



EDITORIAL  
Institución Universitaria CESMAG



INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA  
CESMAG

\*ES SUJETA A INSPECCIÓN Y VIGILANCIA POR EL  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN NACIONAL

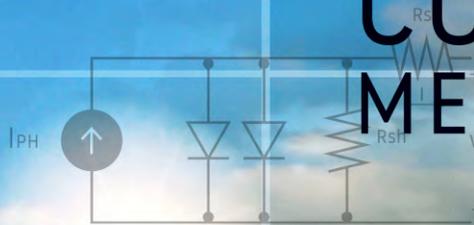
$$I = N_p \left[ -I_{PH} + I_S \left( e^{\frac{q(V_A - IR_S)}{AKT}} - 1 \right) + \frac{V_A - IR_S}{R_{SH}} \right]$$

# ENERGÍA FOTOVOLTAICA

MODELOS Y RESPUESTAS



# CONDICIONES METEOROLÓGICAS



\* *Análisis en la ciudad de Pasto - Colombia con tecnología basada en Silicio* \*



FRANCISCO JAVIER ERASO CHECA  
OLGER FERLEDY ERAZO DE LA CRUZ  
EDISSON ESCOBAR ROSERO

*Rampa*  
GRUPO INVESTIGACIÓN INGENIERÍA ELECTRÓNICA



INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA  
**CESMAG**

\*ES SUJETA A INSPECCIÓN Y VIGILANCIA POR EL  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN NACIONAL



**EDITORIAL**  
Institución Universitaria CESMAG



# ENERGÍA FOTOVOLTAICA

MODELOS Y RESPUESTAS



# CONDICIONES METEOROLÓGICAS

*\* Análisis en la ciudad de Pasto - Colombia con tecnología basada en Silicio \**

---

Eraso Checa, Francisco Javier.

Energía fotovoltaica, modelos y respuestas a condiciones meteorológicas / Francisco Javier Eraso Checa, Olger Ferdely Erazo de la Cruz, Edisson Escobar Rosero. -- 1 ed. -- San Juan de Pasto: Institución Universitaria Centro de Estudios Superiores María Goretti, 2017.

142 p.: il. ; 23,3 cm.

Incluye Bibliografía p. 121-124

ISBN: 978-958-56064-8-7

e-ISBN: 978-958-56064-9-4

DOI: 10.15658/CESMAG17.010807

1

CDD

1. Ed.

CEP - Institución Universitaria Centro de Estudios Superiores María Goretti CESMAG.

Biblioteca Remigio Fiore Fortezza.

---



INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA  
**CESMAG**  
\*ES SUJETA A INSPECCIÓN Y VIGILANCIA POR EL  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN NACIONAL

**EDITORIAL**  
Institución Universitaria CESMAG

**ENERGÍA  
FOTOVOLTAICA**  
MODELOS Y RESPUESTAS

**CONDICIONES  
METEOROLÓGICAS**

PRIMERA EDICIÓN, 2017

© Francisco Javier Eraso Checa, 2017  
© Olger Ferdely Erazo De La Cruz, 2017  
© Edisson Escobar Rosero, 2017

© Institución Universitaria CESMAG, 2017  
© Editorial Institución Universitaria CESMAG, 2017  
Bajo el Sello Editorial CESMAG



Carrera 20A No.14-54  
Tel: +572 – 7216535 Ext. 377 - 218  
E-mail: editorial@iucsmag.edu.co  
Website: www.iucsmag.edu.co/editorial  
San Juan de Pasto, Nariño, Colombia  
CP: 520003



**GRUPO DE INVESTIGACIÓN RAMPA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**PROGRAMA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**  
Carrera 20A 14-54  
Tel: +572 – 7216535 Ext. 218  
E-mail: feraso@iucsmag.edu.co  
San Juan de Pasto, Nariño, Colombia  
CP: 520003

**ISBN: 978-958-56064-8-7**  
**e-ISBN: 978-958-56064-9-4**  
**DOI: 10.15658/CESMAG17.010807**

Rector:  
Fray Próspero Arciniégas Zaldúa, OFM, Cap.

Directora editorial:  
María Eugenia Córdoba

Editores:  
Emma del Pilar Rojas Vergara  
Diego Martínez Hernández  
Emilio Acosta Díaz

Edición impresa y digital  
Impreso y hecho en Colombia  
Printed and made in Colombia

Diseño de cubierta y diagramación:  
D.G. Daniel Portilla Flórez®, danielportillaf@hotmail.com  
Impresión:

IEEE: F. Eraso Checa, O. Erazo de la Cruz and E. Escobar Rosero, Energía fotovoltaica, modelos y respuestas a condiciones meteorológicas, 1st ed. Pasto: Institución Universitaria CESMAG, 2017.  
DOI: 10.15658/CESMAG17.010807

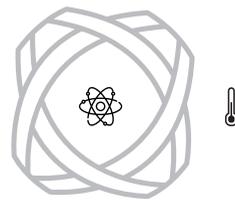


Se permite la citación del texto nombrando la fuente.



El pensamiento que se expresa en esta obra es responsabilidad exclusiva de los autores y no compromete la ideología de la Institución Universitaria CESMAG.

Todos los derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida totalmente y en partes por ningún medio mecánico, fotoquímico, electrónico, magnético, digital, fotocopia o cualquier otro, sin el permiso previo por escrito de la editorial o sus autores.



# CONTENIDO

---



AGRADECIMIENTOS	~ página ~	/ 1 /	
DEDICATORIA	~ página ~	/ 1 /	
INTRODUCCIÓN	~ página ~	/ 2 /	

## » 1

### ASPECTOS METODOLÓGICOS

- página -

/ 4 / 

---

## » 2

### ANTECEDENTES

- página -

/ 7 / 

---

2.1

/ 8 /

#### ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA

↓

2.1.1

/ 8 /

Sistema Eléctrico Nacional

2.1.2

/ 13 /

Energía solar fotovoltaica en Colombia

2.2

/ 14 /

REVISIÓN DE LITERATURA

## » 3

### FUNDAMENTOS DE METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA

- página -

/ 18 / 

---

3.1

/ 20 /

#### FENÓMENOS METEOROLÓGICOS

↓

3.1.1

/ 21 /

Nubosidad

3.1.2

/ 24 /

Viento

3.1.3

/ 25 /

Precipitación

---

3.2 / 26 /

FACTORES CLIMÁTICOS

---

↓

3.2.1 / 27 /

Temperatura

3.2.2 / 29 /

Presión atmosférica

3.2.3 / 29 /

Humedad

---

3.3 / 31 /

INSTRUMENTOS Y ESTACIONES METEOROLÓGICAS

---

↓

3.3.1 / 32 /

Estación meteorológica DAVIS Vantage Pro 2.0

3.3.2 / 35 /

Sistema de monitoreo meteorológico alternativo

3.3.3 / 38 /

Estaciones meteorológicas alternas - ESMERA.

» 4

ENERGÍA SOLAR

~ página ~

/ 41 / 

---

4.1 / 42 /

EL SOL

4.2 / 44 /

CUERPO NEGRO

4.3 / 44 /

CARACTERÍSTICAS DE LA LUZ

4.4 / 45 /

RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

---

4.5 / 46 /

RADIACIÓN SOLAR

---

↓

4.5.1 / 46 /

Masa de aire

4.5.2 / 48 /

Irradiancia

4.5.3 / 49 /

Radiación directa y difusa

4.5.4 / 50 /

Datos de radiación solar en Pasto

4.5.5 / 53 /

Insolación y brillo solar

4.6 / 55 /

LEYES FUNDAMENTALES DE LA RADIACIÓN

» 5

CELIDAS SOLARES ~ página ~ / 57 / 

---

5.1 / 58 /

CONCEPTOS BÁSICOS DE ELECTRICIDAD

5.2 / 59 /

CLASIFICACIÓN DE LAS CELIDAS SOLARES

5.3 / 61 /

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS CELIDAS SOLARES

5.4 / 70 /

PARÁMETROS DE EVALUACIÓN DE CELIDAS SOLARES

---

↓

5.4.1 / 70 /

Fill Factor

---

↓

5.4.2 / 70 /

Eficiencia de conversión

5.4.3 / 70 /

Eficiencia cuántica externa

5.5 / 71 /

TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN DE CELDAS BASADAS EN SILICIO

