá la mayor producción de energía posible a través de la utilización de celdas solares. Este criterio ha sido fundamental para la selección del aeropuerto, el desarrollo de este proyecto, y para el análisis y aplicación de esta metodología para implementar SFV en aeropuertos colombianos.
- **Condiciones climáticas de la zona:** Una vez se tenga claro el destino del SFV se deben también identificar los factores climáticos que caracterizan la zona seleccionada, más allá de los niveles de radiación recibida en dicha zona, pues esto afectará directamente el desarrollo y la utilización de estas tecnologías en los aeropuertos. El mantenimiento y sus costos son altamente afectados por factores climáticos de

la zona tales como la humedad, salinidad, temperatura, presión atmosférica, precipitaciones, vientos, etc.

- **Riesgos y amenazas predecibles e impredecibles en la zona:** Tal como se menciona, existen riesgos en todo proyecto que son difícilmente predecibles o como los desastres naturales, simplemente ocurren sin previo aviso. Sin embargo, gracias al desarrollo científico y tecnológico, hoy en día se pueden realizar aproximaciones a futuros eventos naturales que podrían ocurrir debido a la ubicación de un punto determinado, y a la etapa del año en la que se encuentre. Un ejemplo de esto son los “fenómenos del Niño y de la Niña”, los cuales en Colombia indican un período de abundantes precipitaciones o de sequías en sectores del territorio nacional en etapas determinadas del año. El objetivo de incluir este criterio en la metodología es poder dar alta atención a posibles riesgos que podría correr el SFV debido a eventos que ya hayan ocurrido en la zona seleccionada o que puedan estar próximos a ocurrir.

6.3. Selección del aeropuerto

Uno de los parámetros iniciales para la determinación del aeropuerto al cual se dirigirían las propuestas de este proyecto fue el nivel de radiación al que está expuesto cada aeródromo tenido en cuenta. Según el IDEAM, uno de los aeropuertos que sobresalen a nivel nacional con respecto a los niveles promedio de radiación solar es el caso del Aeropuerto Internacional Almirante Padilla de Riohacha, recibiendo un promedio anual de radiación solar de $5605,8 \text{ Wh/m}^2$ [28] (Ver también apéndice A). A pesar de esto, se decidió continuar con la búsqueda del aeropuerto más cercano a los ideales de los autores y de los cuales se pudiera obtener información suficiente para su posterior análisis, teniendo en cuenta las limitaciones expuestas en la sección 2.2.2 de este proyecto. Para la evaluación de los criterios se tuvieron en cuenta los aeropuertos de la ciudad de Santa Marta, “Aeropuerto Internacional Simón Bolívar”, la ciudad de Cúcuta, “Aeropuerto Internacional Camilo Daza”, la ciudad de Valledupar, “Aeropuerto Alfonso López Pumarejo”, y la isla de San Andrés, “Aeropuerto Internacional Gustavo Rojas Pinilla”. Sin embargo, de la misma manera que aconteció con el aeropuerto de la ciudad de Riohacha, la información obtenida no fue suficiente para la completa aplicación de la metodología presentada y así poder llegar a resultados óptimos y recomendaciones válidas.

Teniendo en cuenta lo anterior, se han evaluado los criterios de la matriz, tal como se presenta en el **apéndice A**, y se ha determinado aplicar la metodología en mención al **Aeropuerto Internacional Gustavo Rojas Pinilla** de San Andrés (figura 6.1), con el fin de analizar la factibilidad técnica de la implementación de un SFV como parte del suministro eléctrico de este aeropuerto. Como resultado de la aplicación de esta metodología y el análisis de cada una de las fases anteriormente explicadas se realizan las propuestas presentes en el capítulo 7.



Figura 6.1: Aeropuerto Internacional Gustavo Rojas Pinilla. (Cortesía: Mr. Jhosimar)

Nota: Aunque las propuestas que se presentan están enfocadas en el aeropuerto de la isla de San Andrés, quedan abiertas al público para que la metodología expuesta pueda ser evaluada, mejorada, y aplicada en cualquier aeropuerto deseado.

6.4. Fase de cálculos y diseño

Aplicando los conceptos y temáticas estudiadas en la primera fase, y con el objetivo de realizar un óptimo análisis del sistema fotovoltaico que se propondrá para el Aeropuerto Internacional Gustavo Rojas Pinilla, se realizaron diversos análisis y cálculos para generar una aproximación bastante real a los posibles casos que pudiese encontrar el sistema en una futura implementación para dicho aeropuerto, como lo son las cargas adicionales que supondría incluir este sistema y factores de brillo o deslumbramiento que afectarían a la torre de control y tripulaciones en las aeronaves. Con el acompañamiento del Laboratorio de Radiometría Solar de la Fundación Universitaria Los Libertadores, el **“Spin-off Radiant”**, se realizó esta fase de cálculos y diseño la cual incluye el dimensionamiento del sistema con medidas y datos brindados por la empresa de servicios públicos de la isla de San Andrés, SOPESA S.A. y la información de las fuentes secundarias que cuenta el aeropuerto por parte de sus funcionarios, además del uso del software Meteoblue encargado

de brindar datos de condiciones climáticas de la isla que se explicará en esta fase.

6.4.1. Parámetros meteorológicos iniciales

Con el apoyo del Laboratorio de Radiometría Solar de la Fundación Universitaria Los Libertadores, se desarrolló algunos modelos basados en cálculos matemáticos de SFV, con el objetivo de seleccionar el más apto técnicamente hablando para cumplir con los criterios que se mencionaran más adelante.

En un principio, es necesario, primero, analizar el historial climatológico que tiene el lugar en específico a analizar, con el fin de saber los días en los que el sistema funcionara continuamente sin interrupción; sin embargo, estos no tienen que ser cumplidos en su totalidad ya que es un máximo que se brinda en caso de falla total de suministro eléctrico por esos días en cuestión; y segundo, el consumo total que el sistema se encargará de cubrir así como para qué secciones se tendrá como fuente primaria o secundaria, con el fin de discretizar al máximo esos datos y tener una muy buena aproximación.



Figura 6.2: Interfaz principal de Meteoblue en ejemplo para Bogotá D.C. [96]

Para revisar el historial climatológico de un punto específico, como en este caso, es necesario un software que tenga gran confiabilidad y certeza en los datos que se brinda, por ello, se utilizó **Meteoblue** para obtener datos concretos y útiles. En la figura 6.2 se puede observar la interfaz de esta herramienta, donde en la opción de **“Búsqueda de ubicación”** se escribe el nombre del lugar específico a analizar. Los diagramas climáticos de Meteoblue se basan en años meteorológicos típicos, también conocidos como años tipo, los cuales son una representación de registros climatológicos tomados por intervalos de

tiempo durante varios años, suelen representar proyecciones o promedios de parámetros a largo plazo [95]; un ejemplo de esto es tomar 5 registros diarios del parámetro “precipitación” de manera consecutiva durante un año, al recopilar esta información y realizar las proyecciones respectivas se considera un año tipo el posible comportamiento del parámetro “precipitación” durante los próximos 10 años basado en los resultados obtenidos en un año completo de medición. De esta manera, el software Meteoblue se basa en mediciones de 3 años tipo lo que resultan ser simulaciones meteorológicas de aproximadamente 30 años; estas proyecciones y recopilaciones de datos ofrecen indicaciones confiables de los patrones climáticos típicos y de las condiciones esperadas (temperatura, precipitación, insolación y viento) [96].

Para poder obtener los días de autonomía que tendrá el SFV para cada caso es necesario ingresar a la opción **“Historia y Clima”** de la parte inferior izquierda como se observa en la figura 6.3, para finalmente incluir la opción de **“Clima (modelado)”** donde se mostrará una gráfica de **“Cielo nublado, sol y días de precipitación”** de la cual se extrapolan los datos para cada mes en Días Nublados, para luego generar un promedio el cual mencionará aquel número de días en los que el sistema debe funcionar autónomamente ya que la obtención de energía será casi nula.

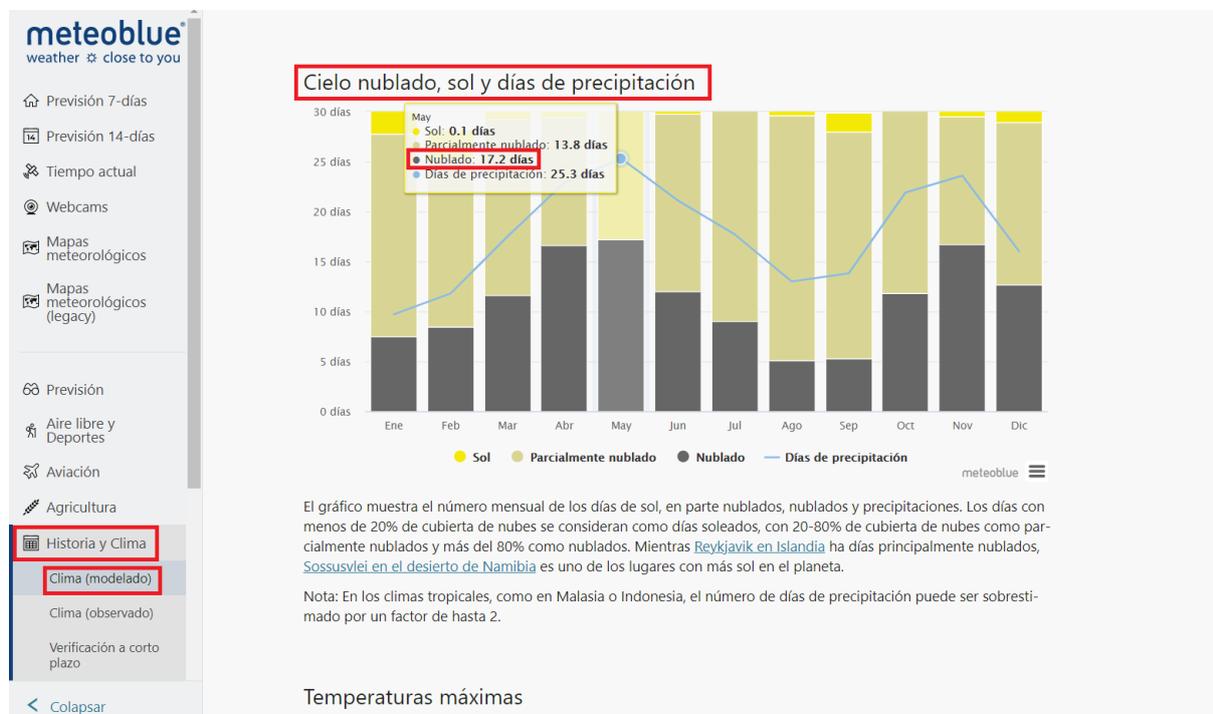


Figura 6.3: Historial del clima y días nublados en Meteoblue. [96]

6.4.2. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

Definición del voltaje del sistema

Para dar inicio al dimensionamiento del SFV, es importante aclarar el voltaje referencia al cual este trabajará, y a lo largo de este documento se conocerá como Voltaje del Sistema (V_{sis}), siendo un parámetro importante ya que definirá el voltaje de entrada de los diferentes dispositivos que compondrán la instalación, desde los módulos, hasta los acumuladores.

Los valores típicos se presentan a 24VDC, 36VDC y 48VDC, no obstante, esto dependerá en parte de que tan grande será el sistema, así como de los componentes de entrada (generadores de energía) que son los que brindan las pautas claras para los demás equipos.

Energía total que se cubrirá

Después de concretar lo anterior, se procede a determinar la energía total (E. Total) que el SFV suministrará por medio de la instalación solar al Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla. Para ello, se puede determinar esta cantidad de energía por medio de diferentes ecuaciones y modelos matemáticos, sin embargo, debido a la complejidad de poder analizar componente por componente y lograr cubrir todo el aeropuerto, incluyendo desde las bombillas de los locales comerciales, hasta luces de pista y calles de rodaje; una de las formas más sencillas es indagando en fuentes oficiales acerca del consumo total del Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla, con el fin de obtener un ponderado general de la cantidad de energía total que se consume, y que se cubrirá con el sistema.

Al conocer la energía total diaria que suministrará el sistema, por motivos de seguridad y con el fin de brindar una brecha porcentual a un posible aumento de la misma por alguna variable no contemplada, se añadirá un 10% más del valor total de la energía siguiendo la ecuación (2).

$$E_{TC} = E.Total + (0,1 * E.Total) \quad (2)$$

Donde:

- E_{TC} , es la energía total corregida a cubrir por día. (Ah/día)
- $E.Total$, es la energía total diaria sin corrección. (Ah/día)

Dimensionamiento de módulos fotovoltaicos (generadores)

Seguido de esto, el siguiente paso consiste en hallar la cantidad de módulos fotovoltaicos que se implementaran en el SFV tanto en serie como en paralelo, sin embargo, para continuar con este paso es importante conocer características meteorológicas y de radiación de la zona a evaluar.

Determinación del total de módulos fotovoltaicos

Se debe definir la radiación invernal, o los niveles de radiación más bajos durante todo el año (usualmente presentados en la temporada de invierno) con el fin de trabajar con base a ellos, ya que esto responde a la seguridad que se debe tener en el caso de utilizarlo en condiciones extremas durante muchos meses al año como lo es invierno, que por otra parte es la temporada de mayor riesgo de accidentes y fallas.

Consultados y ponderados estos niveles de radiación en el Atlas de Radiación Solar de Colombia más actualizado, y con el fin de obtener un promedio mensual, estos se representarán en horas solares pico (H.S.P) de la siguiente manera.

$$\text{Nivel de radiación más bajo} \left(\frac{kJ}{m^2} \right) * 0,024 = \text{Total en langleys} \quad (3)$$

Donde el Total en langleys, es otra medida de radiación muy utilizada a nivel mundial; y que, finalmente representado en H.S.P. es:

$$\text{Total en langleys} * 0,0116 = \text{Total H.S.P} \quad (4)$$

Donde tanto, como para la Ecuación (3) como para la (4); 0,024 y 0,0116, son factores de conversión para lograr obtener los resultados finales en las dimensiones necesarias.

Un aproximado total de módulos fotovoltaicos se concluiría utilizando la corriente continua mínima que produce cada uno de los paneles y las H.S.P ya calculadas, generando la producción diaria que se tendría, como se indica en la ecuación (5); para así, finalmente encontrar la cantidad total de módulos con el procedimiento demostrado en la ecuación (6).

$$H.S.P * I_{min} = P_{día} \quad (5)$$

Donde:

- $H.S.P$, es igual al total de horas solares pico en el lugar a estudiar. (h/día)
- I_{min} , es la corriente mínima que proporciona cada módulo fotovoltaico. (A)
- $P_{día}$, es carga eléctrica en el día o en otras palabras, la producción diaria mínima que tendría cada módulo. (Ah/día)

Nota: No confundir $P_{día}$ con Potencia.

$$\frac{E_{TC}}{P_{día}} = \#PS_T \quad (6)$$

Donde:

- E_{TC} , es la energía total corregida a cubrir por día. ($Ah/día$)
- $\#PS_T$, es el total aproximado de módulos fotovoltaicos para cubrir la energía diaria.

Determinación de módulos fotovoltaicos en serie

Con el fin de disponer un arreglo de paneles solares mucho más acertado, que estén en la capacidad de suministrar con toda la energía requerida, se evalúa la cantidad de los mismos ubicados en serie de la siguiente manera.

La cantidad de generadores en serie depende del voltaje del sistema, previamente analizado y establecido, así como de la tensión nominal de los módulos fotovoltaicos a emplear. Teniendo en cuenta esto, este cálculo esta dado por:

$$\# \text{ de módulos en serie} = \frac{V_{sis}}{V_{P.S.}} \quad (7)$$

Donde:

- V_{sis} , es el voltaje o tensión nominal del sistema. (V)
- $V_{P.S.}$, es el voltaje nominal del módulo fotovoltaico. (V)

Determinación de módulos fotovoltaicos en paralelo

Para poder determinar la cantidad de generadores en paralelo que sean capaces de cubrir con la demanda diaria de energía requerida, se debe cumplir con algunas variables, tales como:

- **Ci, Carga equivalente en corriente (Ah):** Representando la corriente en Amperios por cada hora que el módulo debe suministrar ante la demanda de energía establecida para el lugar de análisis.

$$Ci = \frac{E_{TC}}{V_{sis}} \quad (8)$$

- **Corriente pico del generador (A):** Indica la corriente que producirá el generador cuando este se expone a una medida de radiación estándar de $1000 W/m^2$ [14]. En esta condición, el módulo fotovoltaico suministrará máxima potencia de generación.

$$I_{PG} = \frac{Ci}{HSS} \quad (9)$$

Donde:

- HSS , es el número de horas de sol estándar presentes en el lugar en el cual se efectuará la instalación. (Tomadas del Atlas de Radiación Solar [28])

Al momento de resolver y encontrar los valores numéricos de cada una de estas variables, se calcula el número de módulos en paralelo, como se denota en la ecuación (10).

$$\#módulos \text{ en paralelo} = \frac{I_{PG}}{I_{MP}} \quad (10)$$

Donde:

- I_{PG} , es la corriente suministrada por el conjunto de paneles que conformaran la instalación [14]. (A)
- I_{MP} , es la corriente máxima de potencia del módulo. (A)

Corrección del total de módulos fotovoltaicos en el sistema

La determinación de una cantidad específica de generadores en conexión paralela y en serie, genera una corrección en el número total de módulos que deberán componer el sistema fotovoltaico, donde se rige por la ecuación (11) como se muestra.

$$\#PS_{TC} = \#módulos \text{ en serie} * \#módulos \text{ en paralelo} \quad (11)$$

Donde:

- $\#PS_{TC}$, es la corrección del total de módulos fotovoltaicos en el sistema.

Dimensionamiento del inversor

Conociendo la cantidad de módulos que harían parte del proceso de generación de energía, y debido a que no todos los equipos instalados en la mayoría de construcciones funcionan con Corriente Directa (DC), la cual es el resultado después del proceso realizado por los mismos módulos, es necesario la utilización de un equipo que convierta la Corriente Directa en Corriente Alterna (AC), para una mejor optimización en el uso de energía recolectada.

Como se evidencia los paneles solares poseen valores característicos de voltaje y corriente, los cuales pueden variar en función de la configuración ya sea en serie o en paralelo. Por esto, es necesario conocer los valores de I_{MP} y V_{MP} , que corresponden a la corriente máxima de potencia del módulo y el voltaje de máxima potencia del mismo, respectivamente.

Conociendo estos valores, y a fin de garantizar el correcto funcionamiento de la instalación, es necesario relacionar estos niveles máximos de salida que tendrían los módulos con la cantidad de los mismos en sus dos configuraciones. Así pues, las ecuaciones (12) y (13) relaciona estos valores.

$$I_G = (I_{MP}) * \#Ramas \text{ en paralelo} \quad (12)$$

$$V_G = (V_{MP}) * \#Módulos \text{ en serie} \quad (13)$$

Donde:

- I_G , es la corriente de salida de todos los módulos. (A)
- V_G , es la tensión de trabajo del inversor. (V)

Los resultados obtenidos de I_G y V_G , deben asegurar que la configuración seleccionada operará satisfactoriamente junto con el inversor, lo que significa, que estos valores, no deben superar los valores fijados por el fabricante en relación con los parámetros de entrada del inversor.

Si es necesario, y debido a que en los casos donde el dimensionamiento del sistema tiene alta generación de energía, por lo común en usos industriales, es pertinente dividir en cierta cantidad de módulos y configuraciones todo el equipo total de generadores, con el fin de que más de un inversor pueda encargarse de una corriente y voltaje específicos, cumpliendo lo mencionado anteriormente.

Dimensionamiento del banco de baterías (acumuladores)

Al igual que para los generadores del sistema, el banco de acumuladores o baterías deben ir en configuraciones específicas, ya sea en serie o en paralelo, por lo cual el procedimiento de cálculo será similar al utilizado en los módulos, como se observa a continuación.

Determinación de acumuladores en serie

Para este caso, la ecuación (7) será el punto de comparación para realizar el cálculo de acumuladores que se dispondrán en serie, ya que el raciocinio es similar, solo alterando una variable dentro de ella, utilizándose así la ecuación (14).

$$\# \text{acumuladores en serie} = \frac{V_{sis}}{V_{NA}} \quad (14)$$

Donde:

- V_{NA} , es el voltaje nominal del acumulador o batería. (V)

Determinación de acumuladores en paralelo

De igual manera es imprescindible conocer la cantidad de acumuladores necesarios para alcanzar los niveles de corriente requeridos por la instalación fotovoltaica, de manera que, esta se determina por medio de las siguientes variables.

- **Capacidad nominal o de acumulación de las baterías:** Esto comprende los días de autonomía que tendrá el sistema, por lo cual se refiere a la cantidad de energía mínima para un correcto funcionamiento en días donde el recurso solar sea escaso.

$$CA_b = Ci * DAU \quad (15)$$

Donde:

- DAU , se refiere a los días de autonomía que son extraídos del programa Me-teoBlue.
 - CA_b , es la capacidad de acumulación del banco de baterías. (Ah)
- **Capacidad corregida del banco:** Debido a que los acumuladores no deben cargarse completamente y descargarse completamente todo el tiempo, es necesario realizar correcciones con base a la profundidad de descarga (POD) de la misma, ya que este valor nos indica hasta que porcentaje es seguro realizar la descarga de las baterías, y cumplir de esta manera con la vida útil dada por el fabricante.

$$CA_{cb} = \frac{CA_b}{POD} \quad (16)$$

Donde:

- CA_b , es la capacidad corregida del banco de baterías. (Ah)
- POD , es la profundidad de descarga máxima de cada batería.

Después de tener claro los valores numéricos de cada variable, es así como la ecuación (17) relaciona todas ellas, determinando así el número de baterías necesarias para cumplir con los requerimientos de la instalación.

$$\# \text{acumuladores en paralelo} = \frac{CA_{cb}}{CN_b} \quad (17)$$

Donde:

- CN_b , se refiere a la capacidad nominal que posee una solar batería. (Ah)

Para finalizar, se determinará el número total de baterías necesarios para satisfacer con toda la demanda de acumulación para la instalación por medio de la ecuación (18).

$$\# \text{Total de acumuladores} = Ac_s * Ac_p \quad (18)$$

Donde:

- Ac_s , es el número de acumuladores en serie.
- Ac_p , es el número de acumuladores en paralelo.

Dimensionamiento del cableado

Finalmente, es importante el tipo de conductores utilizados para el manejo y transporte de la energía eléctrica desde su captación hasta el lugar de consumo, para el manejo eficiente y seguro de la corriente [30] que se utilizará en la instalación fotovoltaica.

Es necesario poder relacionar ciertos conceptos de los cuales depende la elección correcta del cableado, y como es de saber, por estos se transportará la corriente que generen los módulos hacia los inversores y posteriormente hacia los acumuladores; por lo cual, dicho conductor debe poseer la capacidad de transportar la corriente a los diferentes componentes de forma óptima sin llegar a generar algún problema de temperatura o pérdida por resistencia del mismo.

