



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE UN MODELO COLECTOR DE ENERGÍA A FIN DE
OPTIMIZAR EL SUMINISTRO ELÉCTRICO PARA UNA RED DE
SENSORES EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN**

Meissner Edú López Cardona

Asesorado por el Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar

Guatemala, octubre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN MODELO COLECTOR DE ENERGÍA A FIN DE
OPTIMIZAR EL SUMINISTRO ELÉCTRICO PARA UNA RED DE
SENSORES EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MEISSNER EDÚ LÓPEZ CARDONA

ASESORADO POR EL ING. CARLOS EDUARDO GUZMÁN SALAZAR

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García (a.i.)
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
EXAMINADOR	Ing. Julio César Campos Paiz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UN MODELO COLECTOR DE ENERGÍA A FIN DE OPTIMIZAR EL SUMINISTRO ELÉCTRICO PARA UNA RED DE SENSORES EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 2 de noviembre de 2018.



Meissner Edú López Cardona

Guatemala, 25 de enero de 2021

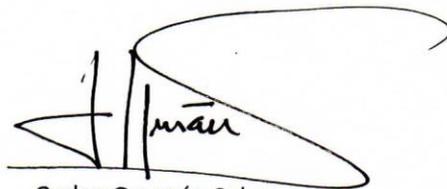
Ingeniero
Fernando Moscoso
Coordinador Área de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado ingeniero Moscoso:

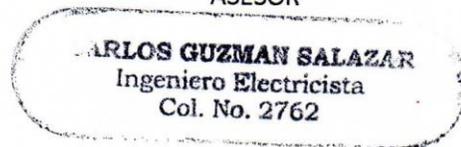
Hago de su conocimiento por este medio que he concluido la revisión del trabajo de graduación del estudiante Meissner Edú López Cardona, titulado **"DISEÑO DE UN MODELO COLECTOR DE ENERGÍA A FIN DE OPTIMIZAR EL SUMINISTRO ELÉCTRICO PARA UNA RED DE SENSORES EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN"**.

Indicando que el mismo cumple a cabalidad los objetivos propuestos en el protocolo presentado a la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica para su realización. Por lo que, **APRUEBO** el trabajo hecho por el estudiante López Cardona.

Quedo en la mejor disposición de ampliar lo referido en el párrafo precedente.
Reciba un cordial saludo.



Carlos Guzmán Salazar
ASESOR



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

Guatemala, 7 de mayo de 2021

Ingeniero
Armando Alonso Rivera Carrillo
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería USAC

Ingeniero Rivera:

Por este medio, con base a lo indicado en el REGLAMENTO DE TRABAJOS DE GRADUACION vigente, tengo a bien proponer la aprobación del trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UN MODELO COLECTOR DE ENERGÍA A FIN DE OPTIMIZAR EL SUMINISTRO ELÉCTRICO PARA UNA RED DE SENSORES EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

del estudiante Meissner Edú López Cardona, habiendo cumplido con los requisitos establecidos en el referido reglamento y conforme la aprobación del asesor.

Sin otro particular

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ingeniero Fernando Alfredo Moscoso Lira
Coordinador Área de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.





REF. EIME 144. 2021.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; MEISSNER EDÚ LÓPEZ CARDONA: DISEÑO DE UN MODELO COLECTOR DE ENERGÍA A FIN DE OPTIMIZAR EL SUMINISTRO ELÉCTRICO PARA UNA RED DE SENSORES EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN, procede a la autorización del mismo.

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo



GUATEMALA, 16 DE SEPTIEMBRE 2,021.



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

**Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101 - 24189102**

DTG. 475-2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE UN MODELO COLECTOR DE ENERGÍA A FIN DE OPTIMIZAR EL SUMINISTRO ELÉCTRICO PARA UNA RED DE SENSORES EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN**, presentado por el estudiante universitario: **Meissner Edú López Cardona**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, octubre de 2021

AACE/cc

ACTO QUE DEDICO A:

La creación

En algún momento en el tiempo todo fue posible, respirar, abrir los ojos, adquirir la sabiduría. Sé que existes, sé que por ti todo es posible y agradezco por las gratificaciones a la vida que se me permitió tener.