---

↓

5.5.1 / 71 /

Tecnología de Silicio monocristalino

5.5.2 / 73 /

Tecnología de Silicio policristalino

5.5.3 / 74 /

Tecnología de Silicio amorfo

5.6 / 76 /

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

---

↓

5.6.1 / 77 /

Tipos de sistemas fotovoltaicos

5.6.2 / 79 /

Etapas de un sistema fotovoltaico

» 6

---

ENERGÍA SOLAR

~ página ~

/ 82 / 

---

6.1 / 83 /

HERRAMIENTAS DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

---

↓

6.1.1 / 84 /

Módulos solares

6.1.2 / 86 /

Banco de pruebas

↓

6.1.3 / 87 /

Eficiencia de conversión

6.1.4 / 88 /

Componente de comunicación

6.1.5 / 88 /

Estación meteorológica

6.2 / 89 /

PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

» 7

ANÁLISIS DE RESULTADOS      ~ página ~      / 91 / 

7.1 / 92 /

POTENCIA GENERADA POR LOS MÓDULOS DE SILICIO

7.2 / 94 /

DENSIDAD POTENCIA GENERADA POR LOS MÓDULOS DE SILICIO

7.3 / 97 /

RELACIÓN IRRADIANCIA Y DENSIDAD DE POTENCIA

7.4 / 101 /

RELACIÓN TEMPERATURA Y DENSIDAD DE POTENCIA

7.5 / 103 /

RELACIÓN VELOCIDAD VIENTO Y DENSIDAD DE POTENCIA

7.6 / 105 /

RELACIÓN HUMEDAD Y DENSIDAD DE POTENCIA

7.7 / 106 /

RELACIÓN IRRADIANCIA, TEMPERATURA Y DENSIDAD DE POTENCIA

7.8 / 108 /

MODELO MATEMÁTICO

7.9

/ 114 /

EFICIENCIA DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS PARA LA CIUDAD DE PASTO

7.10

/ 117 /

FILL FACTOR PARA LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS DE PASTO

>>

CONCLUSIONES

~ página ~

/ 118 /

RECOMENDACIONES

~ página ~

/ 120 /

BIBLIOGRAFÍA

~ página ~

/ 121 /



# LISTA DE FIGURAS

---



(Figura 1).

Vista panorámica Institución Universitaria CESMAG.

/ 6 /

(Figura 2).

Composición del sector eléctrico colombiano.

/ 9 /

(Figura 3).

Capacidad efectiva de la generación de energía eléctrica en Colombia en el año 2014.

/ 11 /

(Figura 4).

Estructura de la atmósfera.

/ 20 /

(Figura 5).

Mapa de ubicación de las estaciones climatológicas del IDEAM en la ciudad de Pasto.

/ 32 /

(Figura 6).

Estación meteorológica DAVIS Vantage Pro 2.

/ 34 /

(Figura 7).

Consola Estación meteorológica DAVIS.

/ 34 /

(Figura 8).

Respuesta espectral del sensor SP-110.

/ 35 /

(Figura 9).

Respuesta en corriente del sensor GUVB-S12SD.

/ 36 /

(Figura 10).

Diagrama de bloques del sistema monitoreo meteorológico alterno de radiación, índice UV, temperatura y luminosidad.

/ 37 /

(Figura 11).

Módulo de sensado de radiación, índice UV, luminosidad y temperatura.

/ 37 /

(Figura 12).

Estructura de las estaciones meteorológicas ESMERA.

/ 38 /

>>

(Figura 13). Respuesta del sensor HS 1101. ----- / 39 /	(Figura 22). Irradiancia promedio en intervalos de una hora para la ciudad de Pasto año 2014. ----- / 53 /
(Figura 14). Estación meteorológica ESMERA. ----- / 40 /	(Figura 23). Densidad espectral de un cuerpo. ----- / 56 /
(Figura 15). Espectro Electromagnético. ----- / 45 /	(Figura 24). Eficiencia de las celdas solares NREL. ----- / 61 /
(Figura 16). Masa de aire. ----- / 46 /	(Figura 25). Diagrama de bandas de un semiconductor intrínseco. ----- / 62 /
(Figura 17). Coeficiente de transmisión p en el espectro solar. ----- / 47 /	(Figura 26). Cristales de silicio dopados tipo P y tipo N. ----- / 63 /
(Figura 18). Irradiancia Espectral a 1.5 AM. ----- / 49 /	(Figura 27). Distribución Fermi-Dirac de electrones al cero absoluto. ----- / 64 /
(Figura 19). Radiación directa y difusa. ----- / 50 /	(Figura 28). Distribución Fermi-Dirac de electrones a temperatura ambiente. ----- / 64 /
(Figura 20). Irradiancia en la ciudad de Pasto - año 2014. ----- / 51 /	(Figura 29). Diagrama de bandas para semiconductores extrínsecos. ----- / 64 /
(Figura 21). Promedio mensual de irradiancia en la ciudad de Pasto - año 2014. ----- / 52 /	(Figura 30). Unión semiconductores tipo P y tipo N. ----- / 65 /

>>

(Figura 31).

Diagrama de bandas de una unión PN.

/ 66 /

(Figura 40).

Módulo solar policristalino.

/ 74 /

(Figura 32).

Unión PN en corto circuito.

/ 66 /

(Figura 41).

Banda prohibida directa.

/ 74 /

(Figura 33).

Característica de I-V para una celda fotovoltaica.

/ 67 /

(Figura 42).

Estructura atómica Silicio Amorfo.

/ 74 /

(Figura 34).

Circuito equivalente de una celda solar.

/ 68 /

(Figura 43).

Módulo de Silicio amorfo de película delgada.

/ 75 /

(Figura 35).

Estructura atómica Silicio monocristalino.

/ 71 /

(Figura 44).

Configuración Substrato para una Celda de Silicio Amorfo.

/ 76 /

(Figura 36).

Banda prohibida indirecta.

/ 72 /

(Figura 45).

Configuración Súper estado para una Celda de Silicio Amorfo.

/ 76 /

(Figura 37).

Estructura de una celda de Silicio monocristalina.

/ 72 /

(Figura 46).

Sistema fotovoltaico aislado (stand alone).

/ 77 /

(Figura 38).

Módulo solar monocristalino.

/ 73 /

(Figura 47).

Sistema fotovoltaico con conexión a la red.

/ 78 /

(Figura 39).

Estructura atómica Silicio policristalino.

/ 74 /

(Figura 48).

Módulo y celdas fotovoltaicas policristalinas.

/ 79 /

>>

(Figura 49). Regulador solar. -----	/ 80 /	(Figura 58). Módulos de comunicación inalámbrica Zigbee a 900 Mhz. -----	/ 88 /
(Figura 50). Banco de baterías. -----	/ 80 /	(Figura 59). Interfaz de usuario del programa de monitoreo ESMERA. -----	/ 90 /
(Figura 51). Sistema de adquisición de datos. -----	/ 83 /	(Figura 60). Comportamiento mensual promedio de la potencia generada por los módulos fotovoltaicos con un ángulo de inclinación de 45° año 2014. -----	/ 92 /
(Figura 52). Sistema de recolección de información meteorológica RAMPA. -----	/ 84 /	(Figura 61). Potencia promedio generada por los módulos fotovoltaicos con un ángulo inclinación de 45° año 2014. -----	/ 94 /
(Figura 53). Muestra de módulos fotovoltaicos. -----	/ 86 /	(Figura 62). Densidad de potencia promedio generada por los módulos fotovoltaicos con un ángulo inclinación de 45° año 2014. -----	/ 95 /
(Figura 54). Diagrama esquemático del banco de pruebas. -----	/ 86 /	(Figura 63). Densidad de potencia generada por cada módulo fotovoltaico por semestre con un ángulo inclinación de 45° año 2014. -----	/ 96 /
(Figura 55). Banco de pruebas. -----	/ 86 /	(Figura 64). Densidad de potencia generada por intervalos de una hora, por tecnología fotovoltaica con un ángulo inclinación de 45° año 2014. -----	/ 96 /
(Figura 56). Respuesta del sensor ACS714-05B. -----	/ 87 /	(Figura 65). Relación entre irradiancia y densidad de potencia de la tecnología monocristalina. -----	/ 98 /
(Figura 57). Sistema de monitoreo de voltaje y corriente. -----	/ 88 /	(Figura 66). Relación entre irradiancia y densidad de potencia de la tecnología policristalina. -----	/ 99 /

>>

(Figura 67).

Relación entre irradiancia y densidad de potencia de la tecnología amorfa. / 100 /

---

(Figura 68).

Relación entre temperatura del módulo y densidad de potencia de la tecnología monocristalina. / 102 /

---

(Figura 69).

Relación entre temperatura del módulo y densidad de potencia de la tecnología policristalina. / 102 /

---

(Figura 70).

Relación entre temperatura del módulo y densidad de potencia de la tecnología amorfa. / 103 /

---

(Figura 71).

Relación entre velocidad del viento y densidad de potencia de la tecnología monocristalina. / 104 /

---

(Figura 72).

Relación entre velocidad del viento y densidad de potencia de la tecnología policristalina. / 104 /

---

(Figura 73).

Relación entre velocidad del viento y densidad de potencia de la tecnología amorfa. / 104 /

---

(Figura 74).

Relación entre humedad relativa y densidad de potencia de la tecnología monocristalina. / 105 /

---

(Figura 75).