Así pues, la corriente pico de la sección de generadores, que se define para el total de paneles tanto en configuración en serie y en paralelo, aglomerados por cada inversor es descrita por la ecuación (19).

$$I_{pg} = \frac{P_{pg}}{V_{sis}} \quad (19)$$

Donde:

- P_{pg} , es la potencia pico de todos los módulos asociados a un inversor. (W)

- I_{pg} , es la corriente pico de todos los módulos. (A)

Posteriormente, la corriente que será transportada por el conductor debe ser menor o igual que 1,2 veces la corriente pico de los generadores, como indica la ecuación (20), siendo así, el cálculo esencial para la elección de un buen cableado.

$$\text{Corriente del conductor} \geq 1,2 * I_{pg} \quad (20)$$

Para concluir, es importante conocer la resistencia del conductor, ya que esto es un factor que puede indicar la capacidad del cableado para conducir el 100% de energía teniendo pérdidas mínimas en el proceso, y esto se puede definir estableciendo una distancia máxima que puede existir entre los módulos y los inversores, donde al relacionar estas variables se obtiene la ecuación (21).

$$R_c = R_{ckm} * \frac{1km}{1000m} * D_{m,i} \quad (21)$$

Donde:

- R_c , es la resistencia que presenta el conductor. (Ohms)
- R_{ckm} , es la resistencia máxima del conductor por cada kilómetro. ($\frac{Ohms}{km}$)
- $D_{m,i}$, es la distancia máxima entre los módulos y los inversores. (m)

6.4.3. Análisis de deslumbramientos mediante el software ForgeSolar

La FAA a través de sus métodos para evaluar el deslumbramiento de proyectos de energía solar fotovoltaica en aeropuertos requiere el uso de modelos para evaluar el deslumbramiento y remite a los proponentes de proyectos a la herramienta de análisis de peligros de deslumbramiento solar (SGHAT). Este método y herramienta han sido adoptados en muchos otros países para evaluar los impactos de destellos y deslumbramientos a los receptores sensibles en la aviación.

Para cada análisis, la huella de la matriz del proyecto describe el modelo utilizando Google Maps para el mapa interactivo y los detalles del proyecto, que incluye la entrada del ángulo de Acimut y el ángulo de inclinación. Luego, se debe ingresar información sobre cada uno de los receptores sensibles del aeropuerto. En donde, se debe ingresar la ubicación de torre de control y la altura del observador en la cabina de la torre. Para el análisis del piloto,

se selecciona el umbral de la pista con la herramienta de trayectoria de vuelo y también se selecciona un segundo punto alejado de la pista que representa toda la trayectoria de vuelo. Después, el modelo identifica automáticamente la ubicación y la altura sobre el suelo de la trayectoria de vuelo en función de una pendiente de planeo habitualmente dada en 3° a 2 millas (3,2 km) del umbral y determina si el piloto a lo largo de la trayectoria de vuelo estaría expuesto al deslumbramiento.

Luego de ingresar todos los parámetros del documento y que el software analice los datos, en caso de que se produzca deslumbramiento se generan una serie de gráficas en las cuáles se indican el periodo del año y el tipo de deslumbramiento que se puede producir (según la figura 87), duración en minutos al día y el acumulado anual, puntos potenciales de imagen superpuesta sobre el área estudiada, etc. Después de analizado el proyecto, se puede exportar un documento PDF con el informe de los resultados bajo los estándares de la FAA.

Procedimiento para utilizar el software ForgeSolar

Para utilizar esta herramienta es necesario registrarse en la página web de ForgeSolar y luego de confirmarse la suscripción a través de correo electrónico se permite crear un proyecto en la versión demo con las herramientas básicas. La interfaz inicial es la que se presenta en la figura 6.4.

The screenshot shows the 'Create Demo Project' page on the ForgeSolar website. At the top, there is a navigation bar with the ForgeSolar logo and links for CONTACT, ACCOUNT, LOG OUT, PRICING, TOOLS & SERVICES, PROJECTS, and HELP. The main heading is 'Create Demo Project'. Below the heading, there is a sub-heading: 'Create a new Demo Project to begin the Free Trial.' The form contains the following fields: 'Project name' with the value 'Demo Project', 'Units of distance' set to 'Meters', and 'Timezone offset from UTC' set to 'UTC-5 (EST, ACT, COT, EASST, ECT, PET)'. At the bottom of the form are 'Create project' and 'Back' buttons. On the right side, there is a box indicating '0 Basic project credit(s) available' and '0 Advanced project credit(s) available', with a 'Purchase subscription' button below it. A note at the bottom of the page reads: 'After creating the project, open the Map Editor to begin setting up a site configuration.'

Figura 6.4: Selección de parámetros iniciales para el proyecto. Fuente: ForgeSolar

Al iniciar el editor del mapa se ilustra la interfaz que se presenta en la figura 6.5. Por medio de esta interfaz se permiten seleccionar y configurar las variables que la herramienta SGHAT requiere para analizar los destellos y deslumbramientos.

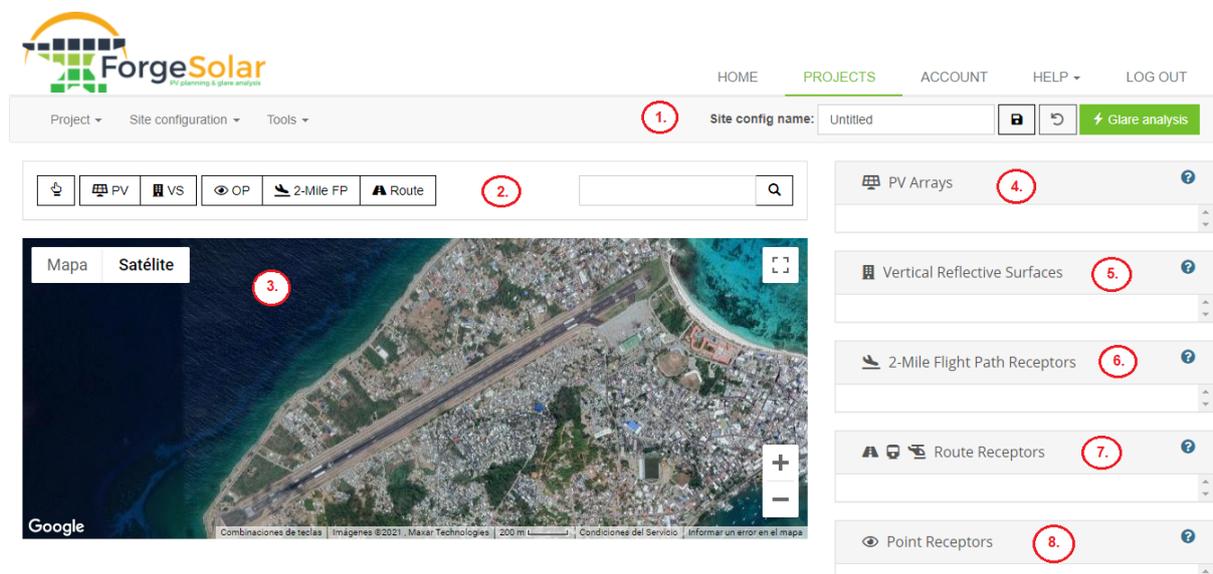


Figura 6.5: Interfaz para configurar las variables del programa. Fuente: ForgeSolar

1. **Barra de herramientas:** Es la barra de herramientas en la cuál se puede asignar un nombre al proyecto, guardar, deshacer cambios o ejecutar el análisis con las variables definidas.
2. **Barra de selección de variables:** Se encuentran los principales elementos que se pueden agregar en el mapa. Al seleccionar alguno se crea una herramienta de dibujo que permite ubicar cada uno de los componentes.
3. **Mapa:** A través de Google Maps se permite localizar la ubicación en donde se requiere hacer el proyecto y ubicar cada variable en el área del lugar.
4. **Matriz fotovoltaica:** Tras ubicar la componente en el área que está destinada para operar la matriz, esta variable permite configurar si la matriz tiene sistema de seguimiento, seleccionar el material del módulo fotovoltaico (liso, con o sin recubrimiento antirreflectante, vidrio con textura ligera o textura profunda), el ángulo de inclinación de los paneles, ángulo de orientación de la matriz y la potencia nominal (opcional).
5. **Superficies verticales:** En esta variable se ubican las matrices verticales como por ejemplo edificios que pueden ocasionar deslumbramiento. Se puede configurar la altura superior, altura inferior y el error de pendiente.

6. **Rutas de vuelo:** Se ubican los puntos de umbral de la pista del aeropuerto y el software generará la ruta de vuelo de hasta 2 millas (3,2 km). Se puede configurar la dirección desde la cuál se aproxima la aeronave, pendiente de planeo y el campo de visión desde la cabina (generados por el software).
7. **Rutas:** En esta variable se permite ingresar rutas cercanas a la matriz fotovoltaica como lo son carreteras, vías de tren ó helipuertos. Es posible modificar el ángulo de visión del observador (máximo alcance de deslumbramiento potencial 50°) y si la ruta es unidireccional o bidireccional.
8. **Puntos de observación:** Se establecen los puntos de observación donde se requiere enfocar el análisis de deslumbramiento. Si se trata de una torre de control de tráfico aéreo, se permite seleccionarlo como este. Para más precisión se permite ingresar las coordenadas geográficas, elevación del terreno y altura de la torre de control (si es una de estas).

Supuestos y limitaciones del programa:

La herramienta SGHAT de ForgeSolar tiene ciertos supuestos y limitaciones para el análisis del proyecto dentro de los cuáles se encuentran los siguientes:

- ✓ El software no representa rigurosidad geométrica detallada de los sistemas, es decir, no toma en cuenta espacios entre los módulos, estructuras de soporte y altura variable de la matriz fotovoltaica.
- ✓ El algoritmo asume que la matriz fotovoltaica está alineada con un plano definido por las alturas totales aproximadas de los vértices fotovoltaicos. Para una mayor precisión, el usuario debe realizar ajustes mínimos y máximos para delimitar la altura del plano que contiene la matriz solar.
- ✓ El software no tiene en cuenta obstáculos (artificiales o naturales) entre los puntos de observación y alguna instalación solar previa que pueda obstruir el deslumbramiento observado.
- ✓ No se consideran las afectaciones a la irradiancia normal directa que la cobertura de nubes, atenuación atmosférica u otros efectos ambientales puedan traer.
- ✓ El riesgo ocular predicho por el análisis no considera una serie de factores ambientales, ópticos y humanos, que pueden ser inciertos y variar.
- ✓ Las gráficas de deslumbramiento son representaciones simplificadas de datos del análisis. Las emanaciones reales y los resultados pueden variar.

Configuración del software ForgeSolar para el análisis de deslumbramientos:

A continuación se presentan los parámetros que se tuvieron en cuenta al configurar el software para realizar las simulaciones de deslumbramientos en el Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla; se tiene en cuenta que algunos de estos valores son predeterminados por el sistema lo que representa que los resultados están bajo condiciones ideales.

Tabla 6.1: Parámetros específicos del aeropuerto de San Andrés. Fuente: Autores

Elemento	Parámetro	Valor
Paneles	Altura sobre el nivel del mar	8-17 m
	Inclinación	12-33 °
	Acimut	56-326 °
	Orientación	Depende de la superficie.
	Material del panel	Vidrio con textura ligera con ARC o Vidrio liso con ARC.
	Tipo de sistema	Fijo (sin seguimiento solar).
Torre de control	Altura	9 m
Rutas de vuelo	Pendiente de planeo	3 °
	Altura de cruce del umbral	15,24 m
	Ángulo de visión descendente máximo	30 °
	Ángulo de visión azimutal	50 °
	Altura sobre dos millas	Umbral 06 (214,61 m) ; Umbral 24 (191,68 m)

Capítulo 7

Propuestas - SFV en el Aeropuerto Internacional Gustavo Rojas Pinilla de San Andrés

7.1. Contextualización

El Aeropuerto Internacional Gustavo Rojas Pinilla está ubicado en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, en el mar Caribe colombiano. Cuenta con una extensión de 27 km^2 , y está ubicado a 720 km del noroeste de la costa colombiana. Por su ubicación, y teniendo una elevación máxima de 85 metros sobre el nivel del mar, cuenta con un clima cálido-seco donde la temperatura promedio es de $27,1^\circ\text{C}$ y el promedio de lluvia anual es de 1.881 mm [37].

La actividad económica de la isla se fundamenta en el comercio, turismo, y en actividades de subsistencia como la agricultura y la pesca. Aunque el crecimiento turístico en la zona ha sido acelerado, la región no está preparada en infraestructura hotelera, servicios públicos como el acueducto, **electricidad**, ni infraestructura vial y movilidad. A pesar de esto, los pronósticos dictan que la economía de la isla seguirá en crecimiento gracias a la creación de nuevas rutas aéreas y a la dinamización del mercado por el auge de las aerolíneas de bajo costo.

Aunque la isla se encuentra en un proceso de desarrollo por su atractivo turístico, las cifras de contaminación que se generan desde sus plantas de producción de energía son alarmantes, pues se estima que al año sus plantas consumen aproximadamente 12 millones de galones de combustible diésel para poder abastecer eléctricamente la isla [9], consumo que representa la producción de más de 134.000 toneladas de CO_2 y que impacta negativamente el ambiente por la emisión significativa de gases de efecto invernadero. El archipiélago de San Andrés al ser una zona no interconectada del territorio colombiano, abastece la totalidad de su demanda energética a base de combustibles fósiles; y el aero-

puerto, al no contar con una fuente de energía propia o alternativa que no se base en la quema de combustibles, debe comprar electricidad al proveedor de energía SOPESA S.A. haciendo que el uso de energía represente un costo operativo considerable [10].

7.1.1. Selección de áreas para la instalación de módulos SFV

Para las propuestas, con el fin de adquirir el mayor aprovechamiento y eficiencia de la energía solar fotovoltaica para suministrar al aeropuerto, fueron seleccionadas las áreas que se ilustran en la figura 7.1. El motivo de selección de estas áreas se debe principalmente a que el Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla no cuenta con suficientes zonas verdes para realizar una instalación solar fotovoltaica completamente en tierra.

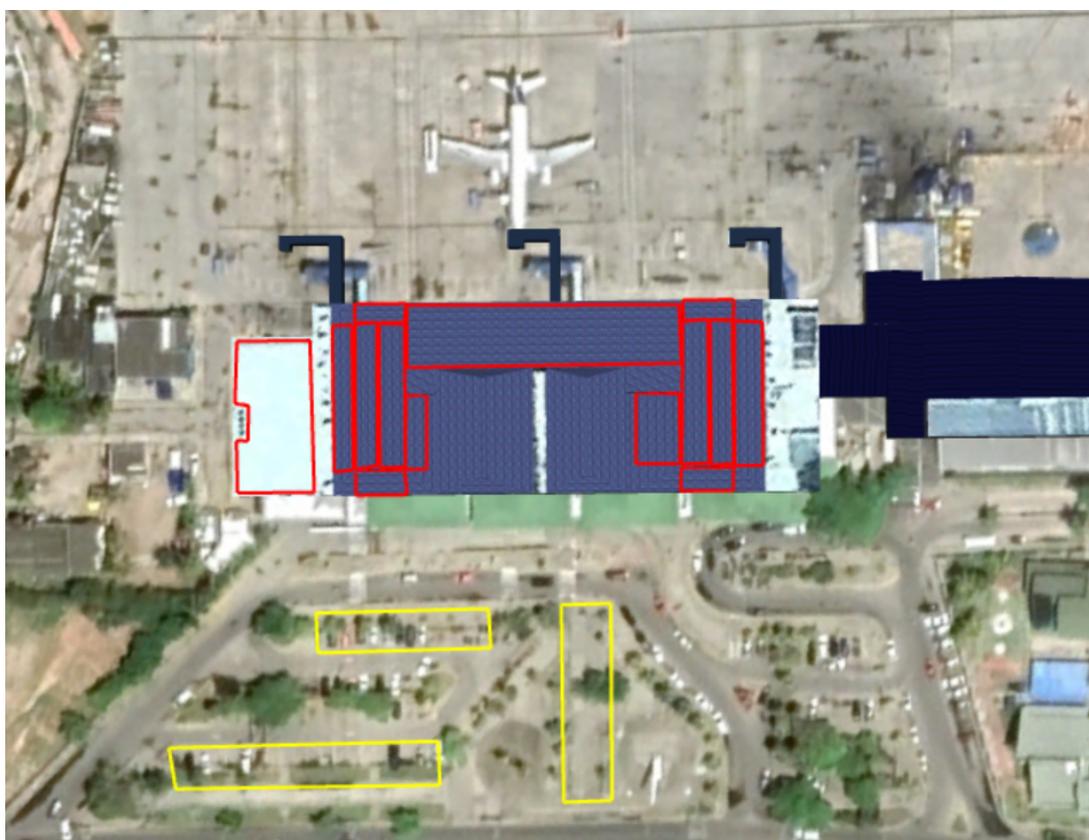


Figura 7.1: Áreas seleccionadas para instalación de módulos fotovoltaicos de las propuestas. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth

Dentro de las áreas aprovechables que son propiedad del aeropuerto, se escogieron las áreas delimitadas que se ilustran en la figura 7.1 por los marcos rojos que cuentan con un área total aproximada de $2.750 m^2$. Mientras, las áreas delimitadas por los marcos amarillos presentes cuentan con un área total aproximada de $1.400 m^2$, corresponden al parqueadero del aeropuerto, pero este es propiedad de la gobernación de San Andrés por lo que la instalación de módulos se consideran como independientes a los que se lleguen a instalar en el techo de la terminal.

7.2. Propuesta 1: Fuente Primaria

Con la primera propuesta se pretende llegar a cubrir todo el suministro energético del aeropuerto aprovechando las áreas disponibles y el potencial de irradiación global que recibe la isla del Caribe colombiano. Para lograr la producción de la cantidad de energía de 256.000 kWh al mes, siendo este valor un promedio mensual de los datos suministrados por la electrificadora “**SOPESA S.A.**”, se presentan en la sección 8.2 los parámetros a tomar en cuenta para el dimensionamiento, los cuales incluyen el número de paneles, su ubicación, su disposición, como también los demás dispositivos que conforman un SFV.

7.2.1. Paneles solares rígidos

Los paneles rígidos son módulos que permiten adquirir un buen potencial de energía y tienen un tiempo de vida útil cercano a los 30 años. En esta propuesta se pretende utilizar dichos paneles en todas las áreas disponibles para la instalación solar fotovoltaica.



Figura 7.2: Módulo solar fotovoltaico rígido. Fuente: Autosolar

En la figura 7.2 se presenta el módulo de 470 W de potencia máxima considerado para la primera propuesta. Este es seleccionado debido a su eficiencia que es de cerca de un 21 %, porcentaje mayor a los módulos de fabricación en Silicio comunes; así como de su tecnología de celda partida o PERC, la cual permite un gran desempeño en generación de energía ya que sus celdas cuentan con separaciones independientes, debido a que en el momento de tener una sombra que afecte la obtención de radiación no se afectará la producción de todo el módulo, como ocurre en aquellos que no cuentan con esta tecnología, por el contrario, solo la zona afectada dejará de producir energía, mientras que las demás

celdas continúan produciendo energía en un porcentaje más alto.

7.2.2. Paneles solares en el techo de la terminal y en espacios del estacionamiento

Para cubrir el suministro energético del Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla de San Andrés se llevará a cabo el dimensionamiento de un sistema solar fotovoltaico utilizando módulos rígidos sobre las superficies del techo de la terminal aérea. Sin embargo, para estudiar otra opción que permita satisfacer la demanda energética de 256.000 *kWh* al mes, se considerará evaluar las áreas externas que posee el estacionamiento que son propiedad de la isla, y permiten maximizar la recolección y producción de energía solar fotovoltaica.

7.3. Propuesta 2: Fuente Secundaria

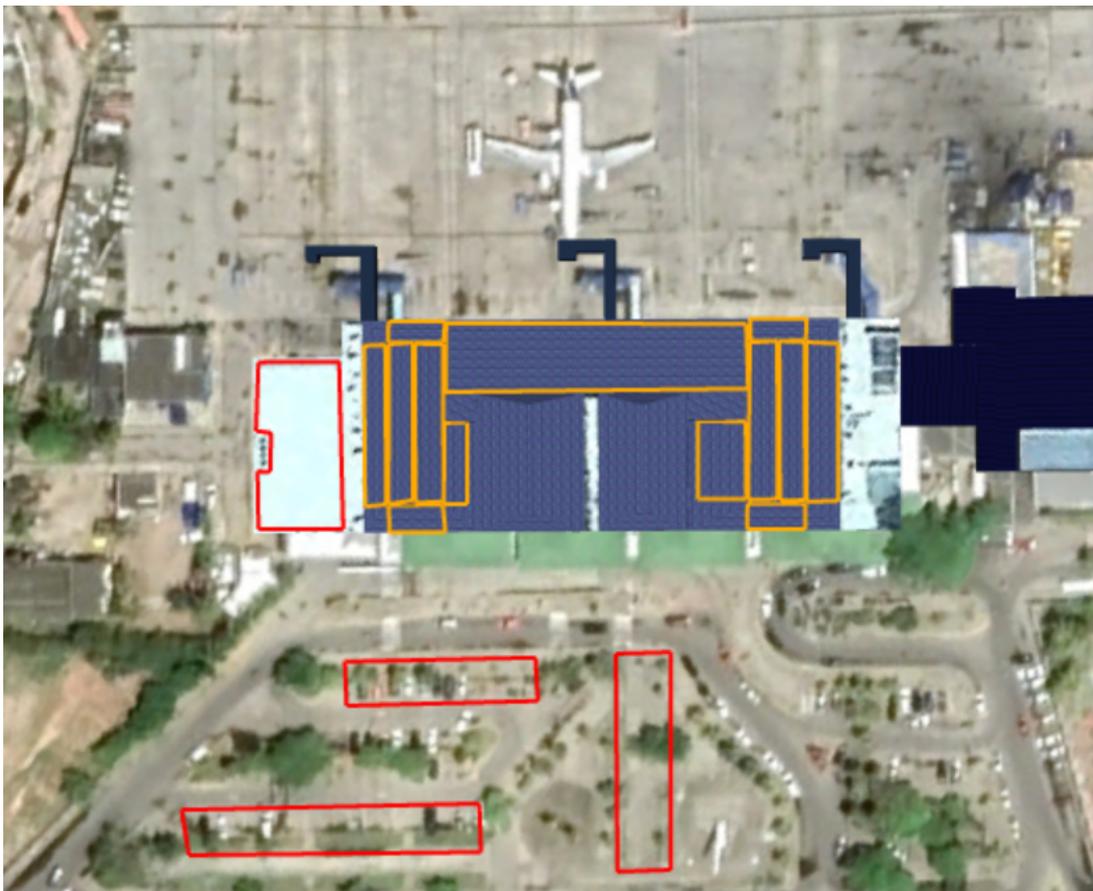


Figura 7.3: Áreas seleccionadas para instalación de módulos fotovoltaicos según la propuesta 2. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth

La meta de la segunda propuesta consiste en utilizar un sistema solar fotovoltaico como fuente secundaria llegando a cubrir principalmente las instalaciones y equipos que por

normativa aeronáutica deben permanecer funcionando en caso de que la fuente primaria no esté suministrando energía al aeropuerto. El estimado de energía requerida por la fuente secundaria se realiza mediante la información suministrada por el Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla de las fuentes secundarias que dispone el aeropuerto, siendo cerca de 34.500 kWh al mes de energía que requiere la terminal aérea y ayudas visuales. Del mismo modo que en la propuesta 1, se presentan en la sección 8.3 los parámetros a tomar en cuenta para el dimensionamiento que incluye el número de paneles, su ubicación, su disposición, como también los demás dispositivos que conforman un SFV.

Como parte de la evaluación de esta propuesta, se ilustran en la figura 7.3 los marcos de color naranja (para implementación de módulos flexibles) y los marcos de color rojo (para implementación de módulos rígidos) como la ubicación de análisis de este apartado.