Mi madre

Engracia Toribia Cardona Ramírez, por su amor abnegado, su paciencia, sus consejos, no puedo encontrar forma de darte gracias por todo lo que me has dado, sin tu vida la mía no sería posible.

Mi padre

Cornelio Felipe López, su templanza, determinación y sabiduría son el mejor ejemplo que me has podido transmitir. Gracias por dejarme lo mejor de tu vida como legado. Infinitas gracias.

Mis hermanos

Edson Didier López Cardona, aunque pensamos diferente, has sido parte fundamental de mi caminar, tu ejemplo y tus consejos han forjado lo que hoy en día cosecho.

Henry Edmar López Cardona, gracias por tu apoyo y tu paciencia, sé que en algo he podido contribuir a tu camino, procurando ser un ejemplo bueno para tu vida.

Mis abuelos

María Eulalia Ramírez, Victoriano Cardona, Everarda López Bámaca, (q. e. p. d.). Un abrazo hasta el cielo.

Mis tíos

Albertina, Flory Cardona, Marta, Teresa, Nicolás Pérez, no alcanzan las líneas para agradecer a todos su apoyo y muestras de afecto, siempre agradecido con su cariño.

AGRADECIMIENTOS A:

**Tricentenaria Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Única universidad pública, baluarte de la educación superior, cuna de ilustres académicos, que hoy me permite ser parte de su historia.

Facultad de Ingeniería

Por ser el lugar de aprendizaje de mis conocimientos y destrezas con las cuales egreso de sus aulas.

Mi asesor de tesis

Ing. Carlos Eduardo Guzmán, por su importante apoyo en la culminación de este trabajo de graduación, sin su ayuda no sería posible esta meta.

Mis compañeros de la Facultad

Marlon López, William López Chugue, Juan Carlos Escobar, Rodrigo Hernández, Abner Vázquez, Wilmer Soria, por compartir cada uno de los momentos de sacrificio y alegría durante nuestra vida estudiantil.

**Mis amigos de la maestría en
Formulación y Evaluación de
Proyectos**

Viviana Sánchez, Sergio Quiñónez,
Sarahí Piril, Alejandra Arias,
Charlotte Guidos, Edgar Oliva,
Edson López, queridos
profesionales con quienes tuve el
agrado de compartir conocimientos
en un equipo multidisciplinario que
tejió lazos de amistad y
compañerismo.

Norma Magdalena Tuy

Agradecimiento especial por su
apoyo y amistad incondicional
durante la etapa inicial de mi carrera
universitaria, sin su apoyo nada de
esto fuera posible.

Mención especial

Melany Paniagua por su cariño,
Óscar López, Héctor Tzoc, mis
compañeros de trabajo, todos
aquellos que me han permitido su
confianza y amistad, mis sinceros
agradecimientos

Para ti

Sé que en algún momento estarás
como yo en esta etapa, espero te
pueda servir y ayudar mi trabajo de
graduación, ¡ánimo!

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. LAS REDES DE SENSORES EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN	1
1.1. Los antecedentes históricos de la agricultura	1
1.1.1. La agricultura convencional	2
1.1.2. La agricultura sostenible o sustentable.....	2
1.1.3. La producción integrada	3
1.1.4. La agricultura de conservación	3
1.2. La agricultura de precisión.....	4
1.2.1. Concepto de agricultura de precisión	4
1.2.2. La relación de variabilidad espacio temporal	5
1.2.3. Diferencia entre la agricultura de precisión y la agricultura convencional	5
1.3. Las etapas principales de la agricultura de precisión	6
1.4. La tecnología asociada a la agricultura de precisión	7
1.4.1. El sistema diferenciado de posicionamiento global (DGPS)	7
1.4.2. El sistema de información geográfica (GIS)	8
1.4.3. La red de sensores inalámbricos (WSN)	10