Relación entre humedad relativa y densidad de potencia de la tecnología policristalina. / 106 /

---

(Figura 76).

Relación entre humedad relativa y densidad de potencia de la tecnología amorfa. / 106 /

---

(Figura 77).

Modelo de una celda solar con doble exponencial. / 109 /

---

(Figura 78).

Evaluación del modelo matemático para la tecnología de silicio monocristalino. / 111 /

---

(Figura 79).

Evaluación del modelo matemático para la tecnología de silicio policristalino. / 111 /

---

(Figura 80).

Evaluación del modelo matemático para la tecnología de silicio amorfo. / 112 /

---

(Figura 81).

Relación corriente y voltaje para  $G = 391,7 \text{ W/m}^2$  y  $T = 16,8^\circ \text{ C}$  en la ciudad de Pasto para la tecnología monocristalina. / 114 /

---

(Figura 82).

Relación potencia y voltaje para  $G = 391,7 \text{ W/m}^2$  y  $T = 16,8^\circ \text{ C}$  en la ciudad de Pasto para la tecnología monocristalina. / 114 /

---

(Figura 83).

Eficiencia de las tecnologías fotovoltaicas para el año 2014. / 116 /

---



# LISTA DE CUADROS

---



(Cuadro 1).

Capacidad efectiva de la generación de energía eléctrica en Colombia en el año 2014. / 10 /

---

(Cuadro 2).

Cantidad promedio mensual de nubes (22 años) en la ciudad de Pasto. / 22 /

---

(Cuadro 3).

Porcentaje promedio mensual de la cantidad de nubes registradas cada tres horas (GMT) en la ciudad de Pasto. / 23 /

---

(Cuadro 4).

Porcentaje promedio mensual de cielo despejado registrado cada tres horas (GMT) en la ciudad de Pasto. / 23 /

---

(Cuadro 5).

Dirección del viento. / 24 /

---

(Cuadro 6).

Velocidad del viento mensual Pasto 2014. / 25 /

---

(Cuadro 7).

Precipitación en la ciudad de Pasto año 2014. / 26 /

---

(Cuadro 8).

Temperatura ambiente Pasto 2014. / 28 /

---

(Cuadro 9).

Temperatura ambiente Pasto 2014 entre las 8:00 a.m. y las 4:00 p.m. / 28 /

---

>>

(Cuadro 10). Presión atmosférica en Pasto. ----- / 29 /	(Cuadro 19). Temperatura promedio por módulo entre las 6:00 a.m. y las 6:00 p.m. para el año 2014. ----- / 101 /
(Cuadro 11). Humedad relativa en Pasto 2014. ----- / 30 /	(Cuadro 20). Parámetros A y k para las tecnologías de módulos solares basadas en silicio para las condiciones meteorológicas de Pasto en el año 2014. ----- / 110 /
(Cuadro 12). Datos de Irradiancia en la ciudad de Pasto año 2014. ----- / 52 /	(Cuadro 21). Parámetros de las tecnologías fotovoltaicas evaluadas para las condiciones de $G = 391,7 \text{ W/m}^2$ y $T = 16,8^\circ \text{ C}$ en la ciudad e Pasto. ----- / 112 /
(Cuadro 13). Promedio de radiación en intervalos de una hora - año 2014. ----- / 54 /	(Cuadro 22). Parámetros de las tecnologías fotovoltaicas evaluadas para las condiciones de $G = 212,3 \text{ W/m}^2$ y $T = 14,6^\circ \text{ C}$ en la ciudad e Pasto. ----- / 113 /
(Cuadro 14). Horas Sol para la ciudad de Pasto año 2014. ----- / 55 /	(Cuadro 23). Eficiencia de las tecnologías fotovoltaicas de acuerdo a los meses del año 2014. ----- / 115 /
(Cuadro 15). Características de los módulos evaluados. ----- / 85 /	(Cuadro 24). Eficiencia de las tecnologías fotovoltaicas de acuerdo a los semestres del año 2014. ----- / 116 /
(Cuadro 16). Irradiancia y potencia promedio entregada por los módulos fotovoltaicos en los meses del año 2014 para una inclinación de $45^\circ$ entre las 6:00 a.m. y 7:00 p.m. ----- / 93 /	(Cuadro 25). Eficiencia de las tecnologías fotovoltaicas bajo condiciones de prueba estándar (STC). ----- / 116 /
(Cuadro 17). Densidad de potencia promedio mensual generada por el sistema fotovoltaico en el año 2014. ----- / 95 /	(Cuadro 26). Fill factor de las tecnologías fotovoltaicas de acuerdo a las condiciones promedio de la ciudad de Pasto. ----- / 117 /
(Cuadro 18). Densidad de potencia promedio generada por tecnología por hora en 2014. ----- / 96 /	

>>

---

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar sus agradecimientos a la Institución Universitaria CESMAG por creer en el desarrollo del potencial energético alternativo como parte de un futuro sostenible que permite mantener nuestra calidad de vida sin comprometer al medio ambiente; porque dentro de sus principios institucionales, los avances científicos y tecnológicos contribuyen a la ecología y se ponen al servicio de la humanidad en especial de los más necesitados.

De manera especial agradecemos a la Doctora María Eugenia Córdoba y al Ingeniero Armando Quijano por su apoyo incondicional para la construcción de este trabajo, la aprobación de recursos y la divulgación de resultados.

Finalmente, damos las gracias a los estudiantes de semilleros, monitorios y pasantías de investigación, que recorrieron con nosotros este camino, sus deseos de aprendizaje los han llevado a descubrir que el conocimiento se construye a partir de pequeños aportes que conllevan un gran significado.

>>

---

## DEDICATORIA

Dedicamos con gran afecto el fruto de este esfuerzo a nuestras familias, compañeros y estudiantes quienes han sido fuente de motivación, inspiración y deseo de lucha para culminar este desarrollo investigativo.

A nuestra región, porque pensamos que el progreso de las familias que en ella habitan se construye con iniciativas que permiten crecer, vivir mejor y asegurar un futuro ambientalmente saludable para las nuevas generaciones.

A la Institución Universitaria CESMAG y sus directivos que con incondicional apoyo han permitido el desarrollo de este trabajo, que será puesto al servicio de quienes más lo necesiten.



## INTRODUCCIÓN

El crecimiento social, económico y tecnológico implica un incremento de la demanda energética de los procesos que lo soportan. No solo los países denominados desarrollados han aumentado el consumo de energía eléctrica per cápita, sino que las economías de los países emergentes evidencian un incremento de su capacidad de generación eléctrica para suplir las necesidades de los usuarios.

La importancia que tiene la energía eléctrica, está relacionada con la capacidad que ésta tiene de transformarse en otro tipo de energía utilizable en las labores cotidianas. La ley de la conservación de la energía, afirma que la energía no se crea ni se destruye sino que se transforma en otro tipo de energía, esto se evidencia cuando un proceso cinético originado en las centrales hidroeléctricas o uno térmico originado en las termoeléctricas se convierte en energía eléctrica, la cual llega a los hogares o industrias y se transforma, mediante dispositivos eléctricos o electrónicos, en energía lumínica (bombillos, luminarias), calórica (hornos, calefactores), sonora (parlantes, alarmas) o mecánica (motores).

En la actualidad, las principales fuentes de energía tienen su origen en fuentes no renovables como el petróleo, el gas natural o el carbón, cuyas reservas son limitadas, tienen altos costos de producción y transporte, y generan un alto impacto ambiental (puesto que desprenden elementos contaminantes causantes del calentamiento global, la reducción de la capa de ozono y los cambios en los factores climáticos), por lo que se requiere desarrollar sistemas sustitutos a través de fuentes renovables, que permitan suplir dicha demanda de manera sostenible tanto en lo económico como en lo ambiental y social.

En la ponencia: Presente y futuro de las energías renovables en Colombia, Nelson Forero<sup>1</sup>, proyecta la producción de energía primaria en Colombia para los años 2000 a 2020, con un suministro brindado por fuentes no renovables e hidroeléctricas. Lo anterior manifiesta la necesidad de generar energía eléctrica a partir de la combinación de fuentes renovables y tecnologías económicas de fácil instalación y portabilidad, que disminuyan costos de producción y generen un bajo impacto ambiental.



<sup>1</sup> FORERO CHACÓN, Nelson.

Presente y futuro de las energías renovables en Colombia. En: Cumbre Iberoamericana de Energías Renovables (28, Septiembre a 3, Octubre, 2009: Guadalajara, Jalisco, México). Memorias: CIER, 2009. p. 3.

Las energías renovables, también conocidas como energías alternativas o limpias son aquellos tipos de energía que se obtienen de cualquier fuente natural con la capacidad de regenerarse (viento, agua de ríos, agua del mar, radiación solar) y que pueden transformarse en energía eléctrica, de esta forma la generación de electricidad a partir de estas fuentes es sostenible. El impacto ambiental de estas fuentes es mucho más positivo que el derivado del uso de fuentes no renovables.