7.3.1. Paneles solares mixtos (rígidos y flexibles)

Los paneles solares flexibles cuentan con algunas ventajas sobre los rígidos, como p. ej. facilidad de montaje e instalación en cualquier superficie, lo que reduce sus tiempos de instalación y costos de montaje; así como la capacidad de recolectar energía con poca luz. Sin embargo, la principal desventaja que tienen frente a los rígidos es el ciclo de vida útil siendo el máximo de 15 años para los flexibles a comparación de los 30 años que pueden llegar a tener los rígidos.



Figura 7.4: Módulo solar fotovoltaico flexible. Fuente: SungoldSolar

A pesar de las ventajas y desventajas de cada uno, se puede llegar a tomar un uso eficiente de la recolección y producción de ambos módulos. Para esta propuesta se evalúan utilizar tanto los módulos rígidos (ver figura 7.2) como los módulos flexibles (ver figura 7.4), estos últimos seleccionados bajo esta referencia; ya que brinda, calidad-eficiencia de cerca del 24%, cubierta de baja reflectividad con base en un material plástico genera más confiabilidad en el momento de implementarlos en operaciones aéreas y una reducción de peso de cerca del 88% en comparación a módulo rígidos.

7.3.2. Paneles solares en el techo de la terminal y en espacios del estacionamiento

Para cubrir la demanda energética alternativa del aeropuerto, la cuál se aproxima a los 34.500 *kWh* al mes, se llevará a cabo el dimensionamiento de un sistema solar fotovoltaico utilizando módulos rígidos y módulos flexibles sobre las superficies del techo de la terminal aérea. No obstante, para estudiar otra opción que permita satisfacer dicha demanda en la terminal y ayudas visuales, se evaluarán las áreas que se encuentran en el estacionamiento con el fin de estimar la producción de energía que podría aportar este sector a la propuesta.

Capítulo 8

Resultados y Análisis de Resultados

8.1. Evaluación de las propuestas

Siguiendo la metodología propuesta, por medio de MeteoBlue se obtuvo el gráfico mostrado en la figura 8.1 donde se pueden evidenciar los días con cielo nublado (gris oscuro), parcialmente nublados (gris claro) y soleados (amarillo), al tiempo que la línea azul representa los días de precipitación.

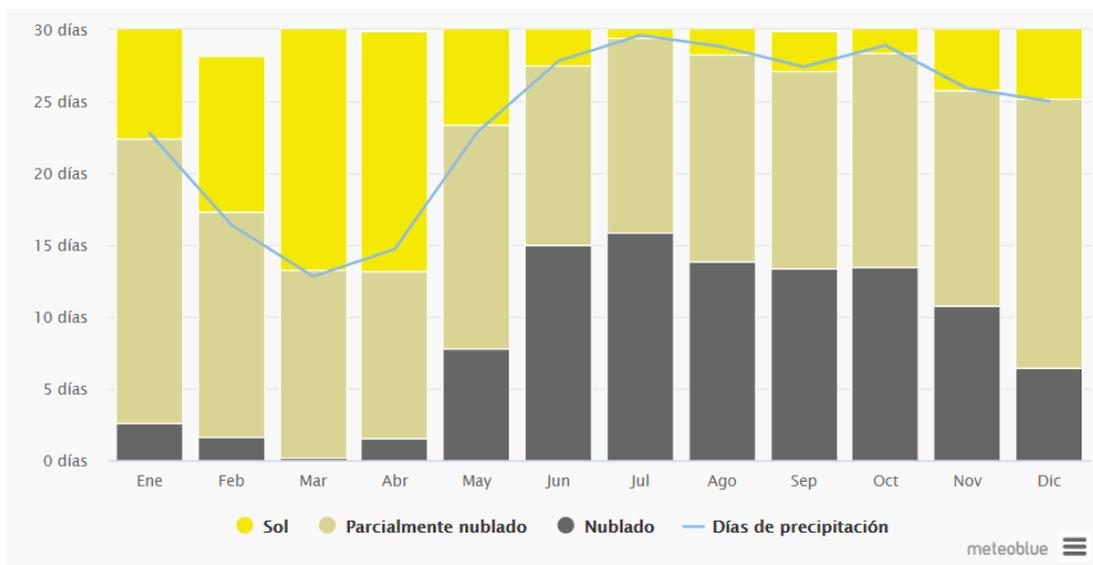


Figura 8.1: Parámetros climatológicos por MeteoBlue. [96]

Se puede analizar de esta gráfica que el mes con más días nublados es Julio; Enero y Diciembre, son los meses con más días parcialmente nublados al año; mientras que, Marzo y Abril son los meses con más días soleados al año, según el promedio realizado por MeteoBlue, y con base en esto, se realizó la extracción de datos de cada mes para cada variable climatológica, con el fin de encontrar un promedio, como se muestra en la tabla 8.1 utilizando este resultado para el cálculo de los componentes del sistema fotovoltaico.

Tabla 8.1: Promedio de parámetros meteorológicos. Fuente: Autores

Parámetro	Valor
Días nublados para cada mes	9
Días de sol para cada mes	7
Días parcialmente nublados para cada mes	15

8.2. Propuesta 1: Fuente primaria

8.2.1. Propuesta 1.1. Paneles solares rígidos en la Terminal de pasajeros

Determinación de la energía total a cubrir

El sistema fotovoltaico que cubriría el 100 % de la energía en el Aeropuerto de la Isla de San Andrés fue diseñado con una tensión nominal de 48V, y esto con el fin de, en primera instancia, reducir la cantidad de componentes utilizados en el SFV; segundo, los sistemas que requieran un consumo mayor a 4000 *Wh* por día requieren una tensión de 48V [97], esto es posible debido a que el sistema solar fotovoltaico adquiere la energía a través de corriente continua (DC) y posteriormente se convierte a través del inversor para suministrar al aeropuerto en forma de corriente alterna (AC), lo cual aplica para este caso; y tercero, proveer al Aeropuerto Internacional Gustavo Rojas Pinilla, de un sistema confiable ante cualquier adversidad o problema que pueda presentarse y equipos sólidos que puedan producir una cantidad de energía tan considerable como se observará en breve.

Seguido de esto, con los datos brindados de energía total consumida desde el año 2018 hasta el 2020, para el Aeropuerto encargado de servir a esta isla del Caribe colombiano, por la empresa dedicada a suministrar energía en la Isla de San Andrés, es decir, SOPESA; se desarrolló un ponderado desde el mes de Enero hasta Diciembre de cada uno de los años mencionados, con el fin de obtener los 3 resultados enunciados en la tabla 8.2.

Tabla 8.2: Gasto energético mensual de SKSP en los últimos 3 años. Fuente: Autores y SOPESA

Parámetro	Valor (kWh/mes)
Gasto energético 2018	312000
Gasto energético 2019	295264
Gasto energético 2020	159771

De los gastos energéticos que se muestran en la tabla 8.2, se desarrolló nuevamente un promedio mensual el cual se presenta en la tabla 8.3 con sus unidades equivalentes para facilitar los cálculos de dimensionamiento. Sin embargo, se aclara que este valor fue el

promedio de los datos reales suministrados mensualmente por SOPESA S.A. y para fines de cálculo se han asumidos constantes, no obstante, son datos que en la actualidad varían y dependen de factores ajenos a los intereses del proyecto.

Tabla 8.3: Tensión de 48V. Fuente: Autores

Parámetro	Valor
Gasto energético mensual (kWh/mes)	256000
Gasto energético mensual (Ah/mes)	5333333,3
Gasto energético diario (Ah/día)	177777,78

Dimensionamiento de los módulos fotovoltaicos (generadores)

Siguiendo la metodología propuesta para poder dimensionar la capacidad de generación que tendrá el SFV, por medio del Atlas de Radiación Solar de Colombia el cual cuenta con datos actualizados a 2017, después del análisis por año tipo de la región, se obtuvo que el mes que presenta el nivel de radiación más bajo es Noviembre con $4295,1 Wh/m^2$ o $15462,36 kJ/m^2$ como se muestra en la tabla 8.4, y con base en estos, se obtuvieron los demás resultados de una primera aproximación para los generadores.

Tabla 8.4: Determinación aproximada de generadores. Fuente: Autores

Parámetro	Valor
Gasto energético diario 10% (Ah/día)	195555,7
Nivel de radiación más bajo (kJ/m^2)	15462,36
Total de horas pico (langleys)	371,1
Horas solares pico (HSP)	4,304
Corriente mínima por módulo (A)	8,75
Producción por día (Ah/día)	37,66
# PS_T	5192

Con el objetivo de determinar el números de módulos fotovoltaicos más acertada, como ya fue mencionado anteriormente, se determina la cantidad de generadores que serán utilizados en el SFV para fuente primaria.

Tabla 8.5: Número de módulos en serie - JAM72S20 445-470 MR. Fuente: Autores

Parámetro	Valor
$V_{P.S}$ (V)	24
# módulos en serie	2

De igual manera, con lo parámetros ya definidos, fue obtenida la cantidad de generadores, en esta ocasión para una configuración en paralelo, siendo estos resultados para cada variable como se muestran enseguida.

Tabla 8.6: Número de módulos en paralelo - JAM72S20 445-470 MR. Fuente: Autores

Parámetro	Valor
C_i (Ah)	195555,5
HSS	7,3
I_{PG} (A)	26788,43
I_{MP} (A)	10,8
# módulos en paralelo	2480

Finalmente, se halla una cantidad corregida para el total de paneles, multiplicando los módulos en su configuración en serie y en paralelo, obteniendo un número corregido de **4960 generadores**.

Dimensionamiento del inversor

Encontrado el número correcto de módulos solares que se usarán en el sistema, se dimensiona el inversor con las ecuaciones ya definidas para este objetivo. Para ello, es necesario seleccionar una configuración de cierta cantidad de generadores por inversor, debido a que la tensión y corriente de salida de los mismos, es muy grande y no puede ser controlada por un solo inversor; por consiguiente, el inversor seleccionado es el **Solis (100-110)K-5G-SA** el cual cuenta con las especificaciones técnicas mostradas en el Anexo B de este documento.

Basado en las características técnicas y de funcionamiento óptimo del inversor como lo son su corriente de entrada Máxima y tensión de entrada máxima, siendo 260A y 110V, respectivamente; y siguiendo las pautas para los cálculos descritas en el Capítulo 6, los resultados obtenidos fueron los siguientes.

Tabla 8.7: Parámetros resueltos del inversor - Solis (100-110)K-5G-SA. Fuente: Autores

Parámetro	Valor
I_{mp} (A)	10,8
V_{mp} (V)	41,8
I_g Total (A)	13392
V_g Total (V)	83,6
I_g x grupo (A)	240
V_g x grupo (V)	84
Módulos en Paralelo x grupo	22
Módulos en Serie x grupo	2
Total módulos por grupo	44
Número de inversores	112

Dimensionamiento del banco de baterías (acumuladores)

La selección del acumulador es tan importante como la de los demás elementos del SFV, ya que en el momento en que los generadores no puedan cumplir su función, usualmente

en la noche y en días donde la nubosidad lo impida, es la energía extra acumulada en las baterías la que entrará en funcionamiento para proveer al Aeropuerto de San Andrés por el tiempo que sea necesario.

En esta etapa es donde los datos de la tabla 8.1 son de vital importancia, esto debido a que los acumuladores deben suplir de energía en los días nublados promedio al aeropuerto en su totalidad. Estos días nublados fueron aproximados a 10 como se muestra en la tabla 8.16, con respecto a los obtenidos por MeteoBlue, para tener un 1 día adicional como factor de seguridad para el sistema.

Tabla 8.8: Capacidad de acumulación- 2V2000Ah. Fuente: Autores

Parámetro	Valor
Profundidad de descarga de la batería	0,8
Días de autonomía para SKSP	10
Tensión nominal por batería (V)	2

Teniendo en cuenta la gran cantidad de corriente en Ah que debe suplir los acumuladores, se seleccionó baterías de referencia **OPzV2-2000(2V2000Ah)** para obtener un sistema seguro, que pueda ser capaz de acumular gran cantidad de energía y que en su relación tamaño-desempeño sea un equipo confiable y completo. Sus características técnicas son mostradas en el Anexo B de este documento.

Con esta información, se desarrollaron los cálculos para dimensionar el número de baterías que pueden ser usadas en el sistema fotovoltaico, obteniendo los resultados de la tabla 8.9 para funcionar como fuente primaria.

Tabla 8.9: Parámetros de acumuladores para la propuesta 1. Fuente: Autores

Parámetro	Valor
CA_b (A)	1947917
CA_{cb} (Ah)	2434896
CN_b (Ah)	2000
Número de acumuladores en serie	24
Número de acumuladores en paralelo	1218
Total de baterías	29232

Dimensionamiento del cableado

Para finalizar, el dimensionamiento del cableado debe ser hecho con cuidado, ya que de este depende que la energía sea suministrada de manera exitosa, primero hacia los demás componentes del sistema, y segundo hacia los elementos que hacen parte del Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla.

Siguiendo las ecuaciones para calcular el calibre adecuado del cable que permitirá trans-

portar la energía que será utilizada por el aeropuerto, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 8.10, obtenidos con base a detalles técnicos de los demás componentes.

Tabla 8.10: Capacidad del cableado - 2 Calibre 50mm. Fuente: Autores

Parámetro	Valor
I_{PG} (A)	508,57
P_{PG} pico del generador (W)	24411,43
Corriente del conductor (A)	610,28
Distancia máxima entre inversores y paneles (m)	40
Capacidad del cable (A)	700
Resistencia (Ω /km)	0,554
Resistencia del conductor (Ω)	0,02216

Se seleccionó el cable con referencia **TUV Solar Panel Wire Pv1 f** para poder comparar los requerimientos del sistema en cuanto al calibre y resistencia de estos, con base a la distancia máxima que se pueda considerar entre módulos, inversores y acumuladores que será no más de 40m, con el fin de evitar pérdidas. Este brindará así un gran rendimiento, incluyendo pocas pérdidas en cuanto a resistencia debido a sus características físicas y técnicas mostradas en la tabla 8.11. Para esta propuesta se escogieron dos cables con un Calibre de 50mm cada uno, para poder dar soporte a la alta corriente que será transportada por este y distribuir de manera correcta la energía generada.

Tabla 8.11: Características técnicas para conductores de referencia TUV Solar Panel Wire Pv1 f. [96]

Construction	Conductor Construction	Conductor	Outer	Resistance max.	Current Aarring Capacity
mm^2	mm	mm	mm	Ω/km	A
1x1.5	30x0.25	1.58	4.90	13.3	30
1x2.5	50x0.256	2.06	5.45	7.98	41
1x4.0	56x0.3	2.58	6.15	4.75	55
1x6	84x0.3	3.15	7.15	3.39	70
1x10	142x0.3	4.0	9.05	1.95	98
1x16	228x0.3	5.7	10.2	1.24	132
1x25	361x0.3	6.8	12.0	0.795	176
1x35	494x0.3	8.8	13.8	0.565	218
1x50	418x0.39	10.0	16.0	0.393	280
1x70	589x0.39	11.8	18.4	0.277	350
1x95	798x0.39	13.8	21.3	0.210	410
1x120	1007x0.39	15.6	21.6	0.164	480

8.2.2. Resultados de destellos y deslumbramientos

En esta apartado se muestran los resultados del análisis realizado a través de la herramienta de "ForgeSolar" para identificar si la instalación cumple con la normativa de la FAA al considerar las rutas de vuelo (aproximación de la aeronave) y la torre de control (ATCT).

Umbral 06: En la figura 8.2 se ilustra la previsión de ocurrencia anual de deslumbramiento que generan las matrices fotovoltaicas que se encuentran ubicados en la terminal aérea y el parqueadero. Los resultados obtenidos muestran que entre mayo, junio, julio y agosto se presenta bajo potencial en las horas de 6 a.m. y 7 a.m.; se reduce la probabilidad de aparición entre finales de mayo en las horas de 8 a.m. y 9 a.m. Entre 10 a.m. y 11 a.m. se presenta a finales de abril, finales de mayo, julio y comienzos de agosto. Además, de acuerdo con la tabla 4.1, para aproximación de la aeronave este resultado cumple con la política de la FAA.

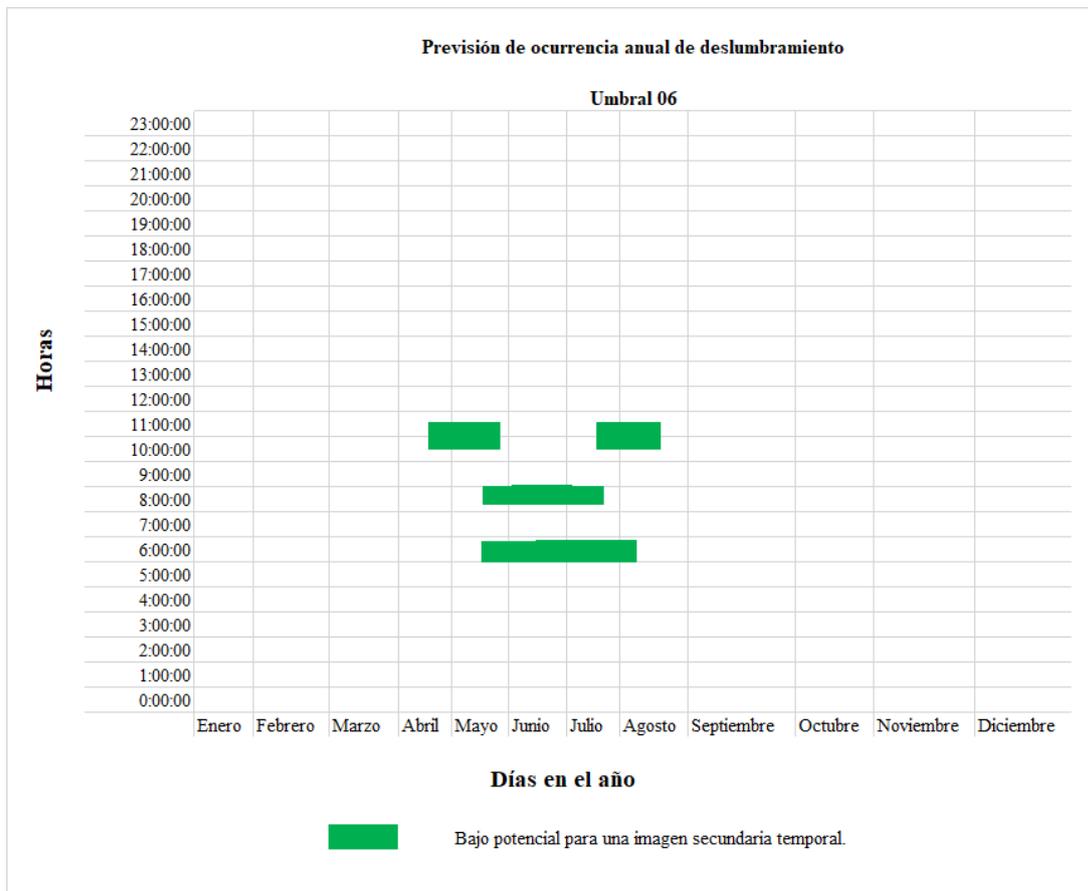


Figura 8.2: Previsión de ocurrencia anual de deslumbramiento en el Umbral 06. Fuente: ForgeSolar

Umbral 24: En la figura 8.3 se ilustra la previsión de ocurrencia anual de deslumbramiento que generan las matrices fotovoltaicas ubicadas en las áreas preestablecidas para esta propuesta. La previsión generada en los resultados muestra que en los meses de enero, inicios de febrero, septiembre, octubre, noviembre y diciembre hay una probabilidad de ocurrencia entre el medio día y la 1 p.m. Mientras que entre las 3 p.m. y 4 p.m. la probabilidad de ocurrencia se encuentra a finales del mes de octubre, noviembre, diciembre, enero y a inicios de febrero. Este tipo de deslumbramiento es aceptable puesto que posee bajo potencial de generar una imagen secundaria temporal a la vista del observador y la FAA lo considera aceptable para aproximación de la aeronave.

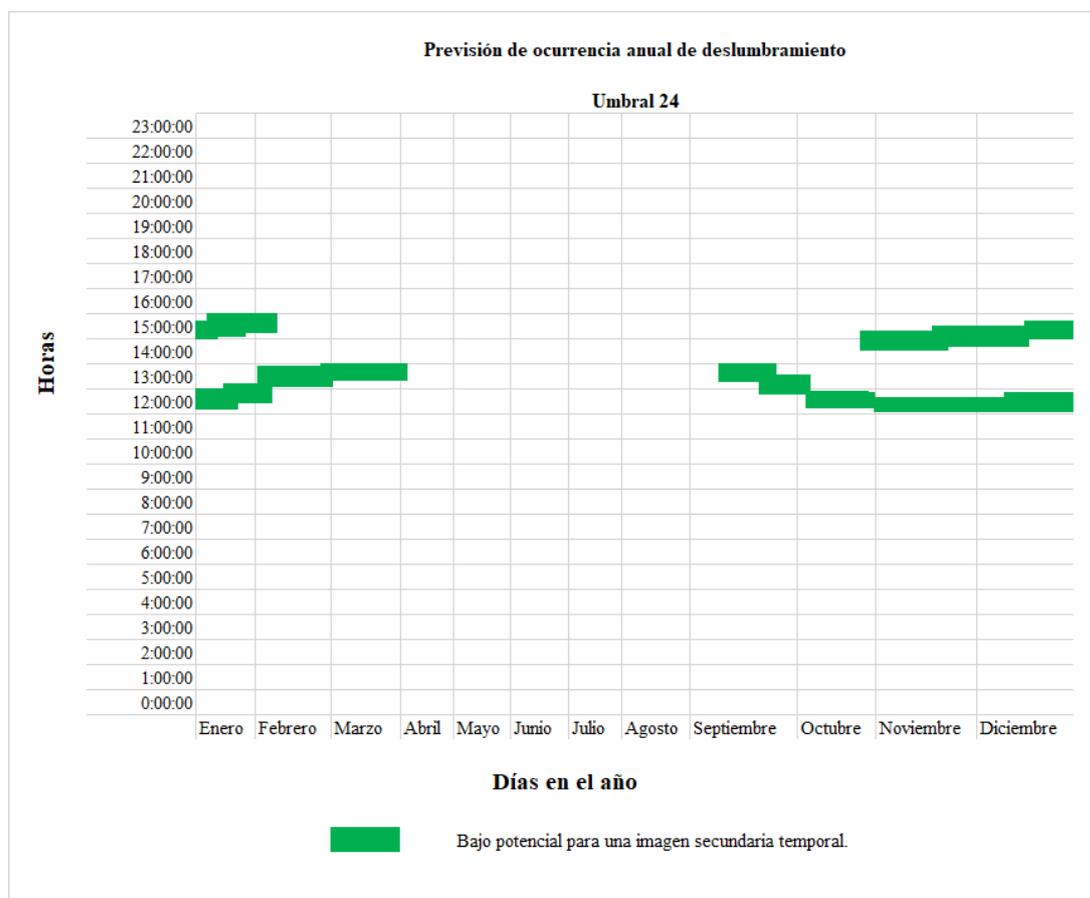


Figura 8.3: Previsión de ocurrencia anual de deslumbramiento en el Umbral 24. Fuente: ForgeSolar

Torre de control: En la figura 8.4 se ilustra la previsión de ocurrencia anual de deslumbramiento que generan las matrices fotovoltaicas en las áreas preestablecidas hacia torre de control (ATCT). La mayor probabilidad de ocurrencia de deslumbramiento se encuentra en los meses de febrero, marzo y octubre en donde el deslumbramiento que se llega producir es de tipo inicialmente verde y posteriormente amarillo en las horas de 7 a.m. y 8 a.m. Luego, existe probabilidad de ocurrencia de tipo verde que se produce en los

meses de enero, febrero, marzo, septiembre, octubre, noviembre y finales de diciembre en las horas de 8 a.m. y 9 a.m.; en donde la tendencia entre finales de noviembre, diciembre, enero y comienzos de febrero es de producirse de 9 a.m. y 10 a.m. Estos tipos de deslumbramientos no cumplen la política de la FAA debido a que en torre de control por ningún motivo se debe generar algún tipo de destellos y deslumbramientos.