1.4.4.	La red de actuadores y monitores de rendimiento/aplicación.....	11
1.4.5.	La maquinaria inteligente	12
1.5.	La red de sensores inalámbricos WSN (<i>Wireless sensors networks</i>).....	12
1.5.1.	Arquitectura básica de una WSN	17
1.6.	Necesidad del suministro eficiente de energía a una red de sensores inalámbricos.....	18
1.7.	Formas y dimensionamiento del suministro de energía a una WSN.....	19
2.	ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS Y COMPONENTES DE UN SISTEMA COLECTOR DE ENERGÍA.....	23
2.1.	Colectores de energía	23
2.2.	Clasificación de los colectores por el medio de obtención de la energía	24
2.2.1.	Colectores de energía con base en el medio ambiente.....	25
2.2.2.	Colectores de energía por esfuerzos mecánicos	26
2.3.	Transductores	27
2.3.1.	Celdas fotovoltaicas	27
2.3.2.	Miniturbinas eólicas.....	29
2.4.	Rectificadores de señal.....	30
2.4.1.	Circuito rectificador de media onda	30
2.4.2.	Circuito rectificador de onda completa	32
2.5.	Reguladores de carga.....	33
2.5.1.	Regulador de carga tipo PWM	33
2.5.2.	Reguladores de carga tipo MPPT	34
2.6.	Almacenaje y gestión de la energía colectada	35

2.6.1.	Bancos de baterías.....	36
2.6.2.	Supercapacitores.....	41
2.7.	Inversores de voltaje	42
2.8.	Conductores eléctricos	43
2.9.	Dispositivos de protección contra sobretensiones.....	44
2.10.	Potencia eléctrica de salida	46
2.11.	Análisis de los sistemas mecánicos para los colectores de energía solar y eólico	47
2.11.1.	Sistemas mecánicos MPPT para colectores solares.....	47
2.11.1.1.	Según los componentes de movimiento	48
2.11.1.2.	Según el sistema fotovoltaico	48
2.11.1.3.	Según los grados de libertad	49
2.11.2.	Estructura básica de un sistema mecánico seguidor solar	49
2.11.2.1.	Estructura de soporte	50
2.11.2.2.	Sistema de control de movimiento.....	51
2.11.2.3.	Sistema de transmisión o de potencia	52
2.11.2.4.	Sistema de adquisición de datos	53
2.11.3.	Estrategias de control MPPT para colectores solares.....	54
2.11.3.1.	Método perturbación y observación (P&O).....	56
2.11.3.2.	Método de conductancia incremental (IC).....	57
2.11.4.	Redes circuitales para convertidores conmutados	58

2.11.4.1.	Circuito tipo Boost	59
2.11.4.2.	Circuito tipo Buck	60
2.11.4.3.	Circuito tipo Buck-Boost	61
2.11.5.	Sistemas mecánicos MPPT para microgeneradores eólicos	62
2.11.5.1.	Según la disposición del eje.....	62
2.11.5.2.	Según el tipo de generador eléctrico	67
2.11.5.3.	Según la potencia nominal suministrada	69
2.11.6.	Estructura básica de un microgenerador (AG) eólico.....	70
2.11.6.1.	Sistema de captación	71
2.11.6.2.	Sistema de transmisión mecánica.....	71
2.11.6.3.	Sistema de generación eléctrica	72
2.11.6.4.	Sistema de regulación y control	72
2.11.6.5.	Sistema de soporte	72
2.11.6.6.	Sistema de almacenamiento de la energía	73
2.11.7.	Estrategias de control MPPT para microgeneradores eólicos	74
2.11.7.1.	Sistema de control basado en la medición de la velocidad de rotación del eje.....	74
2.11.7.2.	Sistema de control basado en la medición de la velocidad del viento.....	76
3.	LA CUESTIÓN DE LA EFICIENCIA EN COLECTORES DE ENERGÍA	79
3.1.	Planteamiento del problema.....	79