La energía eléctrica se obtiene de diversas fuentes como:

**Energía térmica:** resultante de la quema de combustibles como carbón, petróleo, madera, etc., también del uso de mecanismos térmicos en procesos nucleares o procesos geotérmicos.

**Energía hidroeléctrica:** producida por el movimiento de agua en depósitos elevados o por el caudal de ríos y quebradas.

**Energía eólica:** proveniente de los vientos y las corrientes de aire.

**Energía solar:** basada en la energía proveniente de la luz solar.

Una de las fuentes renovables, que puede ser aprovechada en Colombia, corresponde a la energía solar fotovoltaica, pero para su estudio, se debe tener en cuenta las condiciones de tipo climático del lugar en donde se implementaran, puesto que en cada zona del planeta el funcionamiento de un mismo sistema fotovoltaico genera diferentes resultados.

Forero<sup>2</sup> afirma que el territorio nacional tiene un buen potencial energético con un promedio cercano a 4,5 kWh/m<sup>2</sup>, que no varía excesivamente durante el año, lo que permite utilizar esta energía en sistemas fotovoltaicos familiares o industriales. La ciudad de Pasto, ubicada dentro de la zona ecuatorial, posee unas condiciones de radiación solar que se encuentra dentro del promedio nacional, estas condiciones son específicas de la zona y pueden ser aprovechadas para generar energía eléctrica con una eficiencia que depende de la tecnología de celdas solares que se esté implementando. El cuantificar y comparar estos niveles energéticos permite determinar qué tipo de tecnología genera el mejor beneficio.

Existen diferentes tipos de tecnologías fotovoltaicas, que pueden clasificarse de la siguiente forma: tecnología basada en silicio puro, en este caso los módulos pueden fabricarse utilizando materiales de un solo cristal (monocristalino) o materiales formados de retazos de diversos cristales (policristalino); películas de lámina delgada, que utilizan al vidrio flexible como sustrato. Estas permiten absorber la radiación solar en materiales fabricados de cristales de silicio amorfo, telurio de cadmio, uniones de cobre, indio, galio y selenio, materiales orgánicos, materiales de los grupos tres y cinco de la tabla periódica y materiales del grupo dos y seis; la categoría final hace referencia a elementos que pretenden obtener una mayor eficiencia a bajo costo incorporan-

do nuevas tecnologías como son las celdas multiunión o los puntos de quantum.

Este trabajo permite conocer el potencial de generación de energía eléctrica que las tecnologías basadas en silicio (monocristalino, policristalino y amorfo), ofrecen en la ciudad de Pasto, a través de un estudio correlacional que involucra las variables energía eléctrica, densidad de potencia y meteorológicas. Este conocimiento, permite mejorar las potenciales implementaciones fotovoltaicas en la ciudad, disminuyendo costos de instalación y contribuyendo a disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente.

El objetivo planteado consiste en comparar la cantidad de energía eléctrica producida por diferentes tecnologías de celdas solares para las condiciones meteorológicas de la ciudad de Pasto. La caracterización meteorológica de la zona permite pronosticar el comportamiento energético mensual de las celdas solares fotovoltaicas y cuantifica la eficiencia de cada tecnología.

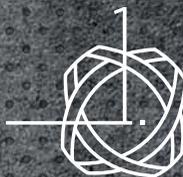
Este documento, no solamente presenta los resultados de un proceso investigativo, sino que a medida que se desarrollan los capítulos permite al lector conocer de una manera muy sencilla los diferentes principios meteorológicos que influyen en la generación de energía eléctrica fotovoltaica; explica las teorías, conceptos y funcionamiento de tecnologías fotovoltaicas; presenta una metodología de trabajo para la cuantificación y predicción de la energía eléctrica generada por sistemas fotovoltaicos basados en silicio de acuerdo a unas condiciones meteorológicas de una zona específica; desarrolla sistemas de monitoreo y evaluación meteorológicos y de potencia eléctrica; explica el comportamiento de los módulos solares mediante la generación de unos modelos matemáticos, y finalmente determina la capacidad de generación de energía eléctrica de las tecnologías fotovoltaicas para las condiciones meteorológicas de la ciudad de Pasto.

El desarrollo de este estudio fue posible gracias a la colaboración de la Institución Universitaria CESMAG que aportó de manera oportuna los recursos físicos y financieros necesarios, especialmente en lo relacionado con la adquisición de la estación meteorológica, el sistema de módulos solares y el aseguramiento del continuo funcionamiento del sistema fotovoltaico; también gracias a los estudiantes investigadores quienes participaron activamente en la recolección de información con las actividades planteadas por los autores del libro.



<sup>2</sup> Ibid., p. 37.

» Uno



# ASPECTOS, METODOLÓGICOS



Este libro es el producto de los resultados obtenidos del estudio titulado *Comparación entre la energía eléctrica producida por diferentes tipos de tecnologías de celdas solares fotovoltaicas para las condiciones meteorológicas de la ciudad de Pasto* y la teoría que permite comprender el funcionamiento de las celdas solares a base de silicio de manera práctica, contextualizada y fácil de interpretar para aquellos interesados en la generación y uso de energías alternativas renovables.

El proceso investigativo se enmarca dentro de un enfoque cuantitativo, que permite determinar la cantidad de energía eléctrica generada por un conjunto de celdas solares sometidas a las condiciones meteorológicas de la ciudad de Pasto, específicamente ubicadas en la terraza del edificio Holanda de la Institución Universitaria CESMAG (Figura 1), ubicada en las coordenadas 1°12' 36" latitud norte y 77° 16' 29" longitud oeste, a una altura de 2570 metros sobre el nivel del mar.

Los resultados obtenidos permitieron determinar la relación entre la generación de energía procedente de los módulos y las condiciones de la zona, las variables brindaron información numérica que fue procesada a través de un análisis estadístico que permitió determinar el comportamiento eléctrico de cada una de las tecnologías en módulos solares analizada para las condiciones meteorológicas y climatológicas de la zona. Al no manipular de manera deliberada ninguna de las variables de estudio o las intervinientes, el trabajo utiliza un diseño no experimental que además es longitudinal durante el año 2014.

Las investigaciones cuantitativas se desarrollan aplicando el método científico (empírico analítico), y este trabajo lo utilizó al realizar mediciones controladas de las variables del estudio y al utilizar regresión polinómica para analizar la relación entre dichas variables. El tipo de investigación pertinente al estudio propuesto es correlacional, puesto que permite relacionar las variables meteorológicas y climatológicas de la ciudad y la generación de potencia eléctrica de cada tecnología fotovoltaica, generando un modelo matemático capaz de predecir la potencia eléctrica de la zona, de acuerdo a la época del año.

La ruta metodológica recorrida inició con la identificación y definición de las variables meteorológicas que influyen en la generación de energía eléctrica a partir de fuentes fotovoltaicas, luego se definen las tecnologías de celdas solares fotovoltaicas a base de silicio, y se incluye una revisión teórica de las mismas, en cuanto a su fabricación y principio de funcionamiento.





>> (Figura 1)

Vista panorámica Institución Universitaria CESMAG.

Los datos meteorológicos se obtuvieron mediante el uso de un sistema redundante compuesto por la estación meteorológica DAVIS Vantage Pro2 y un conjunto de sensores de radiación solar, temperatura y humedad que cumplen con los estándares de la Organización Meteorológica Mundial definidos en el capítulo correspondiente a principios de meteorología y climatología, en donde también se encuentran los valores registrados para cada variable durante el periodo de observación. La energía producida por los módulos se calcula teniendo en cuenta la relación de potencia por unidad de tiempo. La recolección de la información se realiza en tiempo real, con un periodo de muestreo igual a 10 segundos y se almacena en una base de datos. El procesamiento de la información se lleva a cabo en un programa computacional desarrollado por el grupo de investigación y en MATLAB, mediante análisis numérico multivariable de regresión polinómica.

Además del cálculo de correlación existente entre los parámetros meteorológicos y los eléctricos generados por los módulos, se plantea un modelo matemático que representa cada tipo de tecnología, este modelo utiliza ecuaciones no lineales que no pueden ser resueltas mediante un método analítico, por lo que se resuelven utilizando el algoritmo Quasi - Newton con actualización BFGS. El modelo hace el análisis de 10.884 datos, descartando errores y datos atípicos.

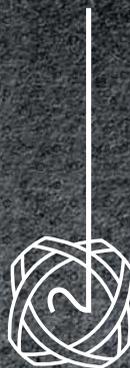
Los módulos adquiridos corresponden a una muestra de cada una de las tecnologías fotovoltaicas basados en silicio, que se ubicaron en el mismo lugar, con el mismo ángulo de inclinación con respecto a la horizontal, bajo unas mismas condiciones climáticas y que alimentaron un sistema de cargas resistivas con los mismos valores, lo que permitió hacer equiparable la comparación. También se determinó la eficiencia de conversión la cual corresponde a la relación existente entre la energía generada con respecto a la energía incidente y los parámetros de evaluación de las celdas solares.