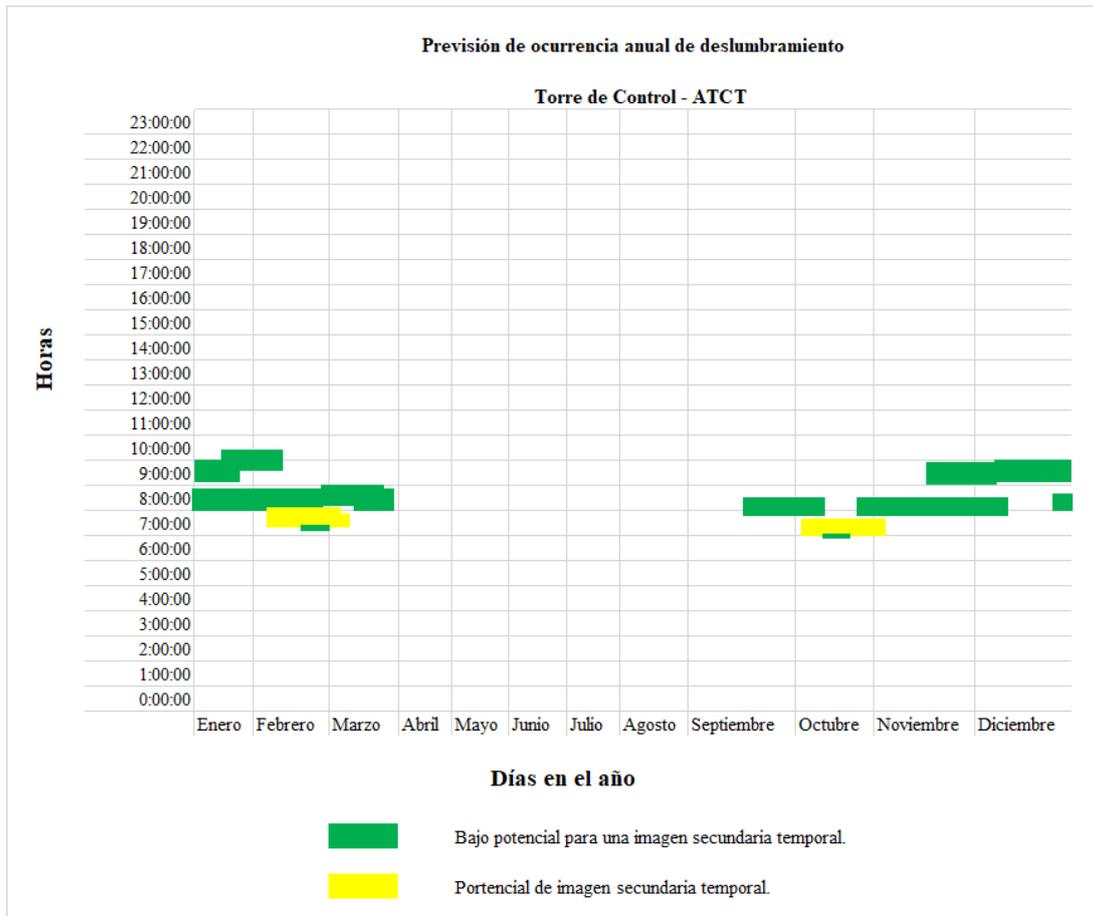


Figura 8.4: Previsión de ocurrencia anual de deslumbramiento en torre de control. Fuente: ForgeSolar

8.2.3. Propuesta 1.2. Paneles solares rígidos en el techo de la terminal y en espacios del estacionamiento

Determinación de la energía total a cubrir

Para esta propuesta, la metodología para la obtención del gasto energético del aeropuerto que el sistema fotovoltaico cambia un poco, debido en gran parte a que se está considerando un espacio adicional o fuera de los límites concesionados por la Aeronáutica Civil, como lo es el espacio del estacionamiento que funciona para este aeropuerto, tal y como se evidencia en la figura 7.3.

Se tomaron mediciones de cada uno de los espacios disponibles ya mostrados, las cuales fueron de importancia para poder tener una noción más clara de la cantidad de componentes, para el caso de las cubiertas y estacionamientos, los módulos fotovoltaicos; y con base a esto y las ecuaciones ya planteadas poder obtener un total de energía que el sistema podría generar, con el fin de poder comparar esta cantidad de energía con el gasto mensual promedio que tiene el aeropuerto y analizar si es posible que funcione como fuente primaria contando con estas áreas adicionales. Para ello, considerando las especificaciones físicas de los módulos, enseñadas en el Anexo B, se obtuvo un área de cada uno de estos para poder relacionarla con la disponible para instalaciones. Cada módulo comprende un área aproximada de $2,5 m^2$, mientras que la disponibilidad del terminal y estacionamiento se encuentra en $4139 m^2$.

Con estos datos claros, se relacionan entre sí, resultando una cantidad de 1656 módulos fotovoltaicos que podrían instalarse en estas áreas, por lo cual, con base a este resultado y ya teniendo planteadas las ecuaciones dispuestas en la metodología, se modificó la energía total generada hasta obtener un aproximado en generación de $85200 kWh/mes$, cifra que se utilizará para continuar con el cálculo de los demás componentes. Es importante tener en cuenta, que la tensión nominal del sistema se sigue manteniendo en 48V con el fin de generar comparaciones más acertadas.

Tabla 8.12: Producción total de energía, propuesta 1.2. Fuente: Autores

Parámetro	Valor
Generación mensual total (kWh/mes)	85200
Generación mensual total (Ah/mes)	1775000
Generación mensual total (Ah/día)	59166,66

Dimensionamiento de los módulos fotovoltaicos (generadores)

Siguiendo la metodología propuesta para poder dimensionar la capacidad de generación que tendrá el SFV, y al igual que la propuesta anterior, se trabajó con Noviembre como el mes con los niveles de radiación más bajo, creando un supuesto que todos los meses del año puedan tener niveles así de críticos, se llegaron a los resultados mostrados a continuación.

Tabla 8.13: Determinación aproximada de generadores, propuesta 1.2. Fuente: Autores

Parámetro	Valor
Gasto energético diario 10% (Ah/día)	65083,33
Nivel de radiación más bajo (kJ/m^2)	15462,36
Total de horas pico (langleys)	371,1
Horas solares pico (HSP)	4,304
Corriente mínima por módulo (A)	8,75
Producción por día (Ah/día)	37,66
$\# PS_T$	1728

El número de módulos corregido corresponde así, a la cantidad ya encontrada en los cálculos anteriores, donde en la tabla 8.14, se evidencian como se corresponderían el número de módulos en serie.

Tabla 8.14: Número de módulos en serie - JAM72S20 445-470 MR. Fuente: Autores

Parámetro	Valor
$V_{P.S}$ (V)	24
# módulos en serie	2

De igual manera, con lo parámetros ya definidos, fue obtenida la cantidad de generadores, para la configuración en paralelo, siendo estos resultados mostrados en la tabla 8.15 de la siguiente manera.

Tabla 8.15: Número de módulos en paralelo - propuesta 1.2. Fuente: Autores

Parámetro	Valor
C_i (Ah)	65083,3
HSS	7,3
I_{PG} (A)	8915,52
I_{MP} (A)	10,8
# módulos en paralelo	826

La cantidad corregida para el total de paneles, multiplicando los módulos en su configuración en serie y en paralelo, es así un poco más baja que la calculada inicialmente con las áreas disponibles, resultando un total de **1652 paneles**, providenciando un poco más de espacio en las cubiertas para instalaciones de soportes adicionales que sean necesarios.

Dimensionamiento del banco de baterías (acumuladores)

En esta etapa los días nublados fueron de igual manera aproximados a 10 como se muestra en la tabla 8.16, con respecto a los obtenidos por MeteoBlue, para tener un día adicional como factor de seguridad para el sistema.

Tabla 8.16: Capacidad de acumulación- 2V2000Ah. Fuente: Autores

Parámetro	Valor
Profundidad de descarga de la batería	0,8
Días de autonomía para SKSP	10
Tensión nominal por batería (V)	2

Con la información técnica de la batería, enseñada en el Anexo B, se desarrollaron los cálculos para dimensionar el número de baterías que pueden ser usadas en el sistema fotovoltaico, obteniendo los resultados de la tabla 8.17 para funcionar como fuente primaria.

Tabla 8.17: Parámetros de acumuladores para la propuesta 1.2. Fuente: Autores

Parámetro	Valor
CA_b (A)	650833,3
CA_{cb} (Ah)	813541,66
CN_b (Ah)	2000
Número de acumuladores en serie	24
Número de acumuladores en paralelo	407
Total de baterías	9768

Dimensionamiento del inversor

Para esto, es necesario seleccionar una configuración de cierta cantidad de generadores por inversor, debido a que la tensión y corriente de salida de los mismos, es muy grande y no puede ser controlada por un solo inversor. La referencia seleccionada de inversor es similar a la propuesta anterior, aclarando que para fines de comparación y análisis entre propuestas, esto es necesario.

Tabla 8.18: Parámetros resueltos del inversor - propuesta 1.2. Fuente: Autores

Parámetro	Valor
I_{mp} (A)	10,8
V_{mp} (V)	41,8
I_g Total (A)	4460,4
V_g Total (V)	83,6
I_g x grupo (A)	240
V_g x grupo (V)	84
Módulos en Paralelo x grupo	22
Módulos en Serie x grupo	2
Total módulos por grupo	44
Número de inversores	112

Dimensionamiento del cableado

Esta estimación debe ser hecho con precaución, ya que de este depende que la energía sea suministrada de manera exitosa, primero hacia los demás componentes del sistema, y segundo hacia los demás elementos del aeródromo. Siguiendo las ecuaciones mencionadas en la metodología, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 8.19, con base a detalles técnicos de los demás componentes.

Para esta propuesta se escogieron dos cables con un Calibre de 50mm cada uno, para poder dar soporte a la alta corriente que será transportada por este y distribuir de manera correcta la energía generada, cuyas especificaciones eléctricas se enseñan en la tabla 8.11.

Tabla 8.19: Capacidad del cableado - propuesta 1.2. Fuente: Autores

Parámetro	Valor
I_{PG} (A)	412,03
P_{PG} pico del generador (W)	19777,77
Corriente del conductor (A)	494,44
Distancia máxima entre inversores y paneles (m)	40
Capacidad del cable (A)	560
Resistencia (Ω /km)	0,786
Resistencia del conductor (Ω)	0,03144

8.3. Propuesta 2: Fuente Secundaria

8.3.1. Propuesta 2.1. Fuente secundaria (paneles rígidos y flexibles)

Determinación de la energía total a cubrir

Al igual que para la primera propuesta, en este caso se debe determinar la cantidad de energía que el sistema debe atender para poder funcionar como fuente secundaria de energía.

Por esto, se realizó en primera instancia, una sumatoria total de la energía que provee cada una de las fuentes de energía secundaria con las que cuenta el Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla, ofreciendo un valor cercano a los 1150 $kWh/día$ las cuales, actualmente solo son utilizadas en situaciones de emergencia o para pruebas de las mismas, siendo entonces, este valor el que el sistema debe ser capaz de satisfacer para poder reemplazar las fuentes actuales.

Posterior a esto, se realizó la estimación de áreas disponibles con las que cuenta el terminal del aeropuerto tal como se evidencia en la figura 7.3, pero sin tener en cuenta el espacio adicional fuera del mismo.

Así pues, para el espacio delimitado con el cuadro rojo de esta misma figura, dentro del terminal, cuenta con un área cercana a los 529 m^2 y corresponde al terminal internacional de pasajeros. Basado en esto, con la misma elección de módulo fotovoltaico escogido para la primera propuesta (**JAM72S20 445-470 MR**), y sus características físicas propias descritas en el Anexo B y la tabla , se realizó un estimado de la cantidad de módulos que pueden ser ubicados en esta área como se demuestra en las ecuaciones (22) y (23).

$$\#MTI_{max} = \frac{\text{Área disponible } m^2}{\text{Área por módulo } m^2} \quad (22)$$

$$\#MTI_{max} = \frac{529m^2}{2,5m^2} = 211 \quad (23)$$

Con esta cantidad de módulos obtenidos y con base a las ecuaciones definidas en la metodología, se modificó la energía que se generará en esta área de la terminal, resultando en 240,5 kWh/día de los 1150 kWh/día que se necesita producir, por lo cual los 909,5 kWh/día serán atendidos por los módulos flexibles dispuestos en los cuadros naranjas de la figura 7.3, como se expone en la tabla 8.20.

Adicional a esto, la elección de la tensión nominal a la que debe trabajar el sistema, se mantuvo en 48V, mismo valor que en la primera propuesta, esto con el fin de poder generar una comparación entre ambas propuestas, además de que el total de energía a atender sigue siendo un gran porcentaje, lo que requiere equipos confiables y de gran performance operativo.

Tabla 8.20: Determinación de energía total para la propuesta 2.1. Fuente: Autores

Parámetro	Tensión 48V	Tensión 48V
Gasto energético a atender (kWh/día)	909,5	240,5
Gasto energético a atender (Wh/día)	909500	240500
Gasto energético a atender (Ah/día)	37895,8	7515,62

De acuerdo a estos parámetros definidos, se selecciona el tipo de módulo flexible que se implementará en el sistema y cuyas características técnicas mostradas en la tabla 8.3.3, son las de más alto rendimiento y generación, lo cual es de vital importancia para cumplir con los objetivos del sistema en el aeropuerto.

Tabla 8.21: Comparación entre parámetros de los paneles flexibles vs paneles rígidos. Fuente: Autores

Descripción	Panel flexible	Panel rígido	Diferencia
Dimensiones (mm)	1460 x 540 x 30	2112 x 1052 x 35	180 x 452 x 0,5
Área (m^2)	0,9	2,5	1,6
Número de celdas	44	144	100
Peso (kg)	2,86	25	22,14
P_{max} (W)	150	470	320
P_{min} (W)	120	445	325
Vida útil (W)	10 - 15 años	20 - 30 años	10 - 15 años
% Eficiencia	22,6 - 23,6	20,6	2 - 3

Dimensionamiento de los módulos fotovoltaicos

Según la metodología y los parámetros descritos en la misma, se desarrollaron los cálculos necesarios para poder obtener una primer aproximación para el número de módulos

que se basan en datos, principalmente, climatológicos y técnicos, como se muestra en la tabla 8.24. Allí se encuentra una síntesis de los resultados para cada tipo de panel, teniendo en cuenta la energía total que cada uno debe satisfacer, según su disponibilidad de espacio.

Tabla 8.22: Capacidad de generación de los módulos. Fuente: Autores

Parámetro	Módulo flexible	Módulo rígido
Gasto energético diario 10% (Ah/día)	36781,25	11945,31
Corriente mínima por módulo (A)	5,97	8,75
Producción por día (Ah/día)	25,7	37,66
Número de módulos aproximado	1431	318
# PS_T	844	304

Con el objetivo de determinar el números de módulos fotovoltaicos corregida, se determina la cantidad de generadores que serán utilizados en el SFV como fuente secundaria.

Tabla 8.23: Número de módulos en serie, propuesta 2.1. Fuente: Autores

Parámetro	Módulo flexible	Módulo rígido
$V_{P.S}$ (V)	24	24
# módulos en serie	2	2

Posteriormente, fue obtenida la cantidad de generadores, en esta ocasión para una configuración en paralelo, siendo estos resultados para cada variable como se muestran enseguida.

Tabla 8.24: Número de módulos en paralelo, propuesta 2.1 Fuente: Autores

Parámetro	Módulo flexible	Módulo rígido
C_i (Ah)	41685,41	8267,18
HSS	7,3	7,3
I_{PG} (A)	5710,33	1132,49
I_{MP} (A)	5,97	10,8
# módulos en paralelo	957	105

Con estos resultados, se halla una cantidad corregida para el total de paneles, multiplicando los módulos en su configuración en serie y en paralelo, obteniendo un número corregido de 1914 generadores flexibles y 210 generadores rígidos.

Dimensionamiento del inversor

Al igual que en la primera propuesta, los valores que el inversor debe garantizar para el sistema en diseño, son desarrollados por medio de las Ecuaciones (12) y (13).

Tabla 8.25: Parámetros del inversor - Solis (100-110)K-5G-SA. Fuente: Autores

Parámetro	Módulo flexible	Módulo rígido
I_{mp} (A)	5,97	10,8
V_{mp} (V)	25,5	41,8
I_g Total (A)	2857	567
V_g Total (V)	51	83,6
I_g x grupo (A)	240	240
V_g x grupo (V)	60	84
Módulos en Paralelo x grupo	40	22
Módulos en Serie x grupo	2	2
Total por grupo	80	44
Número de inversores	24	5

Los resultados para I_G y V_G son en primera instancia para valores totales de todo el sistema, por lo cual los inversores deben ser capaces de cubrir la corriente y tensión de salida de los generadores. Una vez seleccionado el inversor, cuya referencia para este caso, es la ya utilizada anteriormente (**Solis-(100-110)K-5G-SA**), según sus valores máximos a la entrada para corriente y tensión, se dividió en grupos más pequeños de módulos con el fin de que diversos inversores cubran todos los niveles de Amperaje y Voltaje necesarios para funcionar como fuente secundaria. En la tabla 8.25, se pueden notar los resultados para cada variable mencionada, donde es necesario aclarar que para cada grupo dividido de módulos, se debe mantener la misma configuración en serie para no alterar la producción energética.

Dimensionamiento del banco de baterías (acumuladores)

A continuación, en la tabla 8.26 se muestran los resultados obtenidos, siguiendo la metodología ya propuesta para dimensionar el número de acumuladores necesarios para funcionar como fuente secundaria.

La referencia seleccionada para la batería es la misma definida para la primera propuesta, cuyas características técnicas se muestran en el Anexo B y en la tabla 8.16. También se usa la misma cantidad de días de autonomía para brindar seguridad al sistema, y en caso de una falla total de la fuente primaria, este pueda brindarle energía para un funcionamiento muy básico y esencial por 10 días seguidos.

Tabla 8.26: Número de acumuladores, propuesta 2.1. Fuente: Autores

Parámetro	Módulo flexible	Módulo rígido
CA_b (A)	416854,17	82671,875
CA_{cb} (Ah)	521067,71	103339,84
CN_b (Ah)	2000	2000
Número de acumuladores en serie	24	24
Número de acumuladores en paralelo	261	52
Total de baterías	6264	1248

Dimensionamiento del cableado

Atendiendo las ecuaciones para realizar el cálculo correcto del calibre del cable para transportar la energía que será utilizada por el aeropuerto, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 8.27, obtenidos con base a detalles técnicos de los demás componentes.

Tabla 8.27: Capacidad del cableado, propuesta 2.1. Fuente: Autores

Parámetro	Módulo flexible	Módulo rígido
I pico del generador (A)	251	435
P pico del generador (W)	12060	20889
Corriente del conductor (A)	301,5	522,2
Distancia máxima entre inversores y paneles (m)	40	40
Capacidad del cable (A)	350	560
Resistencia (Ω/km)	0,277	0,786
Resistencia del conductor (Ω)	0,01108	0,03144

Para esta propuesta, se escogieron 2 tipos de cables:

- Para la configuración de módulos flexibles, debido a sus especificaciones eléctricas, y según la cantidad de paneles por cada inversor ya encontrada en la tabla 8.25, se seleccionó un cableado de referencia similar a la primera propuesta, de Calibre 70mm, con la diferencia de ser un único cable para la conducción de energía hacia los demás componentes.
- Para la configuración de módulos rígidos, se seleccionó un cableado de Calibre 50 mm, constando de 2 cables de este tipo conectados a los componentes del sistema, para poder conducir la corriente mostrada en la tabla 8.27.

8.3.2. Resultados de destellos y deslumbramientos

En esta sección se muestran los resultados del análisis realizado a través de la herramienta de "ForgeSolar" para identificar si la instalación cumple con la normativa de la FAA al considerar las rutas de vuelo (aproximación de la aeronave) y la torre de control (ATCT).

Umbral 06: En la figura 8.5 se ilustra la previsión de ocurrencia anual de deslumbramiento que generan las matrices fotovoltaicas que se encuentran ubicados en la terminal aérea y el parqueadero. Los resultados obtenidos muestran que entre mayo, junio, julio y agosto se presenta bajo potencial en las horas de 6 a.m. y 7 a.m.; se reduce la probabilidad

de aparición entre finales de mayo en las horas de 8 a.m. y 9 a.m. Entre 10 a.m. y 11 a.m. se presenta a finales de abril, finales de mayo y comienzos de agosto. Además, de acuerdo con la tabla 4.1, para aproximación de la aeronave este resultado cumple con la política de la FAA.