3.1.1.	Definición del problema	79
3.1.2.	Delimitación del problema	80
3.1.2.1.	Límites	80
3.1.2.2.	Alcance	81
3.2.	Antecedentes.....	81
3.3.	Justificación.....	82
4.	DISEÑO DEL MODELO COLECTOR DE ENERGÍA A FIN DE OPTIMIZAR EL SUMINISTRO ELÉCTRICO PARA UNA RED DE SENSORES EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN.....	85
4.1.	Consideraciones generales del entorno de estudio.....	85
4.1.1.	Evaluación del recurso solar y eólico de la zona de estudio	85
4.1.2.	Cálculos de la demanda de potencia necesaria para la red de sensores y actuadores en la zona empleada la técnica de agricultura de precisión	87
4.1.2.1.	Consumo energético de la red de sensores por su función.....	88
4.2.	Consideraciones y cálculos de la potencia demandada	90
4.3.	Diseño del modelo colector de energía solar.....	91
4.3.1.	Consideraciones y cálculos del número de celdas solares para el modelo colector de energía	91
4.3.2.	Selección del módulo regulador de carga según estrategia de control	93
4.3.3.	Selección del sistema de almacenamiento de la energía recolectada	95
4.3.4.	Selección del inversor de voltaje del sistema	97
4.3.5.	Selección del calibre del conductor para los subsistemas del sistema colector	99

4.3.5.1.	Subsistema colector–caja de conexionado	101
4.3.5.2.	Subsistema caja de conexionado– regulador de carga	103
4.3.5.3.	Subsistema regulador de carga– batería	104
4.3.6.	Protecciones para el modelo colector de energía .	104
4.3.7.	Consideraciones de diseño mecánico para la eficiencia del modelo colector de energía	109
4.4.	Diseño del modelo colector de energía eólica.....	111
4.4.1.	Consideraciones medioambientales para la implantación del colector de energía eólica.....	111
4.4.1.1.	Altitud	112
4.4.1.2.	Temperatura y densidad del aire.....	112
4.4.1.3.	Velocidad del viento	113
4.4.2.	Consideraciones de diseño del modelo colector eólico.....	114
4.4.2.1.	Potencia nominal del colector.....	114
4.4.2.2.	Determinación de los parámetros del rotor.....	116
4.4.2.3.	Velocidad de rotación de diseño y fuerza del viento	119
4.4.2.4.	Determinación del sistema de transmisión	120
4.4.2.5.	Selección del generador eléctrico	121
4.4.2.6.	Selección del regulador de carga y el sistema de almacenamiento de la energía recolectada.....	122

4.4.2.7.	Consideraciones mecánicas para la eficiencia del modelo	124
4.5.	Propuesta de integración de los componentes del modelo colector	124
4.5.1.	Diagrama lógico general y específico de la estructura del modelo colector de energía integrando los demás componentes	124
4.5.2.	Diagrama unifilar del sistema modelo colector solar	126
4.5.3.	Diagrama unifilar modelo colector eólico	127
4.5.4.	Modelo colector solar	128
4.5.5.	Modelo colector eólico	131
5.	ANÁLISIS DE COSTOS DEL MODELO COLECTOR DE ENERGÍA ...	135
5.1.	Costos asociados a los equipos y componentes eléctricos y electrónicos del colector sugerido	135
5.2.	Costos asociados a materiales estandarizados para la estructura del colector sugerido.....	138
5.3.	Costos asociados a la mano de obra para ensamblaje de estructura.....	139
5.4.	Costos totales de los modelos de colector	140
	CONCLUSIONES	143
	RECOMENDACIONES.....	145
	BIBLIOGRAFÍA.....	147
	ANEXOS.....	151

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Las etapas de la agricultura de precisión	6
2.	Principio de funcionamiento de un sistema DGPS	8
3.	Representación de los datos en el sistema GIS: modo vector y rastreo	9
4.	Red de sensores en la agricultura de precisión	11
5.	Catálogo de baterías FIAMM para aplicaciones de energía renovable	16
6.	Componentes del hardware de una red de sensores	18
7.	Colectores de energía para una red de sensores en agricultura de precisión	20
8.	Esquema de los diferentes fuentes de energía y su forma de recolección	24
9.	Colector de energía solar	25
10.	Colectores basados en esfuerzos mecánicos	26
11.	Composición de una celda solar	28
12.	Esquema de una miniturbina eólica o aerogenerador	29
13.	Rectificador de media onda	31
14.	Señal rectificada de media onda	31
15.	Rectificador de onda completa en configuración puente	32
16.	Formas de entrada y salida para un rectificador de onda completa	33
17.	Regulador de carga tipo PWM	34
18.	Regulador de carga tipo MPPT	35

