



UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

“Pinturas Solares: Análisis Energético de una Nueva Tecnología Aplicada en Ecuador”

Proyecto de Investigación previo a la
obtención del Título de Ingeniero Eléctrico.

AUTORES:

ANGELO RAFAEL PEREIRA AYABACA

C.I: 070622939-0

KELVIN PAUL TENEMEA LIMA

C.I: 070589483-0

DIRECTOR:

ING. PATRICIO ALCIDES ASTUDILLO SALINAS. MSc

C.I: 140058862-8

CUENCA – ECUADOR

2018



RESUMEN

El propósito de este trabajo de investigación es determinar si la energía solar fotovoltaica «FV» a través de una nueva tecnología emergente como las pinturas solares podría ser aplicable para la generación de electricidad en el Ecuador, esto desde el punto de vista teórico.

Del mismo modo, se realiza una exhaustiva investigación del estado del arte de la nueva tecnología de pintura solar con el único fin de conocer su trascendencia científica, experimental y comercial, para este modo dar análisis a su eficiencia energética tomando en consideración los datos geográficos y climatológicos que caracteriza al Ecuador en cada uno de sus regiones y localidades.

Con el apoyo del atlas solar del Ecuador y otras fuentes confiables, se determinan las potenciales zonas para el aprovechamiento de la radiación solar. De esta manera se realiza un planteamiento para el cálculo energético, económico y ambiental de la zona que sería la óptima para la generación de electricidad mediante la aplicación de la pintura solar.

Finalmente, luego del análisis energético, económico y ambiental, se determina la zona óptima del Ecuador factible para la aplicación. Además, se establecen criterios de innovación y futuros desafíos de Investigación de la nueva tecnología.

PALABRAS CLAVES: Energía Solar Fotovoltaica, Tercera Generación Fotovoltaica, Nanotecnología, Nanomateriales, Fotovoltaica Orgánica, Pintura Solar, Eficiencia Energética, Energías Renovables, Ecuador.



ABSTRACT

The purpose of this research work is to determine if PV solar energy through a new emergent technology like solar paints could be feasible for generation of electricity in Ecuador, this from the theoretical point.

Similarly, an exhaustive research about the state of art of Solar Paints new technology has done in order to know its scientific, experimental and commercial transcendence, and this way make an analysis about the energy efficiency of the solar paints taking into account geographic and climatologic data that characterizes Ecuador in each one of its regions and places.

With the support of the solar atlas and others reliable sources, the potential areas for the use of solar radiation are determined. In such a way that an approach is made for the energy, economic and environmental calculation of the area that would be the optimum for the generation of electricity through application of the solar paint.

Finally, after the energy, economic and environmental analysis, the optimal zone of the Ecuador is determined feasible for its application. Furthermore, innovation criteria and future research challenges of the new technology are established.

KEYWORDS: Photovoltaic Solar Energy, Photovoltaic Third Generation, Nanotechnology, Nanomaterials, Organic Photovoltaic, Solar Paint, Energy Efficiency, Renewable Energy, Ecuador.



ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
INTRODUCCIÓN	22

CAPÍTULO 1

ASPECTOS GENERALES Y OBJETIVOS

1.1 Antecedentes	23
1.2 Justificación.	24
1.3 Alcance.	26
1.4 Metodología.	26
1.5 Objetivos.	27
1.5.1 Objetivo General.....	27
1.5.2 Objetivos Específicos.	27

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1. Energía Solar.....	28
2.1.1. Formas de Aprovechamiento.....	29
2.1.2. Producción, Consumo y Duración.	30
2.2. Radiación Solar.....	30
2.2.1. Tipos de Radiación Solar.....	32
2.2.2. Trayectoria de Incidencia de la Irradiación Solar.	34
2.2.3. Espectro de la Radiación Solar.....	37
2.3. Energía Solar Fotovoltaica.....	41



2.3.1. El Efecto Fotovoltaico	41
2.3.2. Potencial de la Energía Solar Fotovoltaica.....	42
2.3.3. Tecnologías para Aprovechar la Energía Solar Fotovoltaica.....	42
2.3.4. Componentes de un Sistema Fotovoltaico	43
2.3.5. La importancia de explorar nuevas tecnologías.....	45
2.4. Tercera Generación Fotovoltaica.....	46
2.5. Las Pinturas Solares.....	48
2.5.1. Antecedentes.....	48
2.5.2. La Nanotecnología.....	50
2.5.3. Sistema Fotovoltaico Orgánico.....	52
2.5.4. Nanomateriales Orgánicos Fotovoltaicos.....	54
2.5.4.1. Nanopartícula de Óxido de Titanio TiO ₂	54
2.5.4.2. Nanopartícula de Óxido de Zinc ZnO	56
2.5.4.3. Nanotubos de Carbono NTC	57
2.5.5. Método Experimental de la Pintura Solar.....	59
2.5.5.1. Materiales.....	59
2.5.5.2. Preparación	60
2.5.5.3. Sensibilización.....	63
2.5.5.4. Principio de funcionamiento.	64
2.5.5.5. Pruebas y Mediciones de Laboratorio.....	71
2.5.5.6. Disposición del Ánodo y Cátodo.....	72
2.5.6. Ventajas y Desventajas.....	73
2.5.7. Fabricación y Comercialización.	75



CAPÍTULO 3

ANÁLISIS ENERGÉTICO DE LA PINTURA SOLAR EVALUACIÓN EN BASE AL POTENCIAL SOLAR Y CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS DEL ECUADOR

3.1.	Potencial Solar en el Ecuador.....	77
3.1.1.	Introducción.....	77
3.1.2.	Atlas Solar.....	78
3.1.3.	Zonas de Aprovechamiento.....	80
3.2.	Análisis de la Radiación Solar en el Ecuador.....	81
3.3.	Análisis Energético de las Pinturas Solares.....	82
3.3.1.	Introducción.....	82
3.3.2.	Eficiencia de las Pinturas Solares.....	83
3.3.3.	Requerimientos básicos para la Aplicación de la Pintura Solar....	85
3.3.4.	Ánálisis del Ciclo de Vida	86
3.3.5.	Fases del ciclo de vida	89
3.3.6.	Tiempo de Recuperación de Energía	91
3.3.7.	Limitaciones del Sistema FV a base de Pinturas Solares.....	93
3.3.8.	Estabilidad y Degradación	93
3.3.9.	Curvas de Decaimiento	98
3.3.10.	Estándares ISOS	101
3.3.11.	Defectos Eléctricos	102
3.3.12.	Condiciones Ambientales Adversas	103
3.3.13.	Distorsión del Revestimiento	104
3.4.	Mantenimiento durante su tiempo de vida.....	105
3.5.	Propuestas de Mejoramiento.....	106



CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA DE CÁLCULO, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis Energético	108
4.2. Análisis Económico.....	126
4.3. Análisis Ambiental.....	129
4.4. Determinación de la Zona Óptima	131
4.5. Innovación de la Tecnología.	134
4.6. Futuros Desafíos de Investigación.....	135

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.	136
5.2. Recomendaciones.	138

BIBLIOGRAFÍA	140
---------------------------	------------

ANEXOS	151
---------------------	------------



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de energía solar absorbida por la Tierra.....	28
Figura 2. Tipos de radiación solar.	32
Figura 3. Rotación de la Tierra alrededor del sol. El ángulo entre el sol y el ecuador se denomina declinación solar δ	34
Figura 4. Ángulo de altitud del sol al mediodía.	35
Figura 5. Posición del sol descrito por su ángulo de altitud β y su ángulo azimutal ϕ_s	36
Figura 6. Recorrido del Sol en el Hemisferio Norte.	36
Figura 7. Relación Sol-Tierra.....	37
Figura 8. Irradiación Global, kWh/m ² -año.....	38
Figura 9. Irradiación normal directa, kWh/m ² -año.	38
Figura 10. Irradiación horizontal difusa, kWh/m ² -año.	39
Figura 11. Espectro de radiación solar estándar.	40
Figura 12. Clasificación de las tecnologías de células solares.	43
Figura 13. Elementos de un sistema fotovoltaico a nivel residencial.	45
Figura 14. Eficiencia y proyecciones de costo para las tres generaciones.....	48
Figura 15. Escala de dimensiones de varios objetos sobre escala del nanómetro.	51
Figura 16. Celda solar sensibilizada por puntos cuánticos.....	52
Figura 17. Estructura cristalina del Óxido de Titanio TiO ₂	55
Figura 18. Simulación de la estructura del Óxido de Titanio.....	55
Figura 19. Estructura cristalina del Óxido de Zinc.	56
Figura 20. Nanotubos de Carbono.	58
Figura 21. Principio del enfoque de la Pintura Solar.....	60
Figura 22. Deposición de capas secuenciales de CdS y CdSe sobre el TiO ₂	61
Figura 23. Pasos durante la preparación de la Pintura Solar.	62
Figura 24. Ilustración de la modificación del TiO ₂	64
Figura 25. Sensibilización del TiO ₂ con CdSe.	64

Figura 26. Operación de una celda solar a base de TiO ₂ sensibilizada con puntos cuánticos de CdSe.....	65
Figura 27. Partes de una celda sensibilizada con colorante.....	66
Figura 28. Componentes de la celda a base de puntos cuánticos.	66
Figura 29. Representación esquemática de los principios constructivos y operacionales de la celda sensibilizada basada en TiO ₂	67
Figura 30. Capa conductora de electricidad.	68
Figura 31. Ubicación e instalación de los cables	68
Figura 32. Aplicación de la Pintura Solar (a la derecha los nanotubos).	69
Figura 33. Dinámica del flujo de electrones produciendo electricidad.	69
Figura 34. Aplicación de la Pintura Solar FV: a) sobre techo de teja. b) sobre madera.	70
Figura 35. Curvas I-V de la Pintura Solar.	71
Figura 36. Generación de fotocorriente producida por el flujo de electrones del TiO ₂ (flecha amarilla) y CdSe (flecha naranja).....	73
Figura 37. Irradiación Solar Global del Ecuador.	78
Figura 38. Irradiación Solar Directa del Ecuador	79
Figura 39. Irradiación Solar Difusa del Ecuador	80
Figura 40. Marco de Metodología LCA.....	87
Figura 41. Evaluación del Ciclo de Vida desde el inicio hasta el fin.	89
Figura 42. Fases del ciclo de vida de un producto.	90
Figura 43. Artículos científicos publicados sobre OPV.....	94
Figura 44. Comportamiento de ciclo de vida y degradación de dispositivos OPV ubicados en Australia y Dinamarca respectivamente.	98
Figura 45. Estabilidad como función del tiempo.	99
Figura 46. Curva de decaimiento para un dispositivo con geometría normal e invertido.....	100
Figura 47. Cumbre Internacional de la Estabilidad Orgánica.	101
Figura 48. Figura representativa que define los parámetros que se incluirán en el informe de los datos de estabilidad de OPV.....	102
Figura 49. Dispositivos de película delgada (10-1000 nm).....	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Declinación Solar δ para el día 21 de cada mes, en grados.....	35
Tabla 2. Desempeño foto electroquímico de la Pintura Solar.....	71
Tabla 3. Insolación Global Promedio Anual por Provincia [Wh/(kWh/(m ² -día))]	81
Tabla 4. Eficiencias obtenidas por varias investigaciones de la Pintura Solar.....	84
Tabla 5. Ángulos de inclinación recomendadas por la NEC de acuerdo a cada techo o cubierta.....	108
Tabla 6. Radiación para Escenario 1: $\alpha=0^\circ$ y $p=0^\circ$	111
Tabla 7. Radiación para Escenario 2: $\alpha=0^\circ$ y $p=10^\circ$	112
Tabla 8. Radiación para Escenario 3: $\alpha=0^\circ$ y $p=15^\circ$	113
Tabla 9. Radiación para Escenario 4: $\alpha=0^\circ$ y $p=20^\circ$	114
Tabla 10. Radiación para Escenario 5: $\alpha=0^\circ$ y $p=25^\circ$	115
Tabla 11. Radiación para Escenario 6: $\alpha=0^\circ$ y $p=30^\circ$	116
Tabla 12. Calculo Energético Anual para Escenario 1: $\alpha=0^\circ$ y $p=0^\circ$	117
Tabla 13. Cálculo Energético Anual para Escenario 2: $\alpha=0^\circ$ y $p=10^\circ$	118
Tabla 14. Cálculo Energético Anual para Escenario 3: $\alpha=0^\circ$ y $p=15^\circ$	119
Tabla 15. Cálculo Energético Anual para Escenario 4: $\alpha=0^\circ$ y $p=20^\circ$	120
Tabla 16. Cálculo Energético Anual para Escenario 5: $\alpha=0^\circ$ y $p=25^\circ$	121
Tabla 17. Cálculo Energético Anual para Escenario 6: $\alpha=0^\circ$ y $p=30^\circ$	122
Tabla 18. Resultados Energéticos Finales.....	123
Tabla 19. Consumo energético de las cargas de un sistema eléctrico básico.....	124
Tabla 20. Factor K Guayaquil	165
Tabla 21. Factor K Quito	165
Tabla 22. Factor K San Simón	166
Tabla 23. Factor K Puerto Baquerizo Moreno.....	166
Tabla 24. Factor K Santa Rosa	167
Tabla 25. Factor K Mindo.....	167
Tabla 26. Factor K Sangay	168
Tabla 27. Factor K San Cristóbal.....	168



Tabla 28. Radiación para Escenario 1: $\alpha=0^\circ$ y $p=0^\circ$	169
Tabla 29. Radiación para Escenario 2: $\alpha=0^\circ$ y $p=10^\circ$	171
Tabla 30. Radiación para Escenario 3: $\alpha=0^\circ$ y $p=15^\circ$	173
Tabla 31. Radiación para Escenario 4: $\alpha=0^\circ$ y $p=20^\circ$	175
Tabla 32. Radiación para Escenario 5: $\alpha=0^\circ$ y $p=25^\circ$	177
Tabla 33. Radiación para Escenario 6: $\alpha=0^\circ$ y $p=30^\circ$	179

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Comparación Escenario 1.....	117
Gráfico 2. Comparación Escenario 2.....	118
Gráfico 3. Comparación Escenario 3.....	119
Gráfico 4. Comparación Escenario 4.....	120
Gráfico 5. Comparación Escenario 5.....	121
Gráfico 6. Comparación Escenario 6.....	122
Gráfico 7. Comparación Energética Final.....	123



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Yo, Angelo Rafael Pereira Ayabaca en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "PINTURAS SOLARES: ANÁLISIS ENERGÉTICO DE UNA NUEVA TECNOLOGÍA APLICADA EN ECUADOR", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, Marzo de 2018.

Angelo Rafael Pereira Ayabaca

C.I: 070622939-0



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Yo, Kelvin Paul Tenemea Lima en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “PINTURAS SOLARES: ANÁLISIS ENERGÉTICO DE UNA NUEVA TECNOLOGÍA APLICADA EN ECUADOR”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, Marzo de 2018.



Kelvin Paul Tenemea Lima

C.I: 070589483-0



Cláusula de Propiedad Intelectual

Angelo Rafael Pereira Ayabaca, autor del trabajo de titulación "PINTURAS SOLARES: ANÁLISIS ENERGÉTICO DE UNA NUEVA TECNOLOGÍA APLICADA EN ECUADOR", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, Marzo de 2018.

Angelo Rafael Pereira Ayabaca

C.I: 070622939-0



Cláusula de Propiedad Intelectual

Kelvin Paul Tenemea Lima, autor del trabajo de titulación “PINTURAS SOLARES: ANÁLISIS ENERGÉTICO DE UNA NUEVA TECNOLOGÍA APLICADA EN ECUADOR”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, Marzo de 2018.

Kelvin Paul Tenemea Lima

C.I: 070589483-0



AGRADECIMIENTOS

A Dios por habernos guiado cada uno de nuestros pasos hacia el buen camino.

A nuestros seres queridos; padres y familia en general por ser quienes nos han brindado su apoyo, amor & confianza en el trayecto de vida como personas y estudiantes.

A la Universidad Estatal de Cuenca, especialmente a la Facultad de Ingeniería en su Escuela de Ingeniería Eléctrica por permitirnos realizar nuestros estudios profesionales en el campo de la ciencia y tecnología.

Un sincero agradecimiento al Ing. Patricio A. Astudillo S. por la total disponibilidad, colaboración, y consejos para orientarnos durante la realización y culminación de este proyecto de investigación.

A todos los docentes de la Facultad de Ingeniería que impartieron sus conocimientos, experiencias y motivaciones en cada una de las clases para nuestra formación académica.

A todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron para hacer realidad nuestro sueño.

Los Autores



DEDICATORIA

A Dios por iluminar siempre mi camino orientando cada uno de mis pasos con sabiduría, salud y humildad.

Dedicado con todo el amor del mundo a mi pilar fundamental de vida como es mi maravillosa madre Angélica M. Ayabaca L. quien nunca descansó y siempre luchó desde muy joven trabajando arduamente para darnos el estudio y vernos como profesionales tanto a mi hermana como mí.

A mi hermana Evelyn y Don Augusto con inmenso cariño por el apoyo, confianza y amor incondicional que me han brindado, especialmente a mi pequeño Didier quien llegó a formar parte de la familia llenándonos de alegría y amor.

A todas las personas que me apoyaron de manera afectuosa en algún momento de mi vida personal y estudiantil.

A toda mi familia, profesores, compañeros y amigos.

Angelo Rafael Pereira Ayabaca



DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico con mucho amor a mi querida madre María Rosaura Lima Cárdenas, por darme todo el apoyo incondicional para lograr obtener un título profesional.

A mi padre José Reinaldo Tenemea Marín, por enseñarme a soñar en grande y a luchar arduamente por lo que se anhela con pasión.

A mis hermanas, hermano, sobrinos, y sobrinas que supieron alentarme desde la distancia y darme sus sonrisas como fuente de inspiración para dar lo mejor de mí mismo y ser un ejemplo de superación personal, demostrándoles que el esfuerzo acompañado del corazón, hacen posible cualquier sueño.

A mis grandes amistades que me brindaron su apoyo en buenos y malos momentos, que fueron testigos y partícipes del arduo esfuerzo realizado en la travesía académica.

Kelvin Paul Tenemea Lima



GLOSARIO DE TÉRMINOS

LETRAS MAYÚSCULAS

°C	Grados Centígrados
Amp	Amperios
ARCONEL	Agencia de Regulación y Control de Electricidad (Ex CONELEC)
CdS	Sulfuro de Cadmio
CdSE	Seleniuro de Cadmio
CIE	Corporación para la Investigación Científica
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
COP21	Conferencia de las Partes
EPBT	Energy Payback Time (Tiempo de Retorno de la Energía)
FF	Fill Factor (Factor de Relleno)
FTO	Vidrio Semiconductor Transparente
FV	Fotovoltaico/a
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica)
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
Isc	Corriente de Corto Circuito
ISO	International Standardization Organization
ITO	Óxido de Indio y Estaño
LCA	Life Cycle Analysis (Análisis del Ciclo de Vida)
LCI	Life Cycle Inventory (Inventario del Ciclo de Vida)
MEER	Ministerio de Electricidad y Energía Renovable
MBEP	Millones de Barriles Equivalentes de Petróleo



NASA	National Aeronautics and Space Administration (Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio)
NEC	Norma Ecuatoriana de la Construcción
NREL	National Renewable Energy Laboratory (Laboratorio Nacional de Energía Renovable)
NTC	Nanotubo de Carbono
OLADE	Organización Latinoamericana de Energía
ONU	Organización de las Naciones Unidas
OTE	Optically Transparent Electrode (Electrodo Ópticamente Transparente)
RAE	Real Academia Española
TCO	Óxido Conductor Transparente
TGA	Gravimetric Thermal Analysis (Análisis Térmico Gravimétrico)
TiO₂	Óxido de Titanio
UV	Ultravioleta
V	Voltios
V_{oc}	Voltaje de Circuito Abierto
W	Vatio
GW	Gigavatio
TW	Teravatio
W.h	Vatios Hora
ZnO	Óxido de Zinc

LETRAS MINÚSCULAS

cm	centímetro
cm²	centímetro cuadrado
m	metro
m²	metro cuadrado
km	kilómetro
km/seg	kilómetro por segundo



kW	kilovatio
kW.h/año	kilovatio hora por año
kW/m²	kilovatio por metro cuadrado
m²	metros cuadrado
m.s.n.m	metros sobre el nivel del mar
mA	miliamperio
nm	nanómetro
seg	segundos
um	micrómetro



INTRODUCCIÓN

Debido al incentivo del uso de las energías renovables no convencionales, a través del ARCONEL (antes CONELEC) en su Artículo 63 de la Ley de Régimen del Sector Eléctrico, ha originado que varias investigaciones en el área de la generación eléctrica se deriven a la explotación de nuevas fuentes de energías renovables, limpias y amigables con el medio ambiente.

Por lo que, las tendencias no solo en universidades, sino también de las empresas públicas y privadas se han enfocado a la exploración de nuevas tecnologías como alternativas viables para abastecer la creciente demanda eléctrica, especialmente en aquellos sectores aislados que difícilmente tienen acceso a la red eléctrica y que conformarían un sistema FV autónomo.

Los avances de la nanotecnología están dando resultados en el campo de materiales FV's, es así que una de esas tecnologías emergentes es la Pintura Solar, que según varias investigaciones llegarían a tener un potencial energético mayor que los paneles FV's convencionales. Por esta razón, se enfoca en realizar un análisis energético en base a datos obtenidos en laboratorios y experiencias a nivel mundial, producto de la investigación científica que se lleva a cabo día a día con el único fin de mejorar sus propiedades para obtener una mayor eficiencia energética.

De este modo, tener un enfoque técnico de cuán factible sería aplicar esta tecnología en la zona más óptima de acuerdo al potencial solar que posee el Ecuador. Por consiguiente, sabiendo que es una tecnología en vía de desarrollo y no comercial en gran cantidad hasta el momento, es evidentemente que su eficiencia energética es muy baja, por ende, la única aplicación atribuible de las Pinturas Solares tiende a pequeña escala, es decir, únicamente para la autogeneración residencial en el cual requieren de energía para abastecer pequeñas cargas y no para aquellos que superen su capacidad de generación.



CAPÍTULO 1

ASPECTOS GENERALES Y OBJETIVOS

1.1 Antecedentes.

Como consecuencia de diversos estudios en el campo de la energía solar y mejorar la eficiencia de los actuales paneles solares convencionales, emerge una nueva tecnología conocida como «Pintura Solar», la misma que podría suponer un excelente avance de este tipo de energía renovable a nivel mundial, pudiendo llegar a ser el futuro de la energía solar.

Según uno de los entes científicos que investigan esta nueva tecnología, como el laboratorio de la Universidad de Swansea, en Swansea, Gales, Reino Unido, bajo la dirección del Dr. Dave Worsley, pionero y responsable del proyecto, tendría más eficiencia energética al momento de capturar la radiación solar inclusive en lugares poco soleados, no obstante serían mucho más baratos y flexibles en comparación al espacio que ocupan actualmente los paneles solares.

De igual modo, esta nueva tecnología pretende tener un mayor tiempo de vida útil, mejorando sus propiedades químicas y eléctricas que eviten su degradación de acuerdo a las condiciones geográficas y climatológicas donde se apliquen, más aún, en condiciones ambientales adversas.

Mientras continúen las investigaciones de las pinturas solares, este proyecto de tesis servirá para futuras observaciones y desafíos relacionados al tema, y más aún si es posible llevar a cabo la implementación de esta tecnología de Pintura Solar a una vivienda para la generación de electricidad, y de esa manera empezar una competencia económica sobre los paneles solares convencionales.



1.2 Justificación.

El notable cambio climático global provocado por fuentes de energía que utilizan combustibles fósiles (como generación térmica) es indudablemente preocupante debido a la cantidad de emisión de gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global.

Por otro lado, la inequidad poblacional que existe en el Ecuador es significante, debido a la existencia de personas generalmente de sectores rurales marginales con carencia de servicios básicos, siendo uno de estos el déficit de la energía eléctrica, debido a razones técnicas, económicas y ambientales que impiden llevar las redes eléctricas a lugares muy remotos. Por ello, el desafío es alcanzar el desarrollo del país mejorando la calidad de vida, accediendo a fuentes de energía renovable, asequible y sostenible para que sean autosustentables permitiendo cubrir sus propias necesidades tecnológicas (alumbrado, comunicación, etc) y comerciales (agricultura, artesanías, etc). Generalmente las zonas que aún no cuentan con el servicio eléctrico se encuentran especialmente ubicadas en la Amazonía e inclusive ciertas zonas de Pichincha, según el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER).

Para afrontar de manera responsable estos amplios problemas, el MEER a través de estrategias promueve consolidar el proyecto de Electrificación Rural abastecida con energía renovable no convencional especialmente en zonas aisladas. Además, según el ARCONEL en su Informe del Balance Nacional de Energía 2016, la generación de electricidad mediante energía FV es apenas el 0,36%, el 42,1% a través de Hidroelectricidad, Biomasa, Eólica, y el restante 57,54% de Biogás y fuentes que usan combustibles fósiles.

A causa de esto, según la Organización Latinoamericana de Energía, OLADE, Ecuador es pionero en las iniciativas para abastecer la electrificación rural a través de sistemas FV's aislados en forma de microrredes, esto dado que resulta poco o nada económico utilizar generación a base de combustibles.



Por ese motivo las innovaciones tecnológicas no se detienen, y a pesar de ciertas limitaciones en cuanto a su construcción y comercialización, la Pintura Solar FV promete un potencial energético en un futuro no muy lejano para afrontar las necesidades energéticas en sectores o comunidades remotas, por ende, se estima necesario realizar este análisis investigativo siguiendo de muy cerca su evolución.

Geográficamente la ubicación del Ecuador en la mitad del mundo lo beneficia, porque durante todo el año la radiación solar teóricamente es constante llegando a variar únicamente de manera insignificante en períodos de lluvia. Muestra de aquello son los sistemas FV's instalados en zonas remotas de la Amazonía, Guayaquil y sectores aislados de la Sierra.

Teniendo experiencia en aquellos sistemas y privilegiados de tener una radiación solar constante, es conveniente realizar un análisis energético para la generación de electricidad mediante las Pinturas Solares, y de esta manera conocer sus características y beneficios con respecto a la sostenibilidad energética.

Actualmente, la pintura solar, a diferencia de los paneles convencionales serían más económicas y amigables con el medio ambiente, debido a que serán más flexibles, fácil traslado, y lo más importante que ocuparían menos espacio puesto que formarían parte de la estructura del domicilio sin afectar la fachada, techo o arquitectura de la vivienda con dicha tecnología. Estas particularidades lo ubican como una alternativa para satisfacer las necesidades energéticas en ciertas zonas del Ecuador que no tienen acceso a la energía eléctrica o a nivel nacional. Otro punto favorable es la disminución significativa de la basura electrónica, que a diferencia de los paneles solares que amenazan el medioambiente luego de cumplir su vida útil volviéndose residuos, las Pinturas Solares podrán ser desechadas como cualquier otra basura orgánica reduciendo el impacto ambiental.



1.3 Alcance.

La investigación comprende el análisis energético de las potenciales zonas de aprovechamiento de la energía solar a través del atlas solar y estudios realizados al respecto, con el único propósito de generar electricidad mediante la aplicación de la pintura solar.

Con ello, y además de los medios informativos que ofrecen las entidades energéticas del país, así como también de las investigaciones realizadas hasta el momento acerca del estado del arte de la nueva tecnología, se plantea un adecuado análisis energético, económico y ambiental para la posible factibilidad de su instalación.

Con los resultados obtenidos de las pinturas solares así como de los paneles convencionales se empieza una discusión energética, económica y ambiental. De este modo inicial y teórico se podrá definir la zona más óptima que cumpla con los requisitos técnicos para una factible instalación de la nueva tecnología.

1.4 Metodología.

El procedimiento a emplear es esencialmente teórico, en base a investigaciones científicas del tema a nivel mundial. Esto puesto que aún la tecnología de Pintura Solar sigue siendo material de experimentación y pruebas de laboratorio en las que científicos apuestan que en los próximos años sea totalmente comercial y con un potencial energético competitivo con otras tecnologías de generación.

Dentro del contexto investigativo, lo más cerca que se encuentra la Pintura Solar FV es en México, país donde se ha logrado la fabricación de la tecnología por medio de investigadores del Instituto Tecnológico de la Laguna, mismo que ha sido tema relevante de varias exposiciones y patentes.



Dicho esto, y con el conocimiento de las potenciales zonas de aprovechamiento del recurso solar del Ecuador, se enfoca en la recopilación de datos teórico-técnico y evidenciables de esta nueva tecnología, para finalmente llevar a cabo un análisis energético, así como también económico y ambiental para su aplicación en la estudiada zona óptima y viable.

1.5 Objetivos.

1.5.1 Objetivo General.

Desarrollar el Análisis Energético de la Pintura Solar FV como aplicación de una nueva tecnología para la generación de electricidad en el Ecuador.

1.5.2 Objetivos Específicos.

- ▶ Desarrollar un estudio del recurso solar del Ecuador para seleccionar la zona óptima aprovechable conforme el análisis energético de la Pintura Solar FV.
- ▶ Investigar el Estado del Arte de la Pintura Solar y la Importancia de explorar nuevas tecnologías.
- ▶ Analizar, desde el punto de vista energético, económico y ambiental los resultados obtenidos y discutir la factibilidad de la probable implementación de viviendas con techos o cubiertas revestidas con pintura solar.
- ▶ Plantear soluciones a las limitaciones de la nueva tecnología de acuerdo a las condiciones climatológicas del Ecuador.
- ▶ Proponer la innovación de la nueva tecnología a través de la investigación e inversión para la adquisición de la pintura solar en el Ecuador.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE.

2.1. Energía Solar.

La energía solar es la energía originaria del sol, la cual llega a la tierra en forma de luz ultravioleta, visible e infrarrojo y es la principal fuente de energía. Siendo así, el sol lleva 4.500 millones de años iluminando el universo, entregando energía y calor para la evolución de la vida en nuestro planeta, y de acuerdo a estudios de la NASA, el sol seguirá brillando aproximadamente durante los próximos 6.500 millones de años [1].

Desde entonces, la luz del sol ha ido almacenándose en la superficie terrestre en varias de sus formas como carbón, residuos minerales, rocas, etc. Es decir, siempre se ha utilizado el sol, y de la misma manera ha sido aprovechado por la humanidad a través de la historia, y cuantas más formas para utilizar su energía se encuentre mejor será la vida futura. La Figura 1 muestra la distribución de la energía solar en el momento que ingresa a la atmósfera de la Tierra [2].

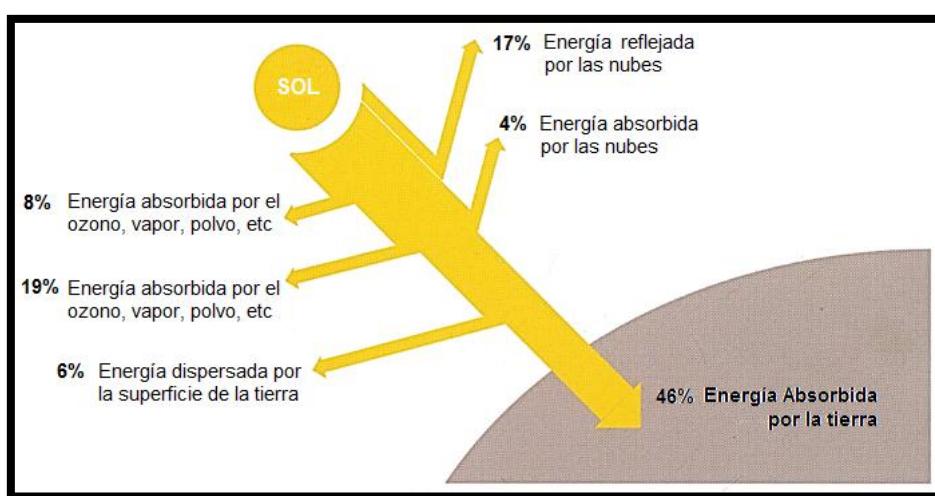


Figura 1. Esquema de energía solar absorbida por la Tierra.

Fuente: P. Wegertseder y Otros, 2016 [2].



Como fuente de energía renovable, la energía solar tiene dos aplicaciones importantes:

- 1) **Energía Solar Directa:** Implica realizar solo una conversión o transformación para obtener una forma de energía utilizable. Ejemplo: Captación Térmica y Captación FV.
- 2) **Energía Solar Indirecta:** Implica realizar más de una conversión o transformación para obtener una forma de energía utilizable. Ejemplo: Energía Hidráulica, Eólica, Mareomotriz, etc.

2.1.1. Formas de Aprovechamiento.

Basados en la aplicación de la energía solar directa e indirecta, para aprovechar al máximo el potencial energético que nos ofrece el sol, los métodos más importantes para este aprovechamiento son mediante los sistemas térmicos y FV's [3].

- a) Los sistemas térmicos aprovechan la energía solar para convertirla en energía térmica y utilizarla principalmente para el calentamiento de agua, calefacción, refrigeración, ventilación, etc. a través del uso de colectores solares.
- b) Los sistemas FV aprovechan la energía solar para convertirla en energía eléctrica a través de la captación fotónica sobre paneles solares o en nuevas tecnologías como la pintura solar FV.
- c) Existen además métodos químicos para un aprovechamiento bioquímico de la energía solar.

Son varias las tecnologías disponibles para la explotación de la radiación solar, algunos de ellos son utilizados directamente para producir calor, mientras que



otros producen energía eléctrica, el problema es que aún es una tecnología costosa [4].

2.1.2. Producción, Consumo y Duración.

Debido a la particularidad que tiene este tipo de energía proveniente del sol, su producción es a nivel mundial y de la misma manera su consumo. Es así que existen diferentes tecnologías y métodos de aprovechamiento del potencial solar para diferentes aplicaciones humanas.

En varios países ya se encuentran instalados varios sistemas FV's, sean estos, en centrales solares o sistemas aislados, con el único objetivo de consumir la energía radiante procedente del sol.

Se estima que el sol brilla únicamente por 9 a 10 mil millones de años según la NASA, y como en la sección precedente se afirmó que esta estrella lleva entregando energía por aproximadamente 4 mil millones de años desde que se formó, es decir, un poco menos de la mitad de su vida. Sabiendo esto, y comparada con el tiempo de vida humana se tendría una fuente de energía solar ilimitada e inagotable que se debe aprovechar al máximo.

2.2. Radiación Solar.

La luz del sol es una de las varias ondas electromagnéticas que están presentes en el espacio y que poseen energía [5]. Esta energía es el resultado de las reacciones nucleares de fusión que se producen en el núcleo del sol y se transmiten a manera de radiación electromagnética llegando a la atmósfera como espectro electromagnético con aproximadamente 0,15 a 4 micrómetros [μm] de longitud de onda [6].

Las propiedades de la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra se clasifica en tres tipos: luz ultravioleta, luz visible y luz infrarroja, es decir, a

longitudes de onda y frecuencias distintas. A continuación se define cada una de estas ondas electromagnéticas procedentes del sol [5].

a) Luz Ultravioleta UV: Esta longitud de onda presenta mayor propiedad cuántica, es decir, mayor cantidad de energía que la visible e infrarroja. Se divide en tres bandas:

- 1) UV-A:** También llamado «luz negra», es el tipo de luz UV poco peligrosa debido a que contiene menos energía. Parte del espectro se encuentra entre 0,315 μm a 0,40 μm.
- 2) UV-B:** Es el tipo de luz UV más peligrosa debido a que contiene más energía capaz de dañar los tejidos biológicos provocando cáncer de piel. La atmósfera se encarga de bloquear parte de ella, es por ello que cualquier cambio en la capa de ozono aumenta el riesgo. Parte del espectro se encuentra entre 0,28 μm a 0,315 μm.
- 3) UV-C:** Es el tipo de luz UV que no es observado en la naturaleza debido a que es absorbido rápidamente de manera completa cuando sus fotones chocan con los átomos de oxígeno, intercambiando energía que dan lugar a la formación de ozono. Parte del espectro se encuentra entre 0,10 μm a 0,28 μm.

b) Luz Visible: Esta longitud de onda apunta a la radiación fácilmente percibida por el ojo humano. Tiene la característica del lumen (lm) que es el equivalente fotométrico de la potencia, el vatio (watt). Entre la luz con más significancia para el ojo humano son el verde-amarillento con más peso que la luz azul o roja de igual lumen con 1 watt a 0,555 μm = 683 lumen.

c) Luz Infrarroja: Es el tipo de onda que contiene menos cantidad de energía por fotón, y en cualquier banda se manifiesta en forma de calor

sensibles a cualquier cambio de ambiente, ejemplo, una persona moviéndose. Es la única luz que tiene propiedades que impiden enfocar o refractar con lentes, dado que tiene mayor difracción.

2.2.1. Tipos de radiación solar.

Cualquier objeto sobre la superficie terrestre recibe la radiación solar de tres maneras diferentes, esto debido al constante movimiento de la tierra que produce variaciones temporales. Estos componentes se distinguen como directa, difusa y reflejada (o de albedo), tal como en la Figura 2.

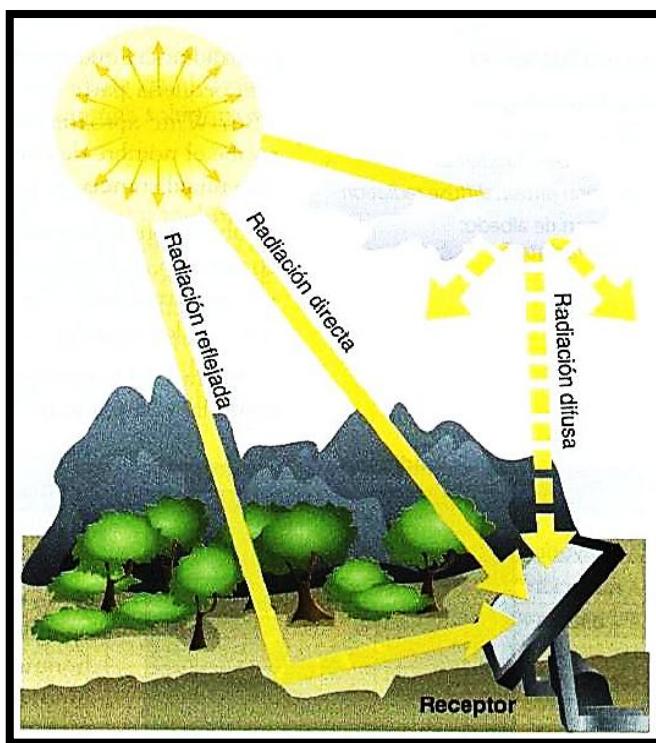


Figura 2. Tipos de radiación solar.
Fuente: A. Castejón, G. Santamaría, 2010 [6].

- Radiación directa:** Es la que llega directamente desde el sol, sin sufrir desviaciones en su trayectoria debido a causas atmosféricas. En magnitud es mayor a los dos siguientes, por ende, la más analizada para aplicaciones de sistemas FV's.

- b) **Radiación difusa:** Es la recibida directamente del sol luego de haber sido desviada o dispersada no solo por las nubes, sino también por las partículas de la atmósfera. En días nublados la radiación que se recepta es totalmente difusa.
- c) **Radiación reflejada (o de albedo):** Es aquella reflejada por la superficie terrestre, como montañas, edificios, árboles, el mismo suelo, etc. hacia algún objeto receptor ligeramente inclinado.

La radiación solar total que recibe algún objeto sobre la superficie de la tierra se conoce como radiación global, que es la suma de las tres radiaciones: directa, difusa y reflejada.

Para expresar de manera numérica o medir la energía de la radiación solar cuando llega a una superficie se utilizan dos valores como la Irradiancia e Irradiación [7].

- 1) **Irradiancia:** Es la potencia o radiación recibida por unidad de superficie. Su unidad de medida es el vatio por metro cuadrado, $[W/m^2]$.
- 2) **Irradiación:** Es la energía o total de irradiancia recibida en un tiempo determinado por unidad de superficie. Su unidad de medida es el vatio hora por metro cuadrado, $[W\cdot h/m^2]$.

La Irradiancia del sol sobre la superficie de la Tierra se conoce como Constante Solar (B)¹. Como la radiación que llega no es constante debido a diferentes horas del día, estaciones del año, o bajo distintas condiciones atmosféricas, la energía recibida sufre pérdidas llegando a la superficie de la Tierra aproximadamente 1 kW/m^2 [7]. Entre otros datos, la radiación media es de $1,353 \text{ kW/m}^2$ según la NASA.

¹ Energía perpendicular a la superficie que llega al exterior de la atmósfera terrestre, equivalente a $1,367 \text{ [kW/m}^2]$ [7].

2.2.2. Trayectoria de Incidencia de la Irradiación Solar.

Se sabe que el sol sale por el Este y se oculta por el Oeste, alcanzando en algún momento su punto más alto durante el mediodía. Pero, sería muy útil saber exactamente dónde se ubicará en cualquier momento, lugar o día, para lograr mejores diseños de viviendas con ventanas o inclinación de techos que logren calefacción o sombreado natural. De la misma manera, en el contexto FV, conocer el ángulo solar permite ubicar adecuadamente el ángulo de inclinación de paneles para aprovechar al máximo la radiación.

Existen diagramas y métodos usados para determinar el ángulo solar a partir del conocimiento rotacional de la Tierra, girando alrededor del sol.

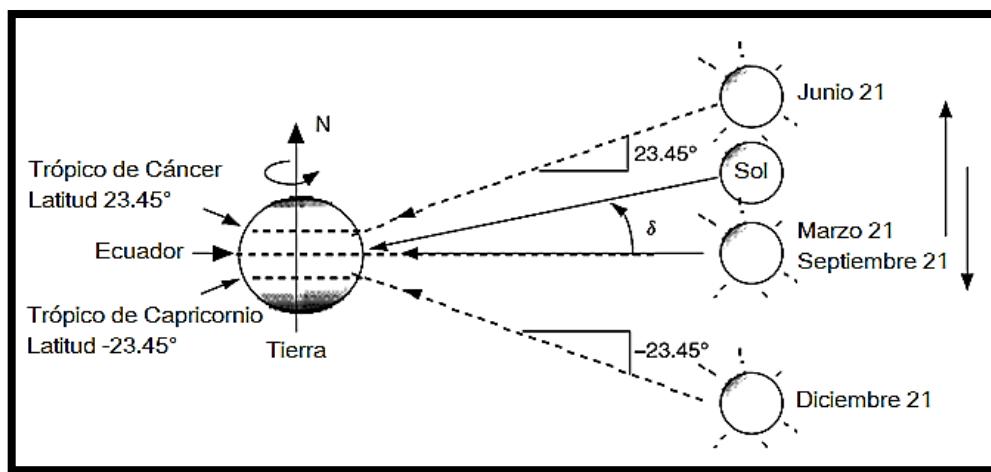


Figura 3. Rotación de la Tierra alrededor del sol. El ángulo entre el sol y el ecuador se denomina declinación solar δ .

Fuente: G. Masters, 2004 [8].