El análisis deductivo, propio del método científico, conlleva a inferir dos hipótesis de investigación, relacionadas a continuación y que serán verificadas a lo largo de este documento:

Hipótesis de investigación 1 (Hi1): Para módulos solares monocristalinos, policristalinos o amorfos la relación de potencia entregada es directamente proporcional al nivel de radiación solar, con una correlación positiva alta y un coeficiente de correlación entre 0,8 y 0,6.

Hipótesis de investigación 2 (Hi2): La tecnología que presenta un mayor coeficiente de correlación entre potencia generada y radiación solar corresponde a la de estructuras monocristalinas.

» Dos



# ANTECEDENTES

>>

A pesar que la humanidad ha utilizado el calor y la luz solar desde el principio de su historia, solo hasta 1839, el físico francés Edmond Becquerel descubrió el efecto fotovoltaico al generar pequeñas cantidades de corriente eléctrica cuando exponía dos electrodos metálicos, sumergidos en una solución conductora, a la luz solar. Maggi<sup>3</sup> recuerda que Hertz en el año 1887, observó electrones emitidos por una superficie metálica bajo acción de la luz, pero no logró demostrar el las causas del fenómeno, por no contar con las herramientas necesarias.

Los estudios formales orientados al aprovechamiento de la energía solar en la época actual inician aproximadamente en los años cincuenta motivados por encontrar una fuente de alimentación para las naves de exploración satelital. Para el año de 1954 se emplearon módulos solares en las naves espaciales, mientras que las aplicaciones terrestres se desarrollan a partir de los años setenta.

En el año de 1960, William Shockley y otros autores, explican el componente teórico del funcionamiento de las celdas solares. Montes<sup>4</sup>, caracteriza dichos aspectos, como: materiales, espectro de radiación, temperatura, termodinámica y eficiencia.

En 1980 la industria desarrolló las tecnologías de celdas de unión PN basadas en silicio, y aparecen compañías en Norteamérica, Europa y Japón.



<sup>3</sup> MAGGI, Sebastián Andrés.

Modelamiento térmico de un panel fotovoltaico con disipador de calor operando en el norte de Chile. Trabajo de grado de Ingeniería Civil y Mecánica. Santiago: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Mecánica, 2013. p. 7.

<sup>4</sup> ALONSO MONTES, José Ignacio et al. Energía solar fotovoltaica. Madrid: Colegio oficial de ingenieros de telecomunicación, 2007. p. 3.



>>

7 / 8

~ página ~

## 2.1.

# ENERGÍA ELÉCTRICA EN COLOMBIA

### 2.1.1 →

#### SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL.

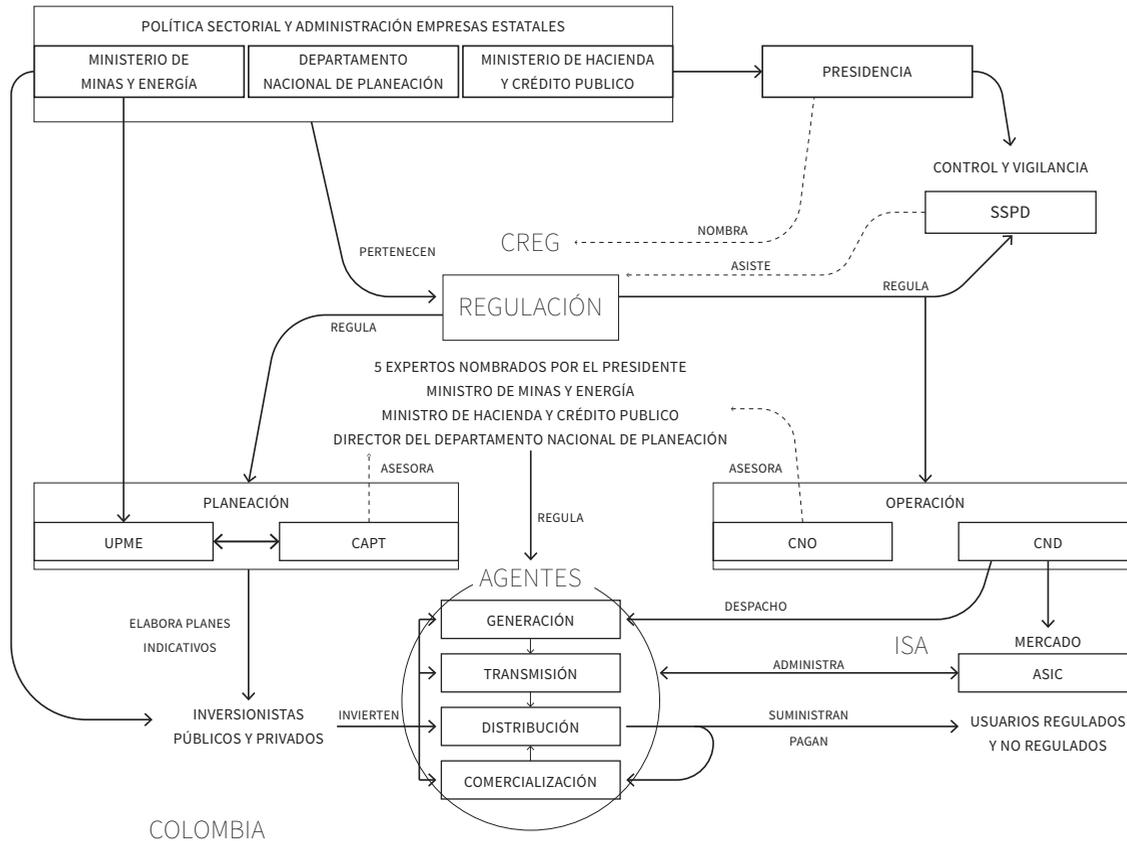
El sistema eléctrico se encuentra conformado por los eslabones de generación, transporte, comercialización, distribución y consumo de energía eléctrica, que se presentan en la Figura 3. En Colombia, estos eslabones se encuentran agrupados según la Ley 143 de 1994 dentro del Sistema Interconectado Nacional (SIN). Todas las regiones geográficas que no se encuentren cobijadas por el servicio del SIN se denominan Zonas No Interconectadas (ZNI).

>> (Figura 2)

### Composición del sector eléctrico colombiano.

FUENTE:

UPME. Una visión del mercado eléctrico colombiano. Bogotá:  
Unidad Minero Energética – República de Colombia, 2004. 21 p.



>>  
9 / 10  
página

COLOMBIA

>> E

El Sistema de Interconexión Nacional (SIN) corresponde al sistema eléctrico tendido a lo largo del país, el cual está definido por la ley<sup>5</sup> como las plantas y equipos de generación, la red de interconexión, las redes regionales e interregionales de transmisión, las redes de distribución, y las cargas eléctricas de los usuarios, en síntesis, todos los componentes de la cadena de la energía eléctrica que se utilizan en Colombia para consumo interno o para exportación.



<sup>5</sup> CONGRESO DE COLOMBIA.

Ley 143 de 1994, Capítulo 2 (en línea). En: Secretaría general del senado: 1994 (consultada: 27, Junio, 2012). Disponible en la dirección electrónica: [http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley/1994/ley\\_0143\\_1994.html](http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley/1994/ley_0143_1994.html)

Los generadores son todos aquellos actores que se encargan de producir energía eléctrica a partir de fuentes primarias las cuales pueden ser eólicas, hidráulicas, solares o térmicas; los transmisores se encargan del transporte de energía eléctrica con

niveles de tensión superiores a 220 KV; los distribuidores son aquellos actores que transportan la energía eléctrica con niveles inferiores a 220 KV y los comercializadores se encargan de comprar la energía en el mercado mayorista (transmisores y distribuidores) y la venden a los usuarios o consumidores finales que pueden ser jurídicos o naturales.

El Sistema de Interconexión Nacional (SIN) es operado por una filial de la empresa Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P (ISA) llamada XM quien además administra las transacciones de energía en Colombia (Mercado de Energía Mayorista).

El Cuadro 1, presenta las diversas fuentes generadoras de energía eléctrica en Colombia y su participación en la producción de potencia eléctrica con su respectivo porcentaje para el año 2014.

(Cuadro 1)

Capacidad efectiva de la generación de energía eléctrica en Colombia en el año 2014.

FUENTE:

XM S.A. E.S.P. Informe de operación del SIN y administración del mercado (en línea). En: Informes anuales XM. (Consultada: 26, octubre, 2015). Disponible en la dirección electrónica: <http://informesanuales.xm.com.co/2014/SitePages/operacion/2-6-Capacidad-efectiva-neta.aspx>.