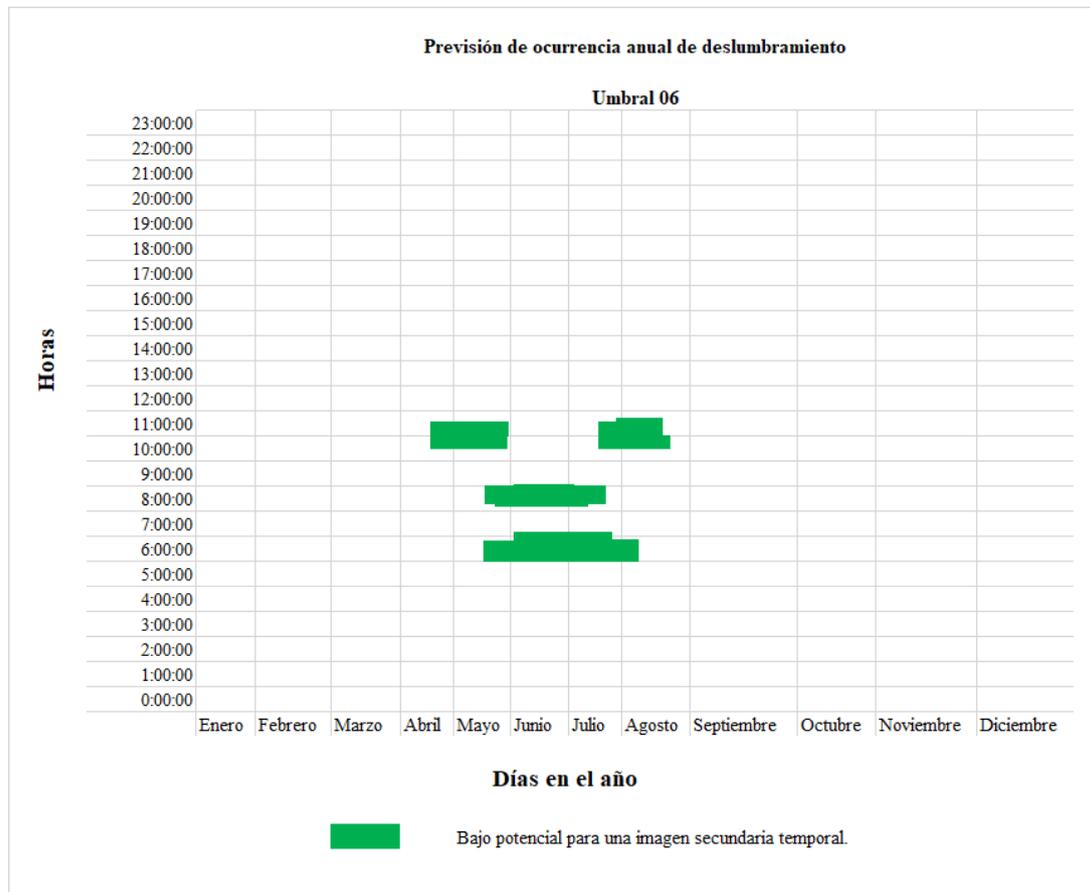


Figura 8.5: Previsión de ocurrencia anual de deslumbramiento en el Umbral 06. Fuente: ForgeSolar

Umbral 24: En la figura 8.6 se ilustra la previsión de ocurrencia anual de deslumbramiento que generan las matrices fotovoltaicas ubicadas en las áreas preestablecidas para esta propuesta. La previsión generada en los resultados muestra que en los meses de enero, inicios de febrero, septiembre, octubre, noviembre y diciembre hay una probabilidad de ocurrencia entre el medio día y la 1 p.m. Mientras que entre las 3 p.m. y 4 p.m. la probabilidad de ocurrencia se encuentra a finales del mes de octubre, noviembre, diciembre, enero y a inicios de febrero. Este tipo de deslumbramiento es aceptable puesto que posee bajo potencial de generar una imagen secundaria temporal a la vista del observador y la FAA lo considera aceptable para aproximación de la aeronave.

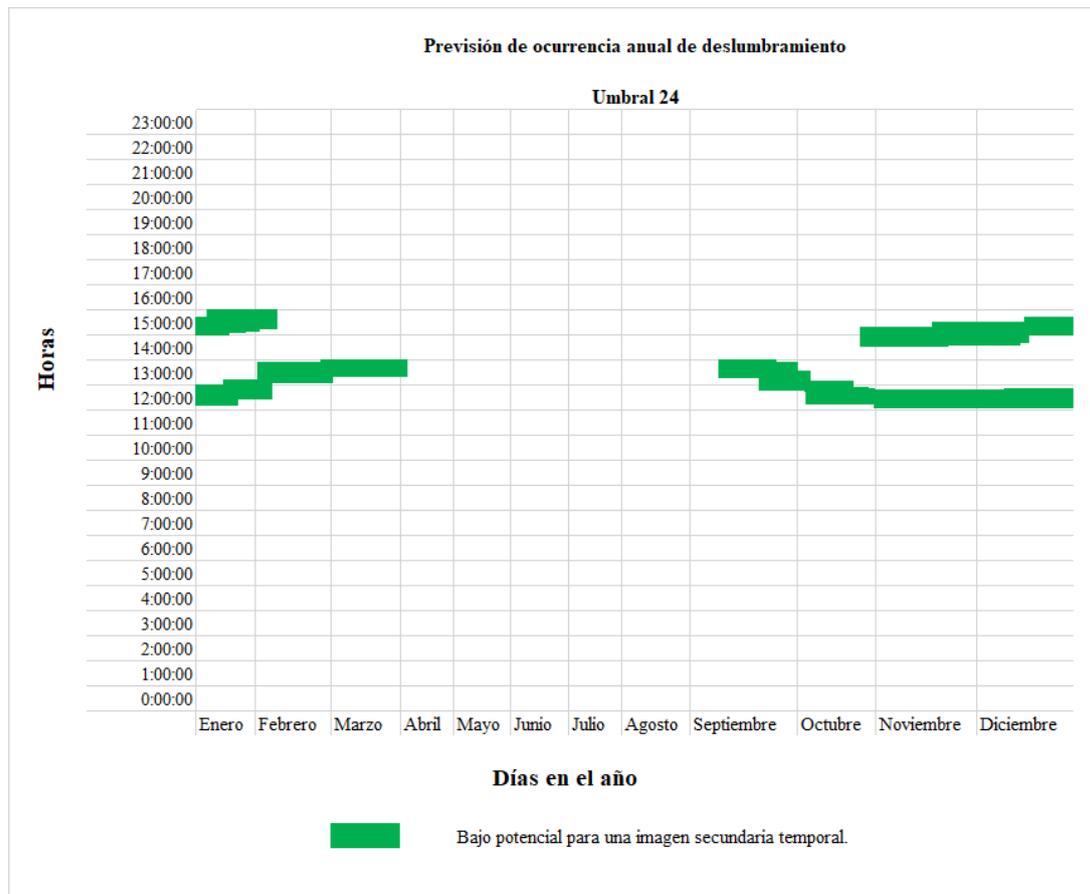


Figura 8.6: Previsión de ocurrencia anual de deslumbramiento en el Umbral 24. Fuente: ForgeSolar

Torre de control: En la figura 8.7 se ilustra la previsión de ocurrencia anual de deslumbramiento que generan las matrices fotovoltaicas en las áreas preestablecidas hacia torre de control (ATCT). La mayor probabilidad de ocurrencia de deslumbramiento se encuentra los meses de febrero, marzo y octubre en donde el deslumbramiento que se llega producir es de tipo inicialmente verde y posteriormente amarillo en las horas de 7 a.m. y 8 a.m. No obstante, este último se reduce levemente al utilizar los paneles flexibles comparado con la primera propuesta. Luego, existe probabilidad de ocurrencia de tipo verde que se produce en los meses de enero, febrero, marzo, septiembre, octubre, noviembre y finales de diciembre en las horas de 8 a.m. y 9 a.m.; en donde la tendencia entre finales de noviembre, diciembre, enero y comienzos de febrero es de producirse de 9 a.m. y 10 a.m. A pesar de que los paneles flexibles reducen el tipo de deslumbramiento amarillo, estos tipos de deslumbramientos no cumplen la política de la FAA debido a que en torre de control por ningún motivo se debe generar algún tipo de destellos y deslumbramientos.



Figura 8.7: Previsión de ocurrencia anual de deslumbramiento en torre de control. Fuente: ForgeSolar

8.3.3. Propuesta 2.2. Fuente secundaria en el terminal (paneles rígidos y flexibles) y en espacios del estacionamiento

Determinación de la energía total a cubrir

Al igual que para la primera parte de la propuesta 2, se debe determinar la cantidad de energía que el sistema debe atender para poder funcionar como fuente secundaria de energía.

Por esto, se toma de igual manera los 1150 kWh/día como energía total, siendo entonces, este valor el que el sistema debe ser capaz de satisfacer para poder reemplazar las fuentes actuales.

En seguida, se realizó la estimación de áreas disponibles con las que cuenta el terminal del aeropuerto tal como se evidencia en la figura 7.3, pero para esta segunda parte de la propuesta SI se tuvo en cuenta las áreas externas al aeropuerto, que corresponden al estacionamiento de vehículos particulares de este.

Para el espacio delimitado con el cuadro rojo de la terminal y los demás cuadros rojos en el exterior de esta, en la figura 7.3, se cuentan con áreas cercanas a los $529 m^2$ y $1388 m^2$, respectivamente. Basado en esto, con la misma elección de módulo fotovoltaico rígido escogido para las demás propuestas, así como sus características físicas propias descritas en el Anexo B y en la tabla , se realizó un estimado de la cantidad de módulos que pueden ser ubicados en estas áreas como se demuestra en las Ecuaciones (24) y (25).

$$\#MTI_{max} = \frac{\text{Área disponible } m^2}{\text{Área por módulo } m^2} \quad (24)$$

$$\#MTI_{max} = \frac{1917m^2}{2,5m^2} = 766 \quad (25)$$

De manera similar a como ya se desarrolló, se modificó la energía que se generará en esta área de la terminal, resultando en $790 kWh/día$ de los $1150 kWh/día$ que se necesita producir, por lo cual los $360 kWh/día$ serán atendidos por los módulos flexibles dispuestos en los cuadros naranjas de la figura 7.3, como se expone en la tabla 8.28.

Adicional a esto, la elección de la tensión nominal a la que debe trabajar el sistema, se mantuvo en 48V, mismo valor que las propuestas anteriores.

Tabla 8.28: Determinación de energía total para la propuesta 2.2. Fuente: Autores

Parámetro	Módulo flexible	Módulo rígido
Gasto energético a atender (kWh/día)	360	790
Gasto energético a atender (Wh/día)	360000	790000
Gasto energético a atender (Ah/día)	15000	24687,5

La selección de el tipo de módulo flexible que se implementará en el sistema, no varía con respecto a la anterior propuesta, por lo que sus especificaciones técnicas son de igual manera mostradas en la tabla 8.3.3.

Dimensionamiento de los módulos fotovoltaicos

Se desarrollaron los cálculos necesarios para poder obtener una primera aproximación para el número de módulos que se basan en datos, principalmente, climatológicos y técnicos, como se muestra en la tabla 8.29. Allí se encuentra una síntesis de los resultados para cada tipo de panel, teniendo en cuenta la energía total que cada uno debe satisfacer, según la disponibilidad de espacio.

Tabla 8.29: Capacidad de generación de los módulos, propuesta 2.2. Fuente: Autores

Parámetro	Módulo flexible	Módulo rígido
Gasto energético diario 10% (Ah/día)	16500	27156,25
Corriente mínima por módulo (A)	5,97	8,75
Producción por día (Ah/día)	25,7	37,66
# PS_T	642	721

Para determinar el número de módulos fotovoltaicos corregido, se determina la cantidad de generadores que serán utilizados en el SFV como fuente secundaria, considerando las áreas disponibles ya mencionadas.

Tabla 8.30: Número de módulos en serie, propuesta 2.2. Fuente: Autores

Parámetro	Módulo flexible	Módulo rígido
$V_{P.S}$ (V)	24	24
# módulos en serie	2	2

Posteriormente, fue obtenida la cantidad de generadores, en esta ocasión para una configuración en paralelo, siendo estos resultados para cada variable como se muestran enseguida.

Tabla 8.31: Número de módulos en paralelo, propuesta 2.1 Fuente: Autores

Parámetro	Módulo flexible	Módulo rígido
C_i (Ah)	16500	27156,25
HSS	7,3	7,3
I_{PG} (A)	2260,27	3720,03
I_{MP} (A)	5,97	10,8
# módulos en paralelo	379	345

Con estos resultados, se halla una cantidad corregida para el total de paneles, multiplicando los módulos en su configuración en serie y en paralelo, obteniendo un número acertado de **758** generadores flexibles y **690** generadores rígidos.

Dimensionamiento del inversor

Siguiendo la misma línea, los valores que el inversor debe garantizar para el sistema en diseño, son desarrollados por medio de las Ecuaciones (12) y (13).

Tabla 8.32: Dimensionamiento del inversor, propuesta 2.2. Fuente: Autores

Parámetro	Módulo flexible	Módulo rígido
I_{mp} (A)	5,97	10,8
V_{mp} (V)	25,5	41,8
I_g Total (A)	1131	567
V_g Total (V)	51	83,6
I_g x grupo (A)	240	240
V_g x grupo (V)	60	84
Módulos en Paralelo x grupo	40	22
Módulos en Serie x grupo	2	2
Total por grupo	80	44
Número de inversores	9	16

El total de módulos fotovoltaicos fue, de igual manera, dividió en grupos más pequeños de módulos con el fin de que diversos inversores cubran todos los niveles de Amperaje y Voltaje necesarios para funcionar como fuente secundaria. En la tabla 8.32, se pueden notar los resultados para cada variable mencionada.

Dimensionamiento del banco de baterías (acumuladores)

En la tabla 8.33 se muestran los resultados obtenidos, siguiendo la metodología ya propuesta para dimensionar el número de acumuladores necesarios para funcionar como fuente secundaria.

La referencia seleccionada para la batería no varía. También se usa la misma cantidad de días de autonomía para brindar seguridad al sistema, y en caso de una falla total de la fuente primaria, este pueda brindarle energía para un funcionamiento muy básico y esencial por 10 días seguidos.

Tabla 8.33: Número de acumuladores, propuesta 2.2. Fuente: Autores

Parámetro	Módulo flexible	Módulo rígido
CA_b (A)	165000	271562,5
CA_{cb} (Ah)	206250	339453,13
CN_b (Ah)	2000	2000
Número de acumuladores en serie	24	24
Número de acumuladores en paralelo	104	170
Total de baterías	2496	4080

Dimensionamiento del cableado

Se realizó el cálculo correcto del calibre del cable siguiendo los parámetros mencionados en la metodología, con el fin de transportar la cantidad de energía necesaria para suplir la fuente secundaria del Aeropuerto. Los resultados se muestran en la tabla 8.34.

Tabla 8.34: Capacidad del cableado, propuesta 2.2. Fuente: Autores

Parámetro	Módulo flexible	Módulo rígido
I pico del generador (A)	251	435
P pico del generador (W)	12060	20889
Corriente del conductor (A)	301,5	522,2
Distancia máxima entre inversores y paneles (m)	40	40
Capacidad del cable (A)	350	560
Resistencia (Ω /km)	0,277	0,786
Resistencia del conductor (Ω)	0,01108	0,03144

Para esta propuesta, las variables no cambiaron, independientemente si la cantidad de módulos aumenta o no, ya que la energía total que se necesita transportar es la misma igual que para la propuesta anterior. Los calibres y referencias de los cables seleccionados son similares y se pueden tomar del cálculo hecho anterior a este.

8.4. Análisis de resultados

En esta sección se dispondrán los análisis pertinentes de los resultados obtenidos, con base en la metodología descrita en este documento, a fin de generar bases para una elección correcta del sistema más conveniente para el Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla de la isla del caribe colombiano, San Andrés.

8.4.1. Análisis del diseño para el SFV

Propuesta 1.1. Paneles solares rígidos en la Terminal de pasajeros

Para la propuesta 1.1 donde los módulos fotovoltaicos rígidos o de diseño físico convencional son los grandes protagonistas, el análisis realizado con respecto a las áreas aprovechables, mostradas en la figura 7.3, para espacios dentro del terminal aéreo es negativo y comprendería un reto bastante grande para su infraestructura y predios disponibles.

En primer lugar, el número de módulos obtenido para asegurar un abastecimiento del 100 % de energía al aeropuerto equivalente a $256.000 \text{ kWh}/m$, siendo éste el gasto energético promedio suministrado por la empresa prestadora de servicios, tal como se mencionó en la sección 7.2, es de 4960 módulos; donde cada módulo representa $2,2 \text{ m}^2$ de espacio necesario para su instalación y $0,3 \text{ m}^2$ de seguridad para separación entre ellos e instalación de la estructura de soporte y cableado que sea requerido, para un total de $2,5 \text{ m}^2$ de área necesaria para la instalación de cada generador; esto equivale a cerca de 12400 m^2 necesarios solo para la adecuación de los módulos fotovoltaicos.

Una vez aclarada esta información, las áreas aprovechables en la cubierta de la terminal de pasajeros brindan un total de 2751 m^2 , dato obtenido después de realizar mediciones

mediante las herramientas de Google Earth. Haciendo un análisis entre el espacio que requiere un solo módulo para su instalación y las áreas del terminal de pasajeros tanto nacional como internacional, podrían ser adecuados cerca de 1242 módulos en toda el área señalada en cuadros rojos en la figura 7.3, dentro de los límites de la terminal (exceptuando parqueadero). Así pues, con esta cantidad de paneles, se podría llegar a tener una generación de energía instalada de aproximadamente 62000 kWh/mes , que al ser comparado con el gasto energético promedio mensual para el Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla de 256000 kWh/mes , no podría llegar a cubrir sino hasta un 24,2% de la energía total para ser considerado como una fuente primaria.

Comparando el espacio que se requiere para la implementación de generadores y el que se encuentra disponible para uso hoy en el Aeropuerto que sirve a la isla del Caribe colombiano, se necesitarían 4 predios cada uno que dispongan de 2751 m^2 en espacio para solventar el gasto energético mensual y poder ser calificado como fuente primaria.

El aeropuerto cuenta con otro tipo de espacios dentro de sus predios concesionados, como se muestra en los cuadro azules de la figura 8.8; no obstante, en estos espacios las instalaciones fotovoltaicas son poco recomendables, debido a la cercanía con la cabecera de la pista 24, ya que podrían generar destellos y deslumbramientos constantes a las tripulaciones en las rutas de aproximación así como en el aterrizaje de las aeronaves; adicionando, que dentro del cuadro rojo de esta misma figura se encuentra la ayuda de aproximación de luces PAPI, las cuales podrían verse afectadas en su funcionamiento debido a altos niveles de interferencia que podrían presentarse e incluso generar afectación para la visual de los pilotos en cuanto a su sendero de aproximación correcto.



Figura 8.8: Espacios adicionales en SKSP. Fuente: Autores

Además de esto, el espacio volumétrico adicional que se requiere para los demás componentes ya calculados son:

- Para un total de 29352 acumuladores, $2025,3 m^3$ aproximadamente, con cada batería ocupando un volumen de $0,069 m^3$.
- Para un total de 112 inversores, $26,9 m^3$, con cada inversor utilizando un espacio volumétrico de $0,24 m^3$.

Requiriendo un total adicional de espacio de $2052,2 m^3$ para los demás componentes, espacio que como se puede observar en la figura 7.1 y 7.3, es difícil de encontrar cerca del aeropuerto.

Propuesta 1.2. Paneles solares rígidos en el techo de la terminal y en espacios del estacionamiento

Para esta propuesta, sucede algo muy similar a lo ya descrito anteriormente en cuanto a la cantidad de módulos, aunque se abarco de una manera distinta, su análisis no da razones concretas para poder implementar el sistema como fuente primaria de energía.

El gasto energético a atender por parte de una posible fuente primaria es más que claro, sin embargo, no siempre más espacio significa mucha más facilidad, y este es el análisis que se desarrollará para esta propuesta.

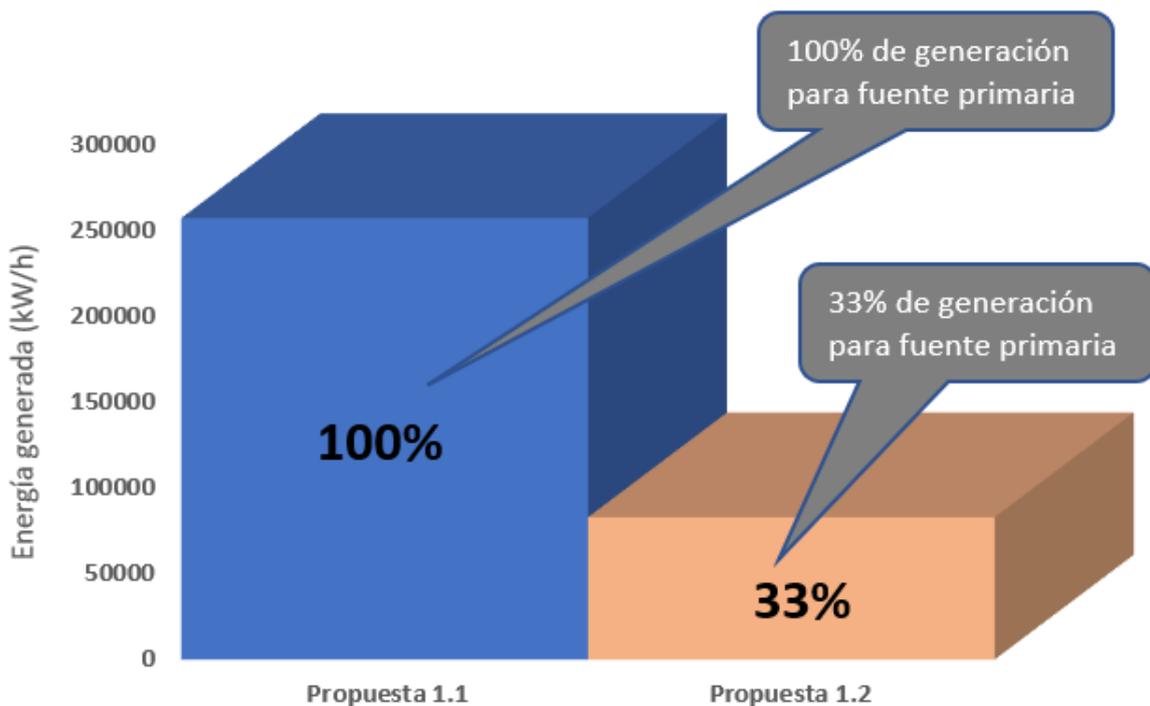


Figura 8.9: Porcentaje de energía generada, propuesta 1.1 y 1.2. Fuente: Autores

El número de módulos totales de 1652 cubrirían todos los cerca de 4140 m^2 disponibles en las cubiertas de las terminales de pasajeros y la zona del estacionamiento, correspondiendo a 2751 m^2 y 1388 m^2 , respectivamente. Sin embargo, esta cantidad de paneles generarían un aproximado de 85200 kWh/mes , valor que solo alcanzaría a cubrir un 33,3 % de la energía total que requiere el aeropuerto para funcionar en su totalidad, como se explica en la figura 8.9 . Por lo cual, no puede ser catalogado como fuente primaria ya que, incluso añadiendo espacio perteneciente a la gobernación de la Isla, no alcanzaría para poder soportar todo el consumo del aeropuerto completo.

A esta restricción se suma el peso total que debería soportar la cubierta de los terminales nacional e internacional. Cada módulo tiene un peso individual de 25 kg, multiplicado por el total de 1652, se obtendría un peso equivalente al mostrado en la ecuación (26), esto sin contar el movimiento del viento que en temporales de invierno y por características de la Isla pueden cambiar repentinamente, pero esto puede ser evaluado en otro documento, ya que este cálculo en concreto se sale de los límites de este análisis.

$$Peso\ total\ en\ kg = 25\ kg * 1652 = 41300\ kg \quad (26)$$

De igual manera, es necesario un espacio volumétrico adicional requerido para los demás componentes ya calculados como lo son:

- Para un total de 9768 acumuladores, 674 m^3 aproximadamente, con cada batería ocupando un volumen de 0,069 m^3 .
- Para un total de 37 inversores, 8,88 m^3 , con cada inversor utilizando un espacio volumétrico de 0,24 m^3 .

Requiriendo un total adicional de espacio de 683 m^3 para los demás componentes, el cual puede ser adecuado más fácilmente en cuartos adicional dentro del aeropuerto.

Esta propuesta, puede funcionar en el momento en que se decida instalar un sistema interconectado a la red, donde los acumuladores no serán necesarios, y generaría un gran ahorro económico con una recuperación de la inversión variable entre 15 y 18 años, pero es necesario implementar un análisis de cargas profundo, análisis económico y ambiental que sobrepasan los objetivos de este proyecto.

Propuesta 2.1. Fuente secundaria (paneles rígidos y flexibles)

La mayoría de los parámetros para hacer una comparación acertada se encuentran en la tabla 8.3.3, los cuales son evidentes entre cada tipo de módulo. En ese orden, el análisis de los resultados para esta propuesta se abarcará por partes.