Según la Figura 3, la Tierra gira alrededor de su eje N-S, mientras que el sol se coloca en algún lugar del espacio moviéndose de arriba hacia abajo a medida que avanzan las estaciones. Siendo el 21 de Junio, el sol alcanza su punto más alto irradiando desde su núcleo a la tierra y formando un ángulo de 23.45° con el ecuador de la Tierra, es decir, el sol está ubicado sobre el hemisferio norte (Trópico de Cáncer), y el mismo día de Diciembre el sol está a 23.45° por debajo del ecuador, es decir, el sol está ubicado sobre el hemisferio sur (Trópico de

Capricornio). En la Tabla 1 se observa los valores computados de declinación solar del día veintiuno de cada mes [8].

Tabla 1. Declinación Solar δ para el día 21 de cada mes, en grados.

Fuente: G. Masters, 2004 [8].

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
δ	-20,1	-11,2	0,0	11,6	20,1	23,4	20,4	11,8	0,0	-11,8	-20,4	-23,4

Además, existe la posibilidad de determinar un nuevo ángulo de altitud del sol durante el mediodía. Este ángulo es el que se encuentra entre el sol y el horizonte local directamente debajo del sol [8]. En otras palabras, es la elevación angular del sol sobre el horizonte, como se observa en la Figura 4.

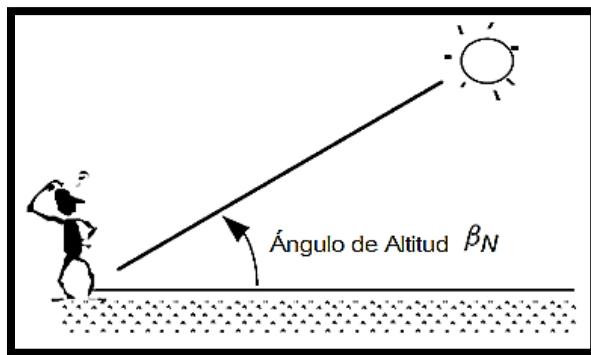


Figura 4. Ángulo de altitud del sol al mediodía.

Fuente: G. Masters, 2004 [8].

La ubicación del sol a cualquier hora del día se puede describir en términos de su ángulo de altitud β y su ángulo azimutal ϕ_s (ángulo de la orientación sobre la superficie) tal como se muestra en la Figura 5.

Por convención, ϕ_s es positivo en la mañana (sol en el Oeste) y negativo en la tarde (sol en el Este). Los ángulos azimutales y de altitud del sol dependen de la latitud, el número de día y, lo más importante, la hora del día.

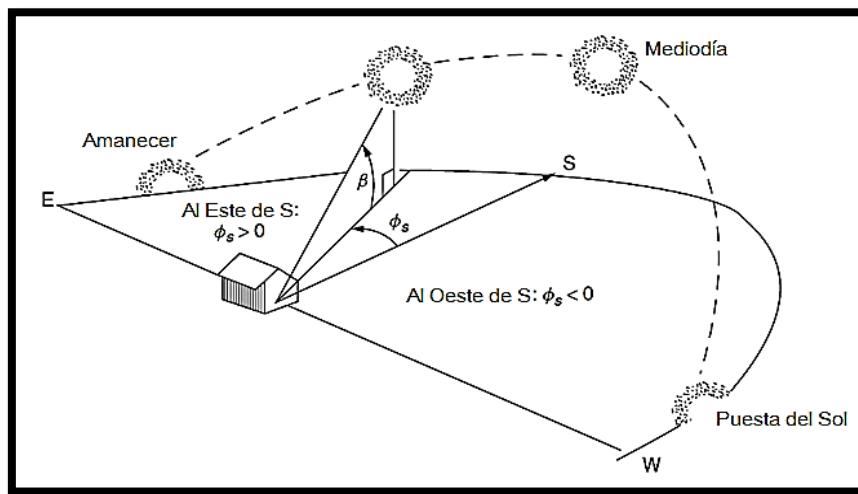


Figura 5. Posición del sol descrito por su ángulo de altitud β y su ángulo azimutal ϕ_s .

Fuente: G. Masters, 2004 [8].

Estos dos ángulos, Altitud y Azimutal, nos permiten localizar la posición del sol en el cielo, qué tan lejos está del horizonte, del Este o del Oeste, en función de los días del año y la latitud [9].

Es así que el sol sale por el Este en dirección Sur hasta ocultarse por el Oeste, dependiendo el hemisferio. Por esta razón, los paneles solares son orientados hacia el Norte en el hemisferio Sur y hacia el Sur en el hemisferio Norte, es decir, siempre se instalarán apuntando hacia el Ecuador. La Figura 6 muestra el recorrido del sol en el hemisferio Norte y en las cuatro estaciones del año [10].

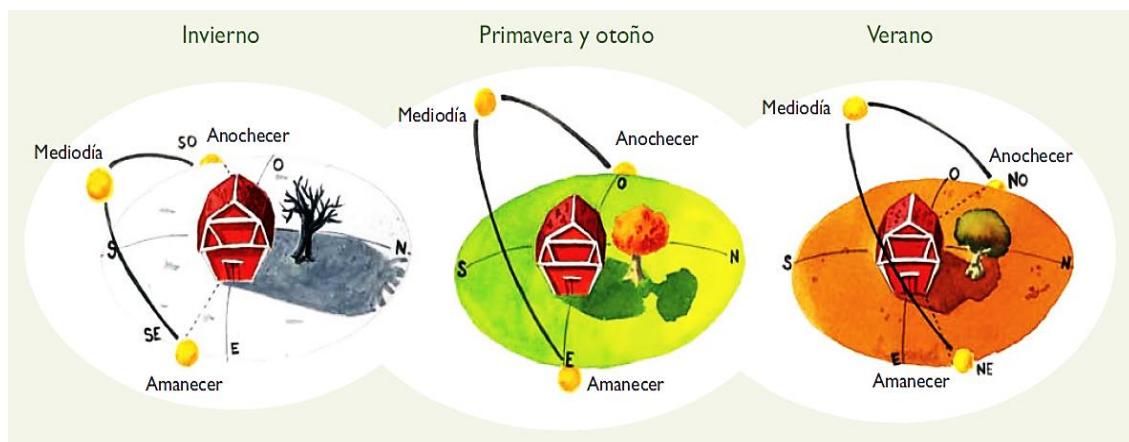


Figura 6. Recorrido del Sol en el Hemisferio Norte.

Fuente: J. C. Schallenberg Rodríguez y Otros [10].

2.2.3. Espectro de la Radiación Solar.

El sol intensamente caliente tiene una temperatura de 5760 Kelvin, siendo mayor en su núcleo con aproximadamente 15 millones Kelvin, y un diámetro de $1,39 \times 10^9$ metros con una distancia a la Tierra de $1,5 \times 10^8$ km, esto debido a que las radiaciones llegan a la superficie terrestre con una velocidad de la luz de 300 mil kilómetros por segundo [km/seg], llegando la energía solar en aproximadamente 8 minutos con 20 segundos, como se ilustra en la Figura 7 [11].

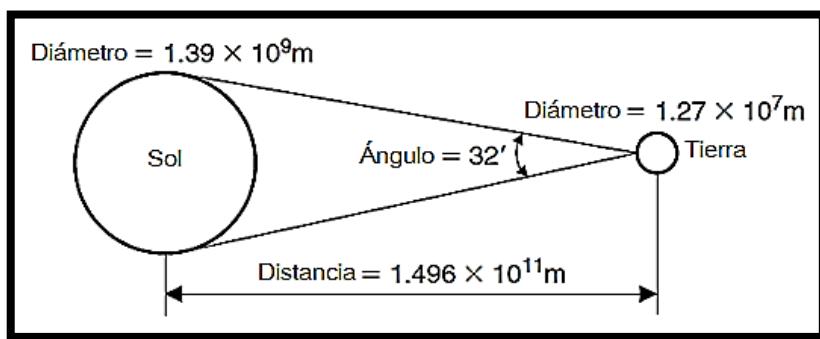


Figura 7. Relación Sol-Tierra.

Fuente: S. Kalogirou, 2009 [11].

La energía total que recibe la Tierra del sol es $1,7 \times 10^{14}$ kilovatio [kW], es decir, $1,5 \times 10^{18}$ kilovatio.hora por año [kWh/año]. Sin embargo, se estima que 84 minutos de radiación solar en el planeta equivale a la demanda de energía mundial en un año [11], o también 28000 veces el consumo mundial. Esta radiación llega a la superficie en dos formas, la que no es absorbida o dispersada, y la que sí lo es, recibiendo el nombre de radiación directa y radiación difusa, respectivamente [5].

La suma de las tres radiaciones (directa + difusa +reflejada) da como resultado la radiación global, Figura 8, es así que su componente directa es la encargada de producir sombra cuando se interpone objetos a su radiación, mientras que su componente difusa no lo hace.

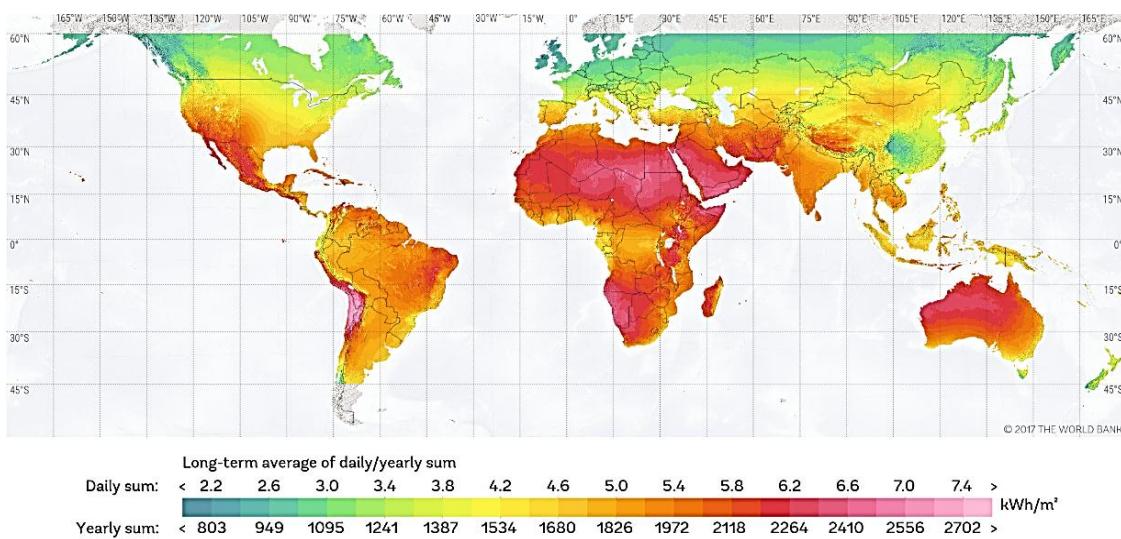


Figura 8. Irradiación Global, kWh/m²-año.

Fuente: globalsolaratlas.info [12].

En resumen, la radiación directa será mínima en días nublados, mientras la radiación difusa será máxima. Las siguientes Figuras 9 y 10 muestran tales radiaciones.

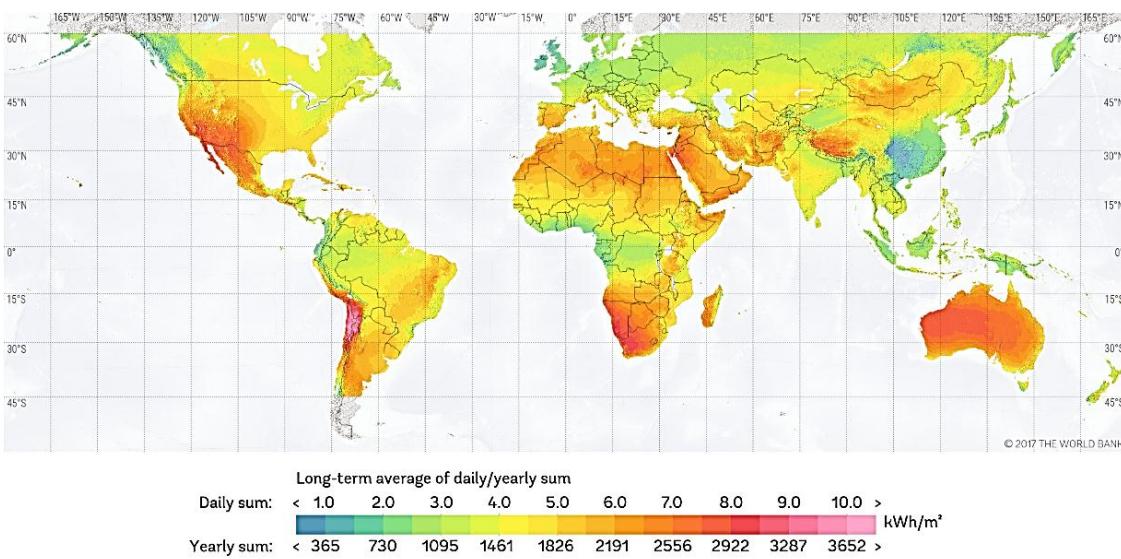


Figura 9. Irradiación normal directa, kWh/m²-año.

Fuente: globalsolaratlas.info [12].

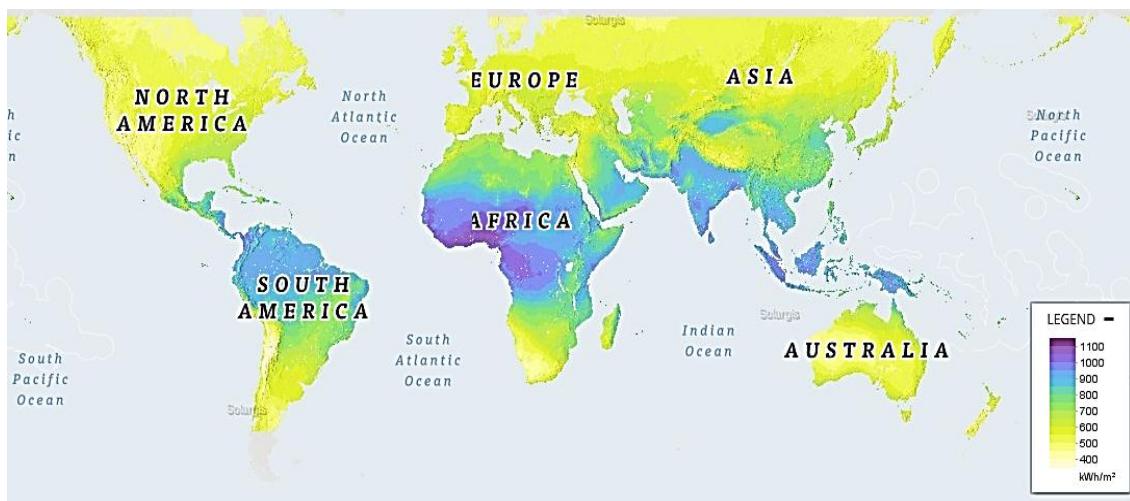


Figura 10. Irradiación horizontal difusa, kWh/m²-año.

Fuente: globalsolaratlas.info [12].

La radiación UV, como se había anunciado anteriormente, es apenas una parte del espectro solar, que va desde 3,5% al 8% del espectro total, variando de acuerdo a días nublados o claros.

Cabe recalcar que las longitudes de onda en la atmósfera responden de manera diferente a las de la superficie terrestre, dado que son más largas a las longitudes de onda que llegan del sol. Esto lo ha hecho un factor importante y responsable del efecto invernadero² [8].

La Figura 11 muestra el espectro solar a nivel de la Tierra en un día claro, en donde el área bajo el espectro corresponde a la longitud de onda de la luz UV con el 7%, luz visible con el 47% y luz infrarroja con el 46%, con rangos de 0,38 μm (violeta) a 0,78 μm (rojo) [8].

Del mismo modo, el espectro solar también dependerá de las condiciones atmosféricas cuando la radiación la atraviese para llegar a la superficie terrestre. Esto puesto que la luz del sol llegará con menos energía y provocará que el espectro solar se traslade a la posición que se encuentran las longitudes de ondas más largas.

² Es un proceso natural el cual los GEI atrapan el calor de la atmósfera (Arhenius, 1896).

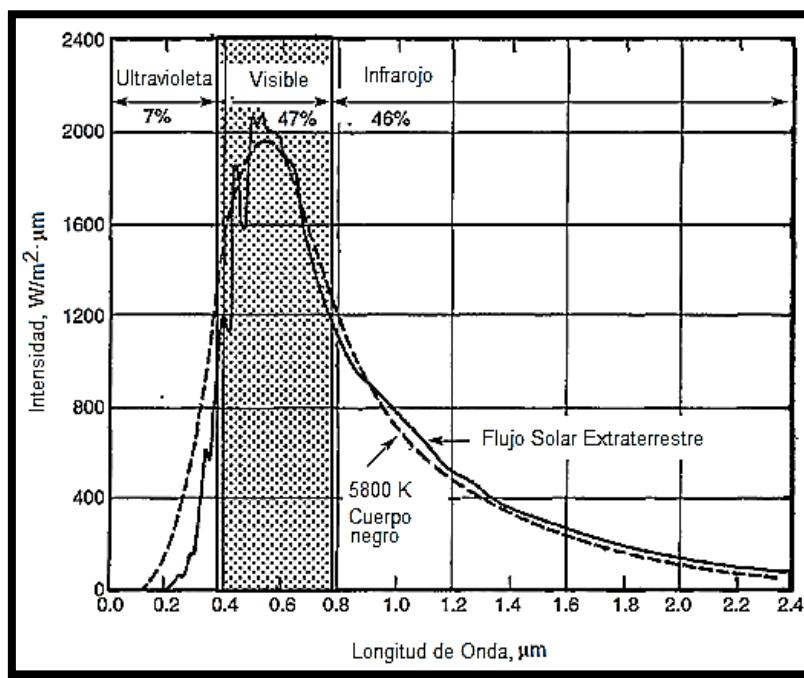


Figura 11. Espectro de radiación solar estándar.

Fuente: G. Masters, 2004 [8].

Ante esto, sabiendo que hay partículas y gases presentes en la atmósfera que reducen la energía de la radiación directa, reflejando, absorbiendo y dispersando espectros solares, se hace uso de unos detectores como filtros variables para lograr la medición más precisa de la radiación. Esto debido a que en la atmósfera algunos fotones son reflejados regresando al espacio, mientras que otros son absorbidos por dichas moléculas de la atmósfera [13].

Toda esta distribución de la radiación mediante el espectro de la luz del sol es importante analizarla para diagnosticar el rendimiento de la energía solar que llega a la superficie de la Tierra, tomando en cuenta diferentes estaciones y condiciones atmosféricas, ya que de estos dependerá el diseño de los sistemas FV's, los colectores solares térmicos, y así como también la construcción de edificaciones para ubicar adecuadamente las ventanas de vidrio y techos o cubiertas.



2.3. Energía Solar Fotovoltaica.

La energía solar fotovoltaica permite transformar directamente los fotones de la luz del sol (radiación) en electricidad. Todo este proceso de conversión se basa en el efecto fotovoltaico sobre paneles compuestos de células solares o FV's. Este efecto también se lo conoce como efecto fotoeléctrico.

2.3.1. El Efecto Fotovoltaico.

El efecto fotovoltaico fue observado por primera vez por el físico francés Henry Becquerel en 1839. En 1877 se fabrica el primer módulo FV de Selenio. Más tarde, a mediados de los años 50, en 1954, se descubre las células de silicio con el 4,5% de eficiencia [10].

El encargado de esta transformación se llama generador FV, compuesto por módulos formados por semiconductores y conectados en serie y/o paralelo para generar electricidad. Esto se logra luego de la incidencia de los fotones sobre los módulos que hacen posible un flujo de electrones entre dos regiones, dopadas con fósforo y boro respectivamente, es decir, en el interior del material. Este movimiento de electrones en direcciones opuestas a través del semiconductor produce un flujo de corriente eléctrica.

Hasta el momento los semiconductores conocidos son el Silicio, Germanio y Arseniuro de Galio, siendo el primero de mayor aplicación para la fabricación de las células FV's debido que es un material abundante en la Tierra luego del oxígeno. Entre los más usados de estos se encuentra el silicio policristalino debido a su bajo costo. También, existen los monocristalino con mayor eficiencia y rendimiento superior al 12%, el amorfo con rendimiento mucho menor a los anteriores, por lo que se limita su uso en aplicaciones de pequeña potencia.

2.3.2. Potencial de la Energía Solar Fotovoltaica.

Es difícil mencionar una cantidad para especificar el potencial de la energía FV, pero teóricamente el potencial FV en todo el mundo es muy alto. A diferencia de la energía eólica que es más económica, la FV tiene la ventaja de adaptarse a cualquier ubicación geográfica.

De toda la radiación solar que llega a la Tierra cada año, solo una pequeña parte de minutos, específicamente el 0,003%, equivale a la demanda de electricidad de todo el mundo hoy en día. Aunque el potencial de la energía FV es parte de todo el potencial de la energía de radiación solar, sigue dependiendo de la ubicación geográfica y del clima, especialmente de la latitud [14].

En zonas donde las estaciones del año no tienen variación significativa, es posible obtener aportes altos de energía FV. Por si fuera poco, el mismo sistema obtendría de 2 a 2,5 veces más electricidad si se ubicara en zonas desérticas o cercanas al Ecuador [14].

2.3.3. Tecnologías para Aprovechar la Energía Solar Fotovoltaica.

Las tecnologías que existen actualmente para el aprovechamiento de la energía FV son las celdas o células solares basadas en Silicio cristalino como las de película delgada y otras emergentes como la pintura solar FV a base de Óxido de Titanio³. Tal como se ilustra en la Figura 12.

Existen también nuevos desarrollos en la tecnología del Silicio, y muy aparte de la convencional también se busca avances para las células de silicio cristalinas y amorfas, puesto que es un elemento con propiedades altas en transporte y absorción de fotones. Esto ha hecho que se consigan reducciones de costo a través de la reducción del espesor de la célula [15].

³ También Dióxido de Titanio. Principal componente de la pintura solar. En la sección de Nanomateriales Orgánicos FV se profundizará con más detalle.

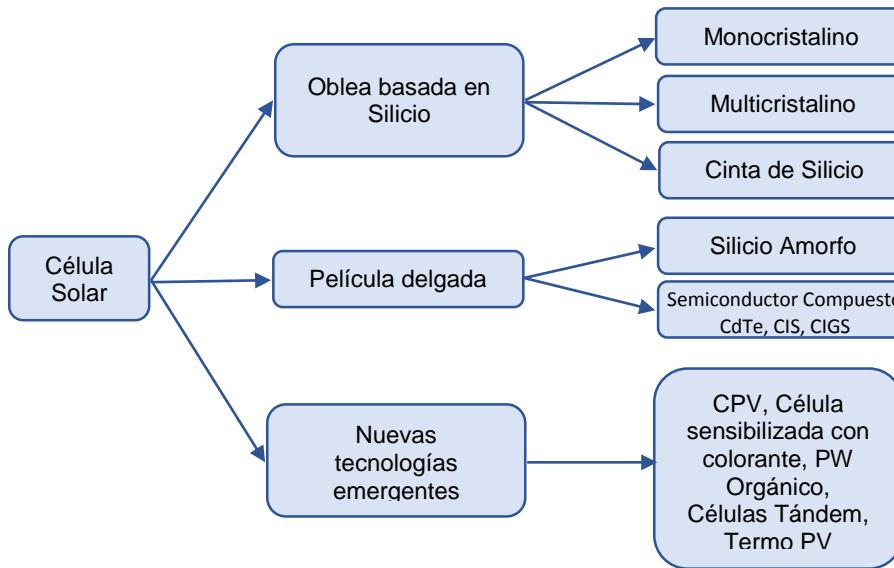


Figura 12. Clasificación de las tecnologías de células solares.

Fuente: P. Mohanty, T. Muneer, M. Kolhe, 2016 [16].

Las nuevas tecnologías fotovoltaicas emergentes buscan mejorar la eficiencia pero a bajo costo, y ese es el objetivo principal de la tercera generación FV. Entre las tecnologías de células orgánicas se encuentra la pintura solar, una célula a base de un compuesto químico que utiliza las nanopartículas⁴ de Dióxido de Titanio. La eficiencia de conversión eléctrica de estas nanopartículas está estimado en alrededor del 11%, y a pesar de estar por debajo de los paneles solares convencionales, esto se podría compensar con su menor costo de producción [17].

2.3.4. Componentes de un Sistema Fotovoltaico [18].

Aunque el generador FV es el componente principal en estos sistemas, sin embargo, a escala residencial existen otros elementos que conforman el sistema. Estos son los encargados de transformar eficientemente la radiación del sol en electricidad, almacenar y entregar la energía generada a los consumidores.

⁴ Otro de los principales componentes de la pintura solar. En la sección de Nanomateriales Orgánicos FV se profundizará con más detalle.



► **Panel Fotovoltaico.**

Es el elemento encargado de recibir la radiación solar y convertirla en corriente eléctrica continua. Es el componente fundamental de la instalación, formado por varios paneles. En nuestro proyecto, el panel será la cubierta o techo recubierto de pintura solar FV.

► **Regulador.**

El regulador de carga es el dispositivo electrónico que controla el flujo de corriente que fluye desde los módulos hacia la batería evitando una sobrecarga o descarga profunda que va hacia el consumo, y así garantizar una mayor vida útil de la batería.

► **Batería.**

También llamados acumuladores, son los encargados de almacenar la energía producida por los paneles y suministrarla a la demanda. Son considerados especiales debido a que son sometidos a constantes cargas y descargas.

► **Inversor.**

De igual forma llamado convertidor, transforman la corriente continua en alterna, necesaria para los diferentes equipos y/o electrodomésticos. Esto se logra mediante la electrónica de potencia. Si el consumo fuera en corriente continua se podría excluir este elemento.

► **Auxiliares.**

Son los dispositivos o equipos de consumo tales como cables, breakers, luminarias, etc. es decir, los aparatos complementarios de la instalación eléctrica residencial, y que a su vez deben ser energéticamente eficientes.

En general, el sistema FV se compone de etapas como la radiación, producción, acumulación y utilización, tal como se muestra en la Figura 13.

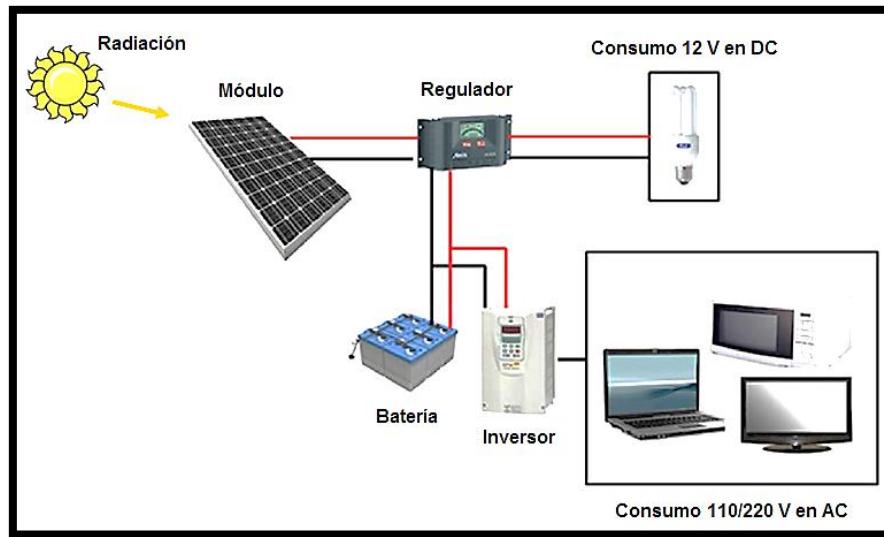


Figura 13. Elementos de un sistema fotovoltaico a nivel residencial.

Fuente: J. C. Vega de Kuyper, S. Ramírez Morales, 2014 [19].

2.3.5. La importancia de explorar nuevas tecnologías [20].

Hoy, la energía FV en base al Silicio policristalino es el mayor usuario a nivel mundial. Buscar el aumento de la eficiencia seguido de la reducción del costo son los principales temas de la tecnología a base de silicio. Pero, ¿Por qué desarrollar una nueva tecnología si la de Silicio está muy estable?

Claro es que en la actualidad las celdas FV's de Silicio están firmes y en desarrollo de mejorar su eficiencia, pero; lo que se quiere no es solamente su factibilidad sino también reducir el costo que las células convencionales tienen actualmente.

La perspectiva de lograr menor costo y una manufacturabilidad a escalas mayores y mejores se basan en el desarrollo de nuevos materiales que absorban intensamente las radiaciones del sol, para que las células puedan ser micrométricas, independientemente de los ciclos estacionales y geográficos.



Puesto que los electrones liberados por los fotones del sol viajan a cortas distancias dentro de la celda FV, reducen de esa manera la purificación y cristalinidad del material.

Existen nuevas tecnologías FV que son de película delgada como la emergente tinta sensibilizada y polímeros orgánicos, y como son de unión líquida operan diferente a las convencionales de estado sólido. Sin embargo, estas prometedoras y fascinantes tecnologías presentan grandes desafíos en cuanto al ambiente, es decir, sensibilidad al aire y agua o vapor, por ello, el reto consiste en desarrollarlos con una especie de encapsulación para que no se vean distorsionados por los factores antes mencionados.

Todas estas nuevas tecnologías emergentes tienen en común dos cosas: reducir el costo y aumentar su eficiencia, para ello, los esfuerzos de investigadores con la ayuda de inversión privada hacen posible escalar cada día más para lograr su fabricación óptima.

2.4. Tercera Generación Fotovoltaica.

Desde sus inicios, las tecnologías de la energía solar FV se han ido evolucionando a tal punto que existe en el mercado una amplia variedad de celdas FV's, y que en un futuro habrá mucho más. Estas se han ido clasificando de acuerdo a sus avances y materiales utilizados para sus fabricaciones, es decir, en generaciones de acuerdo a la aceptación comercial [21].

- ▶ La primera generación se caracterizó en la aplicación de paneles a base de obleas de Silicio monocristalina. Estas fueron totalmente comerciales.
- ▶ La segunda generación se llevó a cabo a través del Silicio amorfo y policristalino, Telururo de Cadmio y Cobre, Diseleniuro de Indio y Galio, todas con algún semiconductor diferente y de menor costo. Todos ellos compuestos químicos.



- ▶ La tercera generación incluye la FV Orgánica, y aún siguen siendo objeto de pruebas y desarrollos en laboratorios, o peor aún, no han sido comercializados.

Cualquier tecnología solar emergente debe revolucionar en cuanto al costo de los materiales que lo constituyan, es por ello que se da inicio a la tercera generación FV con una eficiencia ultra alta pero a bajo costo. Esto quiere decir, que la eficiencia actual de los paneles convencionales se vea superados el doble o el triple del aproximado 15% o 20% de la actualidad [22].

Además, la tercera generación utilizará materiales disponibles en gran cantidad al igual que la segunda generación de película delgada, pero no tóxicos. Esto hará que esta generación de la FV Orgánica sea compatible con cualquier sistema FV a gran escala.

La tercera generación de dispositivos FV's incluirá las células de nanocristal, células fotoelectroquímicas como las de Grätzel⁵, células solares sensibilizadas por colorantes como las pinturas solares, y las células de polímero.

Por ello, esta generación tiene como objetivo primordial reducir los costos por vatío pico muy por debajo del nivel del \$0,5-\$1/W de la segunda generación hasta un valor del \$0,1 a \$0,2/W, o más aún, elevar de manera significativa la eficiencia evitando el límite termodinámico de Snockley-Queisser⁶ y manteniendo las ventajas económicas y ambientales [23]. Tal como se muestra en la Figura 14.

⁵ Profesor de Química y Física del Ecole Politécnico Federale de Lausanne. Pionero de la investigación en sistemas de conversión de energía solar en eléctrica, y entre ellos las células de nanocristales de TiO₂ [22].

⁶ Límite de máxima eficiencia que una célula solar puede tener teóricamente, por debajo del 34% [23].

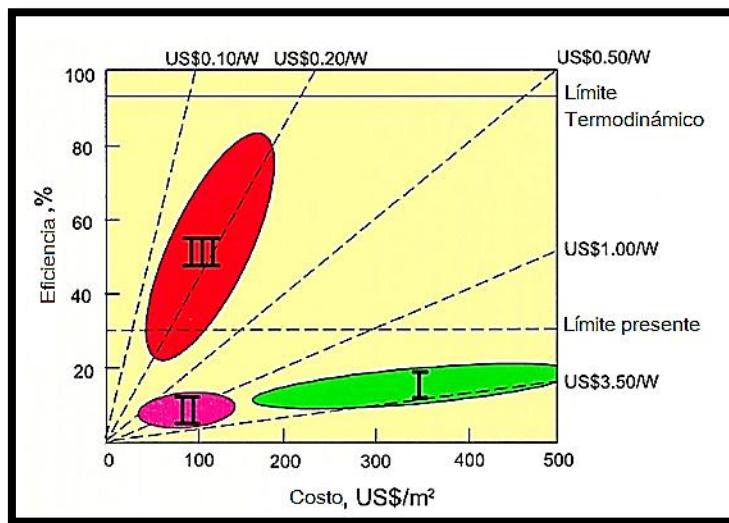


Figura 14. Eficiencia y proyecciones de costo para las tres generaciones.

Fuente: G. Conibeer, A. Willoughby, 2014 [23].

2.5. Las Pinturas Solares.

2.5.1. Antecedentes.

A medida que la demanda mundial de electricidad aumenta, lo mismo sucede con la quema de combustibles fósiles para generarla, lo cual contribuye al calentamiento global llegando a producirse peligrosas condiciones climáticas como resultado. Esto obliga a todo investigador vinculado al desarrollo de nuevas tecnologías en explorar nuevas células solares que tengan la capacidad de proveer energía limpia a escalas mayores.

Otra manera de cubrir la necesidad de electricidad actual, es a través del aprovechamiento de la energía del sol. Según el químico Nathan Lewis del Instituto de tecnología de California, cree que la tecnología solar tiene que volverse mucho más económica antes de poder tener un impacto serio, y se espera que la nanotecnología ayude a hacer posible aquello [24].

Si bien es cierto que las granjas solares auguran una abundante energía limpia en climas con gran radiación o desérticos, pero para ello requieren del uso de



amplios terrenos, y que para países pequeños o en vías de desarrollo les resultaría mejor utilizar los terrenos para la agricultura u otras actividades agropecuarias.

Pronto será necesario únicamente una capa de pintura para convertir la energía de la luz en energía eléctrica, pues como innovación tecnológica y fuente de energía renovable, emerge una tecnología FV conocida como pintura solar, producida a base de nanomateriales que aprovecharían de manera más eficiente la radiación solar. Esta pintura podría recubrir paredes, techos, tejados, ventanas e inclusive pisos, y obtener energía tal como lo hacen los paneles convencionales.

El elemento principal de esta tecnología es un compuesto llamado Óxido de Titanio (TiO_2) con colorante, o como varios autores de artículos científicos lo llaman células colorantes semiconductoras de alta densidad. A diferencia de las células convencionales, éste no utiliza el silicio sino que se asemeja a la fotosíntesis de las plantas, resultando en general más económico [17].

Centros de investigación, universidades y empresas llevan a cabo este proyecto para dar un gran paso a la comercialización de la pintura solar FV. Para el Dr. Dave Worsley⁷, la pintura es más eficiente en cuanto puede capturar la baja radiación del sol fundamentalmente en el área del espectro infrarrojo, o a su vez lugares poco soleados y/o ubicación con climas muy variados, misma que no aprovechan los paneles convencionales [17].

Actualmente continúan las experimentaciones de las pinturas solares, y aunque avancen las investigaciones de fijar los nanomateriales más abundantes, económicos y no tóxicos que permitan una fabricación a gran cantidad, se estima una conversión de energía del 11%. De manera que haciendo una comparación con el descubrimiento de las células de silicio que en sus inicios tenían una

⁷ Científico investigador como uno de los pioneros y responsables del proyecto de las pinturas solares actualmente [17].



eficiencia del 4,5%, y que 6 años más tarde, en 1960 alcanzaron un 14%, y en cuanto a las nanopartículas de la pintura solar llegarían a tener una eficiencia del 20,5% transcurrido los 6 años, es decir, teóricamente en el 2023. Esto sin contar que años atrás no existían los avances tecnológicos y conocimientos como los que se tiene actualmente, principalmente el avance de la nanotecnología.

2.5.2. La Nanotecnología.

Luego de un acuerdo de la comunidad científica alrededor del año 2000, se define a la nanotecnología como la ciencia que manipula objetos entre 1 y 100 nanómetro⁸ (nm) como los átomos o moléculas, y que además fuera utilizado en lugar de la palabra nanociencia [25].

Entre otras definiciones, la nanotecnología fabrica materiales y dispositivos como tecnología a escala del nanómetro mediante la aplicación de las ciencias físicas, químicas, entre otros. Mismos que aparecen como consecuencia de esa tan reducida escala [26]. Otros separan a la nanociencia como el estudio y nanotecnología como explotación de las propiedades de los objetos por debajo de 100 nm para construir nuevos objetos, como se observa en la Figura 15. A veces es llamada como ingeniería a nivel molecular [27].

Son múltiples los medios que se estudian para lograr reducir el costo de la energía FV, y uno de los métodos para aquello es aumentar la eficiencia en la conversión de la luz del sol en energía eléctrica a través del uso de la nanotecnología.

La nanotecnología está siendo utilizada por varios investigadores para desarrollar nanopartículas a base de nanomateriales baratos que puedan convertir la energía solar en eléctrica. Este es el caso de las pinturas solares, constituido especialmente de un compuesto químico como el Óxido de Titanio

⁸ El nanómetro no es una unidad de medida común, y equivale a una mil millonésima partes de un metro, es decir, una millonésima de milímetro o milésima de micra [25].

[24]. En general, en el campo de la nanotecnología, las Pinturas Solares son consideradas como dispersiones de nanopartículas de polímero a base de agua y colorantes.

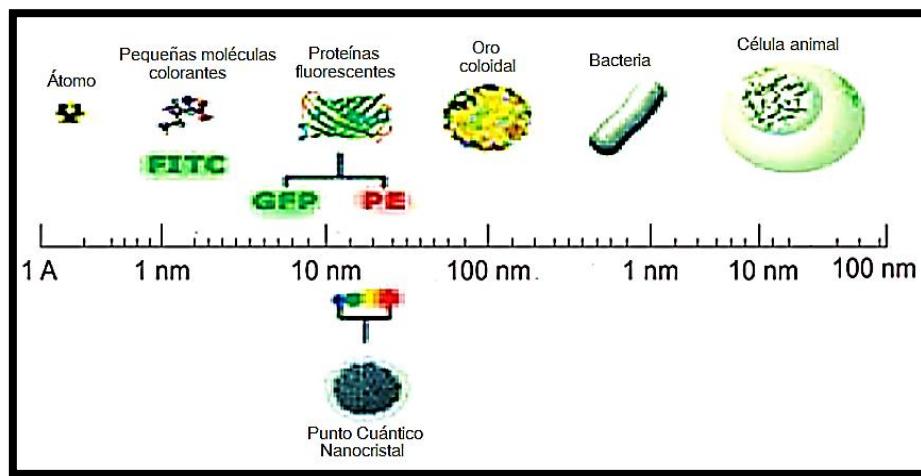


Figura 15. Escala de dimensiones de varios objetos sobre escala del nanómetro.

Fuente: M. Karkare, 2008 [27].

La nanotecnología busca aumentar la capacidad de las nuevas celdas FV's para aumentar la absorción de fotones del espectro solar. Esto funciona mediante la inclusión de puntos cuánticos, capaces de optimizar la eficiencia en la conversión energética [28].

Un punto cuántico es una nanopartícula semiconductor constituidos de unos cientos a 10.000 átomos formando una estructura cristalina a escala nanométrica. Poseen propiedades ópticas, físicas, electrónicas y eléctricas, que dependiendo de su tamaño éstos emiten distintos colores cuando se exponen a la luz UV. Esta característica fluorescente ha captado el interés para aplicaciones de tintes orgánicos [29]. El tamaño diminuto de estos semiconductores hace posible capturar eficientemente la luz que incide del espectro solar visible mediante una capa extremadamente delgada de puntos cuánticos.

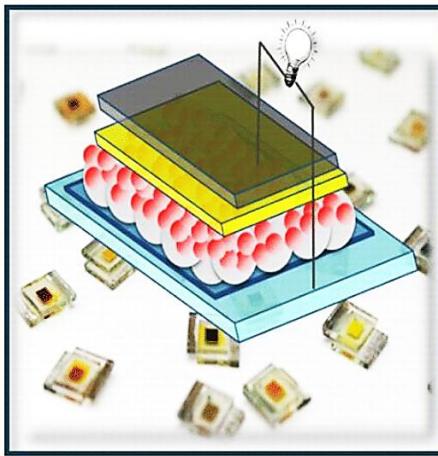


Figura 16. Celda solar sensibilizada por puntos cuánticos.

Fuente: P. Kamal, 2017 [30].

Los últimos avances de tecnología FV a base de puntos cuánticos pueden ser fabricados de materiales abundantes y baratos con un proceso de ahorro de energía en temperatura ambiente, no así que requieran gran purificación como el silicio, un ejemplo de ello se observa en la Figura 16. Con ello, continúan las investigaciones en el desarrollo de pintura semiconductora capaz de poder revestir grandes áreas de superficie [31].

2.5.3. Sistema Fotovoltaico Orgánico.

La FV Orgánica es una tecnología emergente del estudio de la Tercera Generación FV que supera todas las expectativas tecnológicas y regulatorias de las células que existen actualmente, hechas de componentes polímeros disueltos en materiales orgánicos no peligrosos [32].

Los inicios de la FV Orgánica se dieron entre 2005 y 2010 en el que también se desarrolló la Tercera Generación FV [33]. Esto ha logrado atraer gran interés en el mundo científico para contribuir al desarrollo de una energía renovable y amigable con el medio ambiente. Por lo cual han sido pretendidos como una próxima fuente de energía debido a su ligero peso, finas, flexibles y sencillas ventajas de fabricación.

Considerada como una de las promesas de la tercera generación, la FV Orgánica tiene un gran potencial de conversión. Últimamente, la eficiencia de conversión ha mejorado de manera espectacular superando el 10% [34].

La investigación avanzada de nanomateriales ha hecho que la fotovoltaica orgánica se base en la aplicación de emergentes tecnologías solares [35]. Entre las principales investigaciones en este campo nanomateriales están las siguientes:

- ▶ Células solares sensibilizadas al colorante (DSSCs, por sus siglas en inglés).
- ▶ Células solares sensibilizadas al punto cuántico (QDSSCs, por sus siglas en inglés).
- ▶ Células solares de Polímero.
- ▶ Células solares de película delgada basada en CZTS.
- ▶ Células solares de Perovskite.
- ▶ Células solares de banda intermedia.

El interés de este proyecto de investigación se enfoca únicamente en las células solares sensibilizadas al colorante, que sea dicho de paso también utilizan el punto cuántico que combinados con otros elementos se obtiene la pintura solar. Tales elementos y materiales se detallan en secciones posteriores.

En este contexto, las investigaciones son amplias debido a que científicos e investigadores apuestan a diferentes tecnologías como las mencionadas anteriormente. Esto porque en cada desarrollo se busca obtener cuál de ellas tendrá mejores niveles de eficiencia al momento de la conversión de energía.

Por otro lado, la FV Orgánica está dando un gran paso a lo que será la Cuarta Generación FV, es decir, la generación híbrida que combina los dispositivos sólidos convencionales con los orgánicos. Es así que existen investigaciones



que titulan FV inorgánica-orgánica, en la cual se están estableciendo técnicas de impresión para dar lugar a las células solares imprimibles.