19.	Equipo de prueba de impedancia de baterías Megger BITE2 & BITE 2P y configuración común para la prueba.....	38
20.	Principio de funcionamiento de los sistemas inteligentes de monitoreo de baterías	39
21.	Sistema de monitorización PBAT Osonix	40
22.	Esquema de variables de un inversor.....	43
23.	Cables para aplicaciones de energía solar y eólica	44
24.	Esquema de protección de un DPS	46
25.	Esquema básico de un seguidor solar	50
26.	Estructuras de soporte para sistema fotovoltaico con seguimiento solar	51
27.	Seguidor solar con sensores de movimiento	52
28.	Mecanismo transmisor de potencia por cadena y rueda dentada.....	52
29.	Sistema de adquisición de datos	54
30.	Curvas características I-V y P-V para distintas radiaciones solares.	55
31.	Algoritmo del método perturbación y observación (P&O)	57
32.	Algoritmo del método conductancia incremental (IC).....	58
33.	Topología del convertidor Boost	59
34.	Topología del convertidor tipo Buck.....	60
35.	Modelo de circuito convertidor tipo Buck-Boost	61
36.	Aerogenerador de eje horizontal de tres palas	63
37.	Cilindro Flettner.....	65
38.	Configuración de un rotor Savonius.....	65
39.	Estructura de un rotor Darrieus.....	67
40.	Diagrama máquina eléctrica asíncrona en régimen generador	68
41.	Máquina en régimen generador síncrono de baja potencia	69
42.	Tipos de estructuras de soporte para un aerogenerador Darrieus	73
43.	Sistema de control para MPPT basado en la medición de la velocidad de rotación	76

44.	Sistema de control para MPPT basado en la medición de la velocidad del viento.....	77
45.	Controlador de carga con algoritmo integrado MPPT	95
46.	Inversor de voltaje Phoenix Victron Energy 250W 12V	98
47.	Fusibles y portafusibles para aplicaciones de energía renovable	107
48.	Protección contra sobretensiones (SPD) PV T1 / PV T2 Eaton	108
49.	Estructura de seguidor solar motorizada.....	110
50.	Coeficiente de potencia para varios tipos de aerogeneradores	115
51.	Regulador de carga tipo eólico EcoEnergy	123
52.	Diagrama general del modelo colector integrado a la red de sensores en la agricultura de precisión	125
53.	Diagrama específico del sistema colector de energía utilizando cosechadores de energía del ambiente	126
54.	Diagrama unifilar modelo colector solar	127
55.	Diagrama unifilar modelo colector eólico.....	128
56.	Vista en isométrico del modelo colector solar y sus componentes	129
57.	Vista en perfil modelo colector solar.....	130
58.	Vista en laterales modelo colector solar.....	131
59.	Vista en isométrico del modelo colector eólico y sus componentes ...	132
60.	Vista en perfil modelo colector eólico	133
61.	Isométricos de componentes del modelo colector eólico	134

TABLAS

I.	Parámetros de ejemplo para el cálculo de un banco de baterías.....	14
II.	Modelos comerciales de sistemas inteligentes de monitoreo de baterías	40
III.	Clasificación de los aerogeneradores, según su potencia nominal.....	70
IV.	Mapa de datos solares para Guatemala	86