Es importante aclarar que este sistema se encargará de abastecer energía en los momentos en que el aeropuerto por diferentes aspectos, no cuente con el suministro principal

de energía, por lo cual su energía base se encuentra definida con base a las 3 plantas Diesel ubicadas en el Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla con un suministro total de 1150 $kWh/día$.

Teniendo esto como referencia, se obtuvo un total de 210 módulos instalables en el terminal internacional (cuadro rojo de fondo blanco en la figura 7.3) produciendo 240,5 $kWh/día$, donde cada módulo rígido dispuesto tiene un área de 2,5 m^2 , lo cual indicaría que el área a usar es cerca de 525 m^2 , espacio que se encuentra dentro del límite de los 529 m^2 disponibles en esta cubierta. De igual manera, para los módulos flexibles se obtuvo un total de 1914, cada uno con un área de 0,9 m^2 , los cuales ocuparían cerca del 63 % del espacio disponible de la terminal de cubierta azul, con un total de 1723 m^2 para todos los generadores.

Comparando los resultados de la primera propuesta como fuente primaria, en cuanto a las cargas que tendría que soportar la estructura, se reduce en un 74 % el peso con solo la implementación de módulos flexibles muchísimo mas ligeros y reducción en la energía producida, que al final, también generará ahorros económicos considerables en cuento a gasto en equipos, ya que son 57 % menos módulos utilizados, 74 % menos acumuladores e inversores utilizados, traducidos también en una gran reducción de espacio y peso instalado.

De igual manera, es necesario un espacio adicional requerido para los demás componentes ya calculados como lo son:

- Para un total de 210 módulos rígidos y 1914 módulos flexibles, 525 m^2 y 1723 m^2 aproximadamente; el primero ocupando un área de 2,5 m^2 y el segundo de 0,9 m^2 , respectivamente, para un total ocupado de 2248 m^2 .
- Para un total de 7512 acumuladores, 519 m^3 aproximadamente, con cada batería ocupando un volumen de 0,069 m^3 .
- Para un total de 29 inversores, 6,96 m^3 , con cada inversor utilizando un espacio volumétrico de 0,24 m^3 .

Con estos cálculos técnicos adicionales, se puede determinar que el Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla si cuenta con espacio disponible suficiente para la instalación de un fuente secundaria que funcione con energía fotovoltaica.

Propuesta 2.2. Fuente secundaria en el terminal (paneles rígidos y flexibles) y en espacios del estacionamiento

Por último y siendo una de las opciones más completas y acertadas que pueden brindar al Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla un sistema fotovoltaico técnicamente factible para su uso y abastecimiento, se encuentra esta propuesta.

El gasto energético total a atender es el mismo ya mencionado en la propuesta anterior (1150 kWh/día), debido a que funcionará como fuente secundaria. Lo que hace que este sistema tenga un plus, es que se están utilizando áreas adicionales como lo son aquellas del estacionamiento, y es que, esto puede brindar un avance tecnológico y ambiental increíble, debido a que el implementar estructuras con módulos fotovoltaicos en este espacio, implica desarrollarlos de forma elevada, creando cubiertas adicionales en los espacios de aparcamiento y zonas comunes fuera de las instalaciones del aeropuerto.

Con los resultados obtenidos en la sección 8.3.3, para esta propuesta y comparándolos con los resultados de la propuesta anterior, se analizó que la reducción en módulos fotovoltaicos es evidente con un porcentaje cercano al 32 %, así como en acumuladores con una reducción del 12,5 %, como se muestra en la figura 8.10, reduciendo espacio utilizable dentro de los espacios disponibles en el aeropuerto, y por ende la inversión en este proyecto. De igual manera, se puede observar en la figura 8.10, que para una misma generación de energía en estas dos propuestas; la 2.2 tiene una reducción importante de componentes en general a excepción de los módulos rígidos, donde el aumento es de cerca del 70 % debido a que el espacio adicional de las zonas de parqueo implica la adición de este tipo de generadores, con el fin de aumentar la producción de energía con respecto a la áreas incluidas.

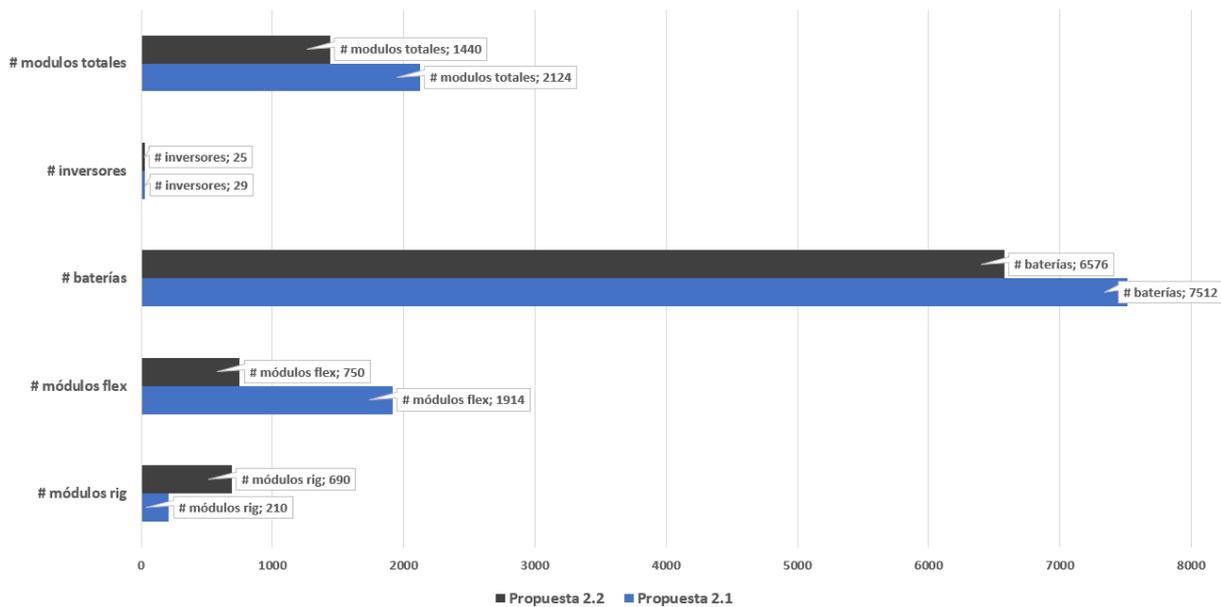


Figura 8.10: Comparativa de resultados para las propuestas 2.1 y 2.2. Fuente: Autores

Adicional a esto, la cantidad de módulos son repartidos en mucha más área disponible, reduciendo en un 60,4 % el peso en la estructura del techo de la terminal de pasajeros nacional, sumado a esto, reduciendo la posibilidad de generar algún destello o deslumbramiento de esta parte del terminal. La zona internacional de pasajeros no tendría ninguna modificación en relación a la propuesta anterior, ya que se mantendrían los mismo 210

módulos en esta sección. El aumento se observaría en la zona del estacionamiento, donde serían implementados cerca de 555 módulos rígidos generando un total adicional de 660 $kWh/día$, reduciendo la cantidad de módulos flexibles en la cubierta nacional del aeropuerto.

El espacio adicional requerido para los demás componentes ya calculados también se reduce y se presenta un ahorro como se observa abajo:

- Para un total de 690 módulos rígidos y 758 módulos flexibles, su área instalada se ajusta a 1725 m^2 y 682,2 m^2 aproximadamente; el primero ocupando un área de 2,5 m^2 y el segundo de 0,9 m^2 , respectivamente, para un total ocupado de 2407,2 m^2 de los 4139 m^2 , disponibles.
- Para un total de 6576 acumuladores, su espacio volumétrico se ajusta a 453,7 m^3 aproximadamente, con cada batería ocupando un volumen de 0,069 m^3 .
- Para un total de 25 inversores, su volumen se limita a 6 m^3 , con cada inversor utilizando un espacio volumétrico de 0,24 m^3 .

Así pues, técnicamente si es posible implementar un sistema bajo estas condiciones de notadas, funcionando como fuente secundaria de energía en el Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla, en caso de emergencias del mismo. Incluso, se podría implementar como un sistema interconectado a la red, ya que supondría aproximadamente el 14% de generación diaria de energía en el aeropuerto. También, se estima que esta propuesta reduciría las emisiones que producen los generadores de la fuente secundaria del aeropuerto dado a que estos producen cerca de 201,6 toneladas de CO_2 al año (estimación realizada a través de la calculadora de emisiones de la UPME [98]), mientras que las emisiones que se generan por la fabricación de los 1448 módulos de esta propuesta sería solo de 143,61 toneladas de CO_2 durante un ciclo de vida útil cercano a los 25 años (estimación basada en la monografía “Análisis del impacto ambiental de diferentes tipos de paneles solares según los materiales utilizados y los componentes tóxicos generados” [99]).

8.4.2. Análisis de resultados de destellos y deslumbramientos para las propuestas

De acuerdo con los resultados proporcionados por la herramienta de ForgeSolar, se presenta en la figura 8.11 una comparativa entre la previsión de minutos al año de ocurrencia de deslumbramiento para la propuesta 1 y la propuesta 2. Donde se evidencia un aumento de deslumbramiento con bajo potencial de generación de imagen superpuesta (deslumbramiento tipo verde), en la segunda propuesta comparada con la primera siendo el umbral 24 y torre de control (ATCT) quienes presentan este aumento; mientras que

para el deslumbramiento con potencial de imagen superpuesta y riesgo de quema de retina (deslumbramiento tipo amarillo), se disminuye en la torre de control (ATCT) en la propuesta 2 a comparación de la propuesta 1.

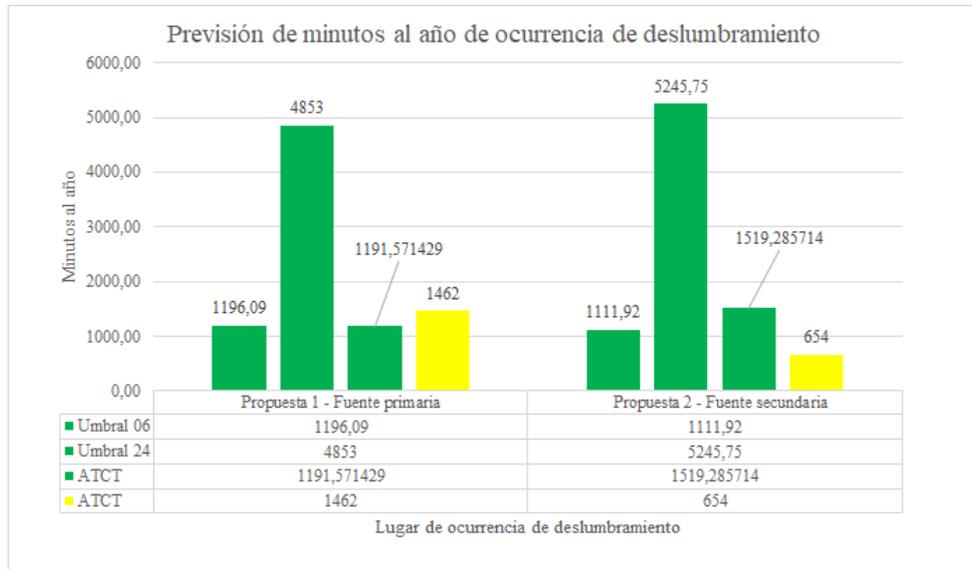


Figura 8.11: Previsión de minutos al año de ocurrencia de deslumbramiento en las propuestas del proyecto. Fuente: ForgeSolar

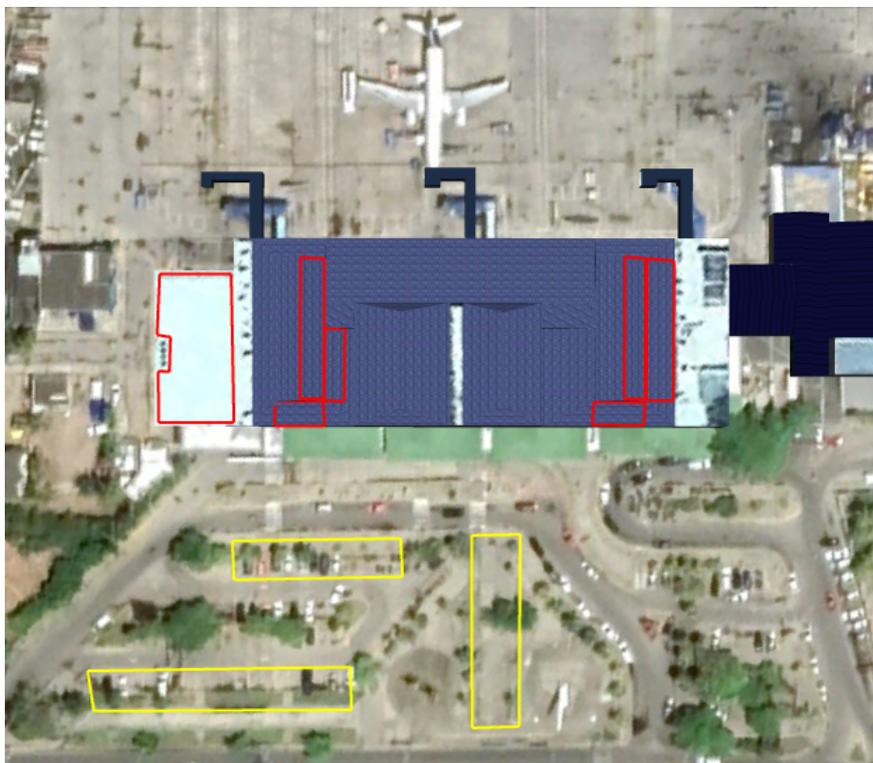


Figura 8.12: Áreas que cumplen con la política de la FAA delimitadas por los marcos rojos y amarillos. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth

En ambas propuestas se identificaron cuales son las áreas a través del reporte de Forge-Solar que generan bajo potencial y potencial para una imagen superpuesta hacia torre de control. Por lo tanto, se sugiere que para hacer la instalación de los paneles solares en las áreas de la terminal, se deben realizar sobre las áreas que se muestran en la anterior figura 8.12 delimitadas por los rectángulos rojos y amarillos que cumplen con la política de la FAA sobre destellos y deslumbramientos ilustrada en la tabla 4.1.

Capítulo 9

Conclusiones

- Los sistemas solares fotovoltaicos son fuentes no convencionales de energía renovable que permiten reducir el impacto ambiental producido por las fuentes tradicionales de energía. Esta tecnología se encuentra en auge desde hace más de 20 años, sin embargo, en Colombia su implementación ha sido de manera paulatina. El sector aeroportuario es una industria que genera altas emisiones debido a las fuentes secundarias que tienen los aeropuertos, pues estas se conforman por generadores que funcionan con Diésel; en el caso de la isla de San Andrés, al ser un territorio que no se encuentra conectado con las demás regiones del país, basa su generación de energía en fuentes fósiles. Colombia cuenta con un alto potencial de aprovechamiento de energía solar al encontrarse sobre la línea ecuatorial; en este caso, la isla de San Andrés se encuentra en el Caribe Insular Colombiano, la región que recibe la mayor cantidad de radiación solar en el país, por lo tanto, la utilización de fuentes renovables a base de energía solar es altamente recomendada.
- La implementación de un sistema fotovoltaico como fuente primaria de energía en el Aeropuerto Internacional Gustavo Rojas Pinilla es irrealizable desde una perspectiva técnica, pues al analizar los resultados obtenidos en la evaluación de las propuestas realizadas, se determinó que, no se cubre en totalidad la demanda energética con el uso exclusivo del SFV como fuente primaria; la falta de zonas disponibles para la instalación de configuraciones alternativas de SFV inhiben el acercamiento a las cantidades de energía necesarias para la operación del aeropuerto en general. Además, en cumplimiento a las normativas de la OACI, algunas de las condiciones que no se logran cumplir son la instalación del SFV fuera del aeródromo, y la necesidad de contar con una fuente secundaria de energía que garantice el abastecimiento continuo al aeropuerto en casos de emergencia o interrupciones del fluido eléctrico.
- Según el dimensionamiento y análisis realizado para la posible implementación de una fuente alternativa en el Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla, la opción más factible

para considerar su implementación es un SFV como fuente secundaria; esto es, teniendo en cuenta la infraestructura y áreas disponibles en el terreno concesionado. No obstante, no es posible ocupar el 100 % del espacio en las cubiertas de los edificios, debido a que el análisis de deslumbramientos concluyó que solo es aprovechable cerca de 1231 m^2 en estas; por lo cual, la propuesta más ajustada a estos requerimientos de espacio y operatividad, es la 2.2 (sección 7.3.2), cumpliendo con todas las normas legales y técnicas internacionales de la FAA y OACI, así como de la Aeronáutica Civil de Colombia.

- Aunque la propuesta de un SFV como fuente primaria para el aeropuerto seleccionado no se encontró técnicamente factible, y la opción que se sugiere implementar es la de un SFV como fuente secundaria, se concluye también que es altamente factible la implementación de un SFV como un sistema interconectado a la red eléctrica (fuente alternativa) cuya operación sea transversal a la fuente primaria sin necesidad de existir falla o interrupción del suministro eléctrico para que esta fuente entre en acción, puesto que su operatividad se ajustaría más incluyéndola en este tipo de conexiones. Con base en lo anterior, se recomienda que en futuros proyectos relacionados a este caso de estudio, se desarrollen análisis económicos y ambientales, con el fin de soportar la implementación de una fuente alternativa en el aeropuerto de la isla de San Andrés.
- El desarrollo y aplicación de la metodología expuesta está limitada a la información disponible del aeropuerto en el que se quiera analizar la factibilidad técnica para implementación de un SFV. La evaluación de los criterios seleccionados, aunque su ponderación sea subjetiva, permite determinar la pre-factibilidad de la utilización de este tipo de tecnologías verdes en el aeropuerto de interés; pues este análisis da apertura al estudio de factibilidad técnica el cual está acompañado de cálculos, diseños, y simulaciones. En este caso, el manejo de la matriz de criterios de evaluación como parte de la metodología creada fue de gran utilidad para determinar el aeropuerto sobre el cual se desarrolló el proyecto, como también para determinar la factibilidad técnica de la implementación de las propuestas en él.
- El análisis de destellos y deslumbramientos es un estudio fundamental e indispensable para realizar instalaciones fotovoltaicas en aeropuertos, debido a que puede comprometer la seguridad e integridad de las personas dentro y fuera de estos. Para el aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla de San Andrés, al no contar con predios disponibles para construir un sistema solar fotovoltaico en tierra, las áreas disponibles se encuentran en algunas secciones del techo de la terminal, las cuales no interfieren con las operaciones aéreas al tener baja probabilidad de deslumbramientos.

Para contar con una mayor área disponible para la instalación de paneles solares se podrían considerar los predios que pertenecen a la gobernación de San Andrés y Providencia, como lo son las zonas de Parking que se encuentran en los límites de la terminal aérea.

La herramienta utilizada para este análisis es el software ForgeSolar, aplicativo que genera un estudio de variables medibles y de aproximaciones basadas en un análisis computacional limitado; se recomienda tener precaución al emplear estos resultados para una instalación real en el Aeropuerto Gustavo Rojas Pinilla de San Andrés, por lo cual es necesario realizar pruebas de campo en él, y comparar sus resultados con los obtenidos a través del software.

Página dejada en blanco intencionalmente.

Bibliografía

- [1] GONZÁLEZ, A. L., BORBÓN, J. E. H., & VILLAMIL, J. A. A. (2014). “*Sistema de captación de radiación solar directa*”. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico.
- [2] SCHHEER, H. (1993). “*Estrategia solar para el acuerdo pacífico con la naturaleza*”.
- [3] ENERGY SECTOR MANAGEMENT ASSISTANCE PROGRAM. (2020). “*Global Photovoltaic Power Potential by Country*”.
- [4] EXPANSIÓN. “*Emisiones CO2 toneladas per capita 2020*”. *Datosmacro.com*. En línea. Disponible en: [t.ly/BNgh]. Accedido el 4 de Diciembre de 2021.
- [5] DÍAZ, A. (2021). “*Emisiones de dióxido de carbono a nivel mundial 1995-2020*”. *statista*. En línea. Disponible en: [t.ly/E9eh]. Accedido el 4 de Diciembre de 2021.
- [6] OMM. (2014). “*El niño/Oscilación del Sur*”. OMM-No. 1145. ISBN: 978-92-63-31145-0
- [7] UPME. “*Invierta y Gane con Energía - Guía práctica para la aplicación de los incentivos tributarios de la ley 1715 de 2014*”. En línea. Disponible en: [t.ly/ENbt]. Accedido el 24 de Junio de 2021.
- [8] REDACCIÓN NACIONAL (2018, Sep 9). “*10 datos ambientales que preocupan en Colombia*”. *Diario el nuevo siglo*. En línea. Disponible en: [t.ly/aMao]. Accedido el 11 de Noviembre de 2021.
- [9] GÓMEZ, J.R., AFANADOR, J.E., & RODRÍGUEZ, J.L. (2016). “*Hacia la sostenibilidad eléctrica en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Colombia: Análisis de alternativas*”. En línea. Disponible en: [t.ly/45yW]. Accedido el 11 de Noviembre de 2021.

- [10] ICAO. “A Focus on the production of renewable energy at the Airport site”. En línea. Disponible en: [t.ly/nmnN7]. Accedido el 24 de Junio de 2021.
- [11] RENOVABLES, I. E. ‘El mar, una fuente de energía inagotable’. En línea. Disponible en: [t.ly/mLhR]. Accedido el 1 de Diciembre de 2021.
- [12] UNIVERSIDAD DE ILLINOIS “Los vientos - Soplan y soplan”. En línea. Disponible en: [t.ly/wqnG]. Accedido el 1 de Diciembre de 2021.
- [13] ATARAMA MONTERO, N. H. (2019). “Evaluación del potencial de energía solar para generación de energía eléctrica, como una alternativa para disminuir el uso de combustibles fósiles, en la región Piura”.
- [14] PRECIADO MOSOS, A.T., & HURTADO MENESES, D. E. (2018). “Diseño y evaluación de un sistema solar fotovoltaico para el Aeropuerto José María Córdova”.
- [15] SCHALLENBERG RODRÍGUEZ, J. C., ET AL. (2008). “Energías renovables y eficiencia energética”. Instituto Tecnológico de Canarias, s.a., Pg 65. España. ISBN 978-84-69093-86-3.
- [16] HEYMSFIELD E,& COLLABORATORS. (2020). “Developing anti-icing airfield runways using surface embedded heat wires and renewable energy”. Sustainable cities and society, 52, 101712.
- [17] OSWEILER, A. B. (2012). “Implementing Conductive Concrete with Photovoltaic Energy to Develop Anti-Icing Airfield Runways”.
- [18] G2E. (2013). “Launches first installation at Geneva International Airport”. En línea. Disponible en: [t.ly/muzi]. Accedido el 06 de septiembre de 2019.
- [19] FLASH TECHNOLOGY. (2014). “Airfield lighting solutions”. En línea. Disponible en: [t.ly/jQ3M]. Accedido el 10 de septiembre de 2019.
- [20] KANDT, A., & ROMERO, R. (2014). “Siting Solar Photovoltaics at Airports”. No. NREL/CP-7A40-62304). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- [21] LOGAN, A. (2012). “ICAO Workshop on Air Navigation Visual Aids New Technologies”. De Airport Visual Aids Research.