Los nanomateriales orgánicos que utilizan las pinturas solares como elemento principal están el TiO₂ o ZnO cubiertos de puntos cuánticos para el desarrollo de la pintura, por ello se analiza las propiedades FV's de ambas.

2.5.4. Nanomateriales Orgánicos Fotovoltaicos.

Estas nanopartículas conjuntamente con los puntos cuánticos son los componentes principales para el desarrollo de la pintura solar, así como también los nanotubos de Carbono. De forma breve, en este apartado se da un enfoque especial básicamente a las propiedades eléctricas de cada uno de ellos.

2.5.4.1. Nanopartícula de Óxido de Titanio TiO₂.

Este compuesto, también llamado Dióxido de Titanio, son partículas de 100 nm de tamaño que a lo largo de las investigaciones han tenido varias aplicaciones como pigmento debido a que es biocompatible⁹ y ambientalmente benigno. Se fabrica mediante una combinación de dos procesos químicos; la producción de partículas de pigmento base y el tratamiento superficial, secado y molienda. Asimismo, para su purificación utilizan el proceso de Sulfato y Cloruro¹⁰ [36].

Según Richards [37], resume las siguientes propiedades del TiO₂, el cual las califica de muy buenas.

- ▶ Excelente propiedad de revestimiento.
- ▶ Tiene una muy buena resistencia química.
- ▶ Posee excelente estabilidad a altas temperaturas.
- ▶ Costo y rendimiento muy bueno.

⁹ Características de materiales que, coexistiendo con otro, tienen la propiedad de no degradar o dañar el medio ambiente (Callister, 2007).

¹⁰ Sulfato y Cloruro son sales minerales que existen en abundancia en manantiales naturales.

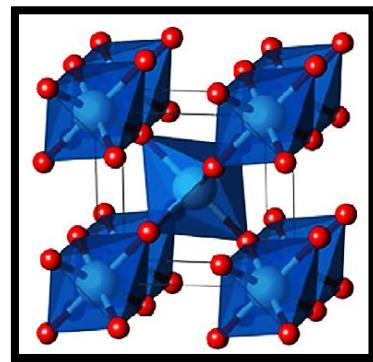


Figura 17. Estructura cristalina del Óxido de Titanio TiO_2 .

Fuente: B. S. Richards, 2004 [38].

El TiO_2 se encuentra en la naturaleza básicamente como un mineral rutilo de color azulado, violeta, rojo sangre. Australia, Rusia, India y algunos de Sudamérica están entre los países productores de este mineral [39]. La Figura 17 muestra la estructura cristalina del TiO_2 .

Entre varios semiconductores ampliamente investigados, el TiO_2 ha sido elegido como el material semiconductor estable y no tóxico. Para la adecuada absorción del colorante sobre el TiO_2 se requiere una superficie grande del Óxido de Titanio [40]. La Figura 18 muestra una simulación de la estructura del TiO_2 utilizado en la investigación de Umer Mehmood y Otros [41].

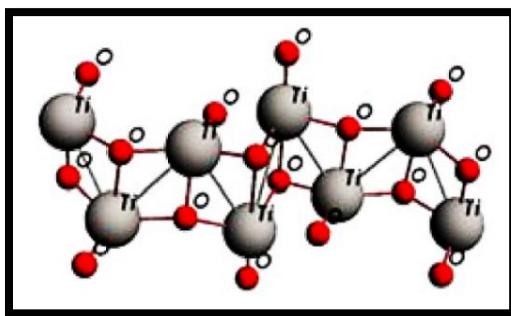


Figura 18. Simulación de la estructura del óxido de titanio.

Fuente: Umer Mehmood y Otros, 2016 [41].

El TiO₂ es muy popular en la industria de pinturas por no ser tóxico. Además, se encuentra presente en los filtros solares¹¹ debido a su alta propiedad de absorción de rayos UV, generalmente los de la banda UV-A, y cuando esto ocurre se produce una reacción química que destruye las moléculas contaminantes presentes [25].

De igual manera, el TiO₂ es un material bastante común que está presente hasta en los alimentos, pero la innovación es que está en forma de nanopartícula que además de ser mezclado con otros elementos de la tabla periódica se produce un material que recibe propiedades semiconductoras, obteniendo así atributos para aplicaciones FV's. [42]

2.5.4.2. Nanopartícula de Óxido de Zinc ZnO.

El Óxido de Zinc (ZnO) es un compuesto químico inorgánico constituido por un átomo de oxígeno y uno de Zinc, generalmente tiene forma de polvo de color blanco. Se lo encuentra en la naturaleza en un 80% dentro de los minerales zincita o ancramita¹² [43]. La Figura 19 se ilustra la estructura cristalina del ZnO.

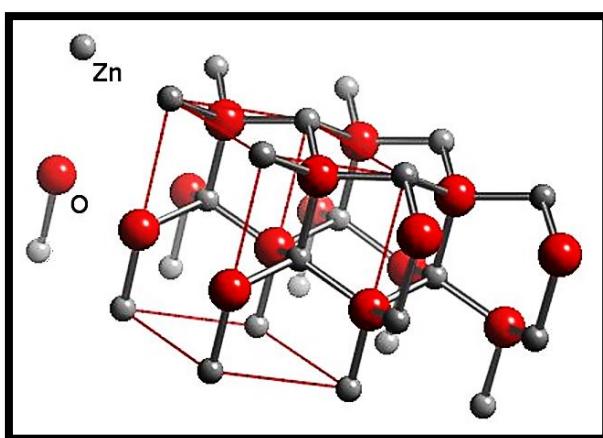


Figura 19. Estructura cristalina del Óxido de Zinc.

Fuente: webelements.com [44].

¹¹ Dispositivos que absorben la radiación directa del sol, especialmente las de tipo UV-A como las de UV-B [116].

¹² Forma mineral del ZnO con alto contenido de metal [116].

El ZnO tiene aplicaciones en los polímeros como estabilizantes, y aunque el TiO₂ es superior en la mayoría de aplicaciones, el Óxido de Zinc también es utilizado como pigmentos blancos. Se transforma en semiconductor por la pérdida de su átomo de Oxígeno luego de haber tomado un color amarillo al calentarse. En definitiva, es favorable para absorber la luz visible e inducir una tensión alta de circuito abierto, pudiéndose obtener un alto rendimiento FV como aplicación de célula solar [45].

Entre otras propiedades, este compuesto presenta una mayor movilización electrónica y un nivel de energía similar al TiO₂ que lo hace capaz de ser utilizado como material para la fabricación de células solares sensibilizadas con colorantes [35]. Debido a esto, el ZnO también es usado en investigaciones de las pinturas solares ya que son considerados semiconductores que poseen excelentes propiedades ópticas y eléctricas así como también un bajo costo de fabricación.

En términos de fabricación de la FV Orgánica, el ZnO, tiene un costo de material de 7 centavos, 0,07\$. El costo del procesamiento es de veinte centavos, 0,20\$. En total tiene un costo del 0,27\$, equivalente a 27 centavos de dólar para lograr recubrir un área de 360 cm² [34].

2.5.4.3. Nanotubos de Carbono NTC.

Un NTC es una composición o agrupación de átomos en forma de filamentos con pocos nanómetros de diámetro y algunas micras de largo. Esta agrupación también da lugar a las nanopartículas con dimensiones nanométricas. La Figura 20 muestra unos modelos atómicos de Nanotubos de Carbono [26].

Presentan dos comportamientos, es decir, pueden ser metálicos o semiconductores en la cual se diferencia únicamente en su diámetro y helicidad¹³

¹³ Propiedad de un material que lo hace elástico [46].

o quirilidad¹⁴ [46]. Entre otras palabras, los nanotubos pueden ser tanto conductores como aislantes.

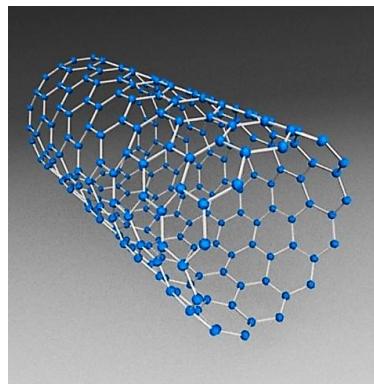


Figura 20. Nanotubos de carbono.

Fuente: C. Briones y Otros, 2009 [26].

La IEEE, a través de la norma IEEEP1650 establece métodos para pruebas estándar en la medición de las propiedades eléctricas de los nanotubos de Carbono tales como su conductividad eléctrica y efecto hall¹⁵, entre otros [46].

Las propiedades eléctricas del nanotubo cuando se encuentra en su estado metálico son muy altas en cuanto a su conductividad, estimando que puede conducir mil millones de amperios por centímetro cuadrado. Esta alta conductividad es debido a que gozan de una deficiencia para dispersar los electrones, por lo tanto también poseen muy baja resistencia [47]. Dicho de otro modo, una de las propiedades es la facilidad que tienen para liberar electrones de sus extremos cuando se encuentran sometidos a un campo eléctrico [25].

Los nanotubos son buenos conductores de corriente eléctrica a temperatura ambiente transportando grandes densidades de corriente, y como semiconductor es posible formar diodos o transistores. Estas propiedades y entre otras térmicas y mecánicas, hacen que los NTC sean fáciles y económicos de fabricarlos [26].

¹⁴ Propiedad de un material que lo hace resistente [46].

¹⁵ Efecto de la conducción eléctrica en el interior de un conductor debido a la separación de cargas (sc.ehu.es).



2.5.5. Método Experimental de la Pintura Solar.

En esta sección se describe de manera resumida todo el proceso y métodos que se llevaron a cabo por científicos en varias investigaciones para el desarrollo de la pintura solar. Esto quiere decir que todo el contenido que a continuación se presenta se basa específicamente por artículos científicos que se han desarrollado a lo largo de los últimos años, y han tenido un impacto positivo puesto que aún continúan las investigaciones al respecto, con el único fin de lograr mayor eficiencia y bajo costo de las pinturas solares para saltar al siguiente nivel de la comercialización a gran escala. Por tal razón, el método experimental está en base a publicaciones de estudios y pruebas de laboratorios.

2.5.5.1. Materiales.

Los investigadores Mathew P. Genovese y Otros [48], han publicado sus estudios respecto a la pintura solar. Para ellos, esta nueva tecnología consiste en una pasta de color marrón o amarillo hecho a partir de puntos cuánticos. Entre otros materiales que utilizaron en la investigación son los siguientes:

- ▶ Óxido de Zinc ultrapuro (ZnO).
- ▶ Polvo de Azufre (S).
- ▶ Nitrato de Cadmio Tetrahidrato ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$).
- ▶ Óxido de Selenio (SeO_2).
- ▶ Alcohol Butílico Terciario,
- ▶ 1 metil-2 Pirrolidinona (Terbutanol).
- ▶ Solución Versa Clean.
- ▶ El polvo de Sulfuro de Cadmio (CdS).
- ▶ Hidróxido de Sodio (NaOH).
- ▶ Sulfuro de Sodio Nonahidratado ($\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$).
- ▶ Sulfato de Cadmio Anhidro (CdSO_4).
- ▶ Borohidruro de Sodio (NaBH_4).
- ▶ Óxido de Titanio (TiO_2).

De manera ilustrativa, todas estas sustancias y compuestos a escala nanométricas pertenecen al campo químico, y de las cuales se ha descrito en secciones precedentes los que se consideran elementos principales, es decir, el TiO₂ y ZnO. Los demás son soluciones químicas que complementa el desarrollo de la pintura, saliendo de nuestro interés aquellos excepto los antes mencionados.

2.5.5.2. Preparación [48].

Los investigadores basaron su experimento con la utilización de tres tipos de puntos cuánticos: el CdS, CdSe y TiO₂, similares a un polvo en agua. Además utilizaron el Terbutanol como alcohol disolvente.

A excepción del TiO₂ que se ha descrito, el punto cuántico CdS es un compuesto químico en forma de polvo llamado Sulfuro de Cadmio. Del mismo modo, el punto cuántico CdSe también es un compuesto químico conocido como Seleniuro de Cadmio. Ambos han sido utilizados en esta investigación por sus procesos de transferencia de carga fotoinducidos en puntos cuánticos semiconductores, aprovechables en las células solares sensibilizadas con tintas.

La Figura 21 muestra el principio del enfoque de la pintura solar a base de los puntos cuánticos antes mencionados.

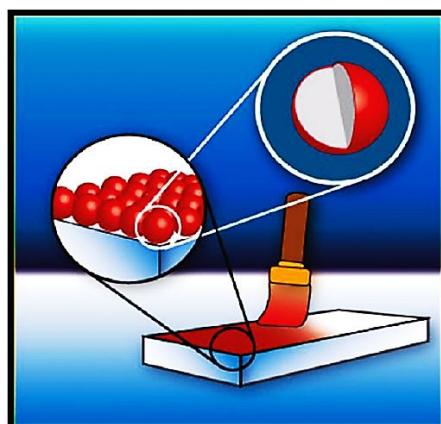


Figura 21. Principio del enfoque de la Pintura Solar.

Fuente: M. P. Genovese y Otros, 2012 [48].

Pintura Mezclada (CdS/TiO_2): El polvo de CdS [0,5 g] es mezclado en 3 [ml] de disolvente de alcohol butílico terciario con agua [volumen 2:1]. Luego se añade lentamente [0,5 g] de polvo TiO_2 mezclado y bajo un calentamiento suave [$\sim 40^\circ \text{C}$]. De igual manera se prepara otra pasta similar pero con [0,5 g] del óxido de zinc ZnO y 0,75/1,5 [g] de CdS .

Pintura Mezclada (CdSe/TiO_2): Las pinturas CdS/TiO_2 y CdSe/TiO_2 la prepararon suspendiendo [0,5 g] de TiO_2 en 15 [ml] de agua/metanol [volumen 3:1] usando una suave sonicación¹⁶. Luego se añade 100 [μl] de Hidróxido de Sodio a la suspensión (mezcla) del TiO_2 . Asimismo agregaron 2 [ml] de Sulfato de Cadmio Anhidro en agua/metanol [1:1] y la mezclaron durante ~ 30 [seg] antes de la adición de 2 [ml] de sulfuro de sodio nonahidratado en agua/metanol [1:1] seguido de una mezcla adicional durante otros 30 [seg].

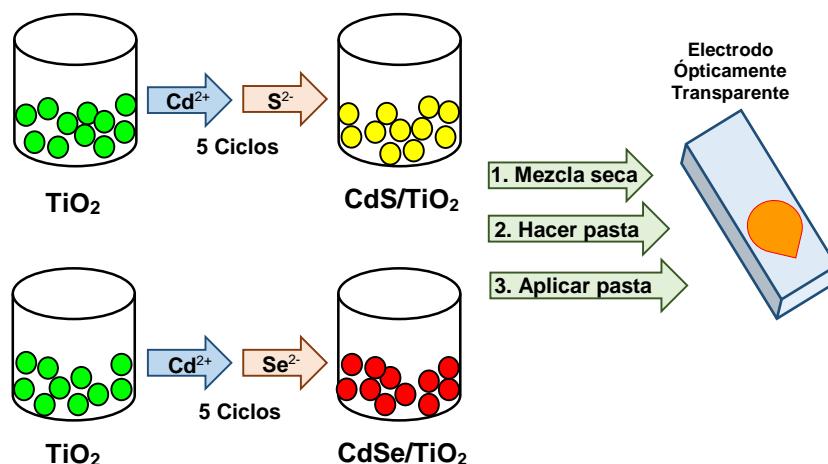


Figura 22. Deposición de capas secuenciales de CdS y CdSe sobre el TiO_2 .

Fuente: M. P. Genovese y Otros, 2012 [48].

Como se ilustra en la Figura 22, para la pintura a base de CdS/TiO_2 o CdSe/TiO_2 , el procedimiento implica un paso de 8 ciclos de repetición de Cd^{2+} y S^{2-} , o 3 ciclos

¹⁶ Acción de aplicar una señal de energía del sonido para agitar partículas de una muestra (copro.com.ar).

de repetición de Cd²⁺ y Se²⁻, químicamente hablando cada sustancia con dos átomos positivos y negativos respectivamente.

En resumen, los científicos Mathew P. Genovese y Otros, adaptaron la estrategia de mezclar de forma física el TiO₂ y CdS en un disolvente mixto (agua y alcohol). Asimismo, incluyeron el polvo de ZnO con TiO₂ antes de mezclarlo con CdS para verificar los aspectos favorables debidos a la separación de carga en el semiconductor compuesto ZnO-TiO₂. La nueva pintura solar como pasta gruesa y amarilla de TiO₂ y CdS se podría aplicar directamente sobre los electrodos de vidrio como conductores. En definitiva, descubrieron que un compuesto de nanopartículas CdS/TiO₂ y CdS/TiO₂ mezcladas logra el mejor rendimiento, especialmente cuando el CdS y el CdSe se depositan directamente en las nanopartículas de TiO₂ como recubrimiento. La Figura 23 muestra los pasos de preparación de la pintura solar mediante la mezcla directa del disolvente¹⁷ con nanopartículas de TiO₂ recubiertas con CdS o CdSe.

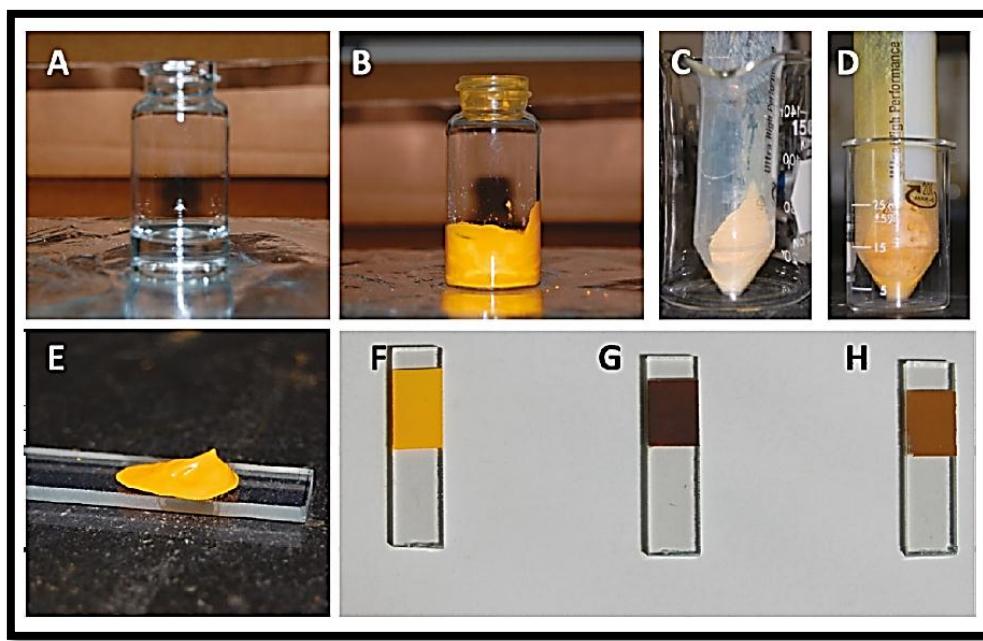


Figura 23. Pasos durante la preparación de la Pintura Solar.

Fuente: M. P. Genovese y Otros, 2012 [48].

¹⁷ También llamado «solvente», es un compuesto o sustancia en la que químicamente se diluyen sólidos, líquidos o gases (cymitquimica.com).

En la Figura 23 se indica: (A) El alcohol Terbutanol y el agua se usan como disolvente. (B) El polvo de CdS y el de TiO₂ se mezclan lentamente en el disolvente, formando la pintura solar. (C y D) El CdS depositado en TiO₂ después de 1 y 8 ciclos de proceso respectivamente, vidrio. (E) Aplicación de pintura solar a un OTE¹⁸. (F-H) Películas recocidas de pintura solar: (F) CdS/TiO₂ [8 ciclos], (G) CdSe/TiO₂ [3 ciclos] películas y (H) la mezcla de F y G.

2.5.5.3. Sensibilización.

La sensibilización es un proceso de baño químico que se lo realiza generalmente a puntos cuánticos para la construcción de celdas solares [49]. En la fabricación de las nuevas celdas solares a base de pinturas, los puntos cuánticos son metales sensibilizadores haciendo que la pintura se vuelva sensible especialmente a la radiación solar.

A lo largo de los últimos años ha llamado mucho el interés de la comunidad científica la aplicación de los nanomateriales, y en ellos se encuentran el estudio de los puntos cuánticos para la sensibilización de células FV's a base de TiO₂ o ZnO.

Debido a la desventaja del TiO₂ en dispersar la radiación solar, las investigaciones han apuntado a la sensibilización con puntos cuánticos. Para ello, se emplea semiconductores nanocrystales llamados puntos cuánticos portadores de carga [50].

En la sensibilización del TiO₂ con CdS, los niveles energéticos entre el punto cuántico y el Óxido de Titanio pueden optimizarse mejorando de manera significativa sus propiedades, transformándolo en semiconductor o tinta orgánica, como en la Figura 24.

¹⁸ Electrodo Ópticamente Transparente, componentes que transmiten luz y conducen corriente eléctrica (noticiasdelaciencia.com).

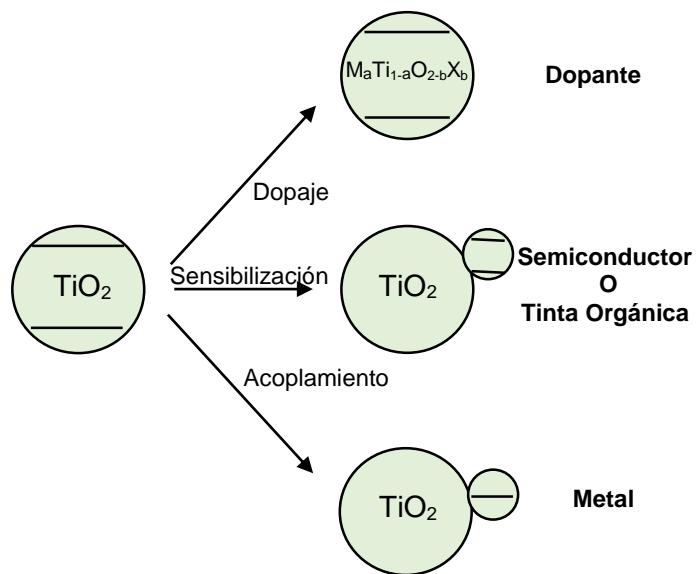


Figura 24. Ilustración de la modificación del TiO_2 .

Fuente: C. Xiaobo, 2009 [36].

Por otro lado, la Figura 25 ilustra la deposición del punto cuántico CdSe como sensibilizador del TiO_2 a través de un enlazador molecular.

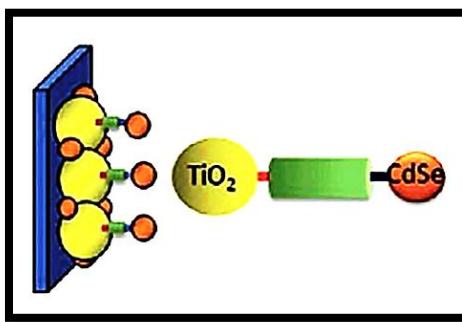


Figura 25. Sensibilización del TiO_2 con CdSe.

Fuente: Z. Ahmad y Otros, 2017 [51].

2.5.5.4. Principio de funcionamiento.

En una célula solar sensibilizada con puntos cuánticos, la excitación de estos nanocristales semiconductores se logra mediante la inyección de los electrones del TiO_2 . Estos electrones se transfieren a la superficie del OTE para generar photocorriente. Por lo general se requieren varios pasos como los indicados

anteriormente para preparar puntos cuánticos como celda solar, y pueden ser aplicadas sobre una superficie en tan solo un paso, en forma de cepillado.

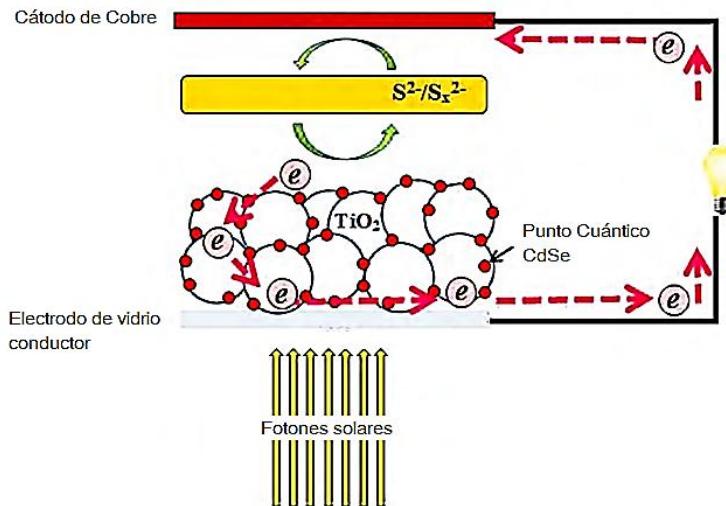


Figura 26. Operación de una célula solar a base de TiO_2 sensibilizada con puntos cuánticos de CdSe .

Fuente: A. I. Sánchez Solís, 2014 [52].

El esquema del principio de operación de la célula FV se muestra en la Figura 26, en el cual incide fotones de luz solar que excitan el punto cuántico CdSe produciendo electrones y huecos que se desplazan hacia el electrolito. Estos electrones viajan a través del semiconductor TiO_2 hasta alcanzar al TCO¹⁹ u OTE como conductor haciendo de ánodo y desplazándose a su vez por un circuito externo hasta alcanzar al contraelectrodo, el Sulfuro de Cobre, que al combinarse con el electrolito actúa como cátodo [52].

A diferencia de las celdas FV's convencionales, en este tipo de celdas a base de pinturas la acción del campo eléctrico no es producida por la separación de cargas, sino más bien es producto de la cinética que provoca el flujo de electrones en las superficies entre el semiconductor sensibilizante TiO_2 y el electrolito (Figura 27) [49].

¹⁹ Conductor Transparente. Otra manera de referirnos al OTE.

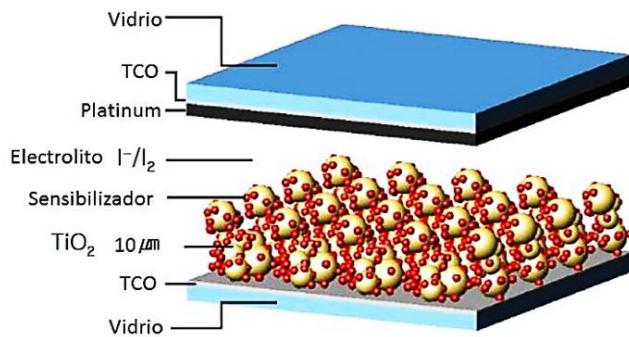


Figura 27. Partes de una celda sensibilizada con colorante.

Fuente: R. Sánchez Rosa, 2014 [49].

De otra manera más simplificada y didáctica, para Josep Albero y Otros [53], esta celda consta de dos electrodos; FTO²⁰ como trabajo y contador, y el platino como contraelectrodo. El semiconductor TiO_2 se ubica en el electrodo tipo n de trabajo, mientras que electrolito es el encargado de transportar los agujeros, tal como se muestra en la Figura 28.

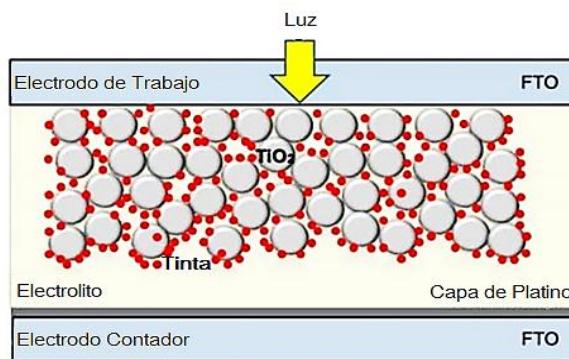


Figura 28. Componentes de la celda a base de puntos cuánticos.

Fuente: A. Josep, P. Atienzar, A. Corma, H. García, 2015 [53].

La pintura basada en TiO_2 se puede clasificar en tipos I y II, dependiendo de la vía de inyección de electrones desde el colorante hasta banda de conducción del TiO_2 . El de tipo I es la fotoexcitación de la banda local del colorante adsorbido sobre TiO_2 seguido de la inyección de electrones dobles o indirectos. El de tipo II es una inyección de electrones «en un solo paso» directo desde el estado

²⁰ Vidrio semiconductor transparente.

fundamental del colorante hacia la banda de conducción, asimismo por fotoexcitación. Esta clasificación se muestra en la Figura 29, donde las flechas verdes representan los procesos para la generación de photocorrientes y las azules los procesos de recombinación, es decir, procesos de pérdida de electrones. ITO²¹. FTO²². TCO²³ [54].

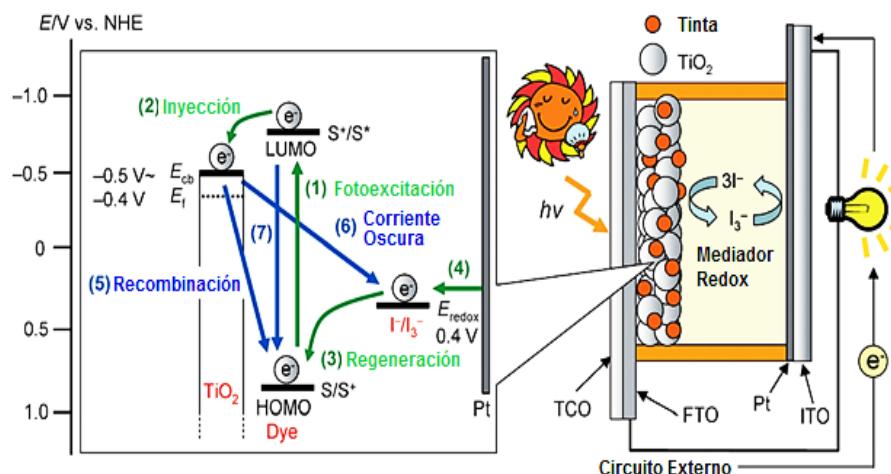


Figura 29. Representación esquemática de los principios constructivos y operacionales de la celda sensibilizada basada en TiO_2 .

Fuente: Y. Ooyama, Y. Harima, 2012 [54].

Visto desde una perspectiva práctica, y según Nathan Lewis [24], el funcionamiento de la pintura solar aplicada sobre un techo o casa podría ser el siguiente.

En primer lugar es necesario aplicar una capa de algún material que ayude a conducir la electricidad, y esta podría ser una de plástico muy delgada cubierta de aluminio, como en la Figura 30.

²¹ Óxido de indio y estaño [54].

²² Óxido de estaño dopado con flúor [54].

²³ Óxido conductor transparente [54].

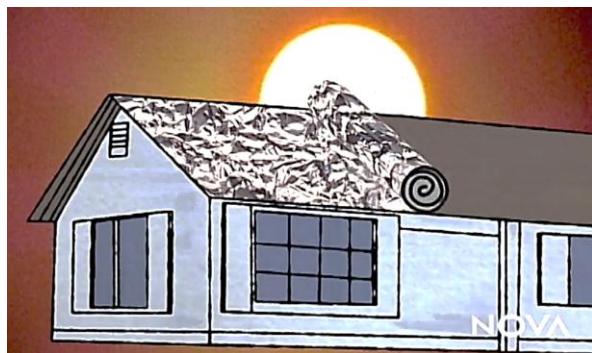


Figura 30. Capa conductora de electricidad.

Fuente: NOVA, 2008 [24].

Del mismo modo son necesario los cables con la función de conducir la electricidad a la casa, como en la Figura 31.



Figura 31. Ubicación e instalación de los cables.

Fuente: NOVA, 2008 [24].

Luego de esto, se aplicaría la capa de pintura solar, donde su componente clave es el compuesto químico TiO_2 procesados dentro de los nanotubos que apuntan al sol como brisas de césped.

La Figura 32 muestra el recubrimiento del techo con la pintura solar, y a su derecha los nanotubos.

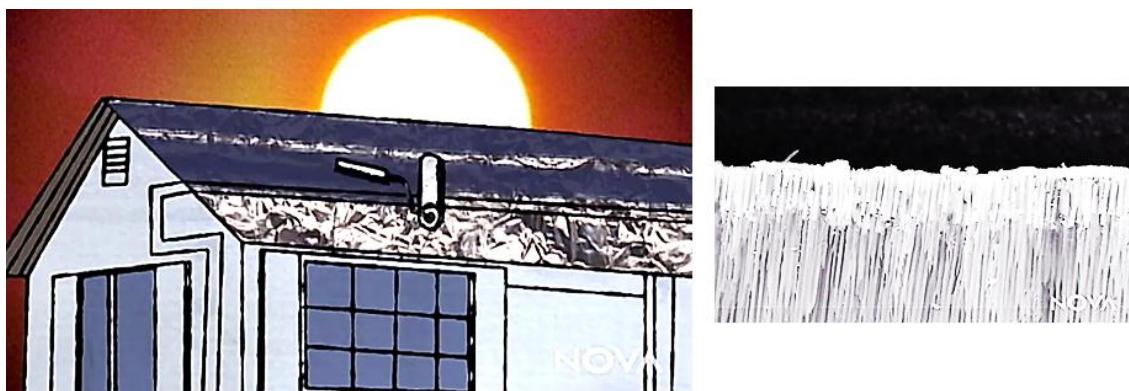


Figura 32. Aplicación de la Pintura Solar (a la derecha los nanotubos).

Fuente: NOVA, 2008 [24].

Cuando los protones de la luz solar entran en contacto con los átomos individuales del TiO₂ liberan electrones, y si se aplicara una capa de color claro de carga positiva sobre la pintura, los electrones liberados de carga negativa empiezan a dirigirse sobre los cables e inversor, y finalmente se obtendría electricidad útil. Tal como se muestra en la Figura 33.

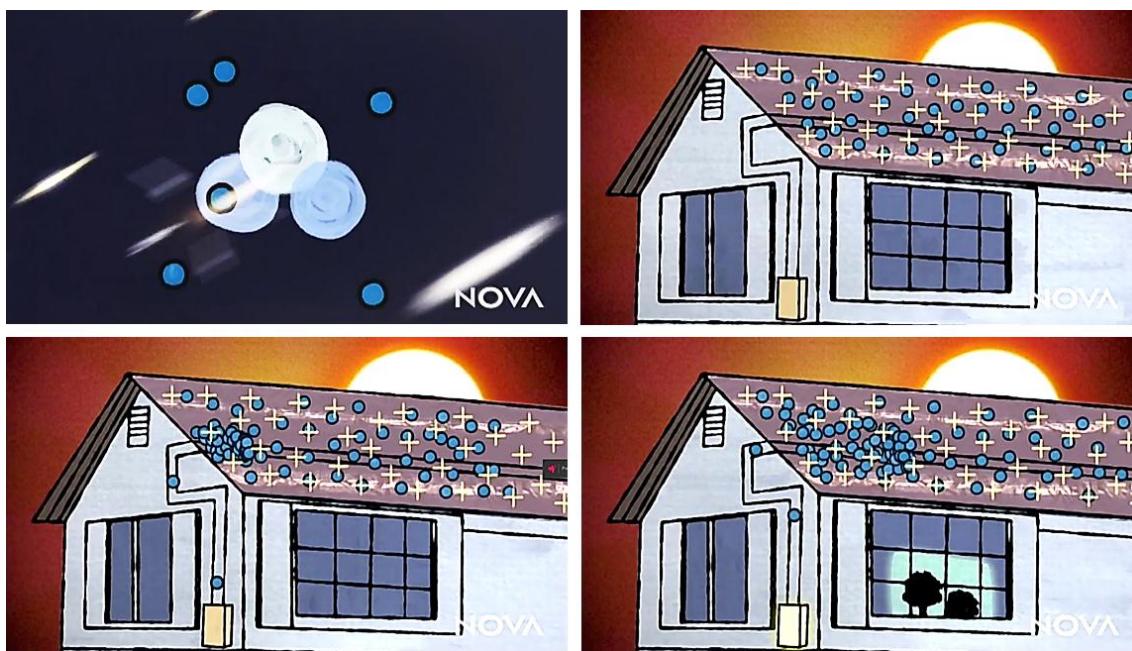


Figura 33. Dinámica del flujo de electrones produciendo electricidad.

Fuente: NOVA, 2008 [24].

Actualmente no existe una vivienda cubierta con la pintura solar FV o simplemente su techo, pero varios expositores y dueños de la patente de la tecnología presentan prototipos de pintura sobre madera, techo o plástico. En este caso, la figura 34 ilustra a la científica mexicana Sandra Casillas exponiendo la aplicación de la pintura solar sobre un techo o teja.

a)



b)



Figura 34. Aplicación de la Pintura Solar FV: a) sobre techo de teja. b) sobre madera.

Fuente: elsiglodetorreón.com.mx [55]

2.5.5.5. Pruebas y Mediciones de Laboratorio.

De acuerdo al artículo científico de Mathew P. Genovese y Otros [48], Las características I-V y la respuesta fotocorriente de la pintura solar bajo una irradiación de luz AM 1.5 se muestran en la Figura 35. El compuesto de nanopartículas mezcladas de CdS/TiO₂ y CdSe/TiO₂ (curva roja en A, y azul en B) logró el mejor rendimiento con una eficiencia de conversión de potencia superior al 1%. Las demás curvas son respuestas correspondientes a otros métodos que dieron resultados inferiores a la mezcla principal del TiO₂ con puntos cuánticos.

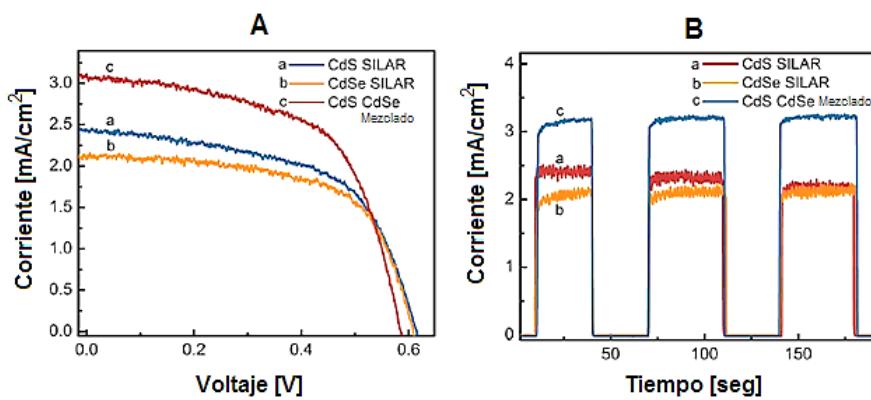


Figura 35. Curvas I-V de la Pintura Solar.

Fuente: M. P. Genovese y Otros, 2012 [48].

Por otro lado, los parámetros que han obtenido de la pintura se comparan en la siguiente Tabla 2.

Tabla 2. Desempeño foto electroquímica de la Pintura Solar.

Fuente: M. P. Genovese y Otros, 2012 [48].

Electrodo	Razón	Método	I _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	FF	η (%)
CdS/TiO ₂	1,5:1,0	Mezclado	2,26	600	0,52	0,71
CdS/ZnO	2,25:1,0	Mezclado	3,01	675	0,28	0,57
CdS/ZnO/TiO ₂	2,0:1,0:0,2	Mezclado	3,63	685	0,36	0,89
CdS/TiO ₂	1,0:3,5	SILAR	2,33	615	0,61	0,87
CdSe/TiO ₂	1,0:5,0	SILAR	2,12	608	0,64	0,83
CdS-TiO ₂ /CdSe-TiO ₂	1,0:1,5	SILAR, Mezclado	3,10	585	0,59	1,08



Con estos resultados de pequeñas muestras de pintura solar, para Mathew P. Genovese y Otros, es necesario más optimización y aplicación de diferentes nanopartículas semiconductoras para elevar la eficiencia de dichas células solares, mientras tanto el artículo desarrollado por los científicos antes mencionados es una demostración de la emergente tecnología FV a base de semiconductores nanocristalinos.

Entre otros criterios, se necesita tener la capacidad de una buena absorción del espectro solar. Esto significa que las investigaciones se están centrando en la utilización de materiales orgánicos de baja banda prohibida, para obtener una corriente alta, es decir una eficiencia aceptable y elevada.

Conviene destacar que la eficiencia obtenida durante las investigaciones de Mathew P. Genovese y Otros no es la única que se conoce en la actualidad respecto a las pinturas solares, considerando que se ha elegido este artículo científico a manera de ejemplo ya que detalla e ilustra de manera sencilla y clara el procedimiento que llevaron a cabo los autores para la preparación de la pintura solar. En consecuencia, más adelante en el Capítulo 3 se indica otros datos de eficiencia obtenidos por diferentes investigadores con diferentes métodos y técnicas utilizadas.

2.5.5.6. Disposición del Ánodo y Cátodo.

Como cualquier célula solar, las pinturas solares requieren como mínimo un electrodo transmisor de luz. El segundo electrodo podría ser un material opaco o transparente, dependiendo de la aplicación específica. La distinción entre ánodo y cátodo en la FV Orgánica en general no es tan trivial y depende fuertemente de la arquitectura de la célula, por lo tanto, es más común definir un electrodo inferior y otro superior. Para una mejor funcionalidad, las propiedades de los electrodos deben ser altos en conductividad, transmisión y reflectancia. En conclusión, la transparencia del ánodo y cátodo debe superar el 80% durante todo el espectro solar para minimizar las pérdidas ópticas.

En la construcción de la célula, Mathew P. Genovese y Otros [48] manifiestan que para obtener el fotoánodo, los electrodos son de Óxido de Estaño dopados con Flúor sometido previamente con Cloruro de Titanio ($TiCl_4$) a 70°C durante 30 minutos. Luego de aquello, se aplica la pintura a los electrodos mediante un método de cuchilla rascadora y se recocen bajo nitrógeno a 200°C durante 60 minutos. En cambio para el photocátodo utilizaron un compuesto de Grafeno, el Sulfuro de Cobre (Cu_2S). Como electrolito emplearon una mezcla de Sulfato y Sulfuro de Sodio. Al final, las células se configuraron en una orientación de célula de sándwich con un espaciador Parafilm. En ambos casos, el ánodo y cátodo están hecho a base de TiO_2 y Óxido de cobre respectivamente, es decir, por nanocris tales en forma de FTO, tal como se muestra en la Figura 36.

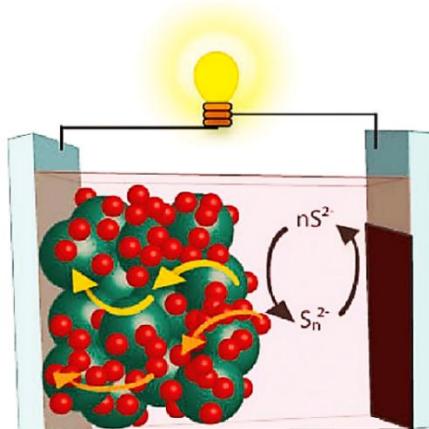


Figura 36. Generación de photocorriente producida por el flujo de electrones del TiO_2 (flecha amarilla) y $CdSe$ (flecha naranja).

Fuente: M. P. Genovese y Otros, 2012 [48].