FUENTE	CAPACIDAD MW	CAPACIDAD PORCENTUAL
<b>Hidráulica</b>	10.315	66,59%
<b>Térmica</b>		
Gas	1.757	11,34%
Carbón	1.003	6,48%
Fuel Oil	1.023	6,60%
Combustóleo	297	1,92%
Jet 1	322	2,08%
<b>Otros</b>		
PCH	585	3,78%
Eólica	18	0,12%
Biomasa	91	0,59%
Solar Fotovoltaica	0,96	0,0062%
Cogeneradores y Autoprodutores	77	0,50%
<b>Total</b>	15.490	100%

La generación de energía eléctrica en Colombia obedece a diferentes fuentes de origen renovable y no renovable cuyos datos estadísticos se encuentran documentados en la descripción del sistema eléctrico colombiano que presenta XM es su página de internet.

De acuerdo a XM<sup>6</sup> la capacidad efectiva neta instalada del SIN al finalizar el año 2014 fue de 15.490 MW, siendo la fuente hidráulica la de mayor participación con un 66,59% del total nacional y presentando un aumento de 10,7% con respecto al año 2013, debido principalmente, a la entrada en operación de la central Hidrosogamoso. Esto demuestra la dependencia nacional de las centrales hidroeléctricas, las cuales no tienen efectos contaminantes de manera directa, razón por la cual se clasifican como fuentes renovables o limpias, pero que en su proceso de implementación desvían el curso natural de los ríos afectando ecosistemas, erosionando los suelos, y modificando las condiciones de vida de la población en estas zonas.



<sup>6</sup> XM S.A. E.S.P.

Descripción del Sistema eléctrico Colombiano (en línea). En: Portal Energético. (Consultada: 28, junio, 2015). Disponible en la dirección electrónica: <http://www.xm.com.co/Pages/DescripciondelSistemaElectricoColombiano.aspx>.

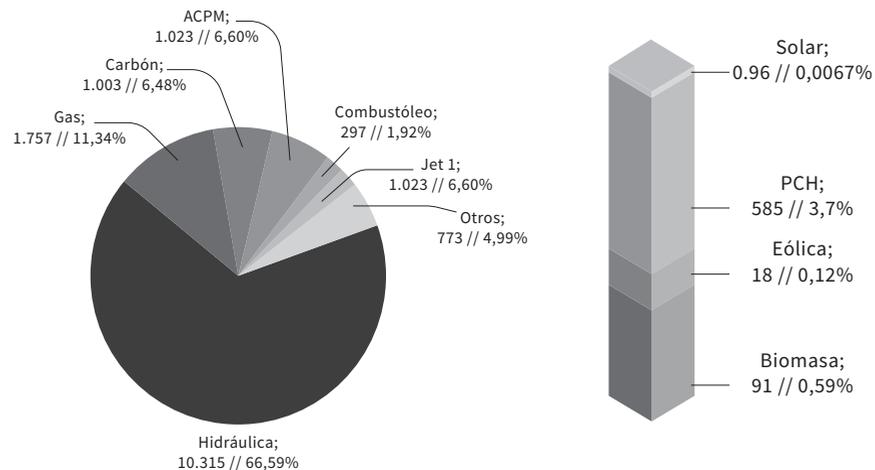
El 28,42 % de la generación de energía eléctrica en Colombia obedece a fuentes térmicas, principalmente a la obtenida por la combustión de gas sea natural o propano, la cual participa con un 11,34% de la capacidad efectiva total colombiana como se observa en la Figura 4. La participación de otro tipo de combustibles (carbón, gasolina u otros derivados del petróleo), corresponden al 17,08%, lo que evidencia una baja dependencia energética de hidrocarburos y significa que los niveles de contaminación atmosférica en Colombia son muy bajos comparados con naciones que dependen en mayor cantidad de este tipo de combustibles.

Los cogeneradores y autoprodutores tienen una participación del 0,5%, lo que se traduce en una producción de 77 MW. La CREG<sup>7</sup> define a los cogeneradores como aquellos productores que combinan procesos eléctricos y térmicos como parte de su actividad productiva, destinados al consumo propio o de terceros. En síntesis, el proceso de cogeneración se presenta en aquellas industrias que desarrollan procesos térmicos a base de vapor de agua, originados en equipos como calderas, este vapor puede ser utilizado en la producción de energía eléctrica, que se puede comercializar en el caso de obtener excedentes.

>> (Figura 3)



Capacidad efectiva de la generación de energía eléctrica en Colombia en el año 2014.



>>

11 / 12

~ página ~



<sup>7</sup> CREG,

Comisión de regulación de energía y gas. Resolución 085 de 1996 (en línea). En: Apolo: 1996 (consultada: 9, Julio, 2012). Disponible en la dirección electrónica:

<http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/Indice01/Resoluci%C3%B3n-1996-CRG85-96>.

Los autoprodutores o autogeneradores están definidos por la CREG<sup>8</sup> como aquella persona natural o jurídica que produce energía eléctrica exclusivamente para atender sus propias necesidades. Por lo tanto, no usa la red pública para fines distintos al de obtener respaldo del SIN, y puede o no, ser el propietario del sistema de generación. Dentro de esta definición no se especifica el método utilizado por el generador para producir su propia electricidad, pero si hace excluyente la capacidad de comercializarla, es decir que la energía producida solo es para el autoconsumo.

En la Figura 4, también se presenta una participación del 4,99%, por parte de otras fuentes de energía eléctrica, estas son generadas por fuentes renovables, tales como las fuentes eólicas (0,12%), la biomasa (0,59%) que ha tenido un incremento casi del 20% con respecto al año 2009, las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (3,78%) denominadas PCH por sus siglas y hacen referencia a hidroeléctricas que aprovechan el curso normal de los ríos sin necesidad de desviarlos ni de construir embalses, finalmente se tiene a la energía solar fotovoltaica (0,0067%) con una participación casi despreciable por ser poco explotada en el país, con usos orientados principalmente a sistemas de comunicación remota en zonas no interconectadas.

En cuanto al consumo potencial en las Zonas No Interconectadas (ZNI), existen unos cifras extraídas por Guacaneme<sup>9</sup> del Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas (IPSE), en las que se evidencia que las ZNI de Colombia agrupan 114.232 usuarios conectados, con una capacidad instalada de 112 MW, soportadas por un parque de generación de más de 199.629,3 kW basado en plantas diésel, lo que denota un buen nicho de trabajo para la implementación de energías alternativas, no solo como factor de prestación de un servicio, sino como un agente que minimice el impacto contaminante que se desprende del actual uso de plantas diésel.

El costo por Kilovatio hora que paga un usuario final en una zona interconectada tiene un promedio de \$1.200, es aproximadamente tres veces superior al que se tiene dentro del SIN, el cual equivale a \$346.

Para el año 2012, el IPSE y la UPME, tienen datos de 1.441.799 personas dentro de las zonas no interconectadas, de estas 425.937 personas no tienen acceso a plantas eléctricas.

Las zonas priorizadas por el gobierno para ser intervenidas y mejorar el servicio de energía eléctrica se encuentran en Amazonas, Nariño y Cauca.



<sup>8</sup> CREG,

Comisión de regulación de energía y gas. Resolución 084 de 1996 (en línea). En: Apolo: 1996 (consultada: 21, Septiembre, 2012). Disponible en la dirección electrónica:

<http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/Indice01/Resoluci%C3%B3n-1996-CRG84-96>.

<sup>9</sup> GUACANEME MORENO, Javier Anotonio; TRUJILLO RODRÍGUEZ, César Leonardo; PEÑA SUESCA, Rafael Antonio.

Generación híbrida de energía eléctrica como alternativa para zonas no interconectadas. En: Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá. Junio, 2007.

## 2.1.2 →

### ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN COLOMBIA

Las primeras implementaciones relacionadas con energía solar en Colombia se enfocaron en aplicaciones térmicas, especialmente utilizadas para el calentamiento de agua para uso doméstico, industrial o recreacional.

La generación de electricidad a partir de fuentes solares empleando sistemas fotovoltaicos se ha utilizado en Colombia desde principios de los años ochenta especialmente en lugares rurales no interconectadas, según Rodríguez<sup>10</sup>, en estos sitios, generalmente remotos, los altos costos del combustible, la operación y mantenimiento, hacen que la energía solar resulte más económica y confiable en el largo plazo. Este tipo de desarrollos se ha llevado a cabo con apoyo del Fondo Financiero para la Energización de Zonas no Interconectadas (FAZNI), creado mediante el decreto reglamentario 1124 de 2008 y enmarcado en la Ley 633 de 2000 y el IPSE.

También es de uso común la implementación de sistemas fotovoltaicos para equipos de comunicaciones ubicados en zonas apartadas del SIN y cuyo consumo de potencia es relativamente bajo.