-
- [22] INER CONSULTORES. (2010). “Energía Verde, Especial Aviación”. *INER Consultores, Maiquetía*. En línea. Disponible en: [t.ly/Zp19]. Accedido el 5 de octubre de 2019.
- [23] BARAN, M. (2019, Julio 18). “This Is the First U.S. Airport to Be Fully Solar-Powered”. *AFAR*. En línea. Disponible en: [https://bit.ly/3c4oxiR]. Accedido el 7 de Octubre de 2019.
- [24] FINAVIA. (2019, Mayo 19). “Solar Power plant at Helsinki Airport”. En línea. Disponible en: [t.ly/9JPH]. Accedido el 7 de Octubre de 2019.
- [25] KRISHNAN, D., & CARRIE, D. (2016, Sep 27). “Bangalore’s Airport to Become a Leader in Solar Energy Production”. En línea. Disponible en: [t.ly/Wtv8]. Accedido el 7 de Octubre de 2019.
- [26] WRITTER, S. (2019, Julio 15). “DXB completes installation of the region’s largest airport solar energy system at Terminal 2”. *Aviation Businessme*. En línea. Disponible en: [t.ly/OSjH]. Accedido el 7 de Octubre de 2019.
- [27] MME., & UPME. (2021, Junio 30). “Informe de Registro de Proyectos de Generación de Electricidad”. Inscripción según los requisitos UPME No. 0520, No. 0638 de 2007 y No. 0143 de 2016.
- [28] IDEAM., & UPME. (2017). “ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR, ULTRAVIOLETA Y OZONO DE COLOMBIA”.
- [29] CUTRERA, M. E., BATTIONI, M. R., RISSO, G. A., & BUITRAGO, R. H. (2010). “Correlaciones entre la radiación solar, sus componentes, el ángulo de Montaje y la generación de los módulos fotovoltaicos”.
- [30] ARELLANO, M. C. (2012). “Modelo para el dimensionamiento de sistemas Fotovoltaicos con Interconexión a Red, aplicado a la UTNL para la difusión del uso de las Energías Renovables”. Tesis de posgrado. Centro de investigación en materiales avanzados, S. C.
- [31] ENERGÍA EFICIENTE. “Colombia es una potencia en el tema de energía solar”. En línea. Disponible en: [t.ly/rSgo]. Accedido el 7 de Octubre de 2019.

- [32] PORTAFOLIO. (2018, Sep 21). “El Aeropuerto El Dorado se iluminará con energía solar”. *Diario Portafolio*. En línea. Disponible en: [t.ly/u6Mc]. Accedido el 8 de Octubre de 2019.
- [33] EQUIPAR. (2018). “Aeropuerto El Dorado inicia mega proyecto de energía solar”. *Revista Equipar*. En línea. Disponible en: [t.ly/KdjX]. Accedido el 8 de Octubre de 2019.
- [34] ORDÓÑEZ, J.L. (2012). “Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico”. Manual formativo de ACTA, (62), 17-31.
- [35] QUEA, E. “Los cuantos o fotones”. *Investigación Educativa*, 7(10), 92-98.
- [36] IDEAM. (2018). “Radiación solar”. *Instituto de Hidrología*. En línea. Disponible en: [t.ly/RjPz]. Accedido el 10 de Septiembre de 2019.
- [37] TYLIN INTERNATIONAL. (2017). “RESUMEN EJECUTIVO - PLAN MAESTRO AEROPUERTO GUSTAVO ROJAS PINILLA DE LA ISLA DE SAN ANDRES, COLOMBIA”. En línea. Disponible en: [t.ly/5h0C]. Accedido el 6 de febrero de 2021.
- [38] ÁLVAREZ JIMÉNEZ, L. M., & CHARRY ROJAS, A. C. (2017). “Diseño de un Sistema Solar Fotovoltaico Autónomo para la Estación Aeronáutica Araracuara de la Aeronáutica Civil de Colombia”.
- [39] AREATECNOLOGIA. “PANELES SOLARES”. En línea. Disponible en: [t.ly/qejL]. Accedido el 27 de Abril de 2021.
- [40] IGA, C. L., & IGA, J. L. (2015). “Radiación solar en proyectos urbanos”.
- [41] ABC CIENCIA. (2019). “El Sol se acerca a un cambio de ciclo: ¿qué consecuencias tendrá para la Tierra?”. *Diario ABC*. En línea. Disponible en: [t.ly/zdzS]. Accedido el 6 de Noviembre de 2020.
- [42] VARAS, E. “Radiación Solar”.
- [43] MARROQUÍN SANTOÑA, A. (2001). “Clima y constante solar variable”.

-
- [44] MENDOZA RODRÍGUEZ, C. A. (2012). “*Viabilidad técnica-económica de una central solar termoeléctrica de colectores cilíndricos parabólicos para su implementación de México (tesis de pregrado)*”. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- [45] HERNÁNDEZ, J. R., & JESÚS, R. (1996). “*Implementación de un sistema automatizado de adquisición de datos meteorológicos y solarimétricos*”. Tesis de grado.
- [46] J. YAGUAL. “*Solución completa a partir de la observación de un astro, para el ploteo de una recta de altura, usando el almanaque náutico y la tablas 229*”. Ancón, Ecuador: ESPOL, 2012.
- [47] CÁRDENAS FREIRE, D. X. (2010). “*Diseño, construcción e implementación de un mecanismo localizador solar automático, montado en un sistema fotovoltaico para mantener la carga de una batería automotriz*”. (Bachelor’s thesis, Quito/UIDE/2010).
- [48] MME. (1992). “*Políticas en fuentes alternas de energía, presente y futuro*”. División de fuentes no convencionales.
- [49] CEPEDA, J., & SIERRA, A. (2017). “*Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones*”.
- [50] PONS, RAFAEL. (2014). “*Entendiendo el Azimut y la Elevación*”. *PhotoPills*. En línea. Disponible en: [<https://bit.ly/3s1cCJo>]. Accedido el 10 de Septiembre de 2019.
- [51] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. (2013). “*Photovoltaics Resources and Technologies*”.
- [52] HUNG GONZÁLEZ, V. (2012). “*Propuesta metodológica de selección de emplazamientos viables para instalaciones de energía solar fotovoltaica: Lanzarote*”. *Ene*, 11, 38.
- [53] CHÁVEZ GUERRERO, M. A. (2013). “*Proyecto de Factibilidad para uso de Paneles Solares en Generación Fotovoltaica de Electricidad en el Complejo Habitacional San Antonio de Riobamba*”. (Bachelor’s thesis).
- [54] MORTENSEN, J. (2001). “*Factors Associated with Photovoltaic System Costs (Topical Issues Brief)*”. (No. NREL/TP-620-29649). National Renewable Energy Lab., Golden, CO (US).

- [55] GUEY-LEE, L. (2000). “*Forces Behind Wind Power*”. *Renewable Energy*, 73-112.
- [56] SAWIN, J. L., SVERRISSON, F., SEYBOTH, K., ADIB, R., MURDOCK, H. E., LINS, C., ... & MARTINOT, E. (2016). “*Renewables 2016 Global Status Report. Key findings. A Record-Breaking Year for Renewable Energy: New Installations, Policy Targets, Investment and Jobs. Mainstreaming renewables: guidance for policy makers*”.
- [57] BIOMASS USERS NETWORK (BUN-CA). (2002). “*Manual sobre energía renovable: solar fotovoltaica*”.
- [58] ROJAS BAEZ, A. F. (2018). “*Diseño de un Sistema Fotovoltaico para la Iluminación Perimetral del Centro de Entrenamiento BOSANOVA*”.
- [59] ABELLA, M. A. “*Sistemas fotovoltaicos*”. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas.
- [60] SÁNCHEZ GUEVARA, S., & FRANCO GIL, J. (2016). “*Diseño e implementación de un sistema fotovoltaico interconectado a red con soporte de almacenamiento en la Universidad Tecnológica de Pereira*”.
- [61] KUZNIA, R. (2019, Enero 8). “*How do solar panels help the environment?*”. En línea. Disponible en: [t.ly/tTIK]. Accedido el 8 de Enero de 2019.
- [62] AUSTRALIAN GOVERNMENT. [Dept. of Industry]. (2013). “*Energy Efficiency at the University of Queensland*”.
- [63] TOVAR CASTILLO, A. M. (2014). “*Evaluación de impacto ambiental de la energía solar y eólica en la abiota de Colombia.*”.
- [64] KHAIRUDIN, H. (2018). “*Solar PV Behavioral Model for Performance Assessment*”. *MATLAB Central File Exchange*. En línea. Disponible en: [t.ly/ZuHw]. Accedido el 27 de Noviembre de 2019.
- [65] NUÑEZ, A. (2015). “*Concepto Aeropuerto Verde. Medidas de reducción de emisiones en aeropuertos y aplicación al Aeropuerto de Sevilla, (Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Aeronáutica. Sevilla, España: Universidad de Sevilla)*”.
- [66] LAINE, D. C. (2017). “*Effects of Solar Power Farms on the Environment*”. En línea. Disponible en: [t.ly/qCWJ]. Accedido el 13 de enero de 2021.

- [67] KOSCIUCH, K., RISER-ESPINOZA, D., GERRINGER, M., & ERICKSON, W. (2020). “A Summary of bird mortality at photovoltaic utility scale solar facilities in the Southwestern US.” PloS one, 15(4), e0232034.
- [68] ALLPE. (2019). “ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA Y MEDIO AMBIENTE”. En línea. Disponible en: [t.ly/hgny]. Accedido el 7 de Abril de 2021.
- [69] ECOLOGISTAS EN ACCIÓN. (2007, junio 21). “[Fotovoltaica] Impacto ambiental”. En línea. Disponible en:[t.ly/Pd56]. Accedido el 8 de Mayo de 2021.
- [70] SUNEARTHTOOLS. “Herramienta de cálculo de elevación y azimut”. En línea. Disponible en: [t.ly/qyMO]. Accedido el 20 de Septiembre de 2021.
- [71] AIRPORT BUSINESS. (2009). “Solar power: the next safe solution for runway lighting”. En línea. Disponible en: [t.ly/7j4F]. Accedido el 15 de Abril de 2021.
- [72] CORPOEMA, C. E. (2010). “Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia (PDFNCE)”. vol. II. Diagnóstico de las FNCE en Colombia, p. 137-152.
- [73] SIEL, “Normatividad”. En línea. Disponible en: [t.ly/477f]. Accedido el 30 de Octubre de 2020.
- [74] COLMENERO, R. B. (2007). “El Protocolo de Kioto y la Tributación Ambiental”. Anuario jurídico y económico escurialense, (40), 71-100.
- [75] MONROY, N., & AGUIRRE, A. (2003). “El protocolo de kyoto: ¿una oportunidad para la industria colombiana?”. Revista de Ingeniería, (18), 108-116.
- [76] MEJÍA, G. (2014). “Estudio comparativo entre la legislación de eficiencia energética de Colombia y España”. Revista Escuela de Administración de Negocios, (77), 122-134.
- [77] CONGRESO DE COLOMBIA. [Cong]. “ Ley 143 de 1994”. En línea. Disponible en:[t.ly/gRvm]. Accedido el 14 de Noviembre de 2020.
- [78] UPME. “Ley No. 1715 - 12 de Mayo de 2014”. En línea. Disponible en: [t.ly/RoSU]. Accedido el 14 de Noviembre de 2020.

- [79] UPME. (2015). “*PLAN ENERGÉTICO NACIONAL DE COLOMBIA - IDEARIO ENERGÉTICO 2050*” p. 184.
- [80] MINENERGÍA. “*Energías Renovables No Convencionales*”. En línea. Disponible en: [t.ly/0g2H]. Accedido el 16 de Noviembre de 2020.
- [81] OACI. (2016). “*Anexo 14, Convenio sobre Aviación Civil Internacional - Aeródromos*”. Capítulo 8. Sistemas Eléctricos. p. 213.
- [82] OACI. (1983). “*Manual de Proyecto de Aeródromos - Parte 5, Sistemas Eléctricos*”. Primera Edición.
- [83] ICAO. (2017). “*Aerodrome Design Manual - Part 5, Electrical Systems*”. 2nd Edition.
- [84] OACI. “*Anexo 10, Convenio sobre Aviación Civil Internacional - Telecomunicaciones Aeronáuticas*”. Adjunto C. ADJ C-73.
- [85] FAA. (2018). “*Technical Guidance for Evaluating Selected Solar Technologies on Airports*”. Version 1.1.
- [86] ONU. (2020), “*La carrera hacia las cero emisiones de gases de efecto invernadero, y por qué el planeta depende de ella*”. Cambio climático y medioambiente. En línea. Disponible en: [t.ly/eXRK]. Accedido el 14 de Diciembre de 2021.
- [87] BARRET, S. (2018). “*Feasibility Study on the use of Solar Energy at Piarco International Airport*”. ICAO.
- [88] FAA. (2007). “*SPECIFICATION FOR PORTABLE RUNWAY AND TAXIWAY LIGHTS*”. AC No: 150/5345-50B.
- [89] FAA. (2015). “*Change 2 to Airport Mater Plans*”. AC No: 150/5070-6B.
- [90] CFR. (2010, July 21). “*14 CFR Part 77 - SAFE, EFFICIENT USE, AND PRESERVATION OF THE NAVIGABLE AIRSPACE*”. Subpart C - Standards for Determining Obstructions to Air Navigation or Navigational Aids or Facilities.
- [91] FAA. (1980). “*PLANNING AND DESIGN OF AIRPORT TERMINAL BUILDING FACILITIES AT NONHUB LOCATIONS*”. AC No: 150/5360-9.

-
- [92] RETIE. “Reglamento técnico de instalaciones eléctricas”. Paneles solares fotovoltaicos. Resolución 90708 de agosto 30 de 2013.
- [93] NTC. (1998, Nov 25). “Norma técnica colombiana 2050”. Secciones: 480, 690 y 702. p.p. 383, 627 y 649.
- [94] PRADO SUQUILA, C. C., RODRÍGUEZ ARAGÓN, J. D., & VELÁSQUEZ CIFUENTES, D. S. (2021). “Actualidad de los sistemas fotovoltaicos en el sector aeronáutico colombiano”. *AeroErmo Revista*, (32), 36-39.
- [95] VITERI, F., & GUERRERO, A. (2013). “DEFINICIÓN DEL AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO EN BASE A LAS VARIABLES TEMPERATURA, PRECIPITACIÓN Y VELOCIDAD DEL VIENTO, DE TRES REGIONES NATURALES DEL ECUADOR: COSTA, SIERRA Y ORIENTE. SIERRA Y ORIENTE”.
- [96] METEOBLUE. “Herramienta para extracción de gráficas e historiales climatológicos”. En línea. Disponible en: [<https://bit.ly/3yvoYvi>]. Accedido el 3 de Septiembre de 2021.
- [97] SOLAR CENTER. (2019). “Cálculo y diseño de sistemas autónomos”. Webinar. En línea. Disponible en: [<https://youtu.be/Viqv4th6nkQ>]. Accedido el 4 de Diciembre de 2021.
- [98] UPME. “Total de emisiones CO2 calculadas (No Equivalentes)”. En línea. Disponible en: [t.ly/O2yV]. Accedido el 3 de Diciembre de 2021.
- [99] GUZMÁN NIÑO, C. A. (2017). “Análisis del impacto ambiental de diferentes tipos de paneles solares según los materiales utilizados y los componentes tóxicos generados”. (Bachelor’s thesis, Fundación Universidad de América).

Página dejada en blanco intencionalmente.

Apéndice A

Primer Apéndice

En esta sección se presenta la matriz de criterios utilizada para la comparación de especificaciones técnicas y meteorológicas de los aeropuertos seleccionados con el fin de determinar el aeropuerto al cual serán dirigidas las propuestas del proyecto.

La información de cada aeropuerto ha sido obtenida de cada uno de los resúmenes ejecutivos del último plan maestro presentado por la Aerocivil para cada aeropuerto. También, a través de comunicaciones de tipo telefónica, por escrito, y en reuniones virtuales con las empresas electrificadoras y equipos de ingeniería de los aeropuertos, se obtuvo la información de consumo, además del promedio anual de irradiación global consultado en el atlas de radiación solar [28] y de tipo técnico que se presenta en la matriz de criterios.

Tabla A.1: Fuente de la información obtenida para cada aeropuerto.

Aeropuerto	Ciudad	Fuente: Aerocivil
Gustavo Rojas Pinilla	San Andrés	Resumen Ejecutivo - Plan Maestro (2017)
Almirante Padilla	Riohacha	Actualización del Plan Maestro (2019)
Camilo Daza	Cúcuta	Actualización del Plan Maestro (2019)
Simón Bolívar	Santa Marta	Resumen Ejecutivo - Plan Maestro (2020)
Alfonso López P	Valledupar	Actualización del Plan Maestro (2019)

A continuación se presenta la matriz de criterios utilizada y aplicada en cada uno de los aeropuertos seleccionados.

CRITERIO	"GUSTAVO ROJAS PINILLA" SAN ANDRÉS	"AMIRANTE PADILLA" LA GUAJIRA	"CAMILO DAZA" CUCUTA	"SIMÓN BOLÍVAR" SANTA MARTA	"ALONSO LOPEZ P." VALLEDUPAR
1	Administración del aeropuerto Aeronáutica Civil		Aeropuertos del Oriente S.A.S.		
2	Propiedad del predio y disponibilidad de espacios para un SFPV	Propiedad del estado, actualmente concesionado. Espacio disponible pero limitado en zonas verdes del aeropuerto. Posibilidad moderada de adquisición predial para futuras ampliaciones.	Propiedad del estado, actualmente concesionado. Espacios disponibles en infraestructura del terminal y en zonas verdes. No se considera la adquisición de predios para remodelaciones e implementación de SFPV.	Propiedad del estado, actualmente concesionado. Espacios disponibles en infraestructura del terminal y en zonas verdes. Predios adquiridos para futuras remodelaciones y alternativas de la terminal aérea.	Propiedad del estado, actualmente concesionado. Espacio disponible al costado de la pista y con posibilidad moderada de adquisición predial en la cabecera de la pista para futuras ampliaciones.
3	Proyección de pasajeros y operaciones (Proñósticos presentados en el último resumen ejecutivo del Plan maestro de cada aeropuerto)	Pasajeros (2048) - Total: 2,697,373 Operaciones Totales (2048) - 27,056	Pasajeros (2048) - Total: 3,974,753 Operaciones Totales (2048) - 29,287	Pasajeros (2050) - Total: 733,100 Operaciones Totales (2050) - 52,589	Pasajeros (2048) - Total: 1,441,202 Operaciones Totales (2048) - 13,647
4	Fuentes de energía del aeropuerto (Empresa prestadora de servicio)	Primaria: Red Interconectada Secundarias: 1 planta eléctrica de 150KW 2 plantas de 15KW (VOR) Electrificadora: SOPESA ESP	Primaria: Red Interconectada Secundarias: 2 plantas eléctricas de 100KW Electrificadora: Caribe sol de la costa S.A.S.	Primaria: Red Interconectada Secundarias: 1 planta eléctrica de 375KVA 1 planta eléctrica de 450KVA 1 planta eléctrica de 750KVA Electrificadora: Centrales Eléctricas del N. de Santander S.A.	Primaria: Red Interconectada, línea de 13,2KV Secundarias: 2 plantas eléctricas de 750KVA Electrificadora: Air-e S.A.S. (Electriaribe)
5	Impacto ambiental	En el año 2000 la isla fue declarada como Reserva de la Biosfera y en el 2005 una porción de la misma ha sido declarada como Área Marina Protegida, sin embargo, actualmente la fuente principal de energía de toda la isla depende de plantas de generación a base de combustibles fósiles.	La degradación del suelo, cambios en la capacidad de infiltración, cambios en el contenido de materia orgánica, el deterioro de la calidad del aire por la emisión de óxidos, y el deterioro de la calidad del aire por emisión de gases y partículas , son los mayores impactos identificados en la zona.	Afectación sobre la red vial alejada, cambios en los usos del suelo, deterioro de la calidad del aire por la emisión de óxidos, gases y partículas , y la fragmentación de ecosistemas son los impactos identificados en la zona y en construcciones de invasión de talanquera al aeropuerto; uso incompatible del suelo.	Riesgos altos de incursión de aves, caminos y felinos en los alrededores del aeropuerto, alejados de la instalación de SFPV en tierra, por lo cual se trabaja en la instalación de halconeras.
6	Impacto socioeconómico	La principal actividad de la isla es el turismo, cuyo crecimiento ha sido acelerado pero la región no cuenta con la suficiente infraestructura hotelera, servicios públicos como acueducto, electricidad e infraestructura vial.	Las actividades económicas de mayor impacto en la zona son la minería, comercio al por mayor y al por menor, transporte y turismo. Todas estas actividades presentan una influencia directa a la demanda de aeropuertos y la modernización de los actuales. Esto representa mayor solidez en el transporte aéreo y crecimiento de la economía local.	Las propuestas de innovación y planes maestros del aeropuerto impactan el medio socioeconómico de la región con la tenencia de la tierra, cambio en el precio de la tierra, la generación de empleos locales, y el fortalecimiento de la actividad comercial y turística.	El aeropuerto genera un gran aporte al PIB de la región, la actividad económica se basa en el turismo y la logística para importación y exportación. Sin embargo, la tasa de desempleo es alta por lo que interviene el aeropuerto con obras de remodelación general empleos e incremento en la economía local.
7	Nivel de radiación solar (Promedio anual de irradiación global, 2017)	5313,1 Wh/m2	5605,8 Wh/m2	5301,6 Wh/m2	5606,4 Wh/m2
8	Condiciones climáticas de la zona (Factores climáticos que puedan afectar el SFPV)	Temperatura promedio 27,1°C. Promedio de lluvia total anual 1881 mm. Zona intertropical, clima cálido seco. Humedad relativa anual de 82%. Niveles altos de salinidad en aguas subterráneas	Temperatura máxima promedio 33°C. Clima desértico cálido. Humedad relativa anual de 73%. Cambios drásticos por temporadas, sequías fuertes o tormentas eléctricas moderadas.	Temperatura promedio 30°C. Humedad relativa anual de 67%. La temporada de precipitaciones es más larga que la temporada de sequías. Periodos prolongados de nubosidad	Temperaturas promedio entre 26 y 31,1°C. Humedad relativa anual entre 71 y 79%. Niveles altos de salinidad en aguas. Mayor número de horas sol 284,5 (enero).
9	Riesgos y amenazas predecibles e impredecibles en la zona	Huracanes, tsunamis, inundación por elevación del nivel del mar, erosión costera.	Descripción del suelo, olas de calor por tiempos prolongados, vientos fuertes con polvaredas.	Oleadas de vientos turbulentos cruzados, inundaciones por desbordamiento de ríos.	Inundaciones, incendios de cobertura vegetal, erosión costera, sismos y tormentas eléctricas.
10	Información disponible al público	Accesible. Información técnica proporcionada por el Equipo de Ingeniería del Aeropuerto. Información oficial proporcionada por SOPESA.	Limitada Información no proporcionada por la electrificadora ni por el concesionario.	Accesible. Información técnica proporcionada por el departamento de energía del concesionario. Valores de consumo proporcionados por el CENS S.A.	Limitada Información no proporcionada por la electrificadora. Valores de consumo aproximados proporcionados por el concesionario.

Apéndice B

Segundo Apéndice

En esta sección se presentan las fichas técnicas de cada uno de los componentes dimensionados en el transcurso de este análisis, con el fin de brindar transparencia en los cálculos desarrollados.