2.5.6. Ventajas y Desventajas.

Como explican Matthew P. Genovese y Otros, la pintura solar tiene ventajas en cuanto a simplicidad, economía y estabilidad en comparación con las arquitecturas de células solares convencionales. Es por ello que una ventaja admirable para el medio ambiente es la poco o nada contaminación ambiental directa que éstas podrían provocar, dado que al contrario de los paneles a base de Silicio, las pinturas solares no se vuelven desechos sólidos o basura electrónica luego de finalizada su vida útil.



La pintura solar como nanopartícula ofrece además la posibilidad de afrontar dos principales desafíos referentes a la impresión de células, sean estas la de controlar la arquitectura a nanoescala y eliminar la necesidad de disolventes orgánicos peligrosos durante la fabricación del dispositivo [56].

Igualmente, la pintura solar como tecnología competitiva y accesible podría reducir el costo de la comercialización de electricidad, pues en lugar de la instalación de paneles convencionales de alto costo y estéticamente incómodos, se podría tener el techo recubierto o pintado con esta nueva tecnología mucho más barata.

Dentro de todo el contexto investigativo acerca de este nuevo dispositivo, la pintura solar podría ofrecer grandes oportunidades como una tecnología FV disponible para afrontar los problemas energéticos en varios sectores del Ecuador, o incluso en un futuro dar una alternativa para dejar de consumir combustibles fósiles para generar electricidad, o más aún cuando lleguemos al punto donde la hidroelectricidad presente problemas debido a una escasez del agua que se podría dar en el 2030 según la ONU, y que desembocaría a una tercera guerra mundial [57]. Con las pinturas solares el único recurso que se utilizaría es el sol, fuente de energía inagotable.

Una de las principales desventajas de las investigaciones a lo largo de los últimos años sobre nuevas tecnologías FV's se ha visto perjudicadas por la falta de apoyo de entes, universidades o empresas públicas y/o privadas para su avance. Es por ello que paralelamente a continuos desarrollos al respecto también se buscan organismos que inviertan de manera económica para establecer instalaciones a escala comercial y estén disponibles en el mercado.

En definitiva, ante las innumerables ventajas de la pintura solar está el hecho que promete ser una tecnología que revolucionará el sistema FV actual, puesto que será más eficiente y económicamente accesible para cualquier persona.



2.5.7. Fabricación y Comercialización.

Como se ha visto en puntos anteriores, la pintura solar es una tecnología que aún no es madura o está en proceso de desarrollo, es decir, en vías de investigación y pruebas de laboratorio. No así a lo indicado anteriormente, lo que sí está actualmente disponible comercialmente hablando son las sustancias y compuestos de los que están hechas las pinturas solares.

Por si fuera poco, la comercialización de la pintura a gran escala con alta eficiencia y a bajo costo es un hito de que el futuro de la energía FV es muy prometedor. Ante ello, numerosas universidades y grupos de investigación han estado trabajando en la pintura solar durante los últimos 5 años incluso llegando hasta el Crowdsourcing²⁴ para la producción comercial.

Los grupos de investigación de varias universidades han demostrado que las pintura solar puede alcanzar una eficiencia de más o menos el 10%, adicional a esto, han mostrado que es una tecnología con un costo de fabricación e instalación más barata que los típicos paneles solares a base de Silicio. Por tal razón, las pinturas solares podrían ser comercialmente viables aunque aún no lo son, ya que uno de los motivos es el deseo de estabilizar la eficiencia de las mismas lo más alto posible por el momento. Asimismo, para que sea un éxito su vida útil, buscan complementar la calidad de la pintura solar logrando disponer de varios colores para mejorar su estética. Esto ha hecho que diferentes empresas quieran apostar por esta nueva tecnología, pero por el momento se han establecido un margen de tiempo para preparar nuevos estrategias de mercado [58].

Sin duda, uno de los factores que puede impedir el surgimiento de esta nueva tecnología son las políticas del sector eléctrico de ciertos países, especialmente industrializados. Dado que en los últimos años la industria solar está cada vez

²⁴ Es un proceso por el cual se consiguen soluciones o financiamientos virtuales a problemas a través de una persona o grupo de personas (DailyCrowdsource, 2017).



más globalizada y por ende generando un mercado más competitivo y fuerte, éstas políticas públicas pretenderían controlar dicho mercado a favor de intereses propios, mediante la imposición de derechos complejos y nuevos sobre los equipos o sistemas solares importados. Estas imposiciones podrían pausar el desarrollo competitivo a las pinturas solares entre las demás tecnologías FV's, tal como está pasando en EE. UU. [59].

Investigando al respecto del tema, existen sitios web en las que compañías muestran a la pintura solar como un producto ya comercial. Entre las que comercializan de manera virtual en sus plataformas a esta nueva tecnología están SunPaint [60], SolarPaint Ltd [61], Casillas Innovation Enterprise [62] y Centro de Innovación de Futuras Tecnologías [63]. En ellas, resaltan a la pintura FV como una tecnología emergente y prometedora.

De todas las compañías antes mencionadas, la compañía SolarPaint Ltd comercializa la tecnología a un precio totalmente bajo con una eficiencia del 10% y vida útil de 10 años, convirtiéndose en la primera empresa en revelar un costo totalmente favorable y prometedor en el ámbito de la energía FV mundial. En la sección del análisis económico del capítulo 4 se profundiza el tema del precio de comercialización.

En fin, el futuro de esta nueva tecnología tiene un panorama prometedor, puesto que las eficiencias de estos dispositivos a lo largo de varias investigaciones en los últimos años han aumentado de 0.004% a 4% en menos de cinco años sobre pequeñas muestras de laboratorio [56].



CAPÍTULO 3

ANÁLISIS ENERGÉTICO DE LA PINTURA SOLAR EVALUACIÓN EN BASE AL POTENCIAL SOLAR Y CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS DEL ECUADOR

3.1. Potencial Solar en el Ecuador.

3.1.1. Introducción.

Teóricamente la radiación solar en el Ecuador se mantiene constante a lo largo de todo el año, puesto que se beneficia por su posición geográfica considerado el país ubicado en la mitad del mundo. En otras palabras, nuestro recurso solar incide con un ángulo perpendicular sobre la superficie ecuatoriana [64]. No obstante esto no sucede en países que cuentan con las cuatro estaciones del año. Por lo tanto, esta particularidad ha hecho que nuestro país registre uno de los mejores niveles de radiación que puede ser aprovechable energéticamente.

Por el contrario, también existen factores negativos que afectan el potencial solar en el Ecuador disminuyendo los niveles de radiación, puesto que también es un país con nubosidad considerable y diferentes latitudes entre una zona y otra.

Inicialmente, los primeros datos de radiación solar se los conoció en el año 1962 por el INAMHI que a su vez registró también la heliofanía²⁵. No obstante, para determinar este potencial el INAMHI contaba con 54 estaciones como tecnología de medición de aquella época, registrando en su mayoría valores discontinuos de varios meses [65].

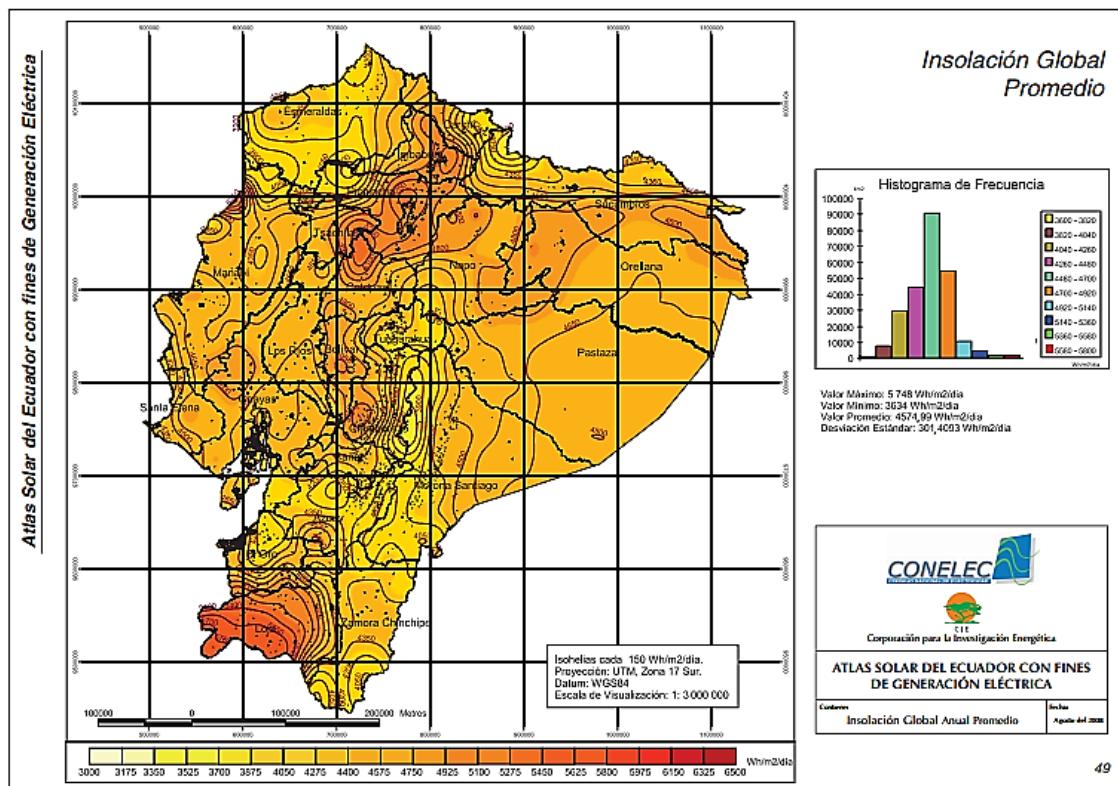
Actualmente existen entidades que miden y registran los niveles de radiación solar con tecnología actualizada a través de satélites. Este es el caso de la

²⁵ Duración del brillo solar o radiación directa, hora/día.

NASA, el Instituto de Energía Solar de la Universidad de Massachusetts, el NREL, entre otros. Por la ubicación del Ecuador, el nivel de radiación promedio durante todo el año es de 4574,99 [Wh/((m²-día))], según el Atlas Solar del Ecuador publicado por el CONELEC (ahora ARCONEL) y la CIE en 2008.

3.1.2. Atlas Solar.

Con fines de generación eléctrica, en el 2008 el ahora ARCONEL y la CIE publican el Atlas Solar poniendo a disposición pública el potencial disponible en el Ecuador en forma de mapa con la radiación solar en sus componentes directa, difusa y global. Para su elaboración utilizaron como base la información del NREL de los Estados Unidos, cuyas operaciones están orientadas a la investigación de las energías renovables y eficiencia energética [66]. La Figura 37 muestra el índice global de irradiación de un año completo.



En este contexto, el potencial solar estimado en el país para generación eléctrica es de 312 [GW] que equivale a 456 [TWh/año], a su vez 283 [MBEP/año]. Esto equivale aproximadamente 15 veces el potencial hidroeléctrico utilizable de nuestro país [67].

Igualmente, para motivar el uso de la energía solar para generar electricidad, el Atlas Solar del Ecuador pone a disposición pública el mapa de la radiación directa y difusa promedio, tal como se muestra en la Figura 38 y 39 respectivamente.

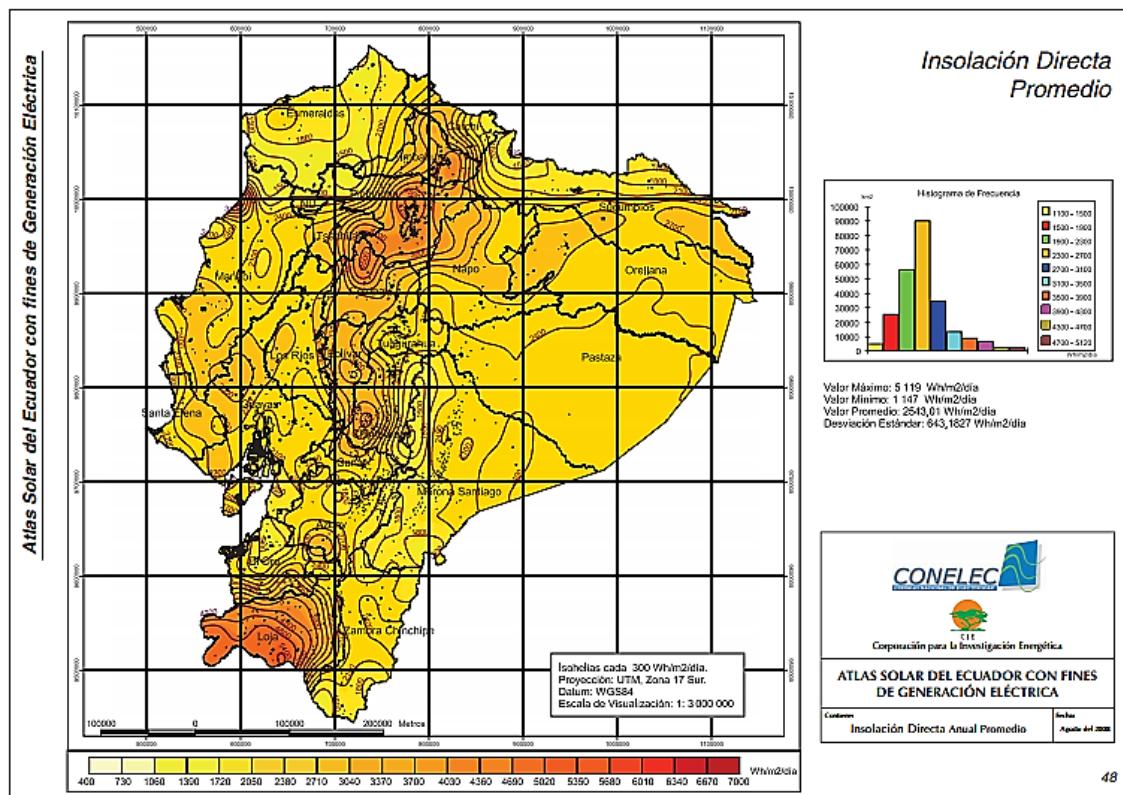


Figura 38. Irradiación Solar Directa del Ecuador.

Fuente: Ex CONELEC, 2008 [66].

Por otro lado, el Instituto de Energía Solar de la Universidad de Massachusetts dispone de una base de datos muy precisos con los niveles de radiación solar para cada ciudad de nuestro país. Dado que cuentan con propios sensores satelitales para la medición (Ver Anexo 1). De igual manera, la NASA posee una base de datos de radiación con alta confiabilidad (Ver Anexo 2).

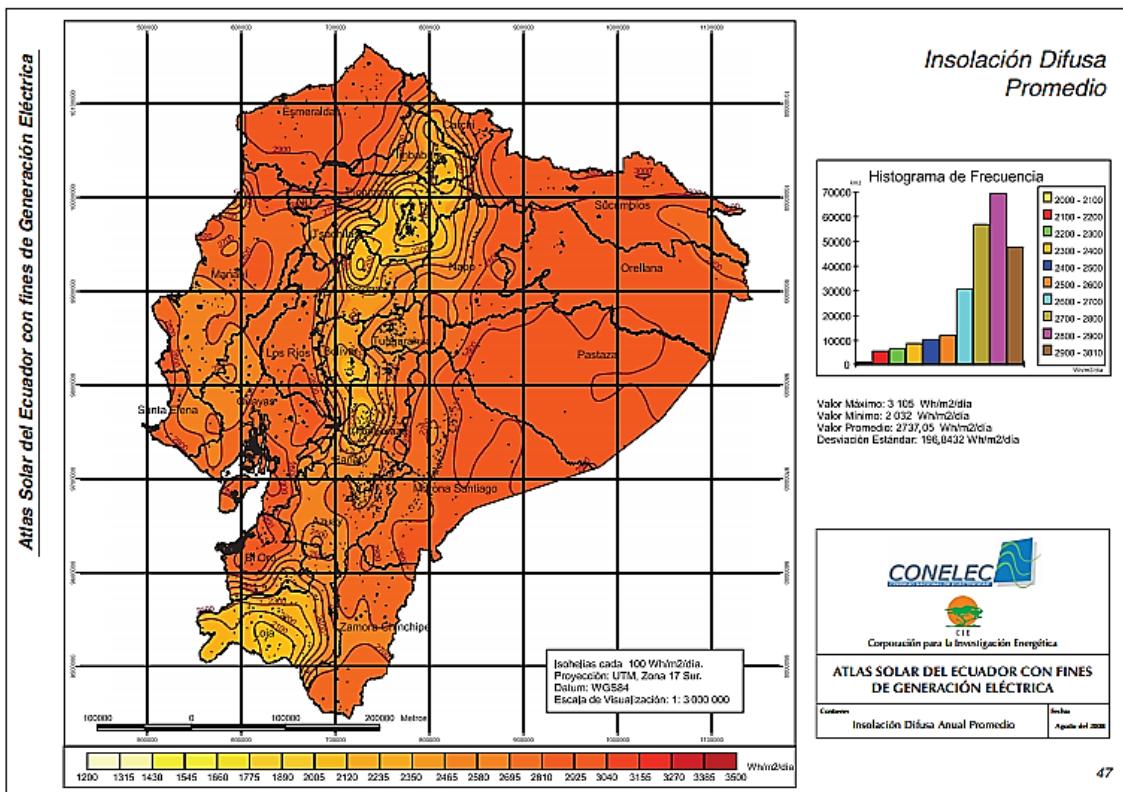


Figura 39. Irradiación Solar Difusa del Ecuador.

Fuente: Ex CONELEC, 2008 [66].

3.1.3. Zonas de Aprovechamiento [68].

Toda la información que dispone el Atlas Solar Ecuatoriano sirve para identificar las zonas que reciben la mayor radiación, y entre ellas están las provincias de Loja, zona Sur del Azuay, el centro del país y del Pichincha, todas con una radiación que supera los 5000 [Wh/((m²-día))]. Aunque sobre este valor se puede incluir Morona Santiago.

Dicho de otro modo, del Atlas se conoce que las zonas con más radiación promedio a lo largo del año también están las Islas Galápagos, Pedernales (Manabí), Santo Domingo, Mindo Nanegalito (Pichincha), Ibarra (Imbabura), Zapotillo, Celica y Macará (todas de Loja) y la Libertad (Santa Elena).

Así pues, en nuestro país los meses de Abril, Mayo, Junio registran la menor insolación global, mientras que los meses de septiembre, octubre y noviembre registran la mayor insolación global.

La Tabla 3 muestra la tabulación de los valores de insolación global promedio para cada una de las provincias.

Tabla 3. Insolación Global Promedio Anual por Provincia [Wh/(kWh/(m²-día))].

Fuente: M. R. Peláez, J. L. Espinoza, 2015 [68].

Provincia	Máximo	Mínimo	Promedio
Azuay	4800	4050	4425
Bolívar	4950	4800	4875
Cañar	4650	4050	4350
Carchi	4200	3900	4050
Cotopaxi	5250	4800	5025
Chimborazo	4950	3750	4350
El Oro	5100	4200	4650
Esmeraldas	4350	3900	4125
Guayas	4800	4200	4500
Imbabura	5100	4000	4550
Loja	5700	4500	5100
Los Ríos	4650	4650	4650
Manabí	5250	4200	4725
Morona Santiago	4500	3750	4125
Napo	4800	4200	4500
Pastaza	4650	4500	4575
Pichincha	5250	4050	4650
Orellana	4800	4500	4650
Tungurahua	4300	4200	4250
Santa Elena	4350	4500	4425
Santo Domingo	5250	4650	4950
Sucumbíos	4800	4050	4425

3.2. Análisis de la Radiación Solar en el Ecuador.

En este análisis se destaca las zonas o ciudades del Ecuador que presenten la mayor y menor radiación solar según el atlas y otras fuentes confiables. En este caso específico se analiza con la base de datos de radiación solar de la Universidad de Massachusetts [69], y de la NASA [70] para registrar sus datos geográficos y climatológicos. Este análisis se detalla en el Anexo 3.



Los datos que se han tabulado corresponden a los lugares con la mayor y menor radiación solar respectivamente, considerándose en principio en las zonas óptimas o desfavorables para la aplicación de la pintura solar. Del mismo modo, para fines de cálculos en el siguiente capítulo, se detallan incluso sus coordenadas geográficas.

3.3. Análisis Energético de las Pinturas Solares.

3.3.1. Introducción.

La intención principal de este trabajo de investigación es realizar el análisis energético de las pinturas solares para una probable aplicación en nuestro país, tomando en consideración el potencial solar, geografía y condiciones ambientales propios del Ecuador.

Ante todo, es conveniente tener claro qué significa realizar un análisis energético y qué parámetros se consideran a lo largo del desarrollo de este trabajo. Para ello, se diferencia términos muy similares como análisis energético y diagnóstico energético, que en varias ocasiones hay confusiones por su similitud pero significan dos cosas diferentes. A continuación se toma como referencia la RAE para conceptualizarlas.

- ▶ **Análisis:** Estudio detallado por distinción y separación de las partes de algo para conocer su composición, principios, elementos, etc. [71].
- ▶ **Diagnóstico:** Identificación y observación de la naturaleza de un proceso a través de la recolección y análisis de datos [71].
- ▶ **Análisis Energético:** Conocer la realidad energética basados en el comportamiento de los componentes del sistema eléctrico, proporcionando una «imagen» del funcionamiento técnico y económico del sistema energético en operación [72].



- ▶ **Diagnóstico Energético:** Determinar, mediante diferentes técnicas, el nivel de eficiencia de los equipos o sistemas al momento de consumir la energía que tienen disponible, es decir, hacer una valoración de todas las fuentes de energía [72].

En cierta medida, los propósitos de ambos términos son diferentes pero orientados al mismo objetivo: conocer el uso de la energía y fijar los mejores procedimientos para que esta utilización sea lo más eficiente posible.

En resumidas cuentas, la idea principal del análisis energético que se llevará a cabo en esta tesis es conocer la posición energética actual de las pinturas solares mediante un proceso de revisión general de su eficiencia y probable instalación.

3.3.2. Eficiencia de las Pinturas Solares.

Como se había mencionado previamente en el Capítulo 2, la eficiencia obtenida por Mathew P. Genovese y Otros no es la única que se conoce respecto a la nueva tecnología, por esta razón, en esta sección se mencionan diferentes valores de eficiencia que se han obtenido en diversas investigaciones a lo largo de los últimos años, de las cuales se selecciona la más influyente para posteriormente empezar el cálculo energético.

A diferencia de la eficiencia del 1,08% conocida, las siguientes tienen algo en común, y es que todas fueron preparadas por diferentes métodos y materiales, con el único objetivo de construir una celda solar FV eficiente y a bajo costo.

En la Tabla 4 se muestran algunas de las principales eficiencias.

Tabla 4. Eficiencias obtenidas por varias investigaciones de la Pintura Solar.**Fuente:** Elaboración propia a partir de [24] [43] [64] [73] - [83]

Autor	Nombre del Artículo	Eficiencia (%)
M. Peng y Otros., [73]	Organic dye-sensitized photovoltaic fibers.	3,12
Stefan Gärtner y Otros., [75]	Eco-Friendly Fabrication of 4% Efficient Organic Solar Cells from Surfactant-Free P3HT: ICBA Nanoparticle Dispersions.	4
James G. Radich y Otros., [76]	Cu2S Reduced Graphene Oxide Composite for High-Efficiency Quantum Dot Solar Cells. Overcoming the Redox Limitations of S2-/Sn2- at the Counter Electrode.	4,4
J-C. Chuan y Otros., [77]	Fabrication and Photovoltaic Properties of Dye-Sensitized Solar Cells Modified by Graphene Oxide and Magnetic Bead.	4,63
Jonathan Goldstein y Otros., [78]	Development of large area photovoltaic dye cells at 3GSolar.	5,38
Umer Mehmood y Otros., [43]	Improvement in Photovoltaic Performance of Dye Sensitized Solar Cell Using Activated Carbon-TiO ₂ Composites-Based Photoanode.	5,45
Armin Fischer y Otros., [74]	Directly Deposited Quantum Dot Solids Using a Colloidal Stable Nanoparticle Ink.	7
Kohjiro Hara y Otros., [79]	Efficient organic-dye-sensitized nanocrystalline TiO ₂ solar cells.	7,6
Illan J. Kramer y Otros., [80]	Efficient Spray-Coated Colloidal Quantum Dot Solar Cells.	8,1
Yiwei Zhang y Otros., [64]	High efficiency arrays of polymer solar cells fabricated by spray-coating in air,	8,75
Nathan Lewis., [24]	NOVA ScienceNOW: Solar Paint Your Roof.	10
Matt Law y Otros., [81]	Nanowire dye-sensitized solar cells.	10
P. Wang y Otros., [82]	Enhance the Performance of Dye-Sensitized Solar Cells by Co-Grafting Amphiphilic.	11
M. Graetzel., [83]	Historical Development Of The DSC, From Its Inception To Its Current State, Nara, Japón: Third DSC Industrialization Conference, 2009.	>12

Como se observa, diferentes estudios han demostrado que las pinturas solares han empezado con eficiencias muy pequeñas al momento de convertir la luz en electricidad, y hasta la actualidad algunos han superado el 12% de eficiencia. Según estos datos, a medida que avanzan las investigaciones se irán desarrollando nuevos métodos y materiales más eficientes que permitirán crear una nueva celda solar a base de pintura. De hecho, la eficiencia de las pinturas solares tiende a crecer advirtiéndose como un futuro muy prometedor en la industria solar FV.

Para fines del cálculo energético, se utiliza una eficiencia del 10% según la compañía «Start-Up Nation Central» [84] especificado por el fabricante SolarPaint Ltd [61].

3.3.3. Requerimientos básicos para la Aplicación de la Pintura Solar.

En principio uno de los aspectos a considerar para la aplicación de la pintura solar está relacionado básicamente al comportamiento de la radiación incidente en las zonas consideradas con alto aprovechamiento del recurso solar.

Geográficamente el Ecuador está ubicado justo en la línea ecuatorial, lo que hace que la insolación diaria se mantenga a lo largo del año con un nivel promedio de 4,575 [kWh/(m²-día)], un máximo de 5,578 [kWh/(m²-día)] y un mínimo de 3,634 [kWh/(m²-día)] [68].

Para que un proyecto FV mediante pinturas solares sea viable es necesario conocer la radiación en determinadas zonas, sea esta la directa, global y difusa así como los niveles promedios, máximos y mínimos medidos durante los diferentes meses del año. Con ello, es posible determinar la zona más óptima para la aplicación y empezar un análisis de su ciclo de vida.

Otro de los aspectos a tomar en cuenta es la superficie la cual estará recubierta. Esto debido a que la pintura solar deberá ser aplicada sobre algún material

sólido, resistente y en algunos casos sobre superficies metálicas para su mejor aprovechamiento y eficiencia.

También, el panel a base de pintura no deberá estar muy distante del centro de carga o consumo para evitar pérdidas por transmisión de energía. En principio, el objetivo de la pintura solar es que su aplicación se lo realice sobre el techo o cubiertas de las viviendas, es decir, en el propio centro de carga. Por ello, tendría la misma ventaja que los paneles convencionales pero con mayor longitud para aprovechar al máximo toda la radiación solar.

En cuanto a las condiciones ambientales que se presenten, las pinturas solares tendrían como una propiedad la impermeabilidad, esto como una especie de barniz sobre su contorno. Pues, aquello lo hará más resistente para que la eficiencia de la conversión energética no se vea afectada ante la presencia de climas adversos o polución.

Igualmente, así como se lleva a cabo un proyecto FV con paneles convencionales se debe evitar el menor impacto ambiental, especialmente en la flora o vegetación que se tendrían que remover para que no haga interferencia y bloquee los rayos del sol que tienden hacia la pintura solar.

3.3.4. Análisis del Ciclo de Vida. [85]

El análisis del ciclo de vida y análisis de impacto ambiental de las pinturas solares es una metodología especial que permitirá resolver preguntas como por ejemplo: ¿Cómo se mide el impacto del proceso? ¿Su operación? ¿Su desmantelamiento? ¿El fin de su vida útil?

Este método también es conocido como Evaluación del Ciclo de Vida o LCA (en sus siglas en inglés). Es utilizada como una herramienta para llevar a cabo la investigación de incipientes tecnologías energéticas y por ende a eco-diseñarlas, en nuestro caso las pinturas solares.

En definitiva, un LCA es un método para entender los impactos ambientales de un producto, la Figura 40 ilustra el proceso o servicio iterativo que consta de cuatro pasos principales:

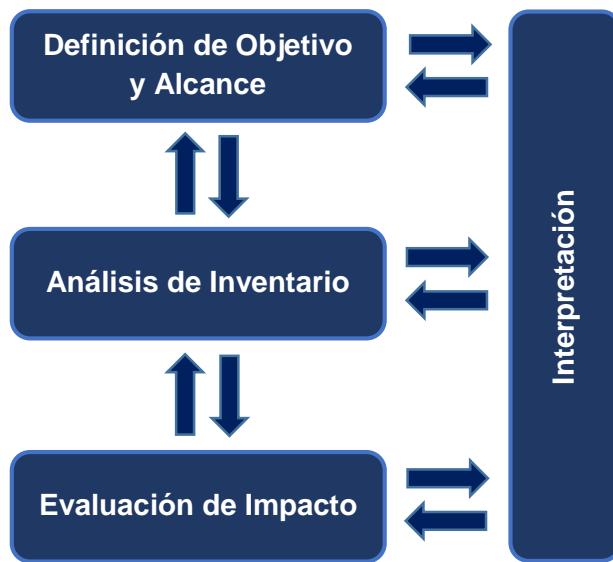


Figura 40. Marco de Metodología LCA.

Fuente: Elaboración propia a partir de [85]

Al igual que cualquier tecnología emergente, también tiene su impacto ambiental y conocerla requiere de datos fiables y un análisis completo para lograr una energía limpia y renovable con materiales abundantes, que no requieran inversión de gran cantidad de energía [86]. La Figura 41 indica el siguiente proceso.

- ▶ **Definición de objetivo y alcance:** En última instancia, la pintura solar producirá electricidad con el fin de identificar los puntos claves, y orientar la investigación hacia el diseño de una tecnología de energía verde, la misma que se encuentra en una etapa temprana. La unidad funcional es una cantidad que proporciona un servicio de una calidad deseada, y en este caso será de un kilovatio hora entregado por la pintura solar. Finalmente, para obtener una buena magnitud para dar cuenta de las entradas y salidas, la referencia se da en metros cuadrado.

- ▶ **Análisis de inventario:** Se recoge las entradas en cada fase del ciclo de vida de este metro cuadrado. Es la lista de datos, materiales, procesos, transportes, electricidad, y las emisiones. Es decir, se necesita conocer todo y cada uno de los detalles de la pintura solar. Aquí se podría utilizar un software para ordenar las fases del ciclo de vida y ser capaces de analizar los resultados más tarde, la mayoría de software incluyen la base de datos «ecoinvent» la cual tiene más de cuatro mil datos de Inventario de Ciclo de Vida o LCI (en sus siglas en inglés). Independientemente del método o herramienta a utilizar, la calidad de los resultados del LCA es igual a la calidad del LCI.
- ▶ **Evaluación de impacto:** Las entradas y salidas de los inventarios anteriores se asignan a cada categoría de impacto. Las categorías de impacto contenidas en el LCA incluye los siguientes: cambio climático, eutrofización²⁶, agotamiento de la capa de ozono, toxicidad humana, etc. Dos parámetros importantes que deben ser calculados al realizar una LCA en tecnologías de energía verde son el Tiempo de Recuperación Energética y la Huella de Carbono. Para el caso de la pintura solar, el tiempo de recuperación energética es el tiempo que se necesita para producir tanta energía como se invirtió en su producción y en toda su vida útil. Mientras que la huella de carbono o factor de emisión son los kilogramos de CO₂ equivalente por la producción de electricidad generada.
- ▶ **Interpretación:** Se lleva a cabo para verificar que la evaluación está cumpliendo con sus objetivos. En primer lugar, la identificación de los parámetros clave en el inventario como el balance energético, materiales, emisiones, residuos, para detectar las contribuciones relevantes.

²⁶ Tipo de contaminación química del agua. Exceso de nutrientes del río, mar, lago, embalse, etc. por la acumulación de residuos orgánicos (ambientum, 2017).

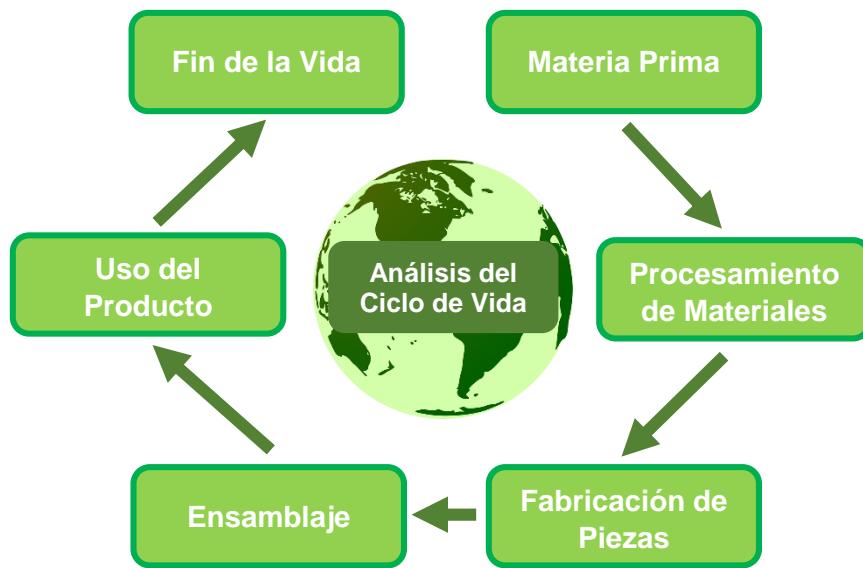


Figura 41. Evaluación del Ciclo de Vida desde el inicio hasta el fin.

Fuente: V, Fthenakis, 2012 [87].

Así se desarrolló a lo largo de los últimos cuatro años la pintura solar como la última generación de FV orgánica, consiguiendo un tiempo de recuperación energética tan bajo como 0,3 años y un inventario más equilibrado. En otras palabras, 3,6 meses es el tiempo de recuperación energética más bajo en el campo FV. Es prometedora, a pesar de no ser aún una tecnología comercial se compara muy bien con las tecnologías FV's tradicionales.

Esta herramienta de LCA ha sido utilizada por varios investigadores para desarrollar la pintura solar o FV Orgánica en general, es decir, mejorar un producto u objeto. De esto se trata el Análisis del Ciclo de Vida, una herramienta utilizada en investigaciones para crear un mundo mejor o quizás saber si la pintura solar se implementará a gran escala.

3.3.5. Fases del ciclo de vida. [85]

La pintura solar consta de cinco etapas distintas de su ciclo de vida, como se ilustra en la Figura 42.

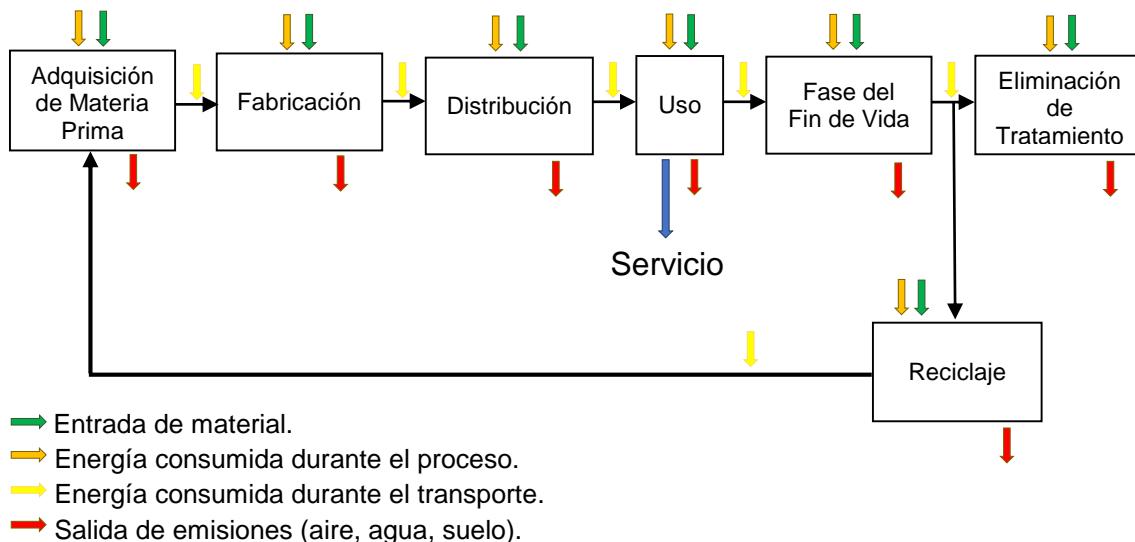


Figura 42. Fases del ciclo de vida de un producto.

Fuente: Elaboración propia a partir de [85]

- ▶ **Adquisición de materia prima:** Procesos relacionados con la extracción y refinación de materias primas. Para el caso de las pinturas solares se utilizan, entre otros materiales, el Óxido de Titanio, como se explicó en el Capítulo 2.
- ▶ **Fabricación:** Incluye procesos que convierte materias primas en productos terminados. Las pinturas solares son fabricados mediante el recubrimiento de varias capas funcionales en una película.
- ▶ **Distribución:** Abarca el transporte y almacenamiento de los productos para consumo.
- ▶ **Uso:** Es la etapa donde los productos realizan un servicio útil para el consumidor. Para el caso de las pinturas solares, éstas entregarán electricidad.
- ▶ **Fase del fin de vida:** Los productos entran al sistema de gestión de residuos. Dependiendo de las prácticas locales de manejo de desechos, la célula a base de pintura solar será reciclada, enterrada bajo tierra o quemada para producir energía.

En cada fase se tiene entrada de materiales, consumo de energía durante el proceso y transporte, liberaciones de emisiones al aire, suelo y agua. Todas estas entradas y salidas causan un daño al ambiente, pero hay que saber detectar cuáles son los impactos más relevantes.

Por el contrario, algunos optan por la incineración como mejor opción de las pinturas solares para el fin de su vida, en consecuencia se desaparecería sus residuos y al mismo tiempo se generaría energía a través de la biomasa u otras tecnologías de conversión, pero en cambio se estaría contaminando con las emisiones producto de la incineración aumentando la huella de carbono.

En definitiva, el LCA revela que mientras se decide por una energía verde para reducir impacto ambiental una consecuencia de ellos sería el aumento de otros impactos. Habría que decir también que es importante tomar en consideración todas las fases del ciclo de vida y así poder identificar las consecuencias colaterales, por el contrario, la correcta aplicación de la LCA en todas estas relaciones hará fácil tomar las decisiones más fiables. Todos estos pasos del método siguen la norma internacional ISO14040 creado por la comunidad LCA y así asegurar una metodología coherente y transparente. [88]

3.3.6. Tiempo de Recuperación de Energía. [87]

Otro parámetro fundamental para el LCA es el tiempo de recuperación de energía o EPBT (en sus siglas en inglés). Indica qué se necesita para compensar la energía primaria renovable y no renovable durante el ciclo de vida de la pintura. La generación eléctrica anual (E_{agen}) se convierte en su energía primaria equivalente basada en la eficiencia de conversión de electricidad en el lado de la demanda. La siguiente expresión es utilizada para determinar este parámetro.

$$\text{EPBT} = \frac{E_{mat} + E_{manuf} + E_{trans} + E_{inst} + E_{EOL}}{\frac{E_{agen}}{n_G} - E_{O\&M}}$$



Donde:

E_{mat} : Demanda de energía primaria para producir materiales que comprenden el sistema FV.

E_{manuf} : Demanda de energía primaria para fabricar la pintura FV.

E_{trans} : Demanda de energía primaria para transportar materiales utilizados durante el ciclo de vida.

E_{inst} : Demanda de energía primaria para instalar el sistema.

E_{EOL} : Demanda de energía primaria para la gestión al final de su vida.

E_{agen} : Generación eléctrica anual.

$E_{O\&M}$: Demanda anual de energía primaria para operación y mantenimiento.

n_G : Eficiencia de conversión de energía primaria promedio a electricidad en el lado de la demanda.

La demanda de energía primaria para producir la pintura solar se considera como gasto energético, pero no existe cifra exacta o aproximada de ese proceso puesto que no es comercialmente estable peor aún a gran escala. Extraoficialmente se manifiesta que produce un gasto energético que origina la aparición de residuos como el NOx²⁷, SO2²⁸, CO2²⁹, etc, dependiendo de las fuentes de energía convencionales del país que lo fabrica.

El estado de Israel [89] donde se ubica la compañía SolarPaint Ltd carece de toda fuente de energía convencional (recurso hídrico y combustibles fósiles), por lo tanto el gasto energético para producir la pintura solar proviene de su fuente convencional como la FV. Es decir, no existen residuos por la fabricación de la pintura en aquel país. Por otro lado, la generación de energía anual a través de la pintura debe ser mayor a la consumida en su fabricación. Este análisis energético se detallará en el capítulo 4.

²⁷ Óxido de nitrógeno.

²⁸ Óxido de azufre.

²⁹ Dióxido de carbono.



3.3.7. Limitaciones del Sistema FV a base de Pinturas Solares.

A través del campo de la energía solar surge la interrogante de mayor interés, cómo se va a sostener la demanda energética de la humanidad por medio de nuevas metodologías. En este caso se trata de un método de rápida fabricación de un dispositivo de recolección solar muy ligero, una célula solar completamente basado en pintura.

El sistema debe cumplir con ciertos requisitos; que la pintura solar debe ser una capa totalmente delgada y debe cubrir un área grande debido a que aún su eficiencia es muy pequeña, 10%. Esto debe ser un causante de que haya sido menos exitoso, al menos en términos de practicidad hasta ahora.

Ahora bien, mientras que la pintura solar es fácil diseminarla o esparcirla a lo largo de grandes superficies que nos permitan recolectar energía, cuánto dinero nos va a costar, cuánto material adicional a la pintura se necesitará, y para los investigadores; cuánto material se necesitará para fabricarlo, cuán complicado es fabricar algo que cubra una gran superficie. Por lo tanto, es necesario que en su fabricación se piense en usar solo materiales que abunden en la Tierra.

Lo ideal es tener una tecnología con un tiempo de recuperación energética bajo, es decir que se reembolse a sí misma en un breve período. También se quiere que sean eficientes o que al menos usen la superficie del techo de forma más eficiente. Por lo que si la pintura solar no es tan eficiente sería necesario ocupar grandes superficies para extraer cierta cantidad de energía, y eso sería tomar en cuenta de no malgastar la superficie que podrían utilizarse para otras actividades.

3.3.8. Estabilidad y Degradación. [90]

Los conceptos de estabilidad y degradación de las células solares son vitales para una tecnología que se expondrá a la luz, el oxígeno y la humedad durante

todo su ciclo de vida. Es así que al analizar estos factores ambientales ha hecho que se logren grandes mejoras en su rendimiento.

A través de la investigación científica se han logrado distinguir diferentes mecanismos de degradación. La estabilidad es un tema muy importante considerando que varios materiales orgánicos expuestos a la luz solar y oxígeno se descomponen. Investigaciones han revelado que prototipos anteriores de este tipo de tecnología se degradaron muy rápido, no así su duración ha incrementado enormemente. Con el propósito de comparar la pintura solar con otras tecnologías FV es importante fabricar células solares que sean comerciales y capaces de durar por largo tiempo.