V.	Mapa de datos del viento para Guatemala	87
VI.	Características de consumo energético de la red de sensores	89
VII.	Consumo energético por actividades con agua	90
VIII.	Características eléctricas de celdas solares TechnoSun.....	94
IX.	Valores para caída de tensión permisible en sistemas aislados de energía renovable	100
X.	Conductividad eléctrica del material de acuerdo con diferentes temperaturas.....	100
XI.	Dimensiones de conductores AWG aislados, según su área nominal	101
XII.	Valores para la selección de las protecciones del sistema.....	106
XIII.	Especificaciones técnicas del seguidor activo SunTracer.....	110
XIV.	Datos para el diseño del colector eólico	112
XV.	Propiedades del aire del lugar de estudio para la implementación del colector eólico	113
XVI.	Velocidad del viento promedio para el colector eólico sugerido	114
XVII.	Dimensiones sugeridas para el colector eólico rotor Savonius.....	119
XVIII.	Características del generador eléctrico.....	122
XIX.	Valores de corriente para el almacenamiento de carga del colector eólico	123
XX.	Equipos y componentes del colector solar de 6 módulos	136
XXI.	Equipos y componentes del colector solar con un solo módulo.....	137
XXII.	Equipos y componentes del colector eólico	138
XXIII.	Materiales para estructura de soporte de colector	139
XXIV.	Costos por mano de obra estructura colector solar	140
XXV.	Costo total modelo colector solar.....	140
XXVI.	Costo total modelo colector eólico	141

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperio
Ah	Amperio por hora
C_p	Coefficiente de potencia de rotor
AC	Corriente alterna
DC	Corriente directa
ρ	Densidad del aire (kg/m^3)
CO ₂	Dióxido de carbono
η_s	Eficiencia del sistema
η_e	Eficiencia eléctrica
η_m	Eficiencia mecánica
F	Faradios
°	Grados
kWh	Kilowatt por hora
L	Litro
mA	Miliamperio
Ω	Ohmio
T	Período (s)
i	Relación de transmisión
γ	Resistividad eléctrica ($\Omega \cdot m$)
rpm	Revoluciones por minuto
s	Segundo
ω	Velocidad angular (rad/s)

TSR	Velocidad específica del aire (m/s)
λ	Velocidad tangencial (m/s)
ν	Viscosidad cinemática del aire (m^2/s)
μ	Viscosidad dinámica del aire ($kg/m \cdot s$)
V_i	Voltaje de entrada (V)
V_o	Voltaje de salida (V)
V	Voltios
W	Watt

GLOSARIO

Alabe	Conjunto o serie de paletas de una máquina que reciben el impulso o impulsan el fluido o masa de aire.
Anemómetro	Instrumento para medir la velocidad de circulación de un fluido gaseoso, en especial del viento.
AP	Agricultura de precisión, conjunto de técnicas y tecnologías utilizadas para estudiar la variabilidad del suelo y los cultivos.
Azimut	Ángulo que forma el meridiano con el círculo vertical que pasa por un punto de la esfera celeste o del globo terráqueo.
Colector	Dispositivo empleado para recoger energía proveniente de una fuente de energía del ambiente para su aprovechamiento en energía térmica o eléctrica.
Cremallera	Barra que presenta dientes en un canto, posibilitando el engranaje con un piñón para convertir un movimiento rectilíneo en circular y viceversa.

Electrolítico	Proceso por el cual una sustancia que se descompone en iones (partículas cargadas de electricidad) cuando se disuelve en agua o los líquidos del cuerpo.
Inalámbrico	Dispositivos o sistemas de comunicación eléctrica que no poseen alambres conductores.
Irradiación	Energía emitida por el Sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas.
Irradiancia	Magnitud representada por el cociente entre la potencia (la energía por unidad de tiempo) y el área que recibe la radiación.
Mapa de rendimiento	Representación gráfica de una serie de datos geográficos de rendimiento y humedad de granos obtenidos mediante una cosechadora equipada con un monitor de rendimiento y un receptor DGPS.
Microcontrolador	Circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria.
Nodo	Dispositivos que toman los datos del sensor a través de sus puertas de datos, y envían la información a una estación base para su procesamiento y posterior toma de decisión con base en la información procesada.