De acuerdo a un estudio desarrollado por la Fundación PESENC<sup>11</sup> en el año 1995, los sistemas fotovoltaicos sumaban una capacidad de generación de potencia de 2.05MW, utilizados en sistemas de telecomunicaciones (843,6 kW) y en electrificación rural (953,5 kW). De los sistemas implementados se encontraron fallos el 45% de los mismos, debido principalmente a falta de mantenimiento, remplazo de partes o por ser sistemas sub-dimensionados. Al cruzar esta información con los datos de XM para el año 2012 se observa como los sistemas de generación de energía solar fotovoltaica en Colombia documentados, no superan los 960 kW, lo que indica que no ha habido un avance significativo en este campo y por el contrario se han dejado de utilizar sistemas implementados en los años ochenta.



»

13 / 14  
« página »



<sup>10</sup> RODRIGUEZ MURCIA, Humberto.

Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. En: Revista de Ingeniería, Universidad de los Andes. Bogotá. Enero, 2009, no. 28, p. 86.

<sup>11</sup> FUNDACIÓN PESENC.

Evaluación de sistemas fotovoltaicos en Colombia. Bogotá: INEA (Instituto de Ciencias nucleares y energías alternativas). Citado por: RODRIGUEZ MURCIA, Humberto. Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. En: Revista de Ingeniería Universidad de los Andes. Bogotá. Enero, 2009. No. 28, p. 86

»

## 2.2.

# REVISIÓN DE LITERATURA

Diferentes autores han trabajado caracterizaciones climatológicas en diferentes lugares y comportamientos de sistemas fotovoltaicos. En esta sección se revisan algunas referencias relacionadas con estos temas. El camino metodológico, relacionado con la adquisición de información y su posterior análisis, se basó en las experiencias de estos autores.

- Caracterización de condiciones meteorológicas en El Salvador. García<sup>12</sup> presenta un análisis de los valores meteorológicos de las variables viento, precipitación y temperatura que fueron registradas por el Centro de predicción ambiental (NCEP), el laboratorio de sistemas de visualización del recurso aire y el centro nacional de investigación atmosférica (NCAR) durante los años 1970 y 2002 en la República de El Salvador.

El estudio analiza las variables en las principales ciudades de El Salvador, utilizando cinco estaciones meteorológicas en las regiones de Acajutla, La Unión, El Papalón (San Miguel), Izalco (Sonzonate) y Santa Ana (El Palmar) con un intervalo de tres mediciones diarias (7:00 horas, 14:00 horas y 21:00 horas), los datos recopilados durante los años mencionados se promediaron de acuerdo a cada uno de los meses del año en cada una de las zonas, dejando entrever la ocurrencia de patrones similares con diferencias asociadas al incremento de la infraestructura en las ciudades.

- Caracterización de estados de tiempo en el suroeste bonaerense. Argentina. Trabajo desarrollado en la Universidad Nacional del sur Bahía Blanca, que hace parte del proyecto titulado La geografía física del sur de la provincia de Buenos Aires. Relaciones del hombre y el medio natural, y desarrolla una caracterización de las variables temperatura, presión y precipitación determinando la frecuencia de cada una de estas. Este estudio utiliza las cartas de tiempo proporcionadas por el Servicio meteorológico nacional y toma datos de una única estación meteorológica situada en el centro de la ciudad de Punta Alta.

Según Ramos<sup>13</sup>, existe un tiempo atmosférico correspondiente al estado físico de la atmósfera en un lugar y tiempo determinado y su evolución en el corto tiempo, si bien para un mismo lugar estos estados varían cotidianamente también es cierto que se mantienen unas características concretas que permiten diferenciar unas regiones de otras, a estos rangos permanentes se les denomina el clima.

Este estudio caracterizó la presión a partir de 48 registros diarios a los cuales se les aplicó la media aritmética y se clasificó en tiempos ciclónicos (presión inferior a la media) y anticiclónicos (presión superior a la media; en cuanto a temperatura se consideró la máxima temperatura diaria y se clasificó en días que van desde los muy fríos (temperaturas inferiores a 5°C) a los muy cálidos (temperaturas superiores a los 25°C); la precipitación se dividió en días lluviosos y secos. Al analizar las tres variables en conjunto se determinaron cinco grupos de tiempo para esta región.

En consecuencia el presente trabajo, no solo tiene en cuenta las condiciones permanentes de las variables atmosféricas, sino también con los cambios que estas presentan, para ser analizados en la generación de energía eléctrica a partir de diferentes tecnologías fotovoltaicas.



<sup>12</sup> GARCIA, Luis et al. Características de las condiciones meteorológicas en el Salvador (en línea). En: Portafolio.snet (consultada: 23, Mayo, 2013). Disponible en la dirección electrónica: <http://portafolio.snet.gob.sv/digitalizacion/pdf/spa/doc00252/doc00252-seccion%20b.pdf>.

<sup>13</sup> RAMOS, María Belén y CAMPO, Alicia. Caracterización de estados de tiempo en el suroeste bonaerense, Argentina. En: Revista de Geografía Norte Grande, Vol. 40. Buenos Aires: (2008). p.87.



»

15 / 16

~ p á g i n a ~



<sup>14</sup> CÓRDOBA MACHADO, Samir et al.

Caracterización del brillo solar en Quibdó (1979 – 2003). En: Revista Institucional. Universidad Tecnológica del Chocó D.L.C. Mayo, 2005, no. 22. p. 15.

<sup>15</sup> DURÁN, Julio C.

Aunque no lo veamos el sol siempre esta. Energía Solar Fotovoltaica en la Argentina y en el mundo, actividades de la CNEA. En: Seminario, Investigación y aplicaciones “Laboratorio Tandar” (8, Abril, 2011: Buenos Aires, Argentina). Memorias: CNEA, 2011. p.3.

- Caracterización del brillo solar en Quibdó (1979-2003). Este trabajo fue desarrollado por Samir Córdoba Machado, William Murillo López, Reiner Palomino Lemus y Edison Banguero, en la Universidad Tecnológica del Chocó (UTCH), determinó la variación del brillo solar en Quibdó a través del uso de los registros del Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) ubicados en la estación sinóptica del aeropuerto el Caraño durante 24 años. Según Córdoba<sup>14</sup>, el estudio establece un promedio de horas sol/día igual a 3,48.

El brillo solar radica en su importancia en la influencia que ejerce en el clima de una región, además permite identificar de manera indirecta nubosidad y radiación solar. De acuerdo a este estudio, la mayor influencia en el brillo solar se debe a la acción de la nubosidad y en menor escala la pluviosidad o la temperatura.

- Energía solar fotovoltaica en la Argentina y en el mundo, actividades de la CNA. El investigador de la Comisión Nacional de Energía Atómica de la república de Argentina, Julio C. Durán<sup>15</sup>, explica como en condiciones similares a las de Colombia: Radiación promedio igual a 4,5 kWh/m<sup>2</sup>, se puede encontrar una eficiencia generadora de un 15% en celdas de silicio cristalinas, las aplicaciones desarrolladas se orienta a procesos espaciales, electrificación rural, agricultura y ganadería, telecomunicaciones, iluminación pública, bombeo de agua, protección catódica, monitoreo remoto, señalización (vial, férrea y marítima), productos de consumo (relojes y calculadoras), cargadores de batería, autos solares y sistemas interconectados a la red.

Durán presenta dentro de las actividades desarrolladas por la CNEA, la caracterización de un sistema de fotovoltaico integrado a la red de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires que consta de una superficie de 4.735.000 m<sup>2</sup> de módulos solares con capacidad de producir 922.800 MWh.

- Maximización de la eficiencia de un sistema de energía solar por igualación de la carga. En la Universidad de California, los investigadores Dexin Li y Pai Cho Li, llevaron a cabo esta investigación la cual expone la importancia de los sistemas solares para implementaciones de baja potencia y explica como un sistema que utiliza el método de igualación de carga a partir del teorema de la máxima transferencia de potencia, maximiza la potencia entregada a la carga en un 132% con respecto a sistemas que no controlan la resistencia de la carga y sistemas con almacenamiento de electricidad.

El desarrollo de la investigación se basa en un modelo del sistema fotovoltaico y una simulación de los factores ambientales (radiación solar, masa de aire, ángulo de incidencia del Sol y la temperatura del panel). Finalmente, el modelo solo involucra la radiación solar aduciendo que esta variable involucra los demás parámetros y las pruebas no se realizan a campo abierto sino con el sistema simulado.

Dentro del análisis que realiza Li<sup>16</sup> se indica que para plasmar un buen modelo de un sistema fotovoltaico, es necesario conocer todos los parámetros ambientales.