Como se puede ver en la Figura 43, sólo hasta el año 2012 es notable un crecimiento exponencial en la cantidad de artículos científicos sobre la FV Orgánica en general, pero solo una pequeña parte de ellos se relaciona con problemas de la degradación y estabilidad.

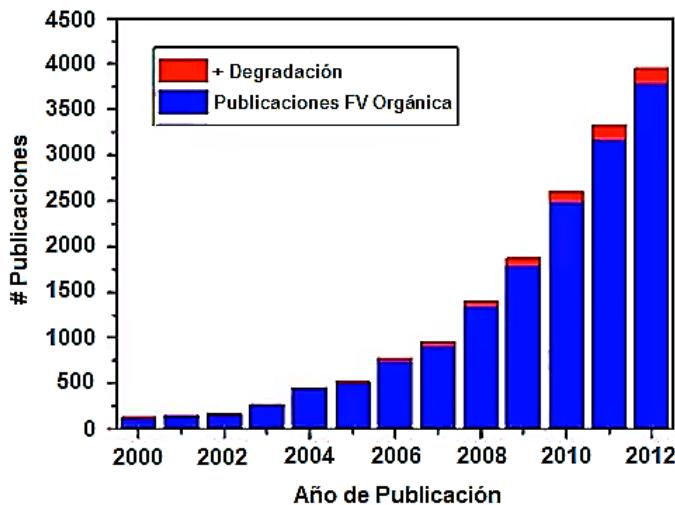


Figura 43. Artículos científicos publicados sobre OPV.

Fuente: F. C. Krebs, 2014 [90].

Como se ha descrito en secciones anteriores, las pinturas solares están formadas por varias capas de diferentes nanomateriales, y cada uno de estas

puede degradarse de diferentes maneras y afectar la estabilidad. Existen una serie de mecanismos de degradación importantes relacionados a la naturaleza física o química, y entre los principales están los siguientes:

► **Físicos.**

- Delaminación³⁰.
- Grietas inducidas por el estrés.
- Cambio morfológico.
- Formación de partículas ajenas a su composición.
- Separación de fases.
- Mezclado o intercambio de componentes.
- Degradación inducida por la luz de componentes orgánicos.

► **Químicos.**

- Oxidación de electrodos inducida por O₂/H₂O (Oxígeno y Agua).
- Oxidación de los componentes orgánicos inducida por O₂/H₂O (Oxígeno y Agua).
- Foto reducción del ZnO y TiO₂.
- Foto oxidación.

Para producir una célula solar estable, es importante entender estos mecanismos y cómo interactúan. Algunos requieren cambios en la elección de los materiales, en cambio otros se pueden resolver protegiendo la célula a través del encapsulamiento para reducir la afluencia de oxígeno y agua. [90]

Al ser las pinturas solares orgánicas y por ende flexibles, en principio es una ventaja en algunas situaciones pero también significan que deben ser mecánicamente estables, capaces de resistir cualquier delaminación y fractura interna. Estos son requerimientos para una operación óptima.

³⁰ Separación o desprendimiento de capas debido a la infiltración de aire entre ellas [90].

En cuanto a la estabilidad, la pintura solar tiene que cumplir al menos dos cosas: estabilidad fotoquímica y estabilidad térmica.

- ▶ Cuando se evalúa la estabilidad fotoquímica se incide luz sobre la pintura y se mide la absorción durante un tiempo, y de esta manera se puede observar cuándo el material se degrada de acuerdo al espectro UV visible.
- ▶ Por otro lado, al evaluar la estabilidad térmica se utiliza un método llamado análisis térmico gravimétrico o TGA (en sus siglas en inglés) donde se proyecta el peso de la pintura bajo cierta temperatura. Esto demuestra el momento en que el material pierde peso molecular cuando es calentado.

Aunque estos dos tipos de estabilidad como la fotoquímica y térmica muestran altos números de estabilidad, no necesariamente significan que el dispositivo sea eficiente a pesar de que sea estable durante un tiempo muy largo, precisamente porque hay varios parámetros en el dispositivo final que hace que la estabilidad se vea afectada. [91]

Algo parecido ocurre con la degradación química, la mayoría de los materiales orgánicos son susceptibles a la reacción con el oxígeno y la humedad de la atmósfera, y cuando incide luz UV del sol esta degradación se acelera, pero afortunadamente las tasas de reacciones difieren enormemente [92].

El gran desafío es utilizar nanomateriales que tengan las propiedades electro ópticas deseadas para que los portadores de las cargas positivas y negativas terminen en sus respectivos electrodos. El ZnO y TiO₂ son compuestos químicos elegibles para el transporte de electrones, no obstante también pueden reaccionar con oxígeno y luz UV cambiando sus propiedades.

Los metales usados para los electrodos también pueden reaccionar con oxígeno y agua. Uno de ellos es el aluminio, que en realidad es muy reactivo y, por lo



tanto, los dispositivos alternativos y más estables son la plata. De cualquier modo, la inmunidad total hacia el oxígeno y el agua no es posible, entonces, una de las estrategias más exitosas es encapsular las células con materiales transparentes que bloquen agentes incidentes hacia la célula. Para esto se han desarrollado películas de plásticos especiales y transparentes con propiedades de barrera. [90]

Tanto los mecanismos químicos y de degradación física se confabulan para degradar la pintura. La importancia de aumentar la estabilidad ha llevado a un mayor número de científicos a centrarse en esta área. Y se creó un foro internacional llamado ISOS para organizar conferencias y supervisar esta área de investigación. Esta norma se detallará más adelante, específicamente en la sección 3.3.10.

Adicionalmente, se distinguen dos formas de investigar la estabilidad de las pinturas solares: pruebas bajo condiciones similares a su uso diario, y experimentos directos para descubrir mecanismos de degradación involucrados. Estos métodos pueden implicar pruebas de por vida con o sin luz, o luz a diferentes intensidades, temperatura variable o estudios de humedad, y el uso de una atmósfera controlada con o sin oxígeno. Durante estas pruebas, se controla el rendimiento de la célula solar y, posteriormente, se pueden llevar a cabo pruebas destructivas para evaluar los cambios químicos y físicos que se han producido durante los diferentes mecanismos de degradación. [93]

En resumidas cuentas, si se coloca la pintura solar en zonas con altos niveles de humedad o con clima seco, es probable obtener una vida diferente para el mismo dispositivo FV. Para ilustrar, en la Figura 44 se observa una prueba que ha sido realizada de acuerdo a las situaciones antes mencionadas, en donde los dispositivos colocados en Australia estableció que el tiempo de vida fue alrededor de 11 meses, mientras que en Dinamarca el mismo dispositivo trabajó hasta 14 meses, más de un año.

La razón de ello, por supuesto, es que en Australia hay más horas de sol y por ende más niveles de energía solar son recibidos por la pintura, y por consiguiente resulta que la degradación es más rápida. Adicional a eso, los niveles de temperatura son bien altos comparados con Dinamarca, llegando a ser el doble de su valor [94].

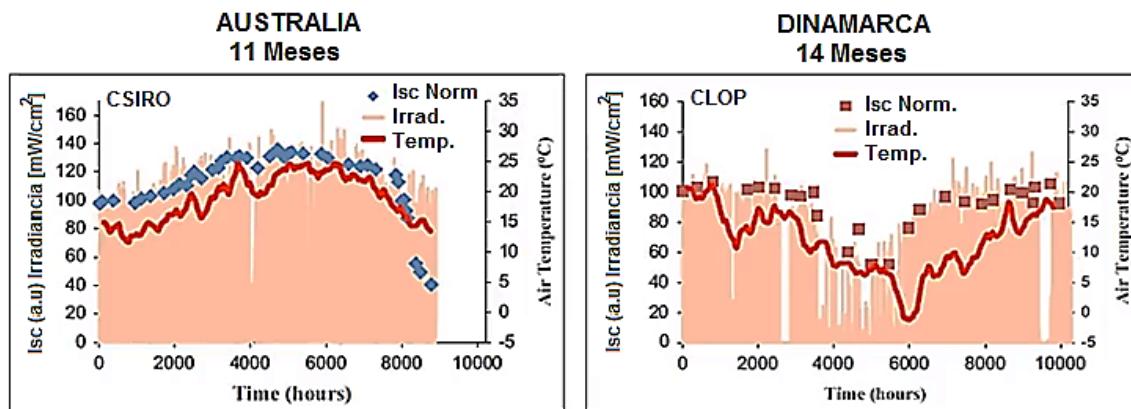


Figura 44. Comportamiento de ciclo de vida y degradación de dispositivos OPV ubicados en Australia y Dinamarca respectivamente.

Fuente: D. Angmo y Otros, 2014 [94].

Este análisis de vida del dispositivo FV nos servirá para hacer una relación directa de radiación y temperatura existente en el Ecuador y compararlas con los datos geográficos y climatológicos de los dos países antes mencionados. Con ello se logra obtener la zona que menos degradaría la pintura solar en nuestro país. Este análisis se lo detallará con precisión en el capítulo 4, metodología de cálculo.

3.3.9. Curvas de Decaimiento. [95]

Otra de las metodologías que se utilizan para medir la estabilidad de las células solares en función del tiempo es mediante las denominadas curvas de decaimiento, que pueden variar de acuerdo a ciertas circunstancias bajo las cuales se midan.

Es una herramienta muy útil pero no revela nada sobre los mecanismos de degradación, sino más bien puede decir si la degradación es rápida o lenta en ciertas circunstancias específicas.

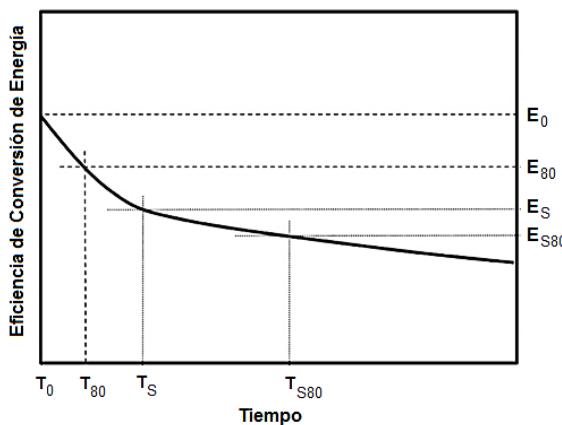


Figura 45. Estabilidad como función del tiempo.

Fuente: M. O. Reese y Otros, 2011 [95].

Estudios realizados obtuvieron una curva de disminución probando una celda solar en mediciones eléctricas a intervalos regulares. Los datos de corriente y voltaje se pueden utilizar para extraer parámetros de células solares, como la eficiencia de conversión de energía y trazarlo contra el tiempo. La trayectoria de una curva de decaimiento es el resultado de la suma de todos los procesos de degradación, pudiendo variar considerablemente.

A manera de ejemplo y analizando la Figura 45, se empieza con una eficiencia E_0 que con el tiempo se reduce. Este tiempo que lo lleva reducir en 80% de su valor se conoce como (TAT), y a veces se lo considera como una medida de la vida útil del dispositivo. Lo que a menudo se observa es una rápida disminución inicial en la eficiencia de conversión de energía seguida de una fase más estable.

Esta etapa inicial a veces se llama «La quemadura en fase» y no siempre se considera parte de la curva de decaimiento. El tiempo al final de la producción en fase es (T_s) y hay un tiempo (T_{S80}) correspondiente donde la eficiencia ha disminuido al 80% desde este tiempo (T_s).

Esta curva revela además que varios procesos de descomposición ocurren al mismo tiempo y que algunos de ellos son muy rápidos pero actúan solo en un corto período. Las mediciones de por vida se llevan a cabo de formas diferentes dependiendo de qué hipótesis se quiere probar, si el objetivo es encontrar la vida útil de una célula solar durante el uso normal, se podría por ejemplo capturar el aire libre expuesto a la intemperie y bajo las condiciones de ciclos diurnos y nocturnos, y probarlo regularmente. En cambio, si se quiere obtener una visión científica de qué parámetros son los más importantes, es necesario controlar el entorno del dispositivo energicamente con luz de lámpara calibrada y el contenido de la atmósfera que rodea la célula solar usando una cámara atmosférica para eliminar o agregar reactivos específicos como oxígeno y agua. [90]

En otro ejemplo de la curva de decaimiento, demostraron que el dispositivo de geometría normal tolera perfectamente el oxígeno pero muere rápidamente en una atmósfera de aire húmedo, mientras que lo opuesto es cierto para el dispositivo de geometría invertida, como se observa en la Figura 46.

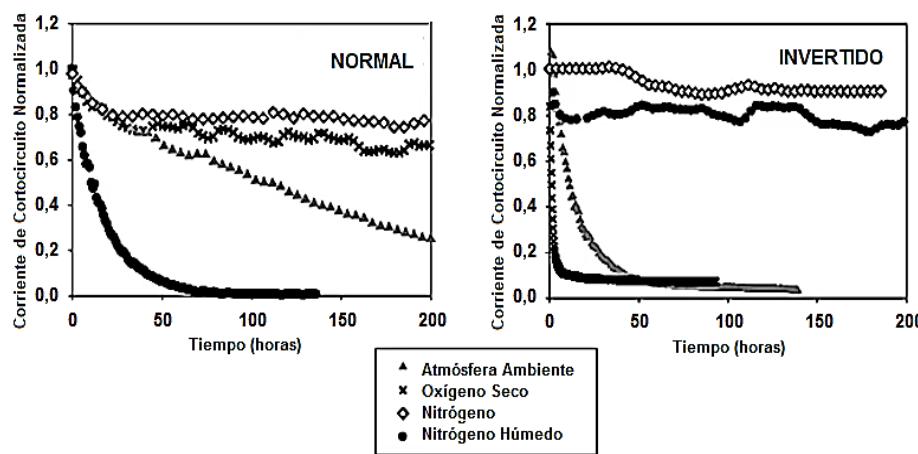


Figura 46. Curva de decaimiento para un dispositivo con geometría normal e invertido.
Fuente: F. C. Krebs, 2014 [90].

Algunas veces los procesos de degradación son tan lentos que sería poco práctico estudiarlos en condiciones ambientales normales, y la mayoría de los procesos físicos y químicos se pueden acelerar aumentando la temperatura.

3.3.10. Estándares ISOS. [96]

Debido a que el estudio de la OPV es tan importante, en el año 2010 se organizó una conferencia en Dinamarca denominada «Cumbre Internacional de la Estabilidad Orgánica» o ISOS (en sus siglas en inglés). Esta organización especial fue creada para organizar conferencias y supervisar este tipo de investigaciones, y así definir los precisos protocolos de medición y procedimientos de prueba, Figura 47. La vida útil de estos nuevos dispositivos cambiará dependiendo de las diferentes ubicaciones geográficas en que se encuentren, y a través de esta norma se reportan los diferentes resultados obtenidos bajo condiciones específicas de prueba.



Figura 47. Cumbre Internacional de la Estabilidad Orgánica.

Fuente: M. Jorgensen y Otros, 2012 [91].

Así surgió el protocolo ISOS, que categoriza los diferentes procedimientos de pruebas tanto para las realizadas a oscuras, a la intemperie, de interior o de baño de luz. Y cuanto mayor sea el nivel de alteraciones, mayor será la lista de parámetros que necesitan ser controlados.

Finalmente, en esa cumbre determinaron que se utilicen ocho parámetros. Primero, E_0 a T_0 para identificar una vida útil para una curva de degradación, es decir, establecer la potencia de salida inicial del dispositivo. Segundo, E_s y T_s para identificar un punto crítico donde la degradación cambia su modo, es decir, a E_s le corresponde ser el punto de este cambio. Por último, los cuatro

parámetros restantes E_{80} , T_{80} y E_{S80} , T_{S80} , mismos que serán la degradación del 20% del desempeño inicial o desde el punto crítico, Figura 48. [95]

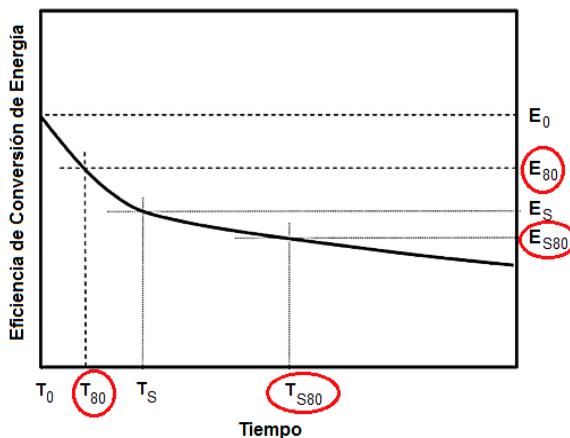


Figura 48. Figura representativa que define los parámetros que se incluirán en el informe de los datos de estabilidad de OPV.

Fuente: M. O. Reese, 2011 [95].

3.3.11. Defectos Eléctricos. [90]

Otros mecanismos de degradación que se abarcaron en secciones precedentes tienden a manifestarse como una disminución en la producción eléctrica. Pero no sucede únicamente esto, además un defecto eléctrico más directo se puede dar en forma de partículas ajenas y/o en características de delaminación en las capas del dispositivo que crean cortocircuitos y circuitos abiertos.

Una de las principales razones por las que las células solares orgánicas son propensas a los defectos eléctricos es que son dispositivos de película delgada con espesores de capa del orden de decenas a cientos de nanómetros, y la distancia entre los dos electrodos externos suele ser mucho menor que una micra de separación, tal como se muestra en la Figura 49. Esto significa que la aparición de partículas puede formar un camino conductor entre ellas, y en esa región de la película habrá una resistencia reducida o incluso un cortocircuito.

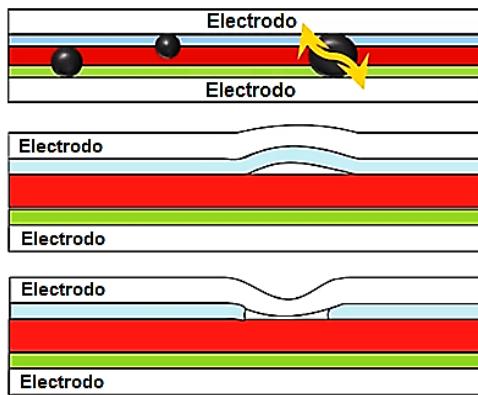


Figura 49. Dispositivos de película delgada (10-1000 nm)

Fuente: F. C. Krebs, 2014 [90].

En este último caso, toda la corriente pasará por el cortocircuito y la célula no funcionará. Debido a que la fuerza de cohesión³¹ es pequeña, y la diferencia en la energía de la superficie es grande en algunas de las capas orgánicas aumentando la posibilidad de delaminación, y por ende abre el circuito eléctrico e impide el transporte de carga.

Aquí, la caracterización eléctrica o curva característica del dispositivo FV mediante la medición de corriente y voltaje (I-V) proporciona información sobre el dispositivo como en general, es decir del todo, pero no puede mostrar dónde se producen los defectos en la célula. Para esto existen dos tecnologías como: corriente inducida por haz de luz y termografía de bloqueo, que puede trazar el mapa de la célula solar como un láser para escanear la célula mientras que la salida eléctrica se mide en cada punto.

3.3.12. Condiciones Ambientales Adversas.

Las condiciones medioambientales son propiedades de cada territorio caracterizados especialmente por la estabilidad meteorológica. Es así que surgen problemas ambientales considerados como leves y severos. Los primeros son considerados leves cuando existe la presencia de lluvia, frío

³¹ Fuerza que une moléculas homogéneas y las mantiene unidas por medio de la atracción (Saez & Palacios, 1868).



moderado, etc. Los severos se caracterizan por la presencia de nevadas, tornados, tormentas, frío y calor extremo, etc.

Ventajosamente nuestro país no se caracteriza por la presencia de problemas ambientales severos, y en tal línea se considera como máximo la aparición de rayos debido a la temporada de invierno. En general, Ecuador es un país con una variedad topográfica, es decir, con un clima muy variado por su altitud, latitud, corrientes marinas, vientos, distribución de aguas y tierras, etc. [97]. También considerado como un clima tropical.

En definitiva, las máximas condiciones ambientales adversas que afronta nuestro país son producto de las dos estaciones climáticas en el año, invierno y verano. Esto porque Ecuador está ubicado sobre la línea ecuatorial terrestre. Lo dicho hasta aquí supone que se tiene como límites climas húmedos y secos.

Ante lo expuesto, en lo que se refiere a las pinturas solares se sabe «teóricamente» que en su composición existe una capa protectora, misma que evita la corrosión de sus elementos en el medio ambiente tolerable.

3.3.13. Distorsión del Revestimiento. [98]

Como se había mencionado en el LCA, la capa de pintura solar tenderá a deformarse o distorsionarse principalmente debido a su baja eficiencia y por ende su corto tiempo de vida. Se debe agregar que, otra causa de esta desventaja es que el mismo recurso que utiliza la pintura para generar electricidad a su vez también lo degrada como es el sol.

Por si fuera poco, también existen agentes externos a condiciones ambientales severas que distorsionan el revestimiento, como es el caso de fisuras debido a impactos con objetos extraños que de alguna u otra manera cambian sus propiedades físicas, químicas y eléctricas perdiendo calidad y eficiencia.



Todas estas observaciones se relacionan también con la temperatura. Y es que dependiendo de la zona en que se ubique la pintura solar hay que tomar en cuenta que la temperatura es un agente crítico que afecta directamente en su eficiencia, siendo estos más eficientes en temperaturas más bajas, tomando en cuenta que a mayor altura menor presión, densidad y temperatura.

Particularmente, en primera instancia las pinturas solares serían más susceptibles a todo tipo de distorsión que se presente, puesto que como paneles serán más extensos debido a que para fines de nuestro interés se analiza cuando estén ubicados en los techos o cubiertas de las viviendas.

Lo anterior no quiere decir que la pintura solar, al igual que los paneles convencionales, estén expuestos a condiciones ambientales leves como es el polvo o presencia de aves, y por la misma razón deben tener mantenimiento constante.

3.4. Mantenimiento durante su tiempo de vida.

El mantenimiento que se le puede dar a la instalación FV con pintura solar básicamente es el mismo comparado al de los paneles convencionales, sean estos, mantenimiento preventivo y correctivo. Estos mantenimientos pueden ser fácilmente realizados por el mismo propietario de la vivienda y sin suspensión del servicio eléctrico, o un personal calificado en el tema que tenga a lo mejor que suspender el servicio de suministro, cosa que actualmente no se conoce cuál será el procedimiento [99] [100].

Las principales funciones del mantenimiento preventivo y correctivo, específicamente del sistema de generación, serán las siguientes:

- ▶ **Mantenimiento Preventivo:** Como se había mencionado anteriormente, se basa en retirar (al menos una vez al mes) suciedad u objetos como polvo o desechos de aves. Para esto, de ninguna manera es permitido



utilizar métodos o herramientas que puedan deformar la pintura, esto con el fin de impedir una mala producción de electricidad.

- ▶ **Mantenimiento Correctivo:** El mantenimiento correctivo para las pinturas solares actualmente casi es nulo. En otras palabras, no existe manera alguna de «corregir» un producto que básicamente es un compuesto químico a escala nanométrica, y peor aún si ya se encuentra sobre el techo, pared o cualquier superficie. Al menos que alguna compañía que fabrica la pintura pueda intervenir sobre él, lo más apropiado es limpiar la superficie y volver a pintar. Esto con la finalidad de reanudar la operación del panel como si fuera el primer revestimiento.

Cabe mencionar que el mantenimiento y/o instalación de los demás componentes del sistema FV sale de nuestro interés, puesto que no se dispone con datos suficientes para realizar un diseño FV ni mucho menos es parte de nuestros objetivos.

Finalmente, entre otra ventaja de la pintura solar como el bajo costo, se tiene que el nivel de mantenimiento será menor comparado con los paneles convencionales, puesto que la pintura no necesitará de sofisticados laboratorios para aquella función. En última instancia, el mantenimiento correctivo de la pintura solar es removerla o desecharla en caso de no conservar las mismas características o propiedades del principio y reemplazarla con una nueva.

3.5. Propuestas de Mejoramiento.

En la línea de lo mencionado anteriormente, la propuesta de mejoramiento se basará únicamente en la realización del mantenimiento correspondiente. Otra sugerencia distinta a la mencionada está fuera de nuestro alcance debido principalmente a que la pintura solar es un producto casi en su totalidad químico.



Varios científicos de hoy trabajan precisamente en el tema del mejoramiento de la pintura solar. Los investigadores en el tema tienen presente que muy aparte de aumentar la eficiencia también está en mejorar su aspecto físico y disponer no solo pinturas oscuras sino de varios colores. Con esto, las viviendas se verían más lúcidas y estéticas.

En la literatura, ya existen registros de la fabricación de la pintura solar FV de color distinto al negro. Este es el caso de una representante del Instituto Tecnológico de la Laguna llamada Sandra Casillas, quien además expuso este proyecto de nueva alternativa de energía renovable en la COP21³² [101], en la mesa de inventores celebrado desde el 30 de noviembre al 11 de diciembre del 2015 en Le Bourget, París [102].

Otra reto que llevan a cabo los científicos es aplicar la teoría de la fotocatálisis a las pinturas solares. Esta reacción catalítica se ha venido usando como purificador. En la línea FV, la pintura solar con fotocatálisis hará que cualquier sustancia como gérmenes, virus, polvo o cualquier suciedad sobre la pintura se descompongan, por intersección de la radiación solar, a moléculas de H₂ y O₂, hidrógeno y agua respectivamente, que a través de la reacción electroquímica producirá electricidad y limpiará de forma automática la superficie de la pintura solar [103].

³² Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) [101].

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA DE CÁLCULO, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis Energético

Antes de realizar el análisis energético, es indispensable tomar en cuenta algunas consideraciones previas.

Entre otros parámetros como los definidos en el capítulo anterior, también es necesario determinar los ángulos de inclinación « p » que tendrían los techos pintados así como su área promedio, y para ello nos basaremos en la Norma Ecuatoriana de Construcción NEC-11 en su Capítulo 14 de Energías Renovables [104]. Otros datos como las condiciones atmosféricas fueron tomados del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). La Tabla 5 indica lo descrito.

Tabla 5. Ángulos de inclinación recomendadas por la NEC de acuerdo a cada techo o cubierta.

Fuente: Elaboración propia a partir de [104].

Regiones	Presencia de lluvia	Pendiente de los Techos o Cubiertas		Inclinación β Recomendado para Paneles
		Inclinación P del Techo	Descripción	
Costa y Región Insular	Bajo	10°	Techo de Cinc y Tejas de Fibrocemento	10°
Oriente	Moderado	15°	Techo de Cinc y Tejas de Fibrocemento	15°
		20°	Diferentes tipos de Tejas de Barro	20°
Sierra	Alto	25°	Diferentes tipos de Tejas de Barro	

Inclinación P del Techo	Descripción
0°	Techo Plano
>30°	A latitudes mayores

- ▶ **Inclinación:** Independientemente de la forma del techo³³, siempre contarán con pendientes normalizadas que de manera ventajosa se encuentran dentro de las recomendaciones de inclinación β para paneles solares.
- ▶ **Área:** Otro de los componentes es el área que tendrá el panel a base de pintura, es decir, la superficie del techo totalmente recubierto con la pintura solar FV. Ante esto, y de acuerdo a la NEC [104], los techos de las viviendas de interés social que se construyen a nivel nacional toman en promedio un área de 50 m², cantidad que aumenta si clasifica a las viviendas por clase social. Para fines de nuestro cálculo se utiliza el área mencionada.

En primer lugar, y cumpliendo con uno de los objetivos del trabajo, se calcula la radiación que incide sobre el módulo, que sería el techo revestido de pintura. La nomenclatura para referirnos a la orientación e inclinación del techo será α y p respectivamente. Para ello se utiliza la siguiente expresión:

$$G_{dm}(\alpha, p) = G_{dm}(0) * K * FI * FS$$

Donde:

$G_{dm}(0)$ = Radiación Global Diaria. Se obtiene del Anexo 3.

K = Se obtiene de la NEC.

$FS=1$

$FI= 1$ (Debido a que el factor K ya toma en cuenta las pérdidas por irradiación).

Factor K: Factor que se utiliza para calcular la radiación sobre el plano inclinado, y se lo seleccionará según la latitud y mes del año de las diferentes localidades con máxima y mínima radiación respectivamente. La tabulación de este factor se especifica en el Anexo 4.

³³ La formas o tipos de techo/cubierta más frecuentes de la arquitectura son: a 1 vertiente, a 2 aguas, a 4 aguas, plana, quebrada, diente de sierra, plagada, etc.

Para calcular la energía anual generada se utilizará la siguiente expresión:

$$E_{gen} = n_{gen} * G_{d,\beta} * \text{Área} * P_G$$

Donde:

E_{gen} : Energía Anual Generada.

n_{gen} : Eficiencia de la Pintura Solar (10%).

$G_{d,\beta}$: Radiación Global Promedio.

Área : Superficie del techo pintado.

P_G : Constante y de valor 1.

Cabe señalar que P_G (Pérdidas globales) toma el valor de 1 debido a que tales pérdidas ya se encuentran consideradas dentro del cálculo de la radiación sobre la pintura solar. En cuanto a la eficiencia se establece un valor constante de 10%. Los datos serán calculados con soporte del programa Excel y los resultados se presentarán en formato de tablas.

Para poder comparar de mejor manera el comportamiento energético de la pintura solar, se establece diferentes escenarios, los mismos que a continuación se describen:

- ▶ **Escenario 1:** Orientación $\alpha=0^\circ$ e Inclinación del Techo $p=0^\circ$
- ▶ **Escenario 2:** Orientación $\alpha=0^\circ$ e Inclinación del Techo $p=10^\circ$
- ▶ **Escenario 3:** Orientación $\alpha=0^\circ$ e Inclinación del Techo $p=15^\circ$
- ▶ **Escenario 4:** Orientación $\alpha=0^\circ$ e Inclinación del Techo $p=20^\circ$
- ▶ **Escenario 5:** Orientación $\alpha=0^\circ$ e Inclinación del Techo $p=25^\circ$
- ▶ **Escenario 6:** Orientación $\alpha=0^\circ$ e Inclinación del Techo $p=30^\circ$

Antes de comenzar a calcular la energía generada, se empieza determinando la radiación sobre el techo inclinado para cada uno de los escenarios y localidades. Todas las tablas de este cálculo se ilustran en el Anexo 5.

Desde la Tabla 6 a la 11 se resumen la radiación sobre el techo inclinado para cada uno de los escenarios.

Tabla 6. Radiación para Escenario 1: $\alpha=0^\circ$ y $p=0^\circ$

Fuente: Elaboración Propia.

Datos				
Localidad	Orientación $\alpha (^\circ)$	Inclinación $p (^\circ)$	FI	FS
Localidades con Máxima Radiación				
Guayaquil	0,00	0,00	1,00	1,00
Quito	0,00	0,00	1,00	1,00
San Simón	0,00	0,00	1,00	1,00
Puerto Baquerizo Moreno	0,00	0,00	1,00	1,00
Localidades con Mínima Radiación				
Santa Rosa	0,00	0,00	1,00	1,00
Mindo	0,00	0,00	1,00	1,00
Sangay	0,00	0,00	1,00	1,00
San Cristóbal	0,00	0,00	1,00	1,00

Regiones	Localidad	Total Anual
		$Gdm(\alpha,p)$ kWh/(m ² .año)
Localidades con Máxima Radiación		
Costa	Guayaquil	1595,40
Sierra	Quito	1821,56
Oriente	San Simón	1629,81
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	1931,37
Localidades con Mínima Radiación		
Costa	Santa Rosa	1161,69
Sierra	Mindo	1343,81
Oriente	Sangay	1375,04
R. Insular	San Cristóbal	1856,80

**Tabla 7.** Radiación para Escenario 2: $\alpha=0^\circ$ y $p=10^\circ$ **Fuente:** Elaboración Propia.

Datos				
Localidad	Orientación $\alpha (^\circ)$	Inclinación $p (^\circ)$	FI	FS
Localidades con Máxima Radiación				
Guayaquil	0,00	10,00	1,00	1,00
Quito	0,00	10,00	1,00	1,00
San Simón	0,00	10,00	1,00	1,00
Puerto Baquerizo Moreno	0,00	10,00	1,00	1,00
Localidades con Mínima Radiación				
Santa Rosa	0,00	10,00	1,00	1,00
Mindo	0,00	10,00	1,00	1,00
Sangay	0,00	10,00	1,00	1,00
San Cristóbal	0,00	10,00	1,00	1,00

Regiones	Localidad	Total Anual
		Gdm(α, p) kWh/(m ² .año)
Localidades con Máxima Radiación		
Costa	Guayaquil	1575,56
Sierra	Quito	1792,65
Oriente	San Simón	1609,80
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	1907,60
Localidades con Mínima Radiación		
Costa	Santa Rosa	1154,07
Sierra	Mindo	1322,23
Oriente	Sangay	1356,83
R. Insular	San Cristóbal	1832,35

**Tabla 8.** Radiación para Escenario 3: $\alpha=0^\circ$ y $p=15^\circ$ **Fuente:** Elaboración Propia.

Datos				
Localidad	Orientación $\alpha (^\circ)$	Inclinación $p (^\circ)$	FI	FS
Localidades con Máxima Radiación				
Guayaquil	0,00	15,00	1,00	1,00
Quito	0,00	15,00	1,00	1,00
San Simón	0,00	15,00	1,00	1,00
Puerto Baquerizo Moreno	0,00	15,00	1,00	1,00
Localidades con Mínima Radiación				
Santa Rosa	0,00	15,00	1,00	1,00
Mindo	0,00	15,00	1,00	1,00
Sangay	0,00	15,00	1,00	1,00
San Cristóbal	0,00	15,00	1,00	1,00

Regiones	Localidad	Total Anual
		$Gdm(\alpha,p)$ kWh/(m ² .año)
Localidades con Máxima Radiación		
Costa	Guayaquil	1551,80
Sierra	Quito	1757,80
Oriente	San Simón	1585,57
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	1873,90
Localidades con Mínima Radiación		
Costa	Santa Rosa	1137,13
Sierra	Mindo	1296,06
Oriente	Sangay	1335,79
R. Insular	San Cristóbal	1647,96

**Tabla 9.** Radiación para Escenario 4: $\alpha=0^\circ$ y $p=20^\circ$ **Fuente:** Elaboración Propia.

Datos				
Localidad	Orientación $\alpha (^\circ)$	Inclinación $p (^\circ)$	FI	FS
Localidades con Máxima Radiación				
Guayaquil	0,00	20,00	1,00	1,00
Quito	0,00	20,00	1,00	1,00
San Simón	0,00	20,00	1,00	1,00
Puerto Baquerizo Moreno	0,00	20,00	1,00	1,00
Localidades con Mínima Radiación				
Santa Rosa	0,00	20,00	1,00	1,00
Mindo	0,00	20,00	1,00	1,00
Sangay	0,00	20,00	1,00	1,00
San Cristóbal	0,00	20,00	1,00	1,00

Regiones	Localidad	Total Anual
		Gdm(α, p) kWh/(m ² .año)
Localidades con Máxima Radiación		
Costa	Guayaquil	1517,39
Sierra	Quito	1713,85
Oriente	San Simón	1550,28
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	1828,86
Localidades con Mínima Radiación		
Costa	Santa Rosa	1113,93
Sierra	Mindo	1263,42
Oriente	Sangay	1305,44
R. Insular	San Cristóbal	1755,16

**Tabla 10.** Radiación para Escenario 5: $\alpha=0^\circ$ y $p=25^\circ$ **Fuente:** Elaboración Propia.

Datos				
Localidad	Orientación $\alpha (^\circ)$	Inclinación $p (^\circ)$	FI	FS
Localidades con Máxima Radiación				
Guayaquil	0,00	25,00	1,00	1,00
Quito	0,00	25,00	1,00	1,00
San Simón	0,00	25,00	1,00	1,00
Puerto Baquerizo Moreno	0,00	25,00	1,00	1,00
Localidades con Mínima Radiación				
Santa Rosa	0,00	25,00	1,00	1,00
Mindo	0,00	25,00	1,00	1,00
Sangay	0,00	25,00	1,00	1,00
San Cristóbal	0,00	25,00	1,00	1,00

Regiones	Localidad	Total Anual
		Gdm(α, p) kWh/(m ² .año)
Localidades con Máxima Radiación		
Costa	Guayaquil	1471,13
Sierra	Quito	1655,75
Oriente	San Simón	1503,08
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	1774,40
Localidades con Mínima Radiación		
Costa	Santa Rosa	1083,27
Sierra	Mindo	1221,07
Oriente	Sangay	1265,13
R. Insular	San Cristóbal	1701,98

Tabla 11. Radiación para Escenario 6: $\alpha=0^\circ$ y $p=30^\circ$
Fuente: Elaboración Propia.

Datos				
Localidad	Orientación α ($^\circ$)	Inclinación p ($^\circ$)	FI	FS
Localidades con Máxima Radiación				
Guayaquil	0,00	30,00	1,00	1,00
Quito	0,00	30,00	1,00	1,00
San Simón	0,00	30,00	1,00	1,00
Puerto Baquerizo Moreno	0,00	30,00	1,00	1,00
Localidades con Mínima Radiación				
Santa Rosa	0,00	30,00	1,00	1,00
Mindo	0,00	30,00	1,00	1,00
Sangay	0,00	30,00	1,00	1,00
San Cristóbal	0,00	30,00	1,00	1,00

Regiones	Localidad	Total Anual
		Gdm(α, p) kWh/(m ² .año)
Localidades con Máxima Radiación		
Costa	Guayaquil	1415,18
Sierra	Quito	1587,33
Oriente	San Simón	1446,04
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	1710,04
Localidades con Mínima Radiación		
Costa	Santa Rosa	1044,71
Sierra	Mindo	1170,72
Oriente	Sangay	1216,39
R. Insular	San Cristóbal	1639,40

Con los valores obtenidos de la radiación sobre el techo, ángulo de inclinación y orientación, se calcula la cantidad de energía generada para cada localidad. Estos cálculos se indican a partir de la Tabla 12 hasta la 17, y en el Gráfico 1 hasta el 6.

Tabla 12. Calculo Energético Anual para Escenario 1: $\alpha=0^\circ$ y $p=0^\circ$

Fuente: Elaboración Propia.

Regiones	Localidad	Área (m ²)	η_{gen} (%)	α ($^{\circ}$)	p ($^{\circ}$)	Gdm(α, p) kWh/(m ² .año)	PG	Egen (kWh/año)
Localidades con Máxima Radiación								
Costa	Guayaquil	50	10,00	0	0	1595,40	1	7977,00
Sierra	Quito	50	10,00	0	0	1821,56	1	9107,80
Oriente	San Simón	50	10,00	0	0	1629,81	1	8149,05
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	50	10,00	0	0	1931,37	1	9656,85
Localidades con Mínima Radiación								
Costa	Santa Rosa	50	10,00	0	0	1161,69	1	5808,45
Sierra	Mindo	50	10,00	0	0	1343,81	1	6719,05
Oriente	Sangay	50	10,00	0	0	1375,04	1	6875,20
R. Insular	San Cristóbal	50	10,00	0	0	1856,80	1	9284,00

Gráfico 1. Comparación Escenario 1

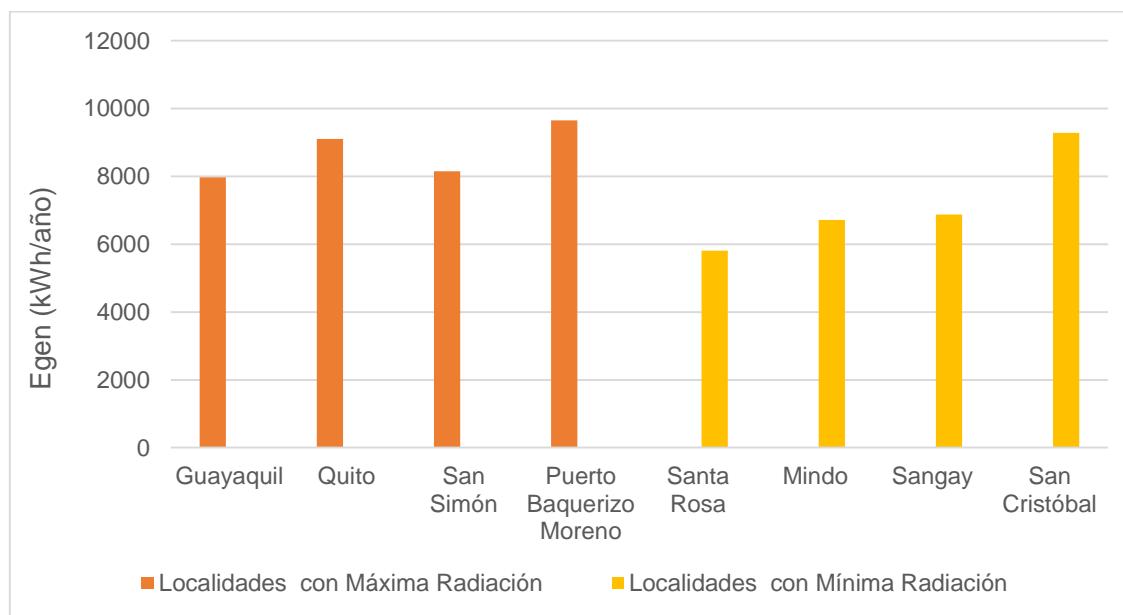


Tabla 13. Cálculo Energético Anual para Escenario 2: $\alpha=0^\circ$ y $p=10^\circ$
Fuente: Elaboración Propia.

Regiones	Localidad	Área (m ²)	η_{gen} (%)	α (°)	p (°)	Gdm(α, p) kWh/(m ² .año)	PG	Egen (kWh/año)
Localidades con Máxima Radiación								
Costa	Guayaquil	50	10,00	0	10	1575,56	1	7877,82
Sierra	Quito	50	10,00	0	10	1792,65	1	8963,25
Oriente	San Simón	50	10,00	0	10	1609,80	1	8049,02
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	50	10,00	0	10	1907,60	1	9538,00
Localidades con Mínima Radiación								
Costa	Santa Rosa	50	10,00	0	10	1154,07	1	5770,33
Sierra	Mindo	50	10,00	0	10	1322,23	1	6611,15
Oriente	Sangay	50	10,00	0	10	1356,83	1	6784,16
R. Insular	San Cristóbal	50	10,00	0	10	1832,35	1	9161,77

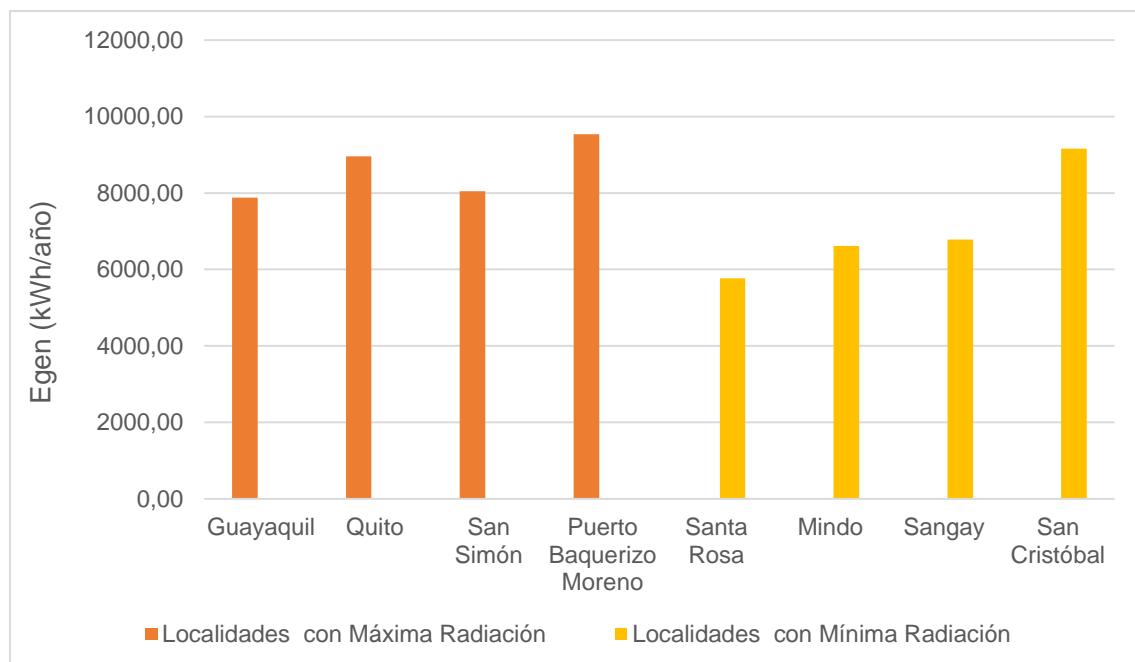
Gráfico 2. Comparación Escenario 2


Tabla 14. Cálculo Energético Anual para Escenario 3: $\alpha=0^\circ$ y $p=15^\circ$
Fuente: Elaboración Propia.