Rectificador	Dispositivo electrónico que convierte una señal de corriente eléctrica alterna en corriente continua.
Regulador de carga	Dispositivo encargado de controlar constantemente el estado de carga de las baterías, así como de regular la intensidad de carga con el fin de alargar la vida útil de las baterías.
Rotor	Pieza de una máquina electromagnética o de una turbina que gira dentro de un elemento fijo.
Seguidor solar	Dispositivo mecánico capaz de buscar la posición del sol en cualquier momento del día, siguiendo al sol desde el este hasta el oeste.
Sensor	Dispositivo que capta magnitudes físicas (variaciones de luz, temperatura, sonido) u otras alteraciones de su entorno.
Servomotor	Motor auxiliar para aumentar automáticamente la energía disponible cuando conviene.
Transceptor	Módulo transmisor-receptor. Estos dispositivos (opto) electrónicos permiten la transmisión de datos a través de cables de cobre y fibra.

Transductor	Tiene la misión de recibir energía de naturaleza eléctrica, mecánica, acústica, entre otros, y suministrar otra energía de diferente naturaleza, pero de características dependientes de la que recibió.
Variabilidad espacial	En agricultura comprende la diferencia en fertilidad de distintas secciones del terreno y las que se dan en la producción de los diferentes cultivos.
Variabilidad temporal	En agricultura se comprende como la diferencia observada en la producción de un cultivo en un espacio de tiempo uno del otro.

RESUMEN

Existe actualmente una relación en la utilización de tecnologías en actividades ordinarias de la vida del ser humano. Dentro de estas actividades se pueden dar ejemplos de tecnología aplicada a la medicina, el entretenimiento, la movilidad humana, la agricultura, entre otros. Precisamente la agricultura sobresale como uno de los subtemas que componen este trabajo, ya que ha jugado un papel importante en la vida de todo ser humano, desde la producción propia de alimentos hasta la comercialización de estos, esta actividad ha estado sujeta a transformaciones desde la forma en cómo se trabaja, y una de las evoluciones que se conoce se denomina agricultura de precisión.

La agricultura de precisión y la tecnología se entrelazan por múltiples componentes tecnológicos intermedios denominadas redes de sensores. Como todo dispositivo tecnológico, necesita de una fuente de energía para su correcto funcionamiento. Estos elementos, encargados del suministro energético a las redes de sensores, se les denomina colectores de energía. Los colectores son componentes relevantes en la operación que conlleva todo el proceso de aplicar la tecnología en la agricultura.

En el presente trabajo de graduación se aborda como eje principal el diseño de un colector del suministro eléctrico eficiente para una red de sensores. Para ello, en el primer capítulo se contextualiza el concepto de agricultura de precisión, que muy pocas veces se escucha, pero que es un avance que ha tenido las ciencias de la ingeniería aplicadas a la agricultura, de la cual se tiene como antecedentes su origen a partir de la década de los años 1970 en EE. UU., que posteriormente se estableció en 1994 mediante el uso del sistema de

geoposicionamiento global para fines de uso civil, lo que dio pauta a una serie de desarrollos en este campo en países como EE. UU., Canadá, Gran Bretaña, Alemania, Brasil, Australia y Argentina.

En el segundo capítulo se describe la configuración de todos los elementos que constituyen la estructura del mecanismo para el suministro eléctrico, el colector de energía. Dicho colector se hace con base en el recurso energético del medio ambiente del entorno de estudio donde oportunamente se sitúe, también se da una breve introducción de cómo se estructura una red de sensores aplicados a la agricultura de precisión y su necesidad de contar con un suministro eléctrico eficiente.

El capítulo tres explica el porqué de la propuesta del modelo colector de energía para el fin descrito, justificando mediante el contexto del país y especificando los antecedentes que se tienen en el medio del tema que tiene por título el presente trabajo.

Los datos de cálculos e ideas de diseño están contemplados en el capítulo cuatro, en el cual se describen razonamientos matemáticos para la deducción de demanda energética a cubrir, criterios de selección de elementos para los colectores, propuestas de valores para diseño mecánico, entre otros.

En el último capítulo se mencionan las memorias de cálculo de costos económicos que supone la adecuación de las propuestas del modelo colector de energía en donde se requiera su uso.

OBJETIVOS

General

Diseñar un modelo colector de energía a fin de optimizar el suministro eléctrico para una red de sensores en la agricultura de precisión.