- Rendimiento y Fiabilidad de Sistemas Fotovoltaicos por la agencia Internacional de Energía IEA. El documento es desarrollado por Köntges<sup>17</sup>, Kurtz, Packard, Jahn, Berger, Kato, Friesen, Liu y Van Iseghem, apoyado por el Ministerio Federal de Transporte, Innovación y Tecnología de Austria, la Academia China de Ciencias y el Ministerio Federal para la Economía y Energía de Alemania, describe los procedimientos para revisar las fallas de los módulos fotovoltaicos, mediciones y el mantenimiento apropiado de los mismos para obtener un nivel de potencia apropiado, entre otros; en algunas de las mediciones descritas se tiene en cuenta la corriente en corto circuito, el voltaje en circuito abierto y otros parámetros que ilustran el rendimiento y fiabilidad de un módulo, indicando que las posibles variables que afectan la pérdida de potencia corresponden a la temperatura, la humedad, la carga mecánica, el índice UV, el ciclo térmico y el ensombrecimiento.

El documento se fundamenta en diferentes investigaciones, una de ellas denominada Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating - Part 1: Irradiance and temperature performance measurements and power rating, 2011, trabajo realizado por International Electrotechnical Commission (IEC), en el cual se describen los requerimientos para evaluar los módulos fotovoltaicos en términos de potencia generada sobre un rango de irradiancia y temperatura, además del comportamiento bajo operación de máxima potencia.

En el documento se describen las variables que afectan la potencia generada, sin indicar el modelo que permita describir el comportamiento del módulo fotovoltaico, por esta razón el presente libro aborda esta temática trabajando algunas variables climatológicas.

- Estimación De La Radiación Solar. Sixto Guevara<sup>18</sup> describe como construir un solarímetro casero para estimar la radiación solar, se describen los equipos necesarios y los procedimientos matemáticos para estimar la radiación solar en el plano horizontal, inclinado y perpendicular a los rayos solares. Una vez se determina la radiación solar instantánea se aplica el método del trapecio para determinar la radiación solar diaria.

El documento justifica la construcción de este tipo de solarímetros ya que se requiere evaluar la radiación solar en puntos específicos y no solo contar con mapas de radiación elaborados a partir de mediciones vía satélite o partir de estaciones meteorológicas que se ubican en centros poblados, información que se refiere a grandes extensiones de tierra y que para una implementación de sistemas de generación fotovoltaica generan incertidumbre la posible potencia generada.

El procedimiento matemático apropiado para estimar la radiación diaria a partir de los sensores electrónicos que generan radiación instantánea es el método del trapecio; proceso que emplea en el desarrollo del proceso investigativo y que se encuentran plasmados en el presente libro para determinar la eficiencia de los módulos fotovoltaicos y la construcción de un modelo que describa el comportamiento de los mismos bajo ciertas condiciones climatológicas.

- Determinación de la irradiación solar sobre el territorio de Cuba a partir de imágenes de satélites. La investigación desarrollada por Israel Borrajero Montejo<sup>19</sup>, Lourdes Lavastida, y Juan Carlos Peláez Chávez del Instituto de Meteorología de Cuba, describe la importancia de emplear tecnología satelital GOES, satélites ambientales geoestacionarios, para estimar la radiación solar en un determinado sitio geográfico, ya que en la isla se encuentran muy pocas estaciones heliográficas y meteorológicas.



<sup>16</sup> LI, Dexin y CHOU Pai H.

Maximizing Efficiency of Solar-Powered Systems by Load Matching. En: Symposium on Low Power Electronics and Design, 2004. ISLPED '04. Proceedings of the 2004 International (9-11, agosto, 2004: New York, Estados Unidos). Memorias. New York: IEEE, 2004. p. 166.

<sup>17</sup> KÖNTGES, Marck et al.

Performance and Reliability of Photovoltaic Systems. Subtask 3.2: Review of Failures of Photovoltaic Modules (en línea). En: engineering.case.edu (consultada: 01, Julio, 2015. Disponible en la dirección electrónica:

[http://engineering.case.edu/centers/sdle/sites/engineering.case.edu.centers.sdle/files/iea-pvps\\_t13-01\\_2014\\_review\\_of\\_failures\\_of\\_photovoltaic\\_modules\\_final.pdf](http://engineering.case.edu/centers/sdle/sites/engineering.case.edu.centers.sdle/files/iea-pvps_t13-01_2014_review_of_failures_of_photovoltaic_modules_final.pdf)

<sup>18</sup> GUEVARA, Sixto.

Estimación De La Radiación Solar (en línea). En: bvsde.ops-oms.org (consultada: 01, Julio, 2015. Disponible en la dirección electrónica: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/cosude/xxii.pdf>

<sup>19</sup> BORRAJERO MONTEJO, Israel, LAVASTIDA, Lourdes, PELÁEZ CHÁVEZ, Juan Carlos.

Determinación de la Irradiación Solar sobre el Territorio de Cuba a partir de Imágenes de Satélites (en línea). En: en.openei.org (consultada: 01, Julio, 2015. Disponible en la dirección electrónica:

<http://en.openei.org/datasets/dataset/8b74ebd2-babe-42f4-b0d2-e5e9608e7aff/resource/7e713898-18b9-40e1-b42c-b06911323de6/download/solarbysatellitecuba193.pdf>

Como Cuba adquirió una estación de alta resolución espacial y temporal, 1 km por pixel e intervalos de medición cada 15 minutos respectivamente, la información gráfica suministrada puede emplearse para la evaluación de sistemas de generación fotovoltaica como también para otras actividades agropecuarias. Para ello cuando el cielo está totalmente despejado se estima la radiación solar teórica y por medio de las imágenes satelitales visibles e infrarrojas adquiridas a las cuales se aplica un método de clasificación automática de tipos de nubes que permite estimar la radiación solar sobre la superficie del territorio.

Este método es apropiado para determinar la radiación solar en superficies no inferiores a un kilómetro cuadrado, con intervalos de adquisición de imágenes cada quince minutos, información que para obtener un modelo matemático que describa el comportamiento de un módulo fotovoltaico bajo ciertas condiciones climatológicas no es apropiado, ya que se requiere para su construcción de mediciones continuas.

- Análisis estadístico de eficiencia de distribución en 10 años de módulos fotovoltaicos comerciales basado en c-si. El autor realiza un análisis de la eficiencia obtenida por 326 módulos de silicio monocristalino y policristalino de varios fabricantes durante el periodo comprendido entre 1999 y 2008. Su objetivo consiste en comparar la eficiencia estimada en laboratorio, bajo condiciones de 1000 W/m<sup>2</sup> de irradiación a 25° C de temperatura, con respecto a dos diferentes condiciones de prueba: la primera denominada condición estándar de operación y la segunda conocida como baja irradiación.

En el desarrollo del proceso investigativo Kuitche<sup>20</sup> y sus colaboradores tienen en cuenta la relación de la densidad de empaquetamiento (PDR) dada por o el área activa sobre el área total y el total; además se observa como el coeficiente de temperatura de máximo poder se encuentra alrededor de -0,5%/°C en los módulos cristalinos de silicio. Agregan que la temperatura de operación es gobernada por la temperatura ambiente, la irradiación y la velocidad del viento.

En una de las pruebas analizan 1.550 muestras por cada módulo bajo las dos condiciones de prueba, finalmente concluyen que la tecnología monocristalina y policristalina presentan una eficiencia del 13% bajo condiciones de prueba simple y del 11% en condiciones de operación estándar.

Los investigadores mencionan la importancia que tiene la temperatura de operación en la eficiencia, de allí que sea necesario considerar en el presente estudio la medición de la temperatura ambiente, la irradiación y la velocidad del viento.

- Photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies. En este trabajo desarrollado por Gow y Mannig<sup>21</sup> se determinan tres modelos matemáticos para el comportamiento de módulos fotovoltaicos de tecnologías basadas en silicio monocristalino, policristalino y amorfo, utilizando el algoritmo Newton Raphson. La importancia de este trabajo radica en que aporta el sistema de ecuaciones que relaciona los parámetros característicos de las celdas con las variables meteorológicas y eléctricas de cada tecnología. A diferencia de este antecedente el trabajo desarrollado en este proceso investigativo utiliza el algoritmo Quasi - Newton con actualización BFGS y es alimentado por las condiciones meteorológicas del contexto analizado.



»

17 / 18

~ página ~



<sup>20</sup> KUITCHE, Joseph M et al.

Statistical Analysis of Commercial c-Si PV Module Photovoltaic Efficiency Distribution over 10-Years Period. En: Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2012 38th IEEE (3-8, junio, 2012: Austin, TX, Estados Unidos). p.2421.

<sup>21</sup> GOW J.A., MANNING C. D.

Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies. En: Electric Power Applications, IEE Proceedings-. IET. 1999. Vol146, no. 2, p. 193.



INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA  
**CESMAG**

\*ES SUJETA A INSPECCIÓN Y VIGILANCIA POR EL  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN NACIONAL



**EDITORIAL**  
Institución Universitaria CESMAG



FRANCISCO JAVIER ERASO CHECA  
OLGER FERLEDY ERAZO DE LA CRUZ  
EDISSON ESCOBAR ROSERO

# ENERGÍA FOTOVOLTAICA

MODELOS Y RESPUESTAS



## CONDICIONES METEOROLÓGICAS