Regiones	Localidad	Área (m ²)	η_{gen} (%)	α ($^{\circ}$)	p ($^{\circ}$)	$Gdm(\alpha,p)$ kWh/(m ² .año)	PG	Egen (kWh/año)
Localidades con Máxima Radiación								
Costa	Guayaquil	50	10,00	0	15	1551,80	1	7759,01
Sierra	Quito	50	10,00	0	15	1757,80	1	8789,01
Oriente	San Simón	50	10,00	0	15	1585,57	1	7927,85
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	50	10,00	0	15	1873,90	1	9369,49
Localidades con Mínima Radiación								
Costa	Santa Rosa	50	10,00	0	15	1137,13	1	5685,66
Sierra	Mindo	50	10,00	0	15	1296,06	1	6480,30
Oriente	Sangay	50	10,00	0	15	1335,79	1	6678,97
R. Insular	San Cristóbal	50	10,00	0	15	1799,19	1	8995,93

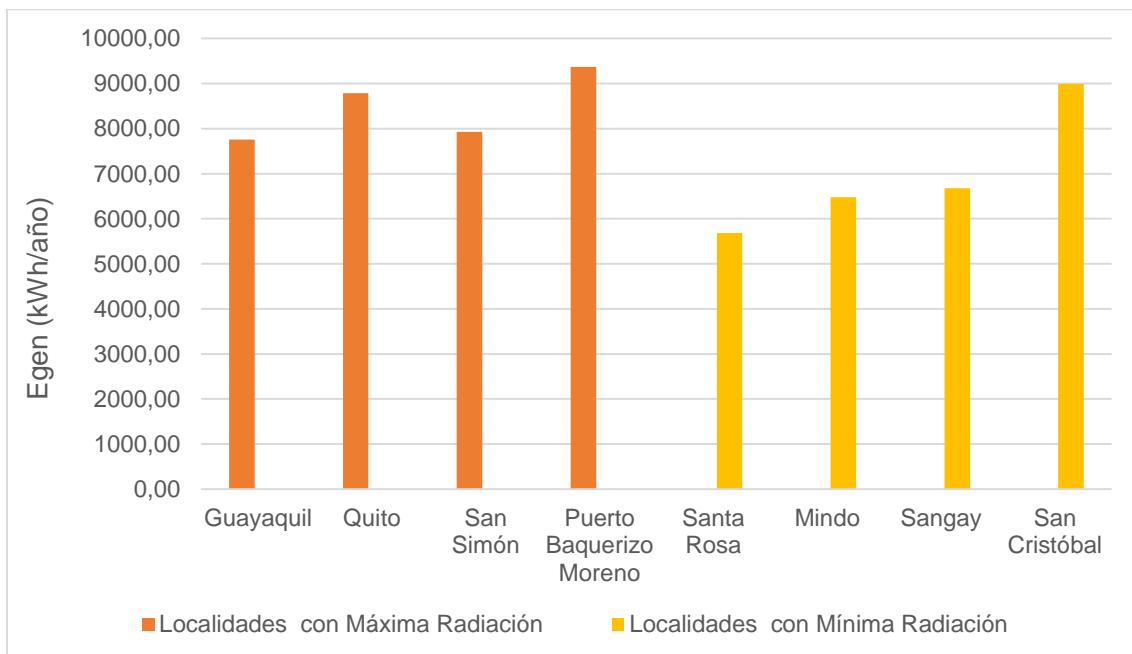
Gráfico 3. Comparación Escenario 3


Tabla 15. Cálculo Energético Anual para Escenario 4: $\alpha=0^\circ$ y $p=20^\circ$
Fuente: Elaboración Propia.

Regiones	Localidad	Área (m ²)	η_{gen} (%)	α ($^{\circ}$)	p ($^{\circ}$)	$Gdm(\alpha,p)$ kWh/(m ² .año)	PG	Egen (kWh/año)
Localidades con Máxima Radiación								
Costa	Guayaquil	50	10,00	0	20	1517,39	1	7586,96
Sierra	Quito	50	10,00	0	20	1713,85	1	8569,26
Oriente	San Simón	50	10,00	0	20	1550,28	1	7751,38
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	50	10,00	0	20	1828,86	1	9144,30
Localidades con Mínima Radiación								
Costa	Santa Rosa	50	10,00	0	20	1113,93	1	5569,67
Sierra	Mindo	50	10,00	0	20	1263,42	1	6317,12
Oriente	Sangay	50	10,00	0	20	1305,44	1	6527,22
R. Insular	San Cristóbal	50	10,00	0	20	1755,16	1	8775,82

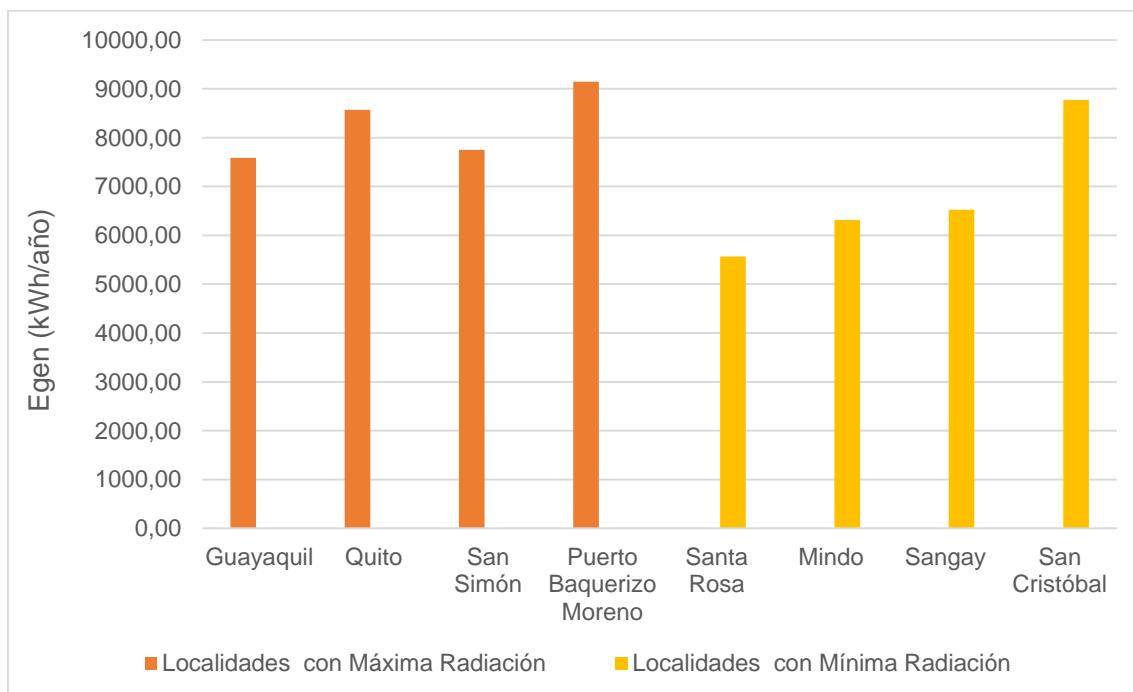
Gráfico 4. Comparación Escenario 4


Tabla 16. Cálculo Energético Anual para Escenario 5: $\alpha=0^\circ$ y $p=25^\circ$
Fuente: Elaboración Propia.

Regiones	Localidad	Área (m ²)	η_{gen} (%)	α ($^{\circ}$)	p ($^{\circ}$)	$Gdm(\alpha,p)$ kWh/(m ² .año)	PG	Egen (kWh/año)
Localidades con Máxima Radiación								
Costa	Guayaquil	50	10,00	0	25	1471,13	1	7355,64
Sierra	Quito	50	10,00	0	25	1655,75	1	8278,76
Oriente	San Simón	50	10,00	0	25	1503,08	1	7515,41
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	50	10,00	0	25	1774,40	1	8871,98
Localidades con Mínima Radiación								
Costa	Santa Rosa	50	10,00	0	25	1083,27	1	5416,33
Sierra	Mindo	50	10,00	0	25	1221,07	1	6105,34
Oriente	Sangay	50	10,00	0	25	1265,13	1	6325,63
R. Insular	San Cristóbal	50	10,00	0	25	1701,98	1	8509,91

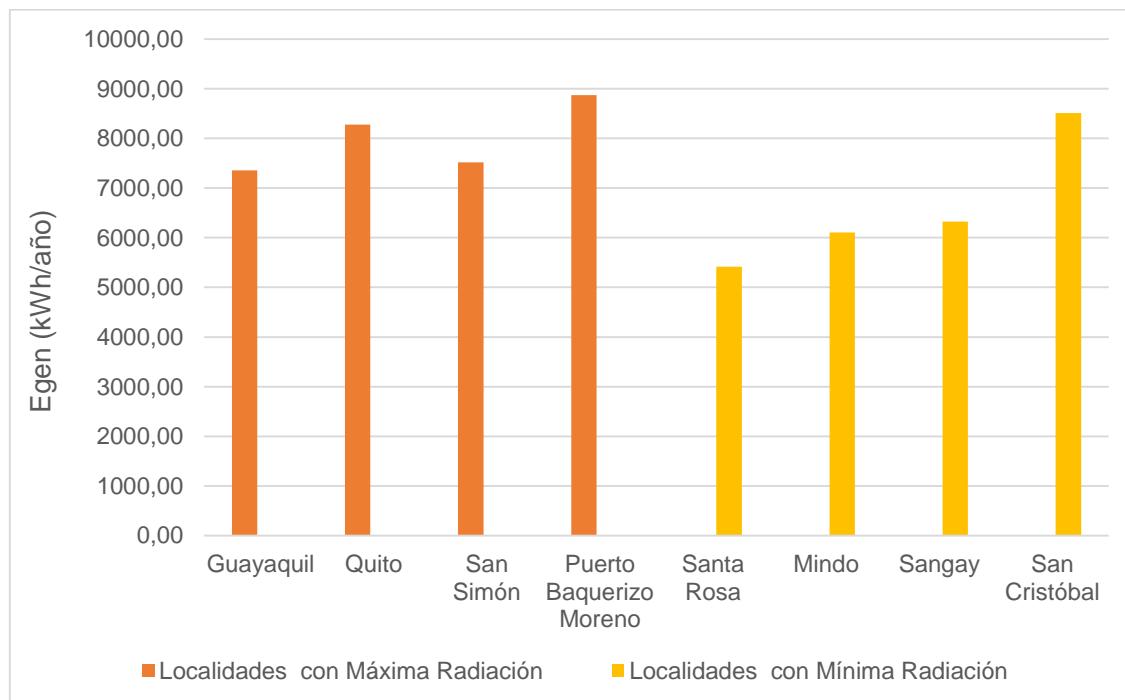
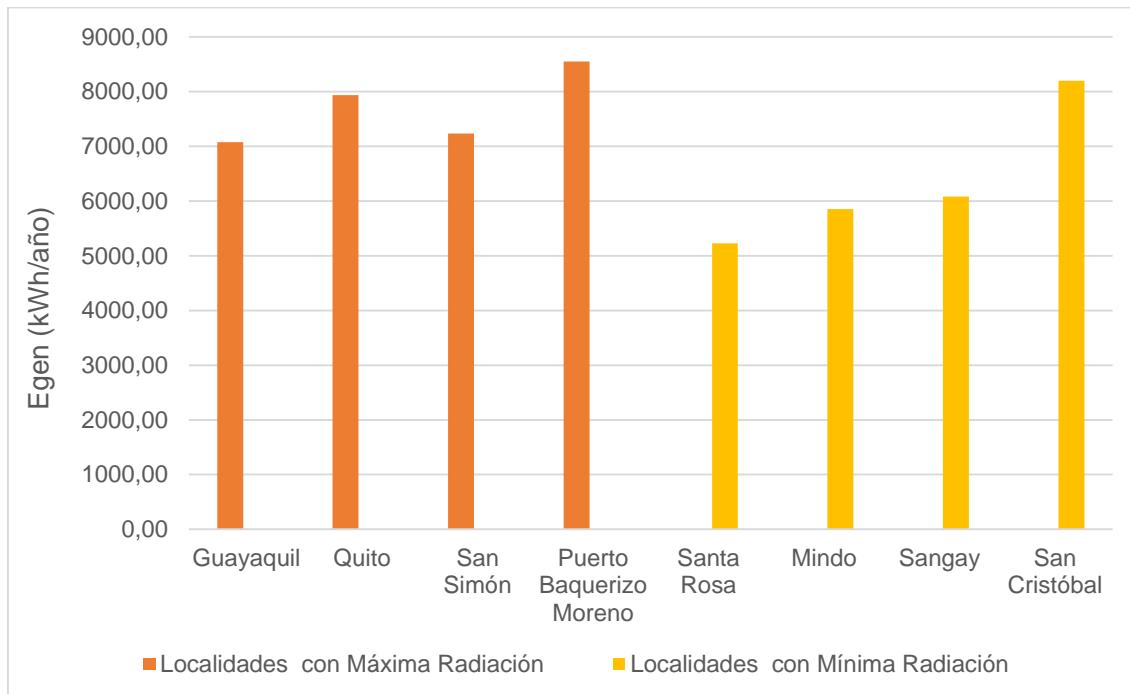
Gráfico 5. Comparación Escenario 5


Tabla 17. Cálculo Energético Anual para Escenario 6: $\alpha=0^\circ$ y $p=30^\circ$
Fuente: Elaboración Propia.

Regiones	Localidad	Área (m ²)	η_{gen} (%)	α ($^{\circ}$)	p ($^{\circ}$)	$Gdm(\alpha,p)$ kWh/(m ² .año)	PG	Egen (kWh/año)
Localidades con Máxima Radiación								
Costa	Guayaquil	50	10,00	0	30	1415,18	1	7075,90
Sierra	Quito	50	10,00	0	30	1587,33	1	7936,66
Oriente	San Simón	50	10,00	0	30	1446,04	1	7230,18
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	50	10,00	0	30	1710,04	1	8550,19
Localidades con Mínima Radiación								
Costa	Santa Rosa	50	10,00	0	30	1044,71	1	5223,55
Sierra	Mindo	50	10,00	0	30	1170,72	1	5853,60
Oriente	Sangay	50	10,00	0	30	1216,39	1	6081,97
R. Insular	San Cristóbal	50	10,00	0	30	1639,40	1	8197,01

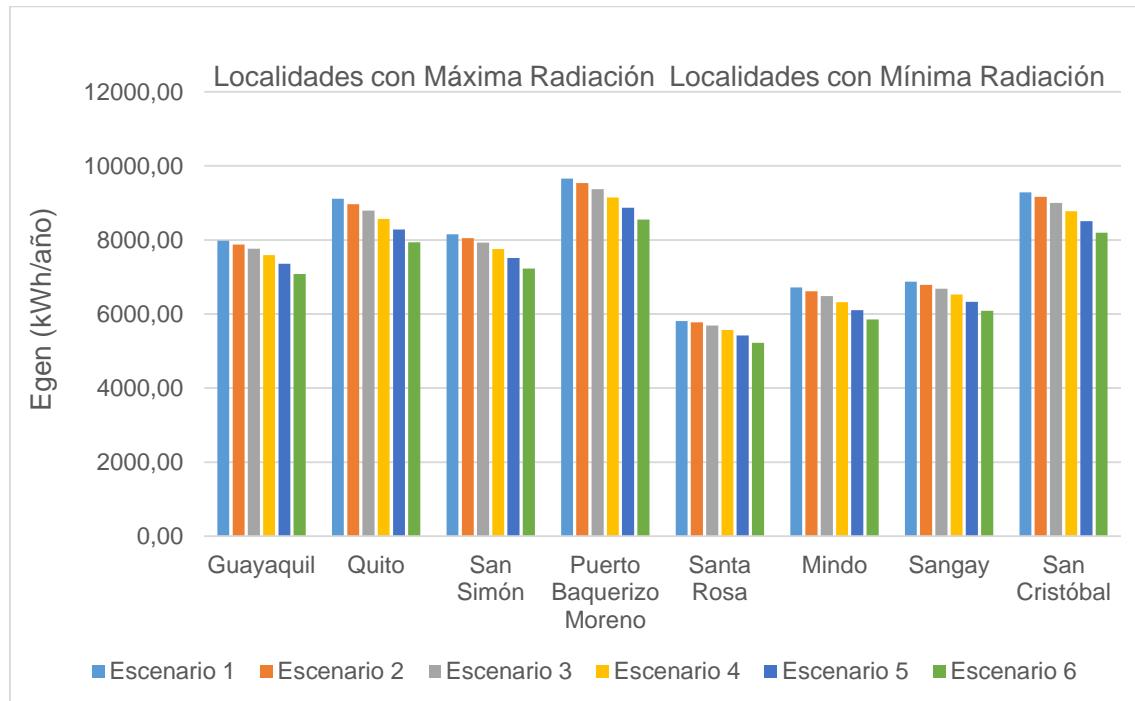
Gráfico 6. Comparación Escenario 6


Para finalizar el cálculo energético, la Tabla 18 y el Gráfico 7 presentan la generación total para cada una de los escenarios, localidades y ángulos de inclinación y orientación del techo.

Tabla 18. Resultados Energéticos Finales
Fuente: Elaboración Propia.

Escenario	Total [kWh/año]							
	Localidades con Máxima Radiación				Localidades con Mínima Radiación			
	Costa	Sierra	Oriente	R. Insular	Costa	Sierra	Oriente	R. Insular
	Guayaquil	Quito	San Simón	Puerto Baquerizo Moreno	Santa Rosa	Mindo	Sangay	San Cristóbal
1	7977,00	9107,80	8149,05	9656,85	5808,45	6719,05	6875,20	9284,00
2	7877,82	8963,25	8049,02	9538,00	5770,33	6611,15	6784,16	9161,77
3	7759,01	8789,01	7927,85	9369,49	5685,66	6480,30	6678,97	8995,93
4	7586,96	8569,26	7751,38	9144,30	5569,67	6317,12	6527,22	8775,82
5	7355,64	8278,76	7515,41	8871,98	5416,33	6105,34	6325,63	8509,91
6	7075,90	7936,66	7230,18	8550,19	5223,55	5853,60	6081,97	8197,01

Gráfico 7. Comparación Energética Final



De acuerdo a todos los cálculos energéticos realizados, se procede a dar un análisis de factibilidad para el caso de una generación de electricidad mínima diaria, así como su máxima.

Antes de ello, se realizará una estimación del consumo o demanda energética básica de una vivienda unifamiliar.

- E_D = La energía media diaria consumida por el sistema [Wh/día]

El consumo de la energía media diaria de un sistema eléctrico básico consta de las siguientes cargas: Iluminación, TV, Frigoríficos y Pérdidas del regulador más Inversor. La Tabla 19 muestra el consumo energético diario de cada carga, según la guía de «Dimensionado de Sistemas Fotovoltaicos Aislados» (M. Chinchilla Sánchez, 2014) [105].

Tabla 19. Consumo energético de las cargas de un sistema eléctrico básico.

Fuente: M. Chinchilla Sánchez, 2014 [105].

CARGAS	Numero	Potencia [W]	Nº hora al día	Wh/día
Fluorescentes	3	20	4	240
	3	15	2	90
TV	1	25	4	100
Frigorífico	1	60	24	1440
Perdidas Regulador + Inversor	-	-	-	240

Donde:

$$E_D = (240 + 90 + 100 + 1440 + 240) \left[\frac{\text{Wh}}{\text{día}} \right]$$

$$E_D = 2110 \frac{\text{Wh}}{\text{día}}$$

$$E_D = 2,11 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{día}} \right]$$

► Análisis de Generación mínima diaria

En este apartado, se analiza el caso menos favorable para deducir si cumple o no con el abastecimiento de energía diaria. Con lo que se puede afirmar que para los demás casos automáticamente también cumplirá.

De acuerdo al análisis obtenido de la radiación sobre el techo para los diferentes escenarios (Tabla 33), se observa que la ciudad de Santa Rosa (Provincia de El Oro) en el escenario 6 y en el mes de noviembre, tiene una radiación mínima diaria sobre la pintura solar de 1,95 [kWh/(m²-día)]. Si a ese resultado se le multiplica por el área de 50m² establecido anteriormente, por las pérdidas de generación (PG=1) y la eficiencia del 10%, se obtiene una generación mínima de energía de 9,75 [kWh/día].

De acuerdo a este resultado, y comparándolo con el consumo medio de energía diaria, se tiene que dicha generación abastece de manera óptima con el peor caso de radiación.

► Análisis de Generación máxima diaria

Analizando el caso más favorable con la radiación incidente en los diferentes escenarios, se evidencia que Puerto Baquerizo Moreno (Región Insular) en el escenario 1 y en el mes de marzo, tiene una radiación máxima diaria sobre la pintura de 6,44 [kWh/(m²-día)]. Si a este resultado se le multiplica como en el caso anterior por el área de 50m² establecido anteriormente, por las pérdidas de generación (PG=1) y la eficiencia del 10%, se obtiene una generación máxima de energía de 32,2 [kWh/día].

De acuerdo a este resultado, y comparándolo con el consumo medio de energía diaria, se tiene que dicha generación abastece inclusive una demanda diaria superior a la estimada en el consumo de energía unifamiliar.

4.2. Análisis Económico.

Este análisis se realiza en base a tres etapas: Hipótesis, Desarrollo y Conclusión, con la única finalidad de obtener un valor de costo de la pintura solar de acuerdo a datos seleccionados de la literatura. Asimismo, y para comparar con otros datos de referencia, se toma características técnicas de dos paneles FV convencionales; uno de alta calidad y otro de marca china, para realizar todo el estudio luego de los 20 años promedio de vida útil de los paneles.

Hipótesis

- 1)** La pintura solar y los paneles solares FV están bajo la condición ambiental estándar STC:
 - ▶ Irradiancia solar de 1000 [W/m²]
 - ▶ Masa de aire 1,5.
 - ▶ Temperatura 25°C (no temperatura ambiente).
- 2)** La demanda diaria que se desea satisfacer para este estudio económico, se considerará igual a la potencia que produzca la pintura solar sobre un techo o cubierta inclinada de 50m² de área.
- 3)** Tanto el sistema con Pintura Solar y Panel FV se proyecta para trabajar 20 años.
- 4)** Se considera que la Pintura Solar tiene una vida útil de 10 años según el fabricante SolarPaint Ltd [84].
- 5)** Se toma una vida útil de 20 años para el panel solar.
- 6)** Según [84], el precio de la pintura solar FV en conjunto con la red de electrodos es de \$0,13/Wp.
- 7)** Para fines de nuestro análisis se selecciona dos paneles:



- a) De alta calidad (alto precio): Panel FV Policristalino 250Wp/24V de la marca Slmax, con un precio de \$300,00 que oferta la empresa Proviento S.A. en Quito. Se elige dicho panel por su alta calidad que satisface plenamente la demanda eléctrica de 20 años que se establece [106].
 - b) De baja calidad (bajo precio): Panel FV Silicio Monocristalino 250 Wp/36V de la marca Xhsolar, fabricado en Zhejiang China (Mainland), con un precio de \$110,00. (Fuente: Mercado Online Alibaba Group)
- 8) Se considera despreciable el factor de pérdidas de generación (Pg).

Desarrollo

► COSTO DE LA PINTURA SOLAR

El sistema FV con Pintura Solar generará una potencia de:

$$\text{Potencia Generada} = \text{Irradiancia Solar} \times \text{Eficiencia} \times \text{Área}$$

$$\text{Potencia Generada} = \left(1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right) (0,10) (50 \text{ m}^2)$$

$$\boxed{\text{Potencia Generada} = 5000 [\text{W}] = 5000[\text{Wp}]}$$

El costo inicial sería:

$$\text{Costo Inicial} = \left(\frac{0,13\$}{\text{Wp}}\right) (5000 \text{ Wp})$$

$$\boxed{\text{Costo Inicial} = \$ 650,00}$$



Como la pintura solar tiene una vida útil de 10 años, para que el sistema funcione durante 20 años es necesario invertir 2 veces el precio de la pintura, por lo que el costo de inversión final sería:

$$\text{Costo Final} = (2 \text{ veces})(\$ 650,00)$$

$$\boxed{\text{Costo Final} = \$ 1.300,00}$$

► COSTO PANELES FOTOVOLTAICOS

Condición: Debe satisfacer la misma generación de la pintura solar

Alta calidad (alto precio)

Se necesita que el sistema con paneles solares genere 5000 [W]. El costo de inversión inicial es:

$$\text{Costo inicial} = \left(\frac{300\$}{250\text{Wp}} \right) (5000\text{Wp})$$

$$\boxed{\text{Costo inicial} = \$6.000,00}$$

Dado que el panel tiene una vida útil de 20 años y coincide con el tiempo de trabajo del sistema, no será necesario reemplazarlo. Entonces, el costo de inversión final será igual a la inicial:

$$\boxed{\text{Costo final} = \text{Costo inicial} = \$6.000,00}$$

Baja calidad (alto precio)

Se necesita que el sistema con paneles solares genere 5000 [W]. El costo de inversión inicial es:



$$\text{Costo inicial} = \left(\frac{110,00\$}{250\text{Wp}} \right) (5000\text{Wp})$$

$$\text{Costo inicial} = \$2.200,00$$

Dado que el panel tiene una vida útil de 20 años y coincide con el tiempo de trabajo del sistema, no será necesario reemplazarlo. Entonces, el costo de inversión final será igual a la inicial:

$$\text{Costo final} = \text{Costo inicial} = \$2.200,00$$

Conclusión

Para un sistema de 20 años en funcionamiento, con pintura solar se invertiría \$1.300,00 dólares en pintura incluido la red de electrodos, mientras con los paneles de alta y baja calidad respectivamente:

- ▶ La diferencia económica de la pintura respecto a este tipo de panel es de \$4.700,00 dólares. En modo de porcentaje y economía, esto representa un ahorro del 78,33%.
- ▶ La diferencia económica de la pintura respecto a este tipo de panel es de \$900,00 dólares. En modo de porcentaje y economía, esto representa un ahorro del 40,91%.

4.3. Análisis Ambiental.

De acuerdo al impacto ambiental que produce la aplicación de las pinturas solares con fines de generación eléctrica existe muy poca información. De forma general, los estudios realizados al respecto publican un mínimo impacto comparado con los paneles convencionales, y más aún con otras fuentes de

energías debido a que al final de su vida útil será básicamente un desecho orgánico asequible y no una basura electrónica como los paneles.

No obstante, para el análisis ambiental se considera los impactos que se producen de acuerdo al análisis del ciclo de vida LCA en sus fases de Producción y Uso de la pintura solar.

- ▶ **Producción:** La fabricación de la pintura solar requiere de la utilización de sustancias y elementos químicos como disolventes (alcohol) y metales pesados (Cadmio, Sodio, Zinc), que al momento del procesamiento desprenden gases peligrosos. Sin embargo, hasta la culminación de este proyecto de investigación no se encontró ninguna información al respecto, mucho menos registrados por científicos e investigadores que llevan a cabo la comercialización de la pintura solar.
- ▶ **Uso:** Información de fuentes no oficiales suponen que la pintura solar al verse expuesta al sol durante largas horas expulsan gases contaminantes, promotores del efecto invernadero y ozono troposférico³⁴. Aunque investigadores han estudiado y publicado que la pintura tendrá una capa en forma de vidrio que la encapsularía, no obstante, estudios realizados indican que la generación de electricidad a través de esta tecnología reducen hasta 200 veces las emisiones de CO₂ respecto de una central térmica, entre otras [107].

Hay que mencionar que todo este análisis ambiental no es más que una estimación de los impactos, considerando que la pintura no está es una tecnología madura.

Entre otros impactos se puede clasificar los siguientes como positivos (+) y negativos (-).

³⁴ Gases nocivos que no afectan la capa de ozono pero que se forman y permanecen por varios años a nivel del suelo afectando a la salud de los seres vivos (twenergy, 2017).



- ▶ (+) Cero contaminaciones visuales.
- ▶ (+) Aplicación en techos y no ocupación de terreno.
- ▶ (+) Puesto que serán capaces de generar aún con poca radiación, no será necesario la deforestación.
- ▶ (+) Mejor apariencia física de los techos.
- ▶ (+) Tecnología químicamente blanda y biodegradable³⁵.
- ▶ (-) En caso de finalizada su vida útil, incinerarla involucraría emitir CO₂.
- ▶ (-) Todavía sensible ante efectos ambientales significativos.

Por el contrario, un impacto positivo que conlleva a uno negativo es suponer que luego de desecharlo como basura orgánica se puede generar electricidad a través de otras tecnologías de conversión energética, pero en cambio se estaría contaminando con las emisiones de la incineración aumentando la huella de carbono.

En definitiva, existen más impactos ambientales positivos que negativos por lo que de esta tecnología interesa a varios investigadores y científicos que consideran que el futuro energético mundial se basará en fuentes fotovoltaicas.

4.4. Determinación de la zona óptima.

Para determinar la zona óptima para la aplicación de la pintura solar se debe considerar las siguientes condiciones climatológicas, según resultados de análisis de ciclo de vida de la FV Orgánica realizadas en Dinamarca y Australia [94]. Las condiciones geográficas y climatológicas más significativas que no favorecen a la rápida degradación de la pintura solar son las siguientes:

³⁵ Elementos que tienen la capacidad de descomponerse, por agentes biológicos, en sustancias químicas naturales. Todo este proceso lo hace en un tiempo relativamente corto (ERENOVABLE, 2017).

1. Menor radiación.
2. Menor presencia de lluvia.
3. Menor temperatura.
4. Menor velocidad de viento.

Ecuador no cuenta con alguna zona específica que cumpla con todas las demás condiciones climatológicas simultáneamente, por lo tanto se considera indispensable que se cumpla las condiciones de menor radiación y menor frecuencia de lluvia, puesto que las mismas inciden en mayor grado a la degradación de la pintura solar según el análisis de estabilidad y degradación del capítulo 3.

Adicionalmente, es indispensable que la zona óptima cumpla con la condición de capacidad mínima de generación eléctrica, que satisfaga plenamente la demanda eléctrica diaria de una vivienda unifamiliar, es decir 2,11 [kWh/Día]. De acuerdo al análisis de mínima generación realizado en el análisis energético se tiene que cualquier zona del Ecuador satisface plenamente la demanda diaria de una vivienda unifamiliar con las pinturas solares, hasta inclusive la localidad con menor radiación solar mensual.

De forma general y tomando en consideración lo expuesto anteriormente, la zona óptima para la aplicación de la pintura solar es la Región Costa del Ecuador, ya que posee las menores radiaciones solares según datos de radiación global diaria especificados en el anexo 3 y bajas frecuencias de lluvia según la Tabla 5.

Particularmente el cantón Santa Rosa de la provincia de El Oro que pertenece a la región costa, cuenta con la menor radiación solar a nivel nacional y una temperatura mínima de 16 ° C que no acelera el proceso de degradación de la misma según el estudio realizado en Australia y Dinamarca [94].

Los siguientes datos geográficos y climatológicos muestran los detalles antes mencionados.



► **Datos Geográficos y Climatológicos de Dinamarca.**

- **Ubicación Geográfica:** Latitud: 56,26 °S
Longitud: 9,50 °O
Altitud: 50 m s.n.m
- **Temperatura:** Máxima: 11,6 °C
Mínima: 5,11 °C
- **Velocidad del Viento:** Promedio: 6,36 [m/s]
- **Radiación Promedio Diaria:** 2,88 [kWh/(m²-día)]

► **Datos Geográficos y Climatológicos de Australia.**

- **Ubicación Geográfica:** Latitud: -25,27 °S
Longitud: 133,78 °O
Altitud: 399 m s.n.m
- **Temperatura:** Máxima: 26,8 °C
Mínima: 15,4 °C
- **Velocidad del Viento:** Promedio: 5,51 [m/s]
- **Radiación Promedio Diaria:** 5,89 [kWh/(m²-día)]

► **Datos Geográficos y Climatológicos de Santa Rosa.**

- **Ubicación Geográfica:** Latitud: -3,46 °S
Longitud: -79,97 °O
Altitud: 11 m s.n.m



- **Temperatura:** Máxima: 26,4 °C
Mínima: 18,6 °C
- **Velocidad del Viento:** Promedio: 2,77 [m/s]
- **Radiación Promedio Diaria:** 3,18 [kWh/(m²-día)]

En la zona óptima con menor impacto de degradación, la pintura solar no tendrá mayores daños durante los 10 años de vida útil establecido por el fabricante SolarPaint Ltd., satisfaciendo plenamente la demanda eléctrica unifamiliar. Por lo tanto Santa Rosa es la localidad donde el sistema FV mediante pintura solar se conserva mejor física y químicamente, reduciendo costos de posible mantenimiento o renovación de la misma durante su tiempo de vida útil.

4.5. Innovación de la tecnología.

Equipo de científicos e investigadores encargados de desarrollar la pintura solar ofrecen la posibilidad de presentar una nueva fuente de energía eléctrica sostenible y a bajo costo que pueda ponerse en práctica a escala global. En particular:

- ▶ Se piensa poner mayor atención a la FV orgánica, especialmente a la pintura.
- ▶ Se prevé que los costos asociados a la instalación y mantenimiento sean bajos comparados con otras tecnologías FV's, lo que permita una introducción rápida en el mercado.
- ▶ La flexibilidad de la pintura solar debería permitir la posibilidad de convertir a las paredes de una vivienda en paneles.



- ▶ La comercialización a gran escala y a bajo costo de la pintura solar ofrecen la posibilidad potencialmente única para dominar el sistema eléctrico híbrido o micro redes a mediano y largo plazo.

4.6. Futuros desafíos de investigación.

Luego de realizado este trabajo de investigación de acuerdo a las características energéticas de nuestro país, se puede sugerir lo siguiente:

- ▶ Realizar un estudio y medición más específico de la irradiación solar en nuestro país, puesto que se tomó como referencia bases virtuales y se observan diferencias en los valores.
- ▶ Promover la investigación de nuevas tecnologías FV a través de las instituciones educativas y facilitar la fabricación o importación en caso de resultar factible el estudio.
- ▶ Mejorar el contexto jurídico del Ecuador para que las energías renovables sean más competitivas que las convencionales.
- ▶ Realizar una metodología de cálculo involucrando superficies con mayores áreas e inclinación, y de ser óptimo reestructurar las normas de construcción de las viviendas con tales recomendaciones.
- ▶ A nivel nanotecnológico, se piensa que la pintura solar tendrá aplicaciones en todos los campos, pudiendo generar electricidad sobre vehículos, ventanas, vestimenta, etc.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.

- ▶ En el escenario 1 se obtiene la mayor generación de energía con un ángulo de inclinación cero, perteneciente a Puerto Baquerizo Moreno. Esto tiene lógica debido a que posee la mayor radiación solar en el Ecuador. No obstante, esto no lo convierte en la zona óptima de aplicación de la pintura solar debido a que su alta radiación y temperatura reduciría su tiempo de vida útil de 10 años. Esto hará que se reemplace más de dos veces aumentando el costo del sistema FV.
- ▶ En el escenario 6 se obtiene la menor generación con un ángulo de inclinación de 30°, perteneciente a Santa Rosa. Esto tiene lógica debido a que posee la menor radiación solar en el Ecuador, pero esto no quiere decir que sea el caso menos favorable, al contrario; obtiene el mayor tiempo de vida útil de la pintura. Esto la convierte en la zona óptima para la aplicación de la nueva tecnología.
- ▶ En ambos casos, para los escenarios de mayor y menor generación se cumple que la pintura solar abastece una demanda energética básica de una vivienda unifamiliar, con la diferencia que el tiempo de vida útil en el uno es menor que la zona óptima.
- ▶ Nuestro país al estar ubicado en el hemisferio central terrestre, entre latitudes 1 y -4, el techo inclinado puede tener cualquier ángulo de orientación α . Con ello, las radiaciones sobre la misma no será muy variable de un ángulo a otro. Ante esto se presenta la ventaja que los techos inclinados pueden tener cualquier ángulo de orientación de manera arbitraria, sin necesidad de hacer un análisis de escenarios para encontrar un ángulo óptimo.

- ▶ Respecto al análisis económico, la generación a través de la aplicación de la pintura solar supone un ahorro del 78,33% respecto a los paneles de alto precio y del 40,91% respecto a los paneles de bajo precio. Es decir, para un sistema de 20 años que dura en promedio un panel de alta calidad, con la pintura solar se tendría un ahorro de cuatro mil setecientos dólares.
- ▶ Para paneles de baja calidad no se puede asegurar que su eficiencia de generación y vida útil dure para el lapso de 20 años, para ello tal vez sea necesario realizar el reemplazo de algunos paneles solares convencionales en ese lapso de tiempo, incrementando el costo total del sistema FV.
- ▶ El impacto ambiental que provocaría la pintura solar es insignificante comparado con otras fuentes de energía, incluso respecto a los paneles. Más bien, existen impactos positivos que contribuyen a planear una posible aplicación en nuestro país.
- ▶ El consumo o gasto energético que se produce al fabricar la pintura solar por parte de SolarPaint Ltd. es despreciable comparado con la generación de energía que se obtiene con esta nueva tecnología.
- ▶ La pintura solar tiene la capacidad de producir energía inclusive en zonas con poca radiación. Por esta razón, la zona óptima para la aplicación y generación de electricidad es la Región Costa, especialmente por la baja radiación y poca presencia de lluvia, factores que ayudan a cumplir o prolongar su vida útil.
- ▶ Empíricamente la pintura solar es una tecnología de generación eléctrica prometedora, pero hasta la actualidad solo ha sido fabricado a nivel de pruebas de laboratorio. Por esto, es probable que llegue a un cierto límite en el cual no se pueda mejorar su eficiencia y su desarrollo se limite, tal como ha sucedido con los paneles convencionales que no han podido mejorar su eficiencia actual, pero aún continúan investigaciones al respecto.
- ▶ La FV Orgánica actualmente es el centro de importancia de varias investigaciones debido a la utilización de sustancias o compuestos químicos

con altas propiedades semiconductoras. Por ello, la pintura solar libera electrones con mayor facilidad produciendo electricidad inclusive sometido a baja radiación.

- ▶ La limitación de la eficiencia de la pintura solar básicamente se debe a que sus compuestos químicos pierden sus propiedades semiconductoras a corto plazo cuando se ven expuestos a altas radiaciones y condiciones climatológicas severas como la mayor presencia de oxígeno y lluvia.

5.2. Recomendaciones.

- ▶ Se recomienda que al organismo de estado que le corresponda, realice nuevas mediciones de radiación solar para tener mayor confiabilidad en los proyectos que se tomen como base aquellos datos.
- ▶ De acuerdo a los resultados obtenidos, se podría aplicar la pintura solar en Puerto Baquerizo Moreno, única y exclusivamente a viviendas con tipo de techo de forma plana, sin inclinación.
- ▶ De acuerdo a los resultados obtenidos, se podría aplicar la pintura solar en Santa Rosa a viviendas donde el techo tenga una inclinación mayor o igual a 30° para obtener el mayor beneficio energético, económico y ambiental.
- ▶ Se recomienda que la NEC empiece a normar las nuevas construcciones cuyos techos o cubiertas tengan los ángulos de inclinación para los cuales se obtiene el mayor beneficio de la pintura solar, según este análisis.
- ▶ En este trabajo no se considera el costo de los demás elementos del sistema fotovoltaico, puesto que sale de nuestro interés el dimensionado total.
- ▶ Con todo el análisis obtenido en este trabajo, la factibilidad de implementar la pintura solar en nuestro país es alto, por lo que se recomienda continuar en



esta línea de investigación para lograr adquirir la pintura y empezar a realizar un análisis o proyecto técnico del mismo.

- ▶ Este análisis energético sirve como base para empezar un análisis técnico de la implementación de la pintura en la zona óptima, siempre y cuando se logre adquirir la nueva tecnología.
- ▶ Se recomienda que las instituciones o universidades que fomentan las energías renovables hagan posible la compra de esta nueva tecnología y se estudie su comportamiento en todo el Ecuador.
- ▶ La pintura solar es una tecnología que a nivel internacional sigue en fase de desarrollo y bajo registro de propiedad intelectual, es por ello que todo este proyecto de tesis está basado en la literatura correspondiente a artículos científicos, que a su vez fueron demostrados a nivel de laboratorio.
- ▶ El precio y vida útil de la pintura es proporcionada por una compañía Israelí SolarPaint Ltd, por lo que se recomienda analizar sus datos geográficos y climatológicos para compararlos con los datos de nuestro país y lograr tener un análisis más profundo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. Dunford, «National Aeronautics and Space Administration NASA,» NASA Planetary Science Division, 24 Agosto 2017. [En línea]. Available: <https://solarsystem.nasa.gov/planets/sun/indepth>. [Último acceso: 30 Agosto 2017].
- [2] P. Wegertseder y et al, POTENCIAL SOLAR EN LA ARQUITECTURA Y LA CIUDAD, Chile: UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO, 2016.
- [3] J. Carta, R. Calero, A. Colmenar y M. Castro, Centrales de energías renovables. Generación eléctrica con energía renovables, Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2009.
- [4] C. Ngô y J. Natowitz, Our Energy Future: Resources, Alternatives, and the Environment, New Jersey: WILEY, 2016.
- [5] J. Blanco y S. Malato, Solar detoxification, Bangalore: UNESCO PUBLISHING, 2003.
- [6] A. Castejón y G. Santamaría, Instalaciones solares fotovoltaicas, Madrid: S.A. EDITEX, 2010.
- [7] T. Díaz y G. Carmona, Instalaciones solares fotovoltaicas, Málaga: McGraw-Hill / Interamericana , 2010.
- [8] G. Masters, Renewable and Efficient Electric Power Systems, New Jersey: WILEY-INTERSCIENCE, 2004.
- [9] A. Walker, Solar Energy: Technologies and Project Delivery for Buildings, New Jersey: WILEY, 2013.
- [10] J. C. Schallenberg Rodríguez y e. al, Energías renovables y eficiencia energética, Gran Canaria: ISBN, 2008.
- [11] S. Kalogirou, Solar Energy Engineering: Processes and Systems, Burlington: Elsevier Inc, 2009.
- [12] W. B. Group, «Global horizontal irradiation,» Global Solar Atlas, 2016. [En línea]. Available: <http://globalsolaratlas.info/?c=85.051129,-103.710938,2&s=86.423629,-103.559875&m=sg:ghi>. [Último acceso: 31 Agosto 2017].