Específicos

1. Adecuar el diseño de un modelo colector de energía capaz de optimizar el recurso energético del ambiente en zonas del sur y occidente de la República de Guatemala.
2. Determinar los valores de diseño para la adecuación del modelo, estimando su aporte al sector donde se pueda desarrollar la técnica de agricultura de precisión.
3. Describir la integración de un colector de energía del ambiente a otros elementos tecnológicos empleados en actividades de carácter agrícola.
4. Aportar el conocimiento sobre el aprovechamiento del recurso energético natural y su posterior conversión a energía eléctrica, para actividades donde se emplea la técnica de agricultura de precisión.

INTRODUCCIÓN

La energía, como forma y concepto de desarrollo de la vida del ser humano, ha sido históricamente un elemento de múltiples cambios y aplicaciones a través de ella. Ha evolucionado en la manera de obtenerla, desde la utilización de derivados de combustibles fósiles, hasta la implementación de mecanismos capaces de obtenerse de recursos naturales, también se ha cambiado el paradigma del uso solamente para actividades cotidianas como la iluminación de las casas, calentamiento de agua o en la cocción de alimentos.

En la actualidad, muchas actividades que se consideran parte fundamental del desarrollo de la vida del ser humano presentan transformaciones en la forma de cómo se concibe su funcionamiento; desde el uso de transporte por medio de combustible hasta ver hoy transporte eléctrico o bien suministrar energía eléctrica en lugares remotos donde el transporte de energía por cableado no puede emplearse. Muchas de estas formas de obtener la energía y aplicarla a actividades que antes no se concebía su uso están conociéndose al paso de los años presentes.

La idea de monitorizar a través de sensores electrónicos, la evolución de los sembradíos en pequeñas o grandes extensiones de tierras cultivables no es ajena al uso que se ha tenido en el desarrollo de la tecnología para facilitar ciertas actividades, y la energía es el elemento relevante en muchas de estas aplicaciones. La conversión de la energía del medio ambiente a energía eléctrica por medio de algún componente que lo haga eficiente y, que, además, asegure el óptimo y continuo flujo de energía para el correcto funcionamiento de los

demás elementos que dependen de ello supone una aplicación apegada a conceptos de ingeniería.

El presente trabajo brinda una herramienta orientada al tema del diseño de modelos de colectores de energía que buscan la óptima captura de esta del medio ambiente, lo que se traduce en energía eléctrica que alimentan a una serie de sensores aplicados en cultivos donde se emplea la técnica de la agricultura de precisión.

Además, se busca aportar conocimiento a futuros seguimientos al tema que se desarrolla y que apoyen sustancialmente a la búsqueda de soluciones de carácter ingenieril, donde sea conveniente su uso.

1. LAS REDES DE SENSORES EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

El presente apartado proporciona las principales teorías que validan el fundamento para el trabajo de investigación y el porqué de conocerlas.

1.1. Los antecedentes históricos de la agricultura

En el transcurso de la historia, en el Paleolítico, el hombre vivió como cazador y recolector de frutos silvestres en estrecha unión con la naturaleza. Así lo atestiguan las escenas y dibujos de arte rupestre. La revolución agrícola, que ocurrió aproximadamente 10 000 años a. de C., en el período Neolítico, permitió que el hombre se hiciera sedentario y se interesara por el suelo como medio de cultivo, comenzando a hacer agricultura. Algunos milenios después (7 000 a 8 000 años a. de C.) surgieron las llamadas civilizaciones hidráulicas en los valles del Nilo, del Tigris y del Éufrates. Las siembras se solían realizar en tierras que habían sido previamente inundadas por las avenidas estacionales de los ríos¹.

Desde el principio, la actividad agraria siempre ha modificado los ecosistemas en los que se ha instalado, convirtiéndolos en agro sistemas. En el cual, la esta actividad afecta a los ecosistemas vecinos a los que se instala, convirtiéndolos en ecosistemas dependientes. Salvo el modelo que más se parece a un ecosistema natural virgen y está ubicado en el Amazonia brasileña, o en la Orinoconía venezolana. Es de mencionar que el hombre se planteó