Esta información fue obtenida en mayor parte por proveedores internacionales de equipos fotovoltaicos, los cuales presentan las características físicas, técnicas y eléctricas con base a la información brindada por los diferentes fabricantes.

La elección de estos equipos fue previamente analizada según los requerimientos dados por la infraestructura del aeropuerto, sin dejar atrás el aporte tecnológico que brindan. Los módulos fotovoltaicos rígidos seleccionados cuentan con tecnología de celda partida o tipo PERC, lo cual permite que durante días nublados o sobras naturales presentadas en el sector y que afecten parcialmente a los módulos, estos sigan aprovechando al máximo la captación de radiación solar y continúen generando energía.

Por último, los inversores seleccionados son de tipo MPPT, lo cual genera una eficiencia de cerca del 98 % en la conversión de corriente que se realiza en estos dispositivos, además de contar con tecnología 5G, lo cual permite ser monitoreado por medio de aplicaciones y dispositivos móviles las 24 horas del día; mientras que las baterías cuentan con una profundidad de descarga del 0,8 a 0,85 brindando una descarga casi completa, sin llegar a afectar su vida útil y funcionamiento.

Harvest the Sunshine

Mono

470W MBB Half-Cell Module

JAM72S20 445-470/MR Series

Introduction

Assembled with multi-busbar PERC cells, the half-cell configuration of the modules offers the advantages of higher power output, better temperature-dependent performance, reduced shading effect on the energy generation, lower risk of hot spot, as well as enhanced tolerance for mechanical loading.



Higher output power



Lower LCOE



Less shading and lower resistive loss

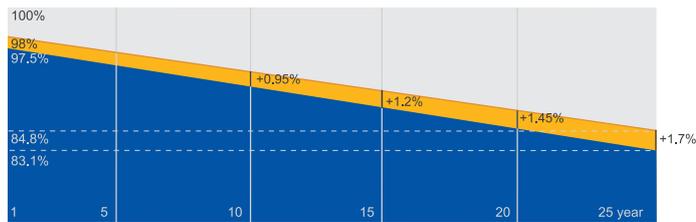


Better mechanical loading tolerance

Superior Warranty

- 12-year product warranty
- 25-year linear power output warranty

0.55% Annual Degradation Over 25 years



■ New linear power warranty ■ Standard module linear power warranty

Comprehensive Certificates

- IEC 61215, IEC 61730, UL 61215, UL 61730
- ISO 9001: 2015 Quality management systems
- ISO 14001: 2015 Environmental management systems
- ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems
- IEC TS 62941: 2016 Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Guidelines for increased confidence in PV module design qualification and type approval



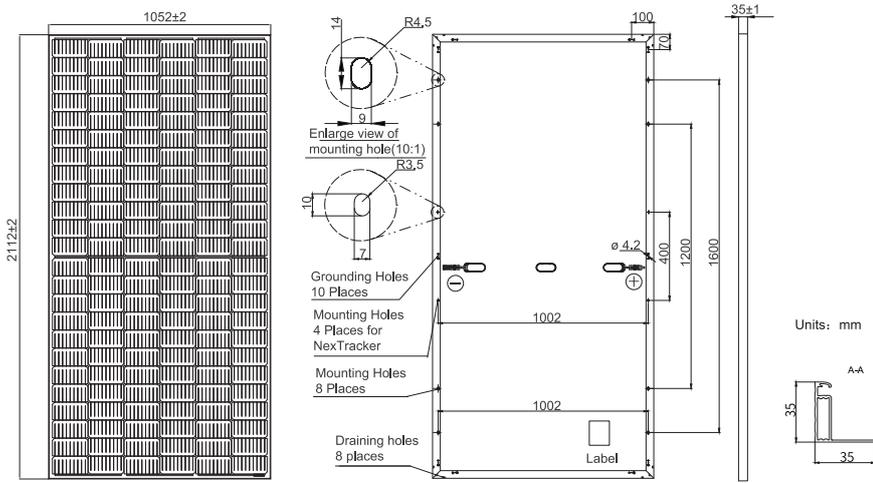
JA SOLAR

www.jasolar.com

Specifications subject to technical changes and tests.
JA Solar reserves the right of final interpretation.



MECHANICAL DIAGRAMS



Remark: customized frame color and cable length available upon request

SPECIFICATIONS

Cell	Mono
Weight	24.7kg±3%
Dimensions	2112±2mm×1052±2mm×35±1mm
Cable Cross Section Size	4mm ² (IEC) , 12 AWG(UL)
No. of cells	144 (6×24)
Junction Box	IP68, 3 diodes
Connector	QC 4.10(1000V) QC 4.10-35(1500V)
Cable Length (Including Connector)	Portrait: 300mm(+)/400mm(-); Landscape: 1200mm(+)/1200mm(-)
Packaging Configuration	31pcs/pallet 682pcs/40ft Container

ELECTRICAL PARAMETERS AT STC

TYPE	JAM72S20 -445/MR	JAM72S20 -450/MR	JAM72S20 -455/MR	JAM72S20 -460/MR	JAM72S20 -465/MR	JAM72S20 -470/MR
Rated Maximum Power(Pmax) [W]	445	450	455	460	465	470
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	49.56	49.70	49.85	50.01	50.15	50.31
Maximum Power Voltage(Vmp) [V]	41.21	41.52	41.82	42.13	42.43	42.69
Short Circuit Current(Isc) [A]	11.32	11.36	11.41	11.45	11.49	11.53
Maximum Power Current(Imp) [A]	10.80	10.84	10.88	10.92	10.96	11.01
Module Efficiency [%]	20.0	20.3	20.5	20.7	20.9	21.2
Power Tolerance				0~+5W		
Temperature Coefficient of Isc(α _{Isc})				+0.044%/°C		
Temperature Coefficient of Voc(β _{Voc})				-0.272%/°C		
Temperature Coefficient of Pmax(γ _{Pmp})				-0.350%/C		
STC	Irradiance 1000W/m ² , cell temperature 25°C, AM1.5G					

Remark: Electrical data in this catalog do not refer to a single module and they are not part of the offer.They only serve for comparison among different module types.

ELECTRICAL PARAMETERS AT NOCT

TYPE	JAM72S20 -445/MR	JAM72S20 -450/MR	JAM72S20 -455/MR	JAM72S20 -460/MR	JAM72S20 -465/MR	JAM72S20 -470/MR
Rated Max Power(Pmax) [W]	336	340	344	348	352	355
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	46.65	46.90	47.15	47.38	47.61	47.84
Max Power Voltage(Vmp) [V]	38.95	39.19	39.44	39.68	39.90	40.10
Short Circuit Current(Isc) [A]	9.20	9.25	9.29	9.33	9.38	9.42
Max Power Current(Imp) [A]	8.64	8.68	8.72	8.76	8.81	8.86
NOCT	Irradiance 800W/m ² , ambient temperature 20°C,wind speed 1m/s, AM1.5G					

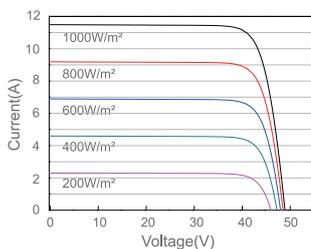
*For NexTracker installations ,Maximum Static Load, Front is 1800Pa while Maximum Static Load, Back is 1800Pa.

OPERATING CONDITIONS

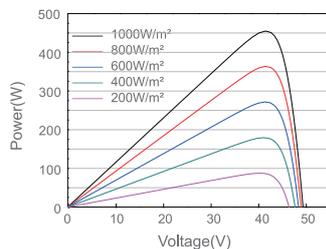
Maximum System Voltage	1000V/1500V DC
Operating Temperature	-40°C~+85°C
Maximum Series Fuse Rating	20A
Maximum Static Load,Front*	5400Pa(112 lb/ft ²)
Maximum Static Load,Back*	2400Pa(50 lb/ft ²)
NOCT	45±2°C
Safety Class	Class II
Fire Performance	UL Type 1

CHARACTERISTICS

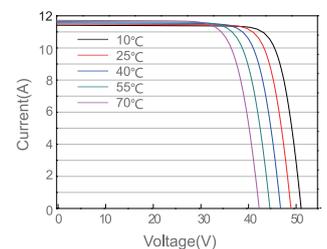
Current-Voltage Curve JAM72S20-455/MR



Power-Voltage Curve JAM72S20-455/MR



Current-Voltage Curve JAM72S20-455/MR



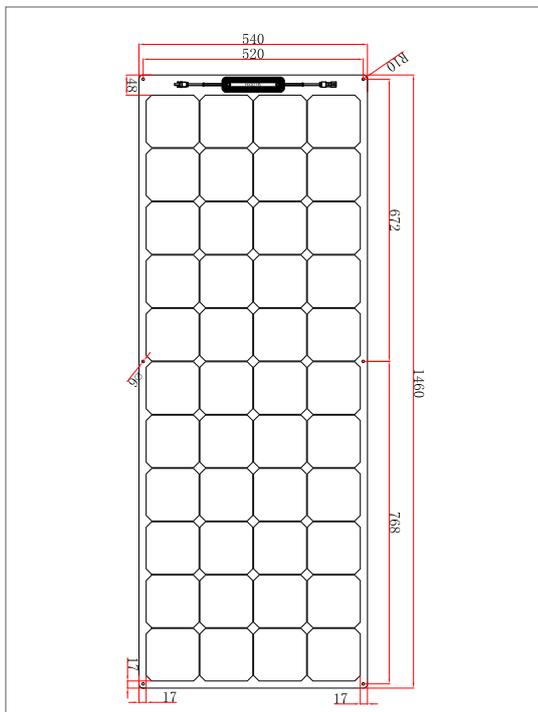
SGM-FL-150W(SP series)

High Efficiency Flexible Solar Modules



— Surface ETFE —

Module Diagram



Electrical Characteristics

Maximum power(Pmax)	150W
Open-circuit voltage(Voc)	30.1
Voltage at Pmax(Vmp)	25.5
Short-circuit current(Isc)	6.32
Current at Pmax(Imp)	5.97
Cells Efficiency(%)	22.60%
The maximum system voltage	45VDC(IEC)
Power temperature coefficient	-0.32%/°C
Voltage temperature coefficient	-1.8mV/°C
Output power tolerance	±3%
Operating Temperature	-10~60°C

Specifications

Solar cell brand	Sunpower
No.of cells and connections	44(4*11)
Module dimension	1460*540*3mm
Weight	2.86KG
Waterproof junction box	IP65 /IP67
Warranty	1 year and service life 10 years

SP-150W (Also suitable for this model)

Solis-(100-110)K-5G-SA

Solis Three Phase Inverters



Model:

400V: Solis-100K-5G-SA Solis-110K-5G-SA



360 degree

Efficient

- ▶ 10 MPPTs, max. efficiency 98.7%
- ▶ > 150% DC/AC ratio
- ▶ High power tracking density 90MPPT/MW
- ▶ Compatible with bifacial modules

Smart

- ▶ Night SVG function
- ▶ Intelligent string monitoring. Smart I-V curve scan
- ▶ Remote firmware upgrade with simple operation

Safe

- ▶ AFCI protection, proactively reduces fire risk
- ▶ Built-in PID recovery for better module performance (optional)
- ▶ Type I SPD for DC (standard) and AC (optional)
- ▶ Overvoltage load reduction and leakage current suppression technology, low failure rate
- ▶ Globally recognised branded componentry for longer life

Economic

- ▶ Power line communication (PLC) (optional)
- ▶ Support "Y" type connection in DC side
- ▶ Supports aluminium wire access to reduce cost

Datasheet

Model Name	Solis-100K-5G-SA	Solis-110K-5G-SA
Input DC		
Max. input voltage	1100 V	
Rated voltage	600 V	
Start-up voltage	195 V	
MPPT voltage range	180-1000 V	
Max. input current	10*26 A	
Max. short circuit current	10*40 A	
MPPT number/Max. input strings number	10/20	
Output AC		
Rated output power	100 kW	110 kW
Max. apparent output power	110 kVA	121 kVA
Max. output power	110 kW	121 kW
Rated grid voltage	3/N/PE, 220 V / 380V , 230 V / 400 V	
Rated grid frequency	50 Hz / 60 Hz	
Rated grid output current	152.0 A / 144.3 A	167.1 A / 158.8 A
Max. output current	167.1 A	183.8 A
Power Factor	>0.99 (0.8 leading - 0.8 lagging)	
THDi	<3%	
Efficiency		
Max. efficiency	98.7%	
EU efficiency	98.3%	
Protection		
DC reverse-polarity protection	Yes	
Short circuit protection	Yes	
Output over current protection	Yes	
Surge protection	DC Type I / AC Type II (AC Type I optional)	
Grid monitoring	Yes	
Anti-islanding protection	Yes	
Strings monitoring	Yes	
I/V Curve scanning	Yes	
Anti-PID function	Optional	
Integrated AFCI (DC arc-fault circuit protection)	Yes	
Integrated DC switch	Yes	
Integrated AC switch	Optional	
General Data		
Dimensions (W*H*D)	1065 * 567 * 344.5 mm (to be determined)	
Weight	84 kg (to be determined)	
Topology	Transformerless	
Self consumption (night)	<2 W	
Operating ambient temperature range	-25 ~ +60°C	
Relative humidity	0-100%	
Ingress protection	IP66	
Cooling concept	Intelligent redundant fan-cooling	
Max. operation altitude	4000 m	
Grid connection standard	NRS 097-2-1	
Safety/EMC standard	IEC 62109-1/-2, IEC 61000-6-2/-4	
Features		
DC connection	MC4 connector	
AC connection	OT terminal (max. 185 mm ²)	
Display	LCD	
Communication	RS485, Optional: Wi-Fi, GPRS, PLC	

OPzV2-2000(2V2000Ah)

**CHLORIDE
EXIDE**

Ritar OPzV series is Valve Regulated Lead Acid battery that adopts immobilized GEL and Tubular Plate technology to offer high reliability and performance. The Battery is designed and manufactured according to DIN standards and with die-casting positive grid and patented formula of active material OPzV series exceeds DIN standard values with more than 20 years floating design life at 25 °C ,and It is the best solution for cyclic use under extreme operating conditions.

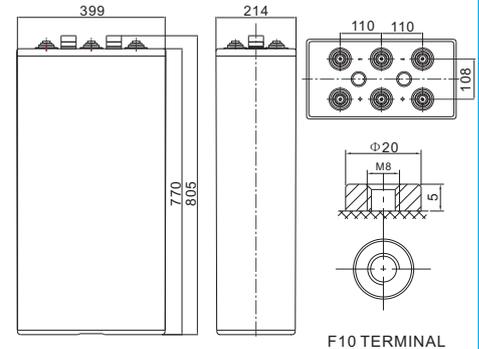


Specification

Cells Per Unit	1
Voltage Per Unit	2
Nominal Capacity	2000Ah@10hr-rate to 1.80V per cell @25°C
Weight	Approx. 150.0 Kg (Tolerance±1%)
Internal Resistance	Approx. 0.40 mΩ
Terminal	F10(M8)
Max. Discharge Current	7000A (5 sec)
Design Life	20 years (floating charge)
Maximum Charging Current	400.0 A
Reference Capacity	C24 2185AH C48 2440AH C72 2460AH C100 2490AH C120 2545AH C240 2588AH
Float Charging Voltage	2.25 V~2.30 V @ 25°C Temperature Compensation: -3mV/°C/Cell
Cycle Use Voltage	2.37 V~2.40 V @ 25°C Temperature Compensation: -4mV/°C/Cell
Operating Temperature Range	Discharge: -40°C~60°C Charge: -20°C~50°C Storage: -40°C~60°C
Normal Operating Temperature Range	25°C±5°C
Self Discharge	RITAR Valve Regulated Lead Acid (VRLA) batteries can be stored for up to 6 months at 25°C and then recharging is recommended. Monthly Self-discharge ratio is less than 2% at 25°C. Please charged batteries before using.
Container Material	A.B.S. UL94-HB, UL94-V0 Optional.

Dimensions

Unit: mm



Length	399±1mm (15.7 inches)
Width	214±1mm (8.43 inches)
Height	770±1mm (30.3 inches)
Total Height	805±1mm (31.7 inches)
Torque Value	10~12 N*m

Constant Current Discharge Characteristics :A(25°C)

F.V/ Time	30min	1h	2h	3h	4h	5h	6h	8h	10h	20h
1.90V	984.0	780.0	550.0	417.2	342.0	295.6	266.0	207.6	178.0	93.5
1.87V	1100	860.0	590.0	442.4	361.0	310.8	282.0	217.3	186.0	97.7
1.83V	1260	960.0	640.0	471.4	380.0	324.4	292.0	227.0	194.0	101.9
1.80V	1400	1040	664.0	485.0	387.6	332.0	300.0	232.8	200.0	105.0
1.75V	1560	1114	694.0	504.4	394.0	340.0	306.0	236.7	204.0	107.1
1.70V	1720	1150	714.0	514.2	400.9	344.0	310.0	238.6	206.0	108.2
1.65V	1774	1222	738.0	528.0	406.6	348.0	314.0	240.6	208.0	109.2
1.60V	1850	1264	766.0	550.0	418.0	354.0	318.0	242.5	210.0	110.3

Constant Power Discharge Characteristics : WPC(25°C)

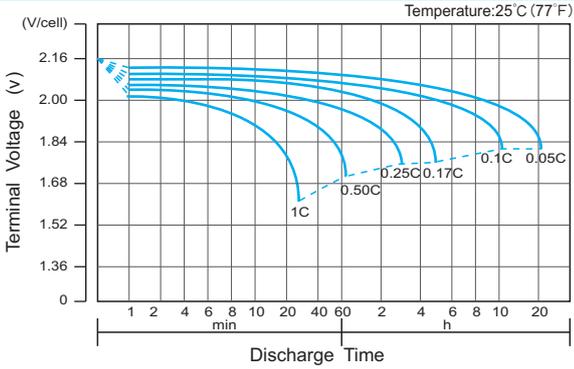
F.V/ Time	30min	1h	2h	3h	4h	5h	6h	8h	10h	20h
1.90V	1883	1497	1063	808.0	669.3	582.0	526.0	415.2	362.8	190.5
1.87V	2072	1626	1128	846.2	705.5	610.0	556.0	432.6	378.3	198.6
1.83V	2322	1773	1200	890.4	739.7	634.0	574.0	448.1	391.9	205.7
1.80V	2537	1891	1240	910.6	753.8	648.0	588.0	457.8	401.6	210.8
1.75V	2752	1976	1280	938.6	763.8	664.0	598.0	463.7	407.4	213.9
1.70V	2951	1996	1313	954.8	775.9	670.0	604.0	467.5	411.3	215.9
1.65V	3001	2084	1349	974.8	785.9	676.0	610.0	471.4	413.2	216.9
1.60V	3037	2149	1381	1007	806.0	682.0	614.0	473.4	415.2	218.0

(Note) The above characteristics data are average values obtained within three charge/discharge cycle not the minimum values.

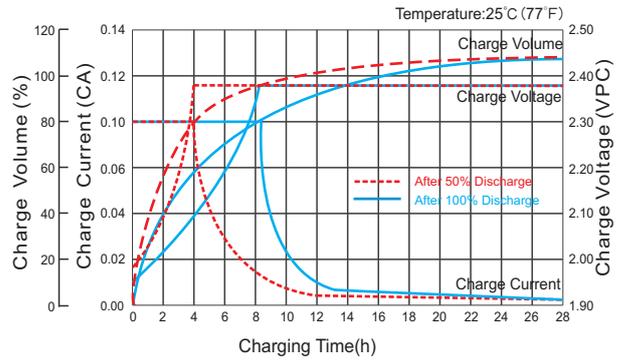
OPzV2-2000(2V2000Ah)



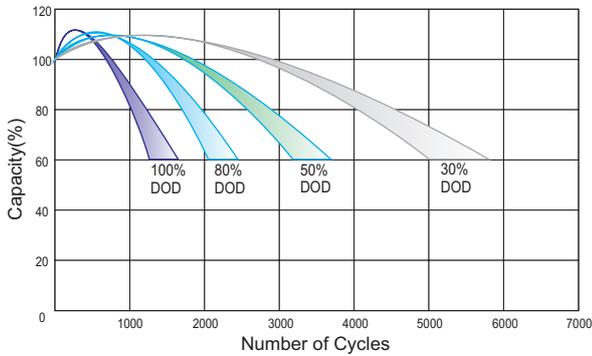
Discharge Characteristics Curve



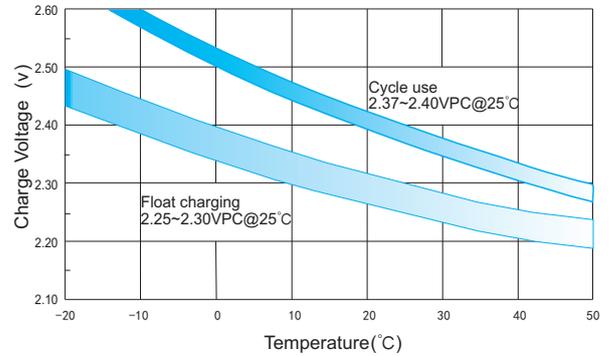
Charge Characteristic Curve for Cycle Use(IU)



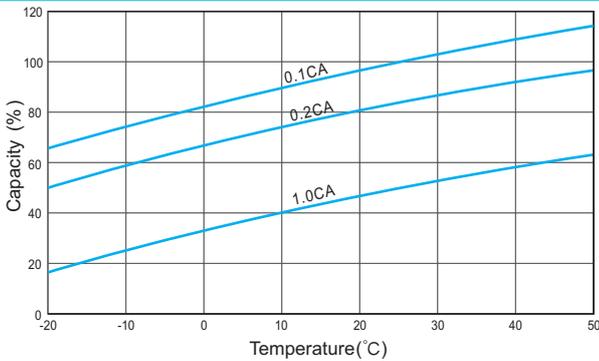
Cycle Life in Relation to Depth of Discharge



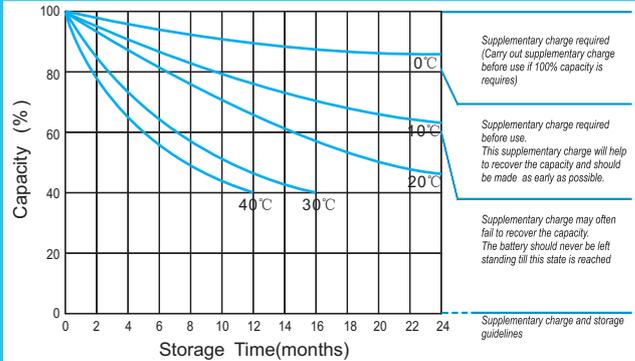
Relationship Between Charging Voltage and Temperature



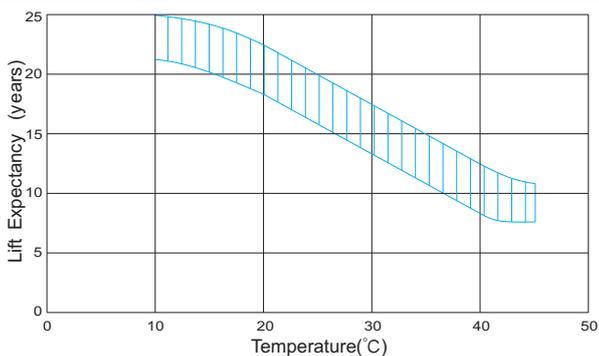
Temperature Effects on Capacity



Storage Characteristics



Effect of Temperature on Long Term Life



Relationship of OCV And State of Charge(20°C)