- [13] C. Algara y I. Rey-Stolle, HANDBOOK OF CONCENTRATOR PHOTOVOLTAIC TECHNOLOGY, Reino Unido: Wiley, 2016.
- [14] A. Goetzberger y V. U. Hoffmann, Photovoltaic Solar Energy Generation, Friburg: Springer Series, 2005.
- [15] R. Messenger y A. Abtahi, Photovoltaic Systems Engineering, Boca Ratón, New York: Taylor & Francis Group, 2017.
- [16] P. Mohanty, T. Muneer y M. Kolhe, Solar Photovoltaic System Applications. A Guidebook for Off-Grid Electrification, Switzerland: Springer, 2016.
- [17] M. Punzano Pozo, A. Maroto Soriano, C. Most López y E. Valverde Alonso, «energía-global,» 01 03 2011. [En línea]. Available: <https://energia-global.wikispaces.com/file/view/nanotecnolog%C3%ADA.pdf>. [Último acceso: 27 09 2017].
- [18] E. Esteire, A. Madrid y A. Madrid, ENERGÍAS RENOVABLES. MANUAL TÉCNICO, Madrid: AMV EDICIONES, 2010.
- [19] J. C. Vega de Kuyper y S. Ramírez Morales, FUENTES DE ENERGÍA, RENOVABLES Y NO RENOVABLES. APLICACIONES, México: Alfaomega, 2014.
- [20] A. Luque y S. Hegedus, HANDBOOK OF PHOTOVOLTAIC SCIENCE AND ENGINEERING, Reino Unido: Wiley, 2003.
- [21] P. G. Vasconcelos Sampaio y M. O. Aguirre González, «Photovoltaic solar energy: Conceptual framework,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nº 74, pp. 590-601, 2017.
- [22] M. A. Green, «Third Generation Photovoltaics: Ultra-high Conversion Efficiency at Low Cost,» *PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS*, nº 9, pp. 123-135, 2001.
- [23] G. Conibeer y A. Willoughby, Solar Cell Materials: Developing Technologies, Estados Unidos: Wiley, 2014.
- [24] N. TV, «NOVA ScienceNOW: Solar Paint Your Roof,» PBS & WGBH Educational Foundation, 2008. [En línea]. Available: <https://www.pbslearningmedia.org/resource/oer08.sci.phys.energy.solarpaint/solar-paint-your-roof/#.WczebFvWzIW>. [Último acceso: 28 09 2017].
- [25] P. C. Lacaze, Nanotechnologies. Concepts, Processing and Applications, Gran Bretaña: ISTE Ltd & Wiley, 2013.

- [26] C. Briones, E. Casero, J. Martín y P. Serena, NANOCIENCIA Y NANOTECNOLOGÍA. Entre la ciencia ficción del presente y la tecnología del futuro, Madrid: FECYT, 2009.
- [27] M. Karkare, Nanotechnology. Fundamentals and Applications, Nueva Delhi: I.K. International Publishing House Pvt. Ltd., 2008.
- [28] L. Hernández, J. C. Rimada y C. I. Cabrera, «Nanotecnología para la energía fotovoltaica,» *Revista Mexicana de Física*, vol. 58, nº 2, pp. 66-74, 2013.
- [29] G. M. Olivar Caballón, «calameo,» 2014. [En línea]. Available: <http://es.calameo.com/read/003317209c464705e1da1>. [Último acceso: 04 10 2017].
- [30] P. Kamat, «MEMENTO,» 10 10 2010. [En línea]. Available: <https://memento.epfl.ch/public/upload/files/Kamat.pdf>. [Último acceso: 04 10 2017].
- [31] M. Berger, Nanotechnology. The Future is Tiny, Berlin: ISBN, 2016.
- [32] S. Jamarkattel, «Solar Paint Technology: Introducing in Nepal as an Alternative Energy Solution,» p. 8, 2014.
- [33] C. Hoth, A. Seemann, R. Steim, T. Ameri, H. Azimi y C. Brabec, Solar Cell Materials: Developing Technologies., Wiley, 2014.
- [34] H. Youn, H. Park y L. Guo, «Organic Photovoltaic Cells: From Performance Improvement to Manufacturing Processes,» *Materials Views*, p. 19, 2015.
- [35] M. Thambidurai, N. Muthukumarasamy, D. Velauthapillai y C. Lee, «Synthesis and characterization of flower like ZnO nanorods for dye-sensitized solar cells,» *Springer*, nº 24, pp. 2367-2371, 2013.
- [36] C. Xiaobo, «Titanium Dioxide Nanomaterials and Their Energy Applications,» *Elsevier*, vol. 30, nº 8, pp. 839-851, 2009.
- [37] B. S. Richards, «Comparison of TiO₂ and other Dielectric Coatings for Buried-contact Solar Cells: a Review,» *Jhon Wiley & Sons, Ltd*, nº 12, pp. 253-281, 2004.
- [38] Y. Lan, Y. Lu y Z. Ren, «Mini review on photocatalysis of titanium dioxide nanoparticles and their solar applications.,» *Elsevier*, pp. 1-15, 2013.

- [39] Wikipedia, «Rutilo,» Wikipedia, 18 07 2017. [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Rutilo>. [Último acceso: 11 10 2017].
- [40] N. Demirci Sankir y M. Sankir, *Printable Solar Cells*, USA: John Wiley & Sons, 2017.
- [41] U. Mehmood, M. Z. Aslam, R. A. Shawabkeh, I. A. Hussein, W. Ahmad y A. Ghaffar Rana, «Improvement in Photovoltaic Performance of Dye Sensitized Solar Cell Using Activated Carbon-TiO₂ Composites-Based Photoanode,» *IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS*, pp. 1-5, 23 05 2016.
- [42] J. M. Terrazocultor, «100ciaencasa,» Experimento: Pintura Fotocatalítica, 29 01 2016. [En línea]. Available: <https://100ciaencasa.blogspot.com.es/2016/01/experimento-pintura-fotocatalitica.html>. [Último acceso: 25 11 2017].
- [43] JRblog, «Óxido de Zinc (ZnO),» jrblog, 29 05 2012. [En línea]. Available: <http://jrgmblog.blogspot.com/>. [Último acceso: 12 10 2017].
- [44] M. Winter, «Zinc: zinc oxide,» WebElements, [En línea]. Available: https://www.webelements.com/compounds/zinc/zinc_oxide.html. [Último acceso: 12 10 2017].
- [45] Z. Mo, Y. Huang, S. Lu, Y. Fu, X. Shen y H. He, «Growth of ZnO nanowires and their applications for CdS quantum dots sensitized solar cells,» *ELSEVIER*, nº 149, pp. 63-68, 2017.
- [46] J. E. Márquez Días, *Nanotecnología. Ciencia a escala aómica y molecular.*, Saarbrücken: Verlag, 2013.
- [47] C. Poole y F. Owens, *Introducción a la Nanotecnología*, Barcelona: REVERTÉ, 2007.
- [48] M. P. Genovese, I. V. Lightcap y P. V. Kamat, «Sun-Believable SOlar Piant. A Transformative One-Step Approach for Designing Nanocrystalline SOlar Cells,» *ACSNANO*, vol. 6, nº 1, pp. 865-872, 2012.
- [49] R. Sánchez Rosa, *Preparación y caracterización de películas de TiO₂ sensibilizadas con CdS para aplicaciones en celdas solares (Tesis de postgrado)*, Altamira: Instituto Politécnico Nacional, 2014.

- [50] M. Triana, A. López y R. Camargo, «Síntesis, Caracterización y Evaluación Fotocatalítica de Puntos cuánticos de CdSe cubiertos con 2 tipos de Tioles.,» *Información Tecnológica*, vol. 26, nº 5, pp. 121-134, 2015.
- [51] Z. Ahmad, M. Ani, R. A. Shakoor, S. Al-Muhtaseb y F. Touati, «Limits and possible solutions in quantum dot organic solar cells,» *ELSEVIER*, nº 1-14, pp. 1364-, 2017.
- [52] A. I. Sánchez Solís, *SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE PUNTOS CUÁNTICOS DE CdSe CON APLICACIONES EN CELDAS FOTOVOLTAICAS CON CONFIGURACIÓN FTO/TiO₂/CdSe/ZnS* (*Tesis de grado*), México: Universidad de Guanajuato, 2014.
- [53] A. Josep, P. Atienzar, A. Corma y H. García, «Efficiency Records in Mesoscopic Dye-Sensitized Solar Cells,» *THE CHEMICAL RECORD*, nº 15, pp. 803-828, 2015.
- [54] Y. Ooyama y Y. Harima, «Photophysical and Electrochemical Properties, and Molecular Structures of Organic Dyes for Dye-Sensitized Solar Cells,» *CHEMPHYSCHM*, pp. 1-50, 2012.
- [55] El siglo de Torreón, «El siglo de Torreón,» Lagunera representará al país, 02 10 2015. [En línea]. Available: <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/1157524.lagunera-representara-al-pais.html>. [Último acceso: 23 03 2018].
- [56] X. Zhou, W. Belcher y P. Dastoor, «Solar Paint: From Synthesis to Printing,» *Polymers*, nº 6, pp. 2832-2844, 2014.
- [57] M. Á. Méndez, «La ONU urge a evitar una grave escasez mundial de agua en 2030,» GIZMODO, 21 03 2015. [En línea]. Available: <http://es.gizmodo.com/la-onu-urge-a-evitar-una-grave-escasez-mundial-de-agua-1692807670>. [Último acceso: 14 10 2017].
- [58] UNDERSTANDSOLAR, «UNDERSTANDSOLAR,» Solar Paint: A Spray-On Alternative to PV, [En línea]. Available: <https://understandsolar.com/solar-paint/>. [Último acceso: 14 10 2017].
- [59] L. Hughes y J. Meckling, «Univisión,» Así es como Trump podría socavar el boom de la energía solar de EEUU, 04 10 2017. [En línea]. Available: <http://www.univision.com/noticias/planeta/asi-es-como-trump-podria-socavar-el-boom-de-la-energia-solar-de-eeuu>. [Último acceso: 14 10 2017].

- [60] sunpaint, «sunpaint,» afternic, [En línea]. Available: <http://sunpaint.com/>. [Último acceso: 14 10 2017].
- [61] K. Nachsholim y D. N. Hof Carmel, «The Solar Paint,» SolarPaint Website under construction, [En línea]. Available: <https://www.thesolarpaint.com/>. [Último acceso: 14 10 2017].
- [62] S. S. Casillas Bolaños, «CasillasInnovation,» Casillas Innovation Enterprise, [En línea]. Available: <http://casillasinnovation.com/>. [Último acceso: 14 10 2017].
- [63] S. S. Casillas Bolaños, «FuturasTecnologías,» Centro de Innovación de Futuras Tecnologías, [En línea]. Available: <http://futurastecnologias.org/>. [Último acceso: 14 10 2017].
- [64] El Universo, «Diseño,» La energía solar se abre terreno en Ecuador, 09 06 2017. [En línea]. Available: <http://www.eluniverso.com/tendencias/2017/06/10/nota/6222868/energia-solar-se-abre-terreno-ecuador>. [Último acceso: 19 10 2017].
- [65] P. Roldán Chiriboga, *Evaluación de las Energías Renovables No Convencionales factibles de desarrollarse en Ecuador (Tesis de Pregrado)*, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2009.
- [66] CONELEC & CIE, *ATLAS SOLAR DEL ECUADOR CON FINES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA*, Quito, 2008.
- [67] J. P. Muñoz-Vizhñay y M. V. Rojas-Moncayo, «Incentivo a la generación distribuida en el ECUADOR,» *INGENIUS*, nº 19, pp. 60-68, 2018.
- [68] M. R. Peláez Samaniego y J. L. Espinoza Abad, *ENERGÍAS RENOVABLES EN EL ECUADOR. SITUACIÓN ACTUAL, TENDENCIAS Y PERSPECTIVAS*, Cuenca: ISBN, 2015.
- [69] Massachusetts Institute of Technology MIT, «MIT,» MIT Energy Initiative, [En línea]. Available: <http://web.mit.edu/>. [Último acceso: 25 11 2017].
- [70] National Aeronautics and Space Administration, «Atmospheric Science Data Center,» NASA Surface meteorology and Solar Energy - Location, [En línea]. Available: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=skip@larc.nasa.gov>. [Último acceso: 25 11 2017].

- [71] Real Academia Española (RAE), «Diccionario de la lengua española- Edición de Tricentenario,» [En línea]. Available: <http://dle.rae.es/?id=De7qNYD>. [Último acceso: 01 11 2017].
- [72] F. Espinosa, «Energiza. Understanding Energy,» ¿Qué hacer Un Análisis Energético o un Diagnóstico Energético?, 19 05 2015. [En línea]. Available: <http://www.energiza.biz/que-hacer-una-analisis-energetico-o-un-diagnostico-energetico/>. [Último acceso: 01 11 2017].
- [73] M. Peng, B. Dong, X. Cai, W. Wang y et al, «Organic dye-sensitized photovoltaic fibers,» *Elsevier*, nº 150, pp. 161-165, 2017.
- [74] A. Fischer, L. Rollny, J. Pan, G. H. Carey y et al, «Directly Deposited Quantum Dot Solids Using a Colloidal Stable Nanoparticle Ink,» *Advanced Materials*, pp. 1-8, 2013.
- [75] S. Gärtner, M. Christmann, S. Sankaran, H. Röhm y et al, «Eco-Friendly Fabrication of 4% Efficient Organic Solar Cells from Surfactant-Free P3HT:ICBA Nanoparticle Dispersions,» *Advanced Materials*, nº 26, pp. 6653-6657, 2014.
- [76] J. G. Radich, R. Dwyer y P. V. Kamat, «Cu₂S Reduced Graphene Oxide Composite for High-Efficiency Quantum Dot Solar Cells. Overcoming the Redox Limitations of S₂/Sn₂- at the Counter Electrode,» *The Journal of Physical Chemistry Letters*, nº 2, p. 2453.2460, 2011.
- [77] J.-C. Chou, C.-M. Chu, Y.-H. Liao y et al, «Fabrication and Photovoltaic Properties of Dye-Sensitized Solar Cells Modified by Graphene Oxide and Magnetic Bead,» *IEEE Electron Device Letters*, vol. 36, nº 7, pp. 711-713, 2015.
- [78] J. Goldstein, I. Yakupov y B. Breen, «Development of large area photovoltaic dye cells at 3GSolar,» *Elsevier*, nº 94, pp. 638-641, 2010.
- [79] K. Hara, A.-S. Wang, N. Koumura, K. Saito y et al, «EFFICIENT ORGANIC-DYE-SENSITIZED NANOCRISTALLINE TiO₂ SOLAR CELLS,» *IEEE*, pp. 313-316, 2006.
- [80] I. J. Kramer, J. C. Minor, G. Moreno-Bautista, L. Rollny y et al, «Efficient Spray-Coated Colloidal Quantum Dot Solar Cells,» *Advanced Materials*, pp. 1-6, 2014.
- [81] M. Law, L. E. Greene, J. C. Johnson y et al, «Nanowire dye-sensitized solar cells,» *Nature Materials*, vol. 4, pp. 455-459, 2005.

- [82] P. Wang y et al, «Enhance the Performance of Dye-Sensitized Solar Cells by Co-Grafting Amphiphilic,» *The Journal of Physical Chemistry B*, nº 107, pp. 14336-14341, 2003.
- [83] M. Graetzel, *Historical Development Of The DSC, From Its Inception To Its Current State*, Nara, Japón: Third DSC Industrialization Conference, 2009.
- [84] SolarPaint, «Start-Up Nation Finder,» Solar Paint. Photovoltaic Wallpaper Rolls, [En línea]. Available: http://finder.startupnationcentral.org/company_page/solarpaint. [Último acceso: 22 03 2018].
- [85] N. Espinosa Martínez, «Life cycle analysis,» Plastic Photovoltaic. A hub for OPV research, 2016. [En línea]. Available: <http://plasticphotovoltaics.org/lc/lc-deployment/lc-lca.html>. [Último acceso: 10 11 2017].
- [86] H. Chul Kim, V. Fthenakis, J.-K. Choi y D. E. Turney, «Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Thin-film Photovoltaic Electricity Generation,» *Journal of Industrial Ecology*, vol. 16, nº S1, pp. 5110-5121, 2012.
- [87] V. Fthenakis, *Third Generation Photovoltaics*, USA: INTECH, 2012.
- [88] ISO 14040, *International Organisation for Standardisation (ISO)*, Geneva, Switzerland, 1997.
- [89] ISRAEL, «Ciencia y Tecnología: I y D en energía,» ISRAEL Israeli Missions Around The Word, [En línea]. Available: <http://embassies.gov.il/MFA/Spanish/Pages/CIENCIA%20Y%20TECNOLOGIA-%20IyD%20en%20energa.aspx>. [Último acceso: 23 03 2018].
- [90] F. C. Krebs, *Stability and Degradation of Organic and Polymer Solar Cells*, JOHN WILEY & SONS, INC., 2014.
- [91] M. Jorgensen, K. Norrman, S. A. Gevorgyan, T. Tromholt y et al, «Stability of Polymer Solar Cells,» *Advanced Materials*, nº 24, pp. 580-612, 2012.
- [92] M. Jorgensen, K. Norrman y F. C. Krebs, «Stability/degradation of polymer solar cells. Review,» *Elsevier*, nº 92, pp. 686-714, 2008.
- [93] F. C. Krebs, M. Hösel, M. Corazza, B. Roth y et al, «Freely available OPV—The fast way to progress,» *Energy Technology*, nº 1, pp. 378-381, 2013.

- [94] D. Angmo, P. M. Sommeling, R. Gupta, M. Hösel y et al, «Outdoor Operational Stability of Indium-Free Flexible Polymer Solar Modules Over 1 Year Studied in India, Holland, and Denmark,» *Advanced Engineering Materials*, vol. 16, nº 8, pp. 976-987, 2014.
- [95] M. O. Reese, S. A. Gevorgyan, M. Jorgensen, E. Bandgaard y et al, «Consensus stability testing protocols for organic photovoltaic materials and devices,» *Elsevier*, nº 95, pp. 1253-1267, 2011.
- [96] S. Gevorgyan y . M. Vesterager Madsen, «ISOS standards,» Plasticphotovoltaics. A hub for OPV research, 19 08 2017. [En línea]. Available: <http://plasticphotovoltaics.com/lc/lc-degradation/lc-physical/lc-delamination.html>. [Último acceso: 11 11 2017].
- [97] Educar, «Educar,» Factores que inciden en el clima del Ecuador, [En línea]. Available: <http://www.educar.ec/edu/dipromepg/4eess/u4/4.2.htm>. [Último acceso: 24 11 2017].
- [98] M. Tenor, *Células Fotovoltaicas Orgánicas y su Integración en Cultivos de Invernadero (Tesis de Maestría)*, Sevilla: ISBN, 2015.
- [99] SunFields Europe, «SunFields Europe,» Mantenimiento de Plantas Fotovoltaicas, [En línea]. Available: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/installaciones-fotovoltaicas-tipos-de-mantenimiento/>. [Último acceso: 24 11 2017].
- [100] O. Barbosa-García, J. L. Maldonado, G. Ramoz Ortiz y et al, «Celdas solares orgánicas como fuente de energía sustentable,» *Acta Universitaria*, vol. 22, nº 5, pp. 36-48, 2012.
- [101] El Siglo de Torreón, «El Siglo de Torreó,» Lagunera representará al país, [En línea]. Available: <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/1157524.lagunera-representara-al-pais.html>. [Último acceso: 25 11 2017].
- [102] COP21, «COP21 Paris,» Find out more about COP21, 2015. [En línea]. Available: <http://www.cop21paris.org/about/cop21/>. [Último acceso: 25 11 2017].
- [103] PLAYGROUND, «PLAYGROUND,» Esta "pintura solar" promete convertir cualquier casa en una fuente de energía limpia. Una central eléctrica en tu pared, 17 06 2017. [En línea]. Available: http://www.playgroundmag.net/now/pintura-convertir-cualquier-fuente-energia_1_22604710.html. [Último acceso: 25 11 2017].

- [104] C. E. d. I. N. E. d. I. Construcción, *Norma Ecuatoriana de Construcción, Capítulo 14, Energías Renavables*, 2011.
- [105] M. Chinchilla Sánchez, «DImensionado de Sistemas Fotovoltaicos Aislados,» 2014.
- [106] PROViento S.A. ENERGÍAS RENOVABLES ECUADOR, «Proviento S.A.,» Proviento S.A., [En línea]. Available: <http://www.proviento.com.ec/panelesolares.html>. [Último acceso: 08 03 2018].
- [107] pinturasolaruce, «Pintura Solar,» Universidad Central del Ecuador, 05 06 2015. [En línea]. Available: <http://pinturasolaruce.blogspot.com/>. [Último acceso: 21 03 2018].
- [108] Coordenadas-GPS, «Coordenadas-GPS,» Coordenadas Geograficas en Google Maps, [En línea]. Available: <https://www.coordenadas-gps.com/>. [Último acceso: 25 11 2017].
- [109] P. Dastoor, «SOLAR PAINT. Harvesting light,» *NATURE PHOTONICS*, vol. 7, pp. 425-426, 2013.
- [110] Y. Zhan, J. Graffin, N. Scarratt, T. Wang y D. Lidzey, «High efficiency arrays of polymer solar cells fabricated by spray-coating in air.,» *PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS*, nº 24, pp. 275-282, 2016.
- [111] T. Casey, «Caution: Wet solar power (a breakthrough in solar paint research),» REneweconomy. Tracking the next industrial revolution, 16 05 2013. [En línea]. Available: <http://reneweconomy.com.au/caution-wet-solar-power-a-breakthrough-in-solar-paint-research-86878/>. [Último acceso: 06 10 2017].
- [112] M. K. Nazeeruddin, A. Kay, I. Rodicio, R. Humphry-Baker, E. Müller y et al, «Conversion of Light to Electricity by cis-X₂Bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylate)ruthenium(II) Charge-Transfer Sensitizers (X = Cl-, Br-, I-, CN-, and SCN-) on Nanocrystalline TiO₂ Electrodes,» *American Chemical Society*, vol. 115, nº 14, pp. 6382-6390, 1993.
- [113] A. M. Vega, F. Santamaría y E. Rivas Trujillo, «Modelo de gestión de energía eléctrica domiciliaria: propuesta preliminar,» *Redes de Ingeniería*, vol. 6, nº 1, pp. 95-105, 2015.



- [114] Y. Zhang, J. Griffin, N. W. Scarratt y et al, «High efficiency arrays of polymer solar cells fabricated by spray-coating in air,» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, nº 24, pp. 275-282, 2016.
- [115] Coursera, «Electrical defects,» Plastic Photovoltaics. A hub for OPV research., 19 08 2017. [En línea]. Available: <http://plasticphotovoltaics.com/videos/videos-coursera/videos-coursera-w04v06.html>. [Último acceso: 11 11 2017].
- [116] cursosinea, «cursosinea,» [En línea]. Available: http://www.cursosinea.coneyt.org.mx/cursos/pcn/interface/mainframe/unidad6/cn_autoev_06.html. [Último acceso: 23 03 2018].



ANEXOS

**ANEXO 1**

Radiación Solar en diferentes localidades del Ecuador según el Instituto de Energía Solar de la Universidad de Massachusetts [69]
[kWh/m²].

Ciudad	LAT	LONG	msnm	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DEC	PROMEDIO		
Ambato	1,28	S	78,63	W	2540	4,64	4,56	4,56	4,42	4,39	3,97	4,28	4,5	4,5	4,97	5	4,81	4,55
Babahoyo (I. Maria)	1,82	S	79,55	W	7	3,67	3,97	4,36	4,31	3,81	3,25	3,39	3,69	3,78	3,72	3,69	3,72	3,78
Bahia de Caraquez	0,60	S	80,38	W	3	3,83	4,14	4,67	4,53	4,14	3,31	3,64	3,94	3,89	3,92	4,06	4,17	4,02
Baños	1,40	S	78,42	W	843	4,25	4,28	3,94	4,11	4,08	3,61	3,89	4,11	4,19	4,75	4,69	4,5	4,2
Boyaca	0,57	S	80,18	W	30	3,33	3,36	4,36	3,83	3,67	3,31	3,56	3,94	3,81	4,11	3,94	3,83	3,75
Bucay	2,17	S	79,27	W	317	3,22	3,39	3,75	3,5	3,31	2,86	3,28	3,5	3,28	3,42	3,39	3,42	3,36
Camposano	1,58	S	80,40	W	120	3,56	3,86	4,36	4,31	4,19	3,53	4,28	4,11	4,28	4,64	4,39	3,89	4,12
Cañar	2,62	S	78,93	W	3104	4,47	4,28	4,36	4,28	4,56	4,31	4,92	4,89	4,58	4,78	4,83	4,75	4,58
Cariamanga	4,32	S	79,57	W	1950	4,28	4,22	4,36	4,33	4,64	4,81	5,08	5,39	4,67	5,75	5,33	4,64	4,79
Charles Darwin	0,73	S	90,30	W	6	4,69	5,03	5,39	5,5	4,53	4,19	3,64	3,53	3,69	4,14	4,36	4,17	4,41
Coca	0,45	S	76,98	W	200	3,83	4,53	3,53	4,14	4,14	3,39	3,83	3,83	3,78	4,33	4,25	4,56	4,01
Cotopaxi	0,62	S	78,57	W	3560	4,31	4,25	3,94	3,64	3,75	3,86	4,14	4,64	4	4,44	4,56	4,17	4,14
Cuenca-Ricaurte	2,85	S	78,95	W	2562	4,58	4,58	4,56	4,28	4,25	3,92	4,22	4,39	4,39	4,78	5,06	4,97	4,5
El Puyo	1,58	S	77,90	W	950	3,56	3,56	3,64	3,53	3,69	3,44	3,69	4	4	4,33	4,28	3,89	3,8
Flavio Alfaro	0,40	S	79,60	W	150	3,17	3,56	4,06	3,53	3,64	3,31	2,94	3,03	3,28	3,81	3,83	3,75	3,49



Continuación...

Guayaquil	2,20	S	79,88	W	6	4	4,17	4,67	4,58	4,56	3,86	4,17	4,5	4,67	4,56	4,31	4,44	4,37
Guayaquil-Aeropuerto	2,20	S	79,88	W		3,43	4,41	3,4	4,35	4,32	3,59	4,36	3,63	5,69	4,16	3,72	4,61	4,14
Hacienda Sangay	1,70	S	77,90	W	970	3,47	3,47	3,75	3,61	3,69	3,44	3,61	4	4	4,25	4,08	3,81	3,77
Hda. San Vicente	0,57	S	80,43	W		3,91	4,23	4,17	4,81	4,05	3,63	2,99	3,18	3,02	3,36	3,17	3,71	3,68
Ibarra	0,35	N	78,13	W	2228	4,44	4,42	4,36	4,36	4,58	4,36	4,89	4,97	4,61	4,72	4,5	4,5	4,56
Inguincho	0,25	N	78,40	W	3380	4,72	4,92	4,56	4,25	4,47	4,61	4,97	5,08	5	5,03	4,92	4,81	4,78
Isabel Maria	1,80	S	79,53	W		3,52	3,83	4,28	4,33	3,62	3,11	3,08	3,41	3,55	3,19	3,24	3,36	3,54
Izobamba	0,37	S	78,55	W	3058	4,23	4,11	4,06	3,75	4,11	4,05	4,21	4,45	4,47	4,16	4,17	4,21	4,16354
Jama	0,20	S	80,27	W	5	3,61	3,64	4,36	3,83	3,75	2,94	4,72	3,44	3,5	4,03	3,94	3,86	3,8
Julcuy	1,47	S	80,62	W	230	3,56	3,78	4,25	4,11	4,08	3,44	4,28	4,92	4,5	4,33	4,39	4,11	4,15
La Clementina	1,67	S	79,35	W	20	3,78	3,78	4,06	4,11	3,61	3,06	3,31	3,39	3,5	3,53	3,58	3,81	3,63
La Concordia	0,10	N	79,42	W	300	3,5	3,83	4,14	4,06	3,94	3,33	3,69	3,56	3,39	3,47	3,39	3,33	3,64
La Naranja	1,37	S	80,47	W	528	3,28	3,47	3,83	3,83	3,69	3,17	3,5	3,81	3,78	3,92	3,67	3,5	3,62
La Naranja-Jipijapa	1,37	S	80,47	W		2,89	3,17	3,48	3,69	3,39	3,03	3,17	3,62	3,67	3,44	3,17	2,98	3,31
Latacunga	0,92	S	78,62	W	2785	4,53	4,25	4,36	4,03	4,31	4,11	4,53	4,61	4,5	4,64	4,58	4,58	4,42
Loja	4,00	S	79,20	W	2135	4,06	4,22	4,17	4,06	4,28	3,86	4,25	4,33	4,36	4,69	4,89	4,61	4,31
Macara	4,38	S	79,28	W	430	4,22	4,11	4,25	4,06	4,31	4	5,06	5,19	5,06	5,22	5,08	4,61	4,6
Macas	2,30	S	78,10	W	1070	4,17	4,17	4,06	3,92	4,28	3,5	3,78	3,69	4,17	4,36	4,72	4,22	4,09
Machala	3,27	S	79,95	W	6	4,42	4,81	5	4,56	4,78	4	3,72	4,17	3,78	3,86	3,83	4,69	4,3
Malchingui	0,07	N	78,33	W	2900	4,67	4,61	4,78	4,75	4,78	4,44	5,19	5,08	4,78	4,92	4,81	4,78	4,8
Manta	0,95	S	80,70	W	6	4,33	4,44	4,78	4,81	4,5	4	4,31	4,33	4,39	4,03	4,28	4,47	4,39



Continuación...

Milagro	2,15	S	79,60	W	13	3,69	3,97	4,36	4,39	3,89	3,22	3,47	3,69	3,78	3,83	3,81	3,94	3,84
Mutile	0,08	N	79,65	W	25	3,31	3,92	4,03	4,56	4,28	3,53	4,19	3,97	3,69	4,08	3,31	3,5	3,86
Napo-San Vicente	0,57	S	80,43	W	5	4,11	4,72	4,47	4,72	4,25	3,47	3,56	3,64	3,39	3,81	3,75	4,17	4
Nuevo Rocafuerte	0,92	S	75,40	W	265	4,72	4,56	4,06	3,92	4,03	3,72	4,22	4,33	4,69	4,64	4,58	4,47	4,33
Olmedo	0,13	N	89,62	W	6	5,06	4,89	4,67	4,56	4,89	4,94	5,42	5,39	5	5	5	4,47	4,94
Olmedo Manabi	1,38	S	80,22	W	60	3,36	3,97	3,64	3,53	3,61	3,17	3,69	4,42	3,89	3,83	3,56	4,31	3,75
Pasaje	3,32	S	79,93	W	6	3,64	3,81	4,25	4,08	3,72	3,19	3,44	3,36	3,28	3,33	3,42	3,56	3,59
Pedernales	0,07	S	80,07	W	10	3,69	3,83	4,89	4,08	3,75	3,5	3,47	3,44	3,61	3,92	3,83	3,44	3,79
Pichilingue	1,10	S	79,48	W	93	3,56	3,86	4,36	4,11	3,83	3,19	3,44	3,61	3,58	3,72	3,56	3,67	3,71
Pisayambo	1,07	S	78,42	W	3615	3,64	3,86	3,94	3,92	3,92	3,56	3,83	3,92	4	4,33	4,36	4,17	3,95
Portoviejo	1,07	S	80,33	W	44	3,64	3,86	4,47	4,42	4,22	3,47	4,5	4,22	4,39	4,33	4,17	4,17	4,16
Puerto Baquerizo	0,90	S	89,78	W	10	4,96	5,68	6,44	6,21	5,97	5,25	4,91	4,88	4,68	4,81	4,88	4,86	5,31
Puerto Bolivar	3,35	S	80,00	W	6	4,42	4,81	5	4,56	4,78	4	3,72	4,17	3,78	3,86	3,83	4,69	4,3
Puerto Ila	0,38	S	79,55	W	260	3,44	3,64	4,06	3,83	3,56	3,11	3,36	3,44	3,39	3,5	3,44	3,36	3,51
Puerto Lopez	1,57	S	80,80	W	6	4,25	4,56	5	4,69	4,28	3,08	3,22	3,42	3,08	3,31	3,67	3,89	3,87
Quininde	0,33	S	79,47	W	95	3,5	3,72	4,14	3,86	3,47	3,42	3,47	3,64	3,39	3,81	4,03	3,53	3,66
Quito-Naquito	0,13	S	78,48	W	2812	4,94	4,64	4,78	4,53	4,83	4,69	5,53	5,47	4,89	5,25	5,14	5,14	4,99
Riobamba	1,67	S	78,63	W	2754	4,44	4,56	4,36	4,22	4,39	4,06	4,47	4,61	4,5	4,75	4,61	4,72	4,47
Rumipamba	1,02	S	78,58	W	2628	4,72	4,56	4,56	4,22	4,61	4,28	4,5	4,72	4,69	4,64	4,89	4,86	4,6
Salinas	2,18	S	80,98	W	6	4,67	5,17	5,19	5,17	4,92	4,03	3,67	3,69	3,39	3,53	4	4,86	4,36
Salinas-La Puntilla	2,20	S	81,02	W		4,14	5,02	4,79	5,41	4,53	3,8	2,79	2,83	3,02	2,81	3,25	4,62	3,92



Continuación...

San Carlos	2,28	S	79,42	W	35	3,5	3,58	4,06	3,92	3,58	3,06	3,28	3,39	3,39	3,53	3,5	3,72	3,54
San Cristobal	0,90	S	89,62	W	6	4,72	5,44	5,92	5,58	5,5	4,92	4,89	4,83	4,58	4,86	4,97	4,86	5,09
San Juan-La Mana	0,95	S	79,32	W	223	3,28	3,47	3,83	3,64	3,33	3	3,22	3,42	3,39	3,5	3,44	3,39	3,41
San Lorenzo	1,28	N	78,85	W	5	3,64	4	4,44	4,28	4	3,56	3,83	3,78	3,81	3,89	3,67	3,47	3,86
San Simon	1,65	S	78,98	W	2600	4,14	4,06	4,36	4,11	4,28	4,17	4,89	5	4,58	4,75	4,58	4,61	4,46
Santa Isabel	3,33	S	79,33	W	1598	3,92	3,92	4,06	3,89	4	4,06	4,58	4,64	4,47	4,78	4,89	4,5	4,31
Santa Rosa	3,43	S	79,97	W		2,77	3,04	3,77	4,03	3,69	2,94	3,13	3,06	2,85	2,79	2,64	3,46	3,18
Santo Domingo	0,23	S	79,27	W	600	3,14	3,5	3,83	3,75	3,5	3,11	3,47	3,5	3,39	3,5	3,33	3,25	3,44
Tabacundo	0,05	N	78,22	W	2876	4,64	4,5	4,56	4,56	4,58	4,17	4,72	4,89	5	4,42	4,19	4,5	4,56
Taura	2,33	S	79,82	W	17	3,5	3,78	4,17	4	3,78	3,22	3,58	3,89	3,69	3,72	3,81	3,42	3,71
Tiputini	0,75	S	75,53	W	220	4,53	4,33	4,17	3,83	3,94	3,64	3,92	4,53	4,58	4,69	4,56	4,47	4,27
Tulcan	0,82	S	77,70	W	2950	4,06	4,11	4,14	3,86	4,17	3,92	4,31	4,39	4,19	4,31	4,19	4	4,14

ANEXO 2

Radiación Solar en diferentes ciudades del Ecuador según la NASA

Irradiación Directa

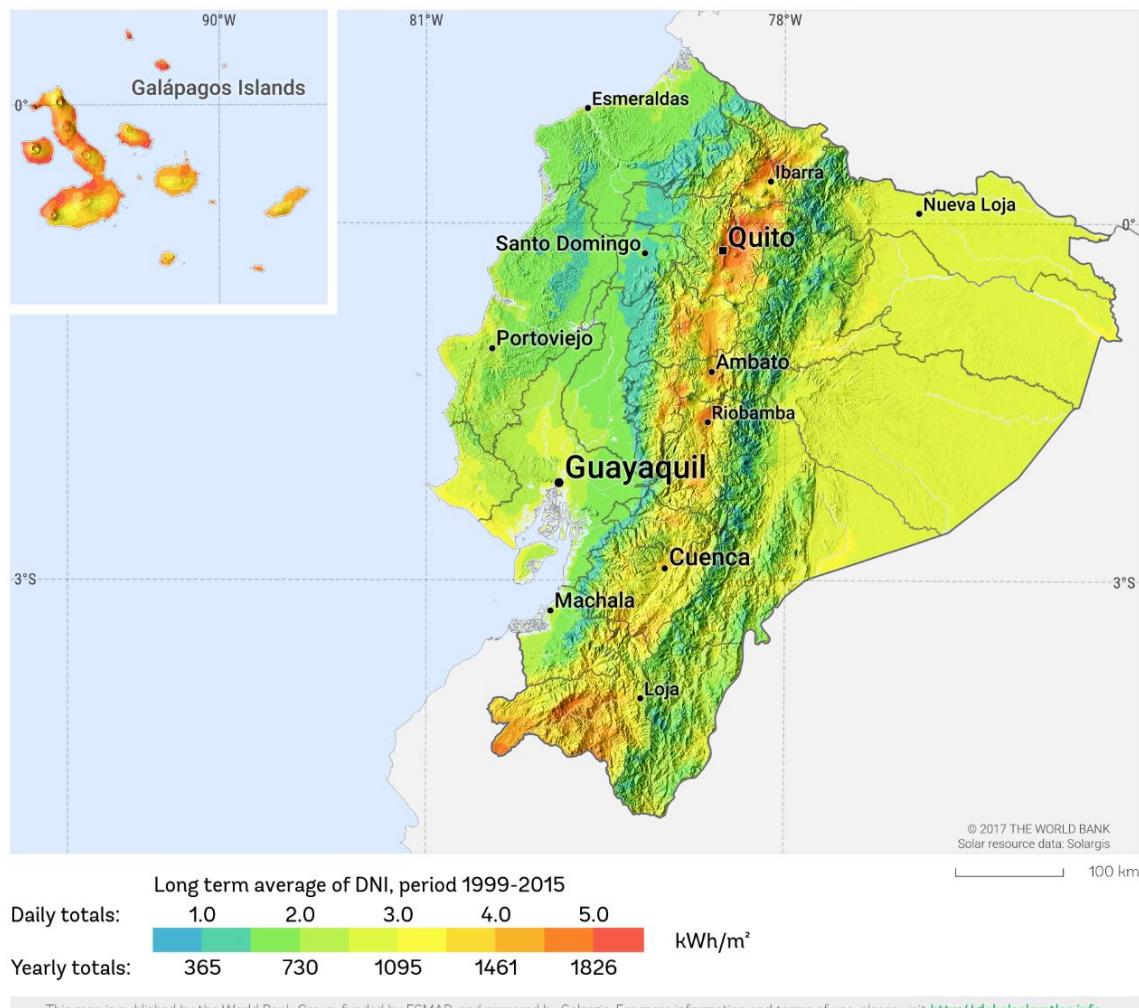
SOLAR RESOURCE MAP

DIRECT NORMAL IRRADIATION ECUADOR

WORLD BANK GROUP
THE WORLD BANK IFC International Finance Corporation

ESMAP
Energy Sector Management Project

SOLARGIS



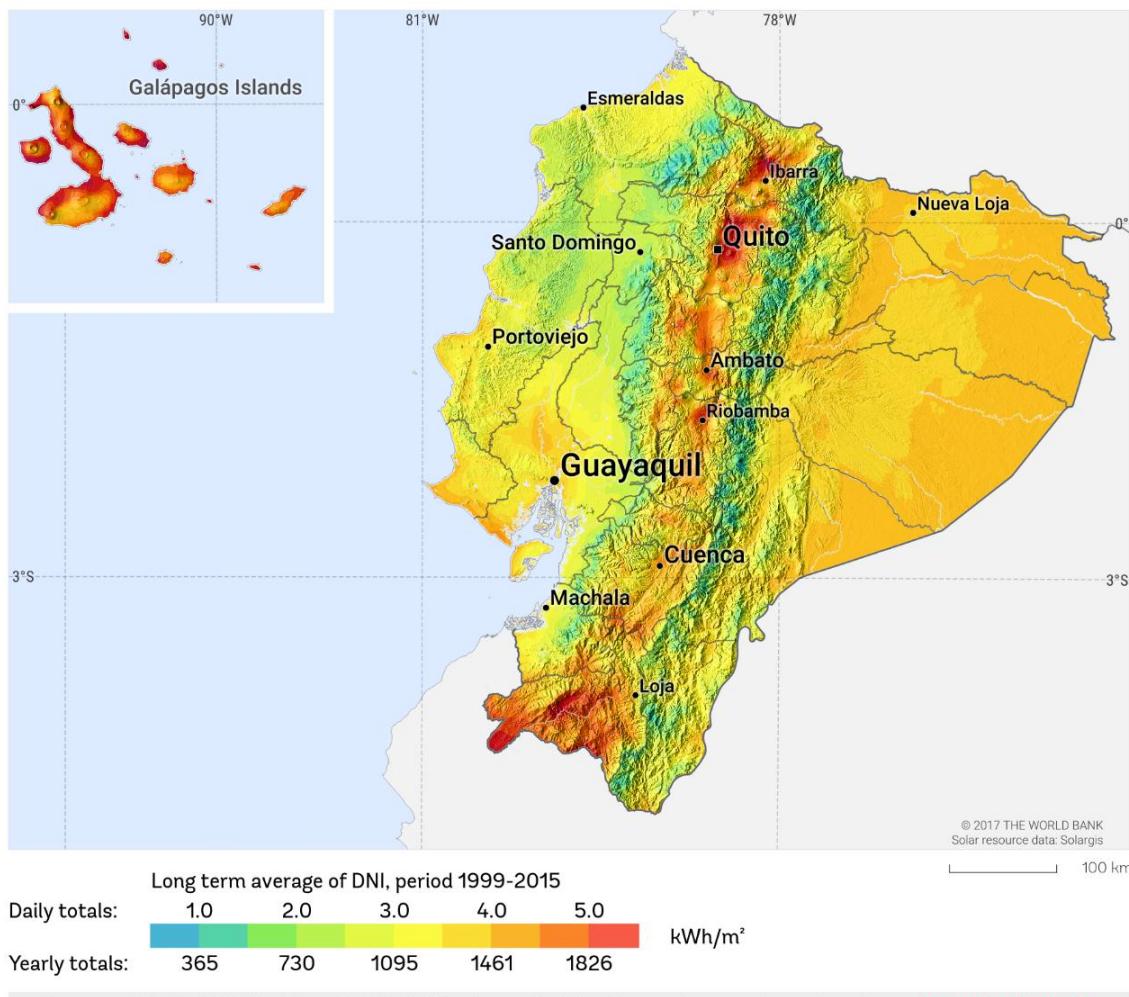
This map is published by the World Bank Group, funded by ESMAP, and prepared by Solargis. For more information and terms of use, please visit <http://globalsolaratlas.info>

Irradiación Horizontal

SOLAR RESOURCE MAP

GLOBAL HORIZONTAL IRRADIATION

ECUADOR



Potencial Energía FV

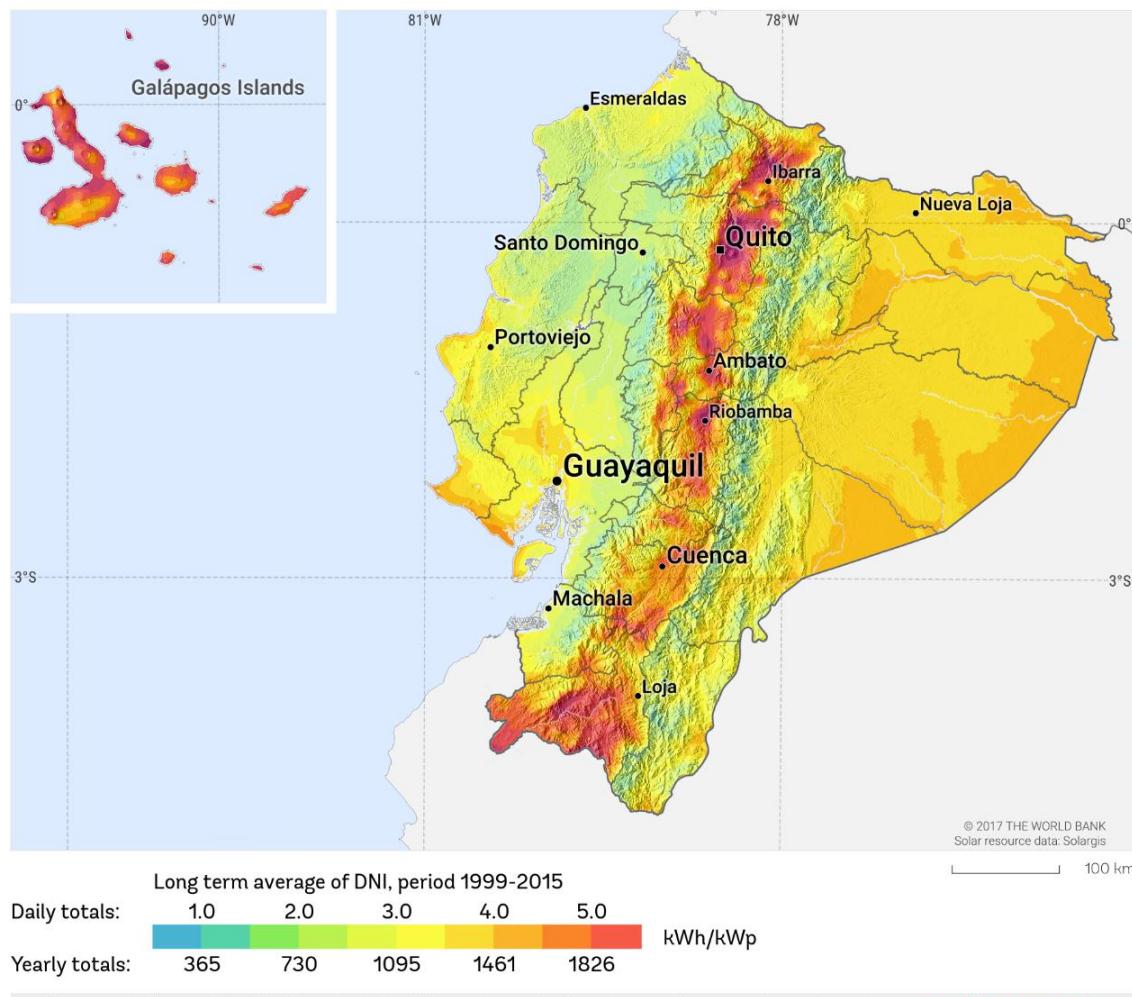
SOLAR RESOURCE MAP

PHOTOVOLTAIC POWER POTENTIAL ECUADOR

WORLD BANK GROUP
THE WORLD BANK IFC International Finance Corporation

ESMAP Deep Dive Energy Resource Project

SOLARGIS



This map is published by the World Bank Group, funded by ESMAP, and prepared by Solargis. For more information and terms of use, please visit <http://globalsolaratlas.info>.



ANEXO 3

Datos Geográficos y Climatológicos de la Costa. [108] [70]

1) Guayaquil: Ciudad capital de la Provincia del Guayas considerada el puerto principal del Ecuador. Oficialmente Santiago de Guayaquil, Perla del Pacífico. Es la ciudad de la Costa con la mayor radiación solar según fuentes oficiales.

- **Ubicación Geográfica:** Latitud: -2,20 °S
Longitud: -79,8 °O
Altitud: 6 m s.n.m
- **Temperatura:** Máxima: 26 °C
Mínima: 22 °C
- **Velocidad del Viento:** Promedio: 2,57 [m/s]
- **Máxima Radiación Global Diaria:**

Ciudad	Máxima Radiación Global Diaria en kWh/(m ² -día)												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio
Guayaquil	4,00	4,17	4,67	4,58	4,50	3,86	4,17	4,50	4,67	4,56	4,31	4,44	4,37

2) Santa Rosa: Cantón de la Provincia de El Oro y su cabecera cantonal es la ciudad de Santa Rosa. Oficialmente Santa Rosa de Lima. Es la ciudad de la Costa con la menor radiación solar según fuentes oficiales.

- **Ubicación Geográfica:** Latitud: -3,46 °S
Longitud: -79,97 °O
Altitud: 11 m s.n.m



- **Temperatura:** Máxima: 26,4 °C
Mínima: 18,6 °C
- **Velocidad del Viento:** Promedio: 2,77 [m/s]
- **Mínima Radiación Global Diaria:**

Ciudad	Mínima Radiación Global Diaria en kWh/(m ² -día)												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio
Santa Rosa	2,77	3,04	3,77	4,03	3,69	2,94	3,13	3,06	2,85	2,79	2,64	3,46	3,18

Datos Geográficos y Climatológicos de la Sierra. [108] [70]

1) **Quito:** Ciudad capital de la Provincia de Pichincha y capital de la República del Ecuador considerada la Mitad del Mundo, Carita de Dios y Luz de América. Es la ciudad de la Sierra con la mayor radiación solar según fuentes oficiales.

- **Ubicación Geográfica:** Latitud: -0,13 °S
Longitud: -78,48 °O
Altitud: 2850 m s.n.m
- **Temperatura:** Máxima: 21 °C
Mínima: 15,1 °C
- **Velocidad del Viento:** Promedio: 2,34 [m/s]
- **Máxima Radiación Global Diaria:**



Ciudad	Máxima Radiación Global Diaria en kWh/(m ² -día)												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio
Quito	4,94	4,64	4,78	4,53	4,83	4,69	5,53	5,47	4,89	5,25	5,14	5,14	4,99

2) Mindo: Parroquia del cantón San Miguel de Los Bancos perteneciente a la Provincia de Pichincha. Renombrado por su bella naturaleza y por la reserva ecológica Mindo-Nambillo. Es el pueblo de la Sierra con la menor radiación solar según fuentes oficiales.

▫ **Ubicación Geográfica:** Latitud: -0,05 °S
Longitud: -78,78 °O
Altitud: 1277 m s.n.m

▫ **Temperatura:** Máxima: 21 °C
Mínima: 15,1 °C

▫ **Velocidad del Viento:** Promedio: 2,34 [m/s]

▫ **Mínima Radiación Global Diaria:**

Parroquia	Mínima Radiación Global Diaria en kWh/(m ² -día)												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio
Mindo	3,91	4,23	4,17	4,81	4,05	3,63	2,99	3,18	3,02	3,36	3,17	3,71	3,68

Datos Geográficos y Climatológicos del Oriente. [108] [70]

1) San Simón: Parroquia del cantón Guaranda Provincia de Bolívar. En su cantón Guaranda se celebra la fiesta del carnaval más famoso del Ecuador. Es el sector de la Sierra con la mayor radiación solar según fuentes oficiales.



- **Ubicación Geográfica:** Latitud: -1,64 °S
Longitud: -78,98 °O
Altitud: 2668 m s.n.m
- **Temperatura:** Máxima: 19,6 °C
Mínima: 13,6 °C
- **Velocidad del Viento:** Promedio: 2,46 [m/s]
- **Máxima Radiación Global Diaria:**

Parroquia	Máxima Radiación Global Diaria en kWh/(m ² -día)												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio
San Simón	4,14	4,06	4,36	4,11	4,28	4,17	4,89	5	4,58	4,75	4,58	4,61	4,46

2) Sangay: Parroquia rural del cantón Palora perteneciente a la Provincia de Morona Santiago. Reconocida por el Parque Nacional Sangay. Es la parroquia del Oriente con la menor radiación solar según fuentes oficiales.

- **Ubicación Geográfica:** Latitud: -2,01 °S
Longitud: -78,33 °O
Altitud: 4040 m s.n.m
- **Temperatura:** Máxima: 21 °C
Mínima: 14,8 °C
- **Velocidad del Viento:** Promedio: 2,60 [m/s]
- **Mínima Radiación Global Diaria:**



Parroquia	Mínima Radiación Global Diaria en kWh/(m ² -día)												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio
Sangay	3,47	3,47	3,75	3,61	3,69	3,44	3,61	4	4	4,25	4,08	3,81	3,77

Datos Geográficos y Climatológicos de la Región Insular. [108] [70]

1) Puerto Baquerizo Moreno: Ciudad capital de la Provincia de Galápagos considerada Capital del Paraíso, la segunda ciudad más grande de las islas. Es la ciudad de la Región Insular con la mayor radiación solar según fuentes oficiales.

- **Ubicación Geográfica:** Latitud: -0,90 °S
Longitud: -89,78 °O
Altitud: 2 m s.n.m
- **Temperatura:** Máxima: 23,3 °C
Mínima: 22,2 °C
- **Velocidad del Viento:** Promedio: 4,58 [m/s]
- **Máxima Radiación Global Diaria:**

Ciudad	Máxima Radiación Global Diaria en kWh/(m ² -día)												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio
Puerto Baquerizo Moreno	4,96	5,68	6,44	6,21	5,97	5,25	4,91	4,88	4,68	4,81	4,88	4,86	5,31

2) San Cristóbal: Isla más oriental del archipiélago de las Islas Galápagos. Oficialmente Isla de San Cristóbal. Es la Isla de la Región Insular con la menor radiación solar según fuentes oficiales.



- **Ubicación Geográfica:** Latitud: -0,90 °S
Longitud: -89,62 °O
Altitud: 2 m s.n.m

- **Temperatura:** Máxima: 23,3 °C
Mínima: 22,2 °C

- **Velocidad del Viento:** Promedio: 4,58 [m/s]

- **Mínima Radiación Global Diaria:**

Ciudad	Mínima Radiación Global Diaria en kWh/(m ² -día)												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio
San Cristóbal	4,72	5,44	5,92	5,58	5,5	4,92	4,89	4,83	4,58	4,86	4,97	4,86	5,09

ANEXO 4
Localidades con Mayor Radiación

- **Guayaquil:** Con latitud de $-2,20^{\circ}$ (-2°) y para cada inclinación p.

Tabla 20. Factor K Guayaquil [104]

Localidad	K											
	Para p=0°											
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
Guayaquil	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Para p=10°											
	0,93	0,96	0,99	1,02	1,04	1,05	1,04	1,02	0,99	0,96	0,93	0,92
	Para p=15°											
	0,89	0,93	0,98	1,02	1,05	1,06	1,05	1,02	0,98	0,93	0,89	0,87
	Para p=20°											
	0,84	0,89	0,96	1,02	1,06	1,07	1,05	1,01	0,96	0,89	0,84	0,82
	Para p=25°											
	0,78	0,84	0,93	1,01	1,06	1,07	1,04	1	0,93	0,85	0,79	0,76
	Para p=30°											
	0,72	0,80	0,89	0,99	1,05	1,06	1,03	0,98	0,90	0,80	0,73	0,69

- **Quito:** Con latitud de $-0,13^{\circ}$ (0°) y para cada inclinación p.

Tabla 21. Factor K Quito [102]

Localidad	K											
	Para p=0°											
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
Quito	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Para p=10°											
	1,03	1,01	0,99	0,96	0,93	0,92	0,93	0,95	0,99	1,02	1,04	1,04
	Para p=15°											
	1,04	1,01	0,97	0,92	0,88	0,87	0,88	0,92	0,97	1,02	1,05	1,05
	Para p=20°											
	1,04	1	0,95	0,88	0,83	0,81	0,83	0,88	0,95	1,01	1,05	1,06
	Para p=25°											
	1,03	0,99	0,92	0,84	0,77	0,75	0,77	0,83	0,92	0,99	1,04	1,06
	Para p=30°											
	1,02	0,97	0,88	0,79	0,71	0,68	0,70	0,78	0,88	0,97	1,03	1,05

- **San Simón:** Con latitud de $-1,64^{\circ}$ (-1°) y para cada inclinación p.

Tabla 22. Factor K San Simón [102]

Localidad	K											
	Para $p=0^{\circ}$											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
San Simón	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Para $p=10^{\circ}$											
	0,93	0,96	0,99	1,02	1,04	1,04	1,03	1,02	0,99	0,96	0,93	0,92
	Para $p=15^{\circ}$											
	0,88	0,92	0,97	1,02	1,05	1,06	1,04	1,01	0,97	0,93	0,89	0,87
	Para $p=20^{\circ}$											
	0,83	0,88	0,95	1,05	1,05	1,06	1,04	1,01	0,95	0,89	0,84	0,81
	Para $p=25^{\circ}$											
	0,77	0,84	0,92	1	1,05	1,06	1,04	0,99	0,92	0,85	0,78	0,75
	Para $p=30^{\circ}$											
	0,71	0,79	0,89	0,98	1,04	1,05	1,03	0,97	0,89	0,80	0,72	0,69

- **Puerto Baquerizo Moreno:** Con latitud de $-0,90^{\circ}$ (0°) y para cada inclinación p.

Tabla 23. Factor K Puerto Baquerizo Moreno [102]

Localidad	K											
	Para $p=0^{\circ}$											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Quito	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Para $p=10^{\circ}$											
	1,03	1,01	0,99	0,96	0,93	0,92	0,93	0,95	0,99	1,02	1,04	1,04
	Para $p=15^{\circ}$											
	1,04	1,01	0,97	0,92	0,88	0,87	0,88	0,92	0,97	1,02	1,05	1,05
	Para $p=20^{\circ}$											
	1,04	1	0,95	0,88	0,83	0,81	0,83	0,88	0,95	1,01	1,05	1,06
	Para $p=25^{\circ}$											
	1,03	0,99	0,92	0,84	0,77	0,75	0,77	0,83	0,92	0,99	1,04	1,06
	Para $p=30^{\circ}$											
1,02	0,97	0,88	0,79	0,71	0,68	0,70	0,78	0,88	0,97	1,03	1,05	



Localidades con Menor Radiación

- **Santa Rosa:** Con latitud de $-3,46^{\circ}$ (-3°) y para cada inclinación p.

Tabla 24. Factor K Santa Rosa [102]

Localidad	K											
	Para $p=0^{\circ}$											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Quito	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Para $p=10^{\circ}$											
	0,93	0,96	0,99	1,03	1,05	1,05	1,04	1,02	0,99	0,96	0,94	0,93
	Para $p=15^{\circ}$											
	0,89	0,93	0,98	1,03	1,06	1,06	1,05	1,02	0,98	0,93	0,89	0,88
	Para $p=20^{\circ}$											
	0,84	0,89	0,96	1,02	1,06	1,07	1,05	1,02	0,96	0,90	0,85	0,83
Para $p=25^{\circ}$												
0,79												0,77
Para $p=30^{\circ}$												
0,73												0,70

- **Mindo:** Con latitud de $-0,05^{\circ}$ (0°) y para cada inclinación p.

Tabla 25. Factor K Mindo [102]

Localidad	K											
	Para $p=0^{\circ}$											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Mindo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Para $p=10^{\circ}$											
	1,03	1,01	0,99	0,96	0,93	0,92	0,93	0,95	0,99	1,02	1,04	1,04
	Para $p=15^{\circ}$											
	1,04	1,01	0,97	0,92	0,88	0,87	0,88	0,92	0,97	1,02	1,05	1,05
	Para $p=20^{\circ}$											
	1,04	1	0,95	0,88	0,83	0,81	0,83	0,88	0,95	1,01	1,05	1,06
Para $p=25^{\circ}$												
1,03												1,06
Para $p=30^{\circ}$												
1,02												1,05



- **Sangay:** Con latitud de $-2,01^{\circ}$ (-2°) y para cada inclinación p.

Tabla 26. Factor K Sangay [102]

Localidad	K											
	Para $p=0^{\circ}$											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Sangay	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Para $p=10^{\circ}$											
	0,93	0,96	0,99	1,02	1,04	1,05	1,04	1,02	0,99	0,96	0,93	0,92
	Para $p=15^{\circ}$											
	0,89	0,93	0,98	1,02	1,05	1,06	1,05	1,02	0,98	0,93	0,89	0,87
	Para $p=20^{\circ}$											
	0,84	0,89	0,96	1,02	1,06	1,07	1,05	1,01	0,96	0,89	0,84	0,82
	Para $p=25^{\circ}$											
	0,78	0,84	0,93	1,01	1,06	1,07	1,04	1	0,93	0,85	0,79	0,76
	Para $p=30^{\circ}$											
	0,72	0,80	0,89	0,99	1,05	1,06	1,03	0,98	0,90	0,80	0,73	0,69

- **San Cristóbal:** Con latitud de $-0,90^{\circ}$ (0°) y para cada inclinación p.

Tabla 27. Factor K San Cristóbal [102]

Localidad	K											
	Para $p=0^{\circ}$											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
San Cristóbal	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Para $p=10^{\circ}$											
	1,03	1,01	0,99	0,96	0,93	0,92	0,93	0,95	0,99	1,02	1,04	1,04
	Para $p=15^{\circ}$											
	1,04	1,01	0,97	0,92	0,88	0,87	0,88	0,92	0,97	1,02	1,05	1,05
	Para $p=20^{\circ}$											
	1,04	1	0,95	0,88	0,83	0,81	0,83	0,88	0,95	1,01	1,05	1,06
	Para $p=25^{\circ}$											
	1,03	0,99	0,92	0,84	0,77	0,75	0,77	0,83	0,92	0,99	1,04	1,06
	Para $p=30^{\circ}$											
	1,02	0,97	0,88	0,79	0,71	0,68	0,70	0,78	0,88	0,97	1,03	1,05



ANEXO 5

Radiación sobre el Techo Inclinado para cada α y p en cada mesTabla 28. Radiación para Escenario 1: $\alpha=0^\circ$ y $p=0^\circ$

Fuente: Elaboración Propia.

Regiones	Localidad	Enero			Febrero			Marzo			Abril		
		Gdm(0)	K	Gdm(α,p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α,p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α,p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α,p) kWh/(m ² día)
Localidades con Máxima Radiación													
Costa	Guayaquil	4,00	1,00	4,00	4,17	1,00	4,17	4,67	1,00	4,67	4,58	1,00	4,58
Sierra	Quito	4,94	1,00	4,94	4,64	1,00	4,64	4,78	1,00	4,78	4,53	1,00	4,53
Oriente	San Simón	4,14	1,00	4,14	4,06	1,00	4,06	4,36	1,00	4,36	4,11	1,00	4,11
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	4,96	1,00	4,96	5,68	1,00	5,68	6,44	1,00	6,44	6,21	1,00	6,21
Localidades con Mínima Radiación													
Costa	Santa Rosa	2,77	1,00	2,77	3,04	1,00	3,04	3,77	1,00	3,77	4,03	1,00	4,03
Sierra	Mindo	3,91	1,00	3,91	4,23	1,00	4,23	4,17	1,00	4,17	4,81	1,00	4,81
Oriente	Sangay	3,47	1,00	3,47	3,47	1,00	3,47	3,75	1,00	3,75	3,61	1,00	3,61
R. Insular	San Cristóbal	4,72	1,00	4,72	5,44	1,00	5,44	5,92	1,00	5,92	5,58	1,00	5,58



Regiones	Localidad	Mayo			Junio			Julio			Agosto		
		Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)
Localidades con Máxima Radiación													
Costa	Guayaquil	4,50	1,00	4,50	3,86	1,00	3,86	4,17	1,00	4,17	4,50	1,00	4,50
Sierra	Quito	4,83	1,00	4,83	4,69	1,00	4,69	5,53	1,00	5,53	5,47	1,00	5,47
Oriente	San Simón	4,28	1,00	4,28	4,17	1,00	4,17	4,89	1,00	4,89	5,00	1,00	5,00
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	5,97	1,00	5,97	5,25	1,00	5,25	4,91	1,00	4,91	4,88	1,00	4,88
Localidades con Mínima Radiación													
Costa	Santa Rosa	3,69	1,00	3,69	2,94	1,00	2,94	3,13	1,00	3,13	3,06	1,00	3,06
Sierra	Mindo	4,05	1,00	4,05	3,63	1,00	3,63	2,99	1,00	2,99	3,18	1,00	3,18
Oriente	Sangay	3,69	1,00	3,69	3,44	1,00	3,44	3,61	1,00	3,61	4,00	1,00	4,00
R. Insular	San Cristóbal	5,50	1,00	5,50	4,92	1,00	4,92	4,89	1,00	4,89	4,83	1,00	4,83

Regiones	Localidad	Septiembre			Octubre			Noviembre			Diciembre		
		Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)
Localidades con Máxima Radiación													
Costa	Guayaquil	4,67	1,00	4,67	4,56	1,00	4,56	4,31	1,00	4,31	4,44	1,00	4,44
Sierra	Quito	4,89	1,00	4,89	5,25	1,00	5,25	5,14	1,00	5,14	5,14	1,00	5,14
Oriente	San Simón	4,58	1,00	4,58	4,75	1,00	4,75	4,58	1,00	4,58	4,61	1,00	4,61
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	4,68	1,00	4,68	4,81	1,00	4,81	4,88	1,00	4,88	4,86	1,00	4,86
Localidades con Mínima Radiación													
Costa	Santa Rosa	2,85	1,00	2,85	2,79	1,00	2,79	2,64	1,00	2,64	3,46	1,00	3,46
Sierra	Mindo	3,02	1,00	3,02	3,36	1,00	3,36	3,17	1,00	3,17	3,71	1,00	3,71
Oriente	Sangay	4,00	1,00	4,00	4,25	1,00	4,25	4,08	1,00	4,08	3,81	1,00	3,81
R. Insular	San Cristóbal	4,58	1,00	4,58	4,86	1,00	4,86	4,97	1,00	4,97	4,86	1,00	4,86

**Tabla 29.** Radiación para Escenario 2: $\alpha=0^\circ$ y $p=10^\circ$ **Fuente:** Elaboración Propia.

Regiones	Localidad	Enero			Febrero			Marzo			Abril		
		Gdm(0)	K	Gdm(α,p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α,p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α,p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α,p) kWh/(m ² día)
Localidades con Máxima Radiación													
Costa	Guayaquil	4,00	0,93	3,72	4,17	0,96	4,00	4,67	0,99	4,62	4,58	1,02	4,67
Sierra	Quito	4,94	1,03	5,09	4,64	1,01	4,69	4,78	0,99	4,73	4,53	0,96	4,35
Oriente	San Simón	4,14	0,93	3,85	4,06	0,96	3,90	4,36	0,99	4,32	4,11	1,02	4,19
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	4,96	0,93	4,61	5,68	0,96	5,45	6,44	0,99	6,38	6,21	1,02	6,33
Localidades con Mínima Radiación													
Costa	Santa Rosa	2,77	0,93	2,58	3,04	0,96	2,92	3,77	0,99	3,73	4,03	1,03	4,15
Sierra	Mindo	3,91	1,03	4,03	4,23	1,01	4,27	4,17	0,99	4,13	4,81	0,96	4,62
Oriente	Sangay	3,47	0,93	3,23	3,47	0,96	3,33	3,75	0,99	3,71	3,61	1,02	3,68
R. Insular	San Cristóbal	4,72	0,93	4,39	5,44	0,96	5,22	5,92	0,99	5,86	5,58	1,02	5,69



Regiones	Localidad	Mayo			Junio			Julio			Agosto		
		Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)
Localidades con Máxima Radiación													
Costa	Guayaquil	4,50	1,04	4,68	3,86	1,05	4,05	4,17	1,04	4,34	4,50	1,02	4,59
Sierra	Quito	4,83	0,93	4,49	4,69	0,92	4,31	5,53	0,93	5,14	5,47	0,95	5,20
Oriente	San Simón	4,28	1,04	4,45	4,17	1,05	4,38	4,89	1,04	5,09	5,00	1,02	5,10
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	5,97	1,04	6,21	5,25	1,04	5,46	4,91	1,03	5,06	4,88	1,02	4,98
Localidades con Mínima Radiación													
Costa	Santa Rosa	3,69	1,05	3,87	2,94	1,05	3,09	3,13	1,04	3,26	3,06	1,02	3,12
Sierra	Mindo	4,05	0,93	3,77	3,63	0,92	3,34	2,99	0,93	2,78	3,18	0,95	3,02
Oriente	Sangay	3,69	1,04	3,84	3,44	1,05	3,61	3,61	1,04	3,75	4,00	1,02	4,08
R. Insular	San Cristóbal	5,50	1,04	5,72	4,92	1,04	5,12	4,89	1,03	5,04	4,83	1,02	4,93

Regiones	Localidad	Septiembre			Octubre			Noviembre			Diciembre		
		Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)
Localidades con Máxima Radiación													
Costa	Guayaquil	4,67	0,99	4,62	4,56	0,96	4,38	4,31	0,93	4,01	4,44	0,92	4,08
Sierra	Quito	4,89	0,99	4,84	5,25	1,02	5,36	5,14	1,04	5,35	5,14	1,04	5,35
Oriente	San Simón	4,58	0,99	4,53	4,75	0,96	4,56	4,58	0,93	4,26	4,61	0,92	4,24
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	4,68	0,99	4,63	4,81	0,96	4,62	4,88	0,93	4,54	4,86	0,92	4,47
Localidades con Mínima Radiación													
Costa	Santa Rosa	2,85	0,99	2,82	2,79	0,96	2,68	2,64	0,94	2,48	3,46	0,93	3,22
Sierra	Mindo	3,02	0,99	2,99	3,36	1,02	3,43	3,17	1,04	3,30	3,71	1,04	3,86
Oriente	Sangay	4,00	0,99	3,96	4,25	0,96	4,08	4,08	0,93	3,79	3,81	0,92	3,51
R. Insular	San Cristóbal	4,58	0,99	4,53	4,86	0,96	4,67	4,97	0,93	4,62	4,86	0,92	4,47

**Tabla 30.** Radiación para Escenario 3: $\alpha=0^\circ$ y $p=15^\circ$ **Fuente:** Elaboración Propia.

Regiones	Localidad	Enero			Febrero			Marzo			Abril		
		Gdm(0)	K	Gdm(α,p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α,p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α,p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α,p) kWh/(m ² día)
Localidades con Máxima Radiación													
Costa	Guayaquil	4,00	0,89	3,56	4,17	0,93	3,88	4,67	0,98	4,58	4,58	1,02	4,67
Sierra	Quito	4,94	1,04	5,14	4,64	1,01	4,69	4,78	0,97	4,64	4,53	0,92	4,17
Oriente	San Simón	4,14	0,89	3,68	4,06	0,93	3,78	4,36	0,98	4,27	4,11	1,02	4,19
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	4,96	0,88	4,36	5,68	0,92	5,23	6,44	0,97	6,25	6,21	1,02	6,33
Localidades con Mínima Radiación													
Costa	Santa Rosa	2,77	0,89	2,47	3,04	0,93	2,83	3,77	0,98	3,69	4,03	1,03	4,15
Sierra	Mindo	3,91	1,04	4,07	4,23	1,01	4,27	4,17	0,97	4,04	4,81	0,92	4,43
Oriente	Sangay	3,47	0,89	3,09	3,47	0,93	3,23	3,75	0,98	3,68	3,61	1,02	3,68
R. Insular	San Cristóbal	4,72	0,88	4,15	5,44	0,92	5,00	5,92	0,97	5,74	5,58	1,02	5,69



Regiones	Localidad	Mayo			Junio			Julio			Agosto		
		Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)
Localidades con Máxima Radiación													
Costa	Guayaquil	4,50	1,05	4,73	3,86	1,06	4,09	4,17	1,05	4,38	4,50	1,02	4,59
Sierra	Quito	4,83	0,88	4,25	4,69	0,87	4,08	5,53	0,88	4,87	5,47	0,92	5,03
Oriente	San Simón	4,28	1,05	4,49	4,17	1,06	4,42	4,89	1,05	5,13	5,00	1,02	5,10
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	5,97	1,05	6,27	5,25	1,06	5,57	4,91	1,04	5,11	4,88	1,01	4,93
Localidades con Mínima Radiación													
Costa	Santa Rosa	3,69	1,06	3,91	2,94	1,06	3,12	3,13	1,05	3,29	3,06	1,02	3,12
Sierra	Mindo	4,05	0,88	3,56	3,63	0,87	3,16	2,99	0,88	2,63	3,18	0,92	2,93
Oriente	Sangay	3,69	1,05	3,87	3,44	1,06	3,65	3,61	1,05	3,79	4,00	1,02	4,08
R. Insular	San Cristóbal	5,50	1,05	5,78	4,92	1,06	5,22	4,89	1,04	5,09	4,83	1,01	4,88

Regiones	Localidad	Septiembre			Octubre			Noviembre			Diciembre		
		Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)
Localidades con Máxima Radiación													
Costa	Guayaquil	4,67	0,98	4,58	4,56	0,93	4,24	4,31	0,89	3,84	4,44	0,87	3,86
Sierra	Quito	4,89	0,97	4,74	5,25	1,02	5,36	5,14	1,05	5,40	5,14	1,05	5,40
Oriente	San Simón	4,58	0,98	4,49	4,75	0,93	4,42	4,58	0,89	4,08	4,61	0,87	4,01
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	4,68	0,97	4,54	4,81	0,93	4,47	4,88	0,89	4,34	4,86	0,87	4,23
Localidades con Mínima Radiación													
Costa	Santa Rosa	2,85	0,98	2,79	2,79	0,93	2,59	2,64	0,89	2,35	3,46	0,88	3,04
Sierra	Mindo	3,02	0,97	2,93	3,36	1,02	3,43	3,17	1,05	3,33	3,71	1,05	3,90
Oriente	Sangay	4,00	0,98	3,92	4,25	0,93	3,95	4,08	0,89	3,63	3,81	0,87	3,31
R. Insular	San Cristóbal	4,58	0,97	4,44	4,86	0,93	4,52	4,97	0,89	4,42	4,86	0,87	4,23

**Tabla 31.** Radiación para Escenario 4: $\alpha=0^\circ$ y $p=20^\circ$ **Fuente:** Elaboración Propia.

Regiones	Localidad	Enero			Febrero			Marzo			Abril		
		Gdm(0)	K	Gdm(α,p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α,p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α,p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α,p) kWh/(m ² día)
Localidades con Máxima Radiación													
Costa	Guayaquil	4,00	0,84	3,36	4,17	0,89	3,71	4,67	0,96	4,48	4,58	1,02	4,67
Sierra	Quito	4,94	1,04	5,14	4,64	1,00	4,64	4,78	0,95	4,54	4,53	0,88	3,99
Oriente	San Simón	4,14	0,84	3,48	4,06	0,89	3,61	4,36	0,96	4,19	4,11	1,02	4,19
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	4,96	0,83	4,12	5,68	0,88	5,00	6,44	0,95	6,12	6,21	1,01	6,27
Localidades con Mínima Radiación													
Costa	Santa Rosa	2,77	0,84	2,33	3,04	0,89	2,71	3,77	0,96	3,62	4,03	1,02	4,11
Sierra	Mindo	3,91	1,04	4,07	4,23	1,00	4,23	4,17	0,95	3,96	4,81	0,88	4,23
Oriente	Sangay	3,47	0,84	2,91	3,47	0,89	3,09	3,75	0,96	3,60	3,61	1,02	3,68
R. Insular	San Cristóbal	4,72	0,83	3,92	5,44	0,88	4,79	5,92	0,95	5,62	5,58	1,01	5,64



Regiones	Localidad	Mayo			Junio			Julio			Agosto		
		Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)
Localidades con Máxima Radiación													
Costa	Guayaquil	4,50	1,06	4,77	3,86	1,07	4,13	4,17	1,05	4,38	4,50	1,01	4,55
Sierra	Quito	4,83	0,83	4,01	4,69	0,81	3,80	5,53	0,83	4,59	5,47	0,88	4,81
Oriente	San Simón	4,28	1,06	4,54	4,17	1,07	4,46	4,89	1,05	5,13	5,00	1,01	5,05
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	5,97	1,05	6,27	5,25	1,06	5,57	4,91	1,04	5,11	4,88	1,01	4,93
Localidades con Mínima Radiación													
Costa	Santa Rosa	3,69	1,06	3,91	2,94	1,07	3,15	3,13	1,05	3,29	3,06	1,02	3,12
Sierra	Mindo	4,05	0,83	3,36	3,63	0,81	2,94	2,99	0,83	2,48	3,18	0,88	2,80
Oriente	Sangay	3,69	1,06	3,91	3,44	1,07	3,68	3,61	1,05	3,79	4,00	1,01	4,04
R. Insular	San Cristóbal	5,50	1,05	5,78	4,92	1,06	5,22	4,89	1,04	5,09	4,83	1,01	4,88

Regiones	Localidad	Septiembre			Octubre			Noviembre			Diciembre		
		Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)
Localidades con Máxima Radiación													
Costa	Guayaquil	4,67	0,96	4,48	4,56	0,89	4,06	4,31	0,84	3,62	4,44	0,82	3,64
Sierra	Quito	4,89	0,95	4,65	5,25	1,01	5,30	5,14	1,05	5,40	5,14	1,06	5,45
Oriente	San Simón	4,58	0,96	4,40	4,75	0,89	4,23	4,58	0,84	3,85	4,61	0,82	3,78
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	4,68	0,95	4,45	4,81	0,89	4,28	4,88	0,84	4,10	4,86	0,81	3,94
Localidades con Mínima Radiación													
Costa	Santa Rosa	2,85	0,96	2,74	2,79	0,90	2,51	2,64	0,85	2,24	3,46	0,83	2,87
Sierra	Mindo	3,02	0,95	2,87	3,36	1,01	3,39	3,17	1,05	3,33	3,71	1,06	3,93
Oriente	Sangay	4,00	0,96	3,84	4,25	0,89	3,78	4,08	0,84	3,43	3,81	0,82	3,12
R. Insular	San Cristóbal	4,58	0,95	4,35	4,86	0,89	4,33	4,97	0,84	4,17	4,86	0,81	3,94

**Tabla 32.** Radiación para Escenario 5: $\alpha=0^\circ$ y $p=25^\circ$ **Fuente:** Elaboración Propia.

Regiones	Localidad	Enero			Febrero			Marzo			Abril		
		Gdm(0)	K	Gdm(α,p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α,p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α,p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α,p) kWh/(m ² día)
Localidades con Máxima Radiación													
Costa	Guayaquil	4,00	0,78	3,12	4,17	0,84	3,50	4,67	0,93	4,34	4,58	1,01	4,63
Sierra	Quito	4,94	1,03	5,09	4,64	0,99	4,59	4,78	0,92	4,40	4,53	0,84	3,81
Oriente	San Simón	4,14	0,78	3,23	4,06	0,84	3,41	4,36	0,93	4,05	4,11	1,01	4,15
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	4,96	0,77	3,82	5,68	0,84	4,77	6,44	0,92	5,92	6,21	1,00	6,21
Localidades con Mínima Radiación													
Costa	Santa Rosa	2,77	0,79	2,19	3,04	0,85	2,58	3,77	0,93	3,51	4,03	1,01	4,07
Sierra	Mindo	3,91	1,03	4,03	4,23	0,99	4,19	4,17	0,92	3,84	4,81	0,84	4,04
Oriente	Sangay	3,47	0,78	2,71	3,47	0,84	2,91	3,75	0,93	3,49	3,61	1,01	3,65
R. Insular	San Cristóbal	4,72	0,77	3,63	5,44	0,84	4,57	5,92	0,92	5,45	5,58	1,00	5,58



Regiones	Localidad	Mayo			Junio			Julio			Agosto		
		Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)
Localidades con Máxima Radiación													
Costa	Guayaquil	4,50	1,06	4,77	3,86	1,07	4,13	4,17	1,04	4,34	4,50	1,00	4,50
Sierra	Quito	4,83	0,77	3,72	4,69	0,75	3,52	5,53	0,77	4,26	5,47	0,83	4,54
Oriente	San Simón	4,28	1,06	4,54	4,17	1,07	4,46	4,89	1,04	5,09	5,00	1,00	5,00
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	5,97	1,05	6,27	5,25	1,06	5,57	4,91	1,04	5,11	4,88	0,99	4,83
Localidades con Mínima Radiación													
Costa	Santa Rosa	3,69	1,06	3,91	2,94	1,07	3,15	3,13	1,05	3,29	3,06	1,00	3,06
Sierra	Mindo	4,05	0,77	3,12	3,63	0,75	2,72	2,99	0,77	2,30	3,18	0,83	2,64
Oriente	Sangay	3,69	1,06	3,91	3,44	1,07	3,68	3,61	1,04	3,75	4,00	1,00	4,00
R. Insular	San Cristóbal	5,50	1,05	5,78	4,92	1,06	5,22	4,89	1,04	5,09	4,83	0,99	4,78

Regiones	Localidad	Septiembre			Octubre			Noviembre			Diciembre		
		Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)
Localidades con Máxima Radiación													
Costa	Guayaquil	4,67	0,93	4,34	4,56	0,85	3,88	4,31	0,79	3,40	4,44	0,76	3,37
Sierra	Quito	4,89	0,92	4,50	5,25	0,99	5,20	5,14	1,04	5,35	5,14	1,06	5,45
Oriente	San Simón	4,58	0,93	4,26	4,75	0,85	4,04	4,58	0,79	3,62	4,61	0,76	3,50
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	4,68	0,92	4,31	4,81	0,85	4,09	4,88	0,78	3,81	4,86	0,75	3,65
Localidades con Mínima Radiación													
Costa	Santa Rosa	2,85	0,94	2,68	2,79	0,86	2,40	2,64	0,79	2,09	3,46	0,77	2,66
Sierra	Mindo	3,02	0,92	2,78	3,36	0,99	3,33	3,17	1,04	3,30	3,71	1,06	3,93
Oriente	Sangay	4,00	0,93	3,72	4,25	0,85	3,61	4,08	0,79	3,22	3,81	0,76	2,90
R. Insular	San Cristóbal	4,58	0,92	4,21	4,86	0,85	4,13	4,97	0,78	3,88	4,86	0,75	3,65

**Tabla 33.** Radiación para Escenario 6: $\alpha=0^\circ$ y $p=30^\circ$ **Fuente:** Elaboración Propia.

Regiones	Localidad	Enero			Febrero			Marzo			Abril		
		Gdm(0)	K	Gdm(α,p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α,p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α,p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α,p) kWh/(m ² día)
Localidades con Máxima Radiación													
Costa	Guayaquil	4,00	0,72	2,88	4,17	0,80	3,34	4,67	0,89	4,16	4,58	0,99	4,53
Sierra	Quito	4,94	1,02	5,04	4,64	0,97	4,50	4,78	0,88	4,21	4,53	0,79	3,58
Oriente	San Simón	4,14	0,72	2,98	4,06	0,80	3,25	4,36	0,89	3,88	4,11	0,99	4,07
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	4,96	0,71	3,52	5,68	0,79	4,49	6,44	0,89	5,73	6,21	0,98	6,09
Localidades con Mínima Radiación													
Costa	Santa Rosa	2,77	0,73	2,02	3,04	0,80	2,43	3,77	0,90	3,39	4,03	0,99	3,99
Sierra	Mindo	3,91	1,02	3,99	4,23	0,97	4,10	4,17	0,88	3,67	4,81	0,79	3,80
Oriente	Sangay	3,47	0,72	2,50	3,47	0,80	2,78	3,75	0,89	3,34	3,61	0,99	3,57
R. Insular	San Cristóbal	4,72	0,71	3,35	5,44	0,79	4,30	5,92	0,89	5,27	5,58	0,98	5,47



Regiones	Localidad	Mayo			Junio			Julio			Agosto		
		Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)
Localidades con Máxima Radiación													
Costa	Guayaquil	4,50	1,05	4,73	3,86	1,06	4,09	4,17	1,03	4,30	4,50	0,98	4,41
Sierra	Quito	4,83	0,71	3,43	4,69	0,68	3,19	5,53	0,70	3,87	5,47	0,78	4,27
Oriente	San Simón	4,28	1,05	4,49	4,17	1,06	4,42	4,89	1,03	5,04	5,00	0,98	4,90
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	5,97	1,04	6,21	5,25	1,05	5,51	4,91	1,03	5,06	4,88	0,97	4,73
Localidades con Mínima Radiación													
Costa	Santa Rosa	3,69	1,05	3,87	2,94	1,07	3,15	3,13	1,04	3,26	3,06	0,98	3,00
Sierra	Mindo	4,05	0,71	2,88	3,63	0,68	2,47	2,99	0,70	2,09	3,18	0,78	2,48
Oriente	Sangay	3,69	1,05	3,87	3,44	1,06	3,65	3,61	1,03	3,72	4,00	0,98	3,92
R. Insular	San Cristóbal	5,50	1,04	5,72	4,92	1,05	5,17	4,89	1,03	5,04	4,83	0,97	4,69

Regiones	Localidad	Septiembre			Octubre			Noviembre			Diciembre		
		Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)	Gdm(0)	K	Gdm(α, p) kWh/(m ² día)
Localidades con Máxima Radiación													
Costa	Guayaquil	4,67	0,90	4,20	4,56	0,80	3,65	4,31	0,73	3,15	4,44	0,69	3,06
Sierra	Quito	4,89	0,88	4,30	5,25	0,97	5,09	5,14	1,03	5,29	5,14	1,05	5,40
Oriente	San Simón	4,58	0,90	4,12	4,75	0,80	3,80	4,58	0,73	3,34	4,61	0,69	3,18
R. Insular	Puerto Baquerizo Moreno	4,68	0,89	4,17	4,81	0,80	3,85	4,88	0,72	3,51	4,86	0,69	3,35
Localidades con Mínima Radiación													
Costa	Santa Rosa	2,85	0,90	2,57	2,79	0,81	2,26	2,64	0,74	1,95	3,46	0,70	2,42
Sierra	Mindo	3,02	0,88	2,66	3,36	0,97	3,26	3,17	1,03	3,27	3,71	1,05	3,90
Oriente	Sangay	4,00	0,90	3,60	4,25	0,80	3,40	4,08	0,73	2,98	3,81	0,69	2,63
R. Insular	San Cristóbal	4,58	0,89	4,08	4,86	0,80	3,89	4,97	0,72	3,58	4,86	0,69	3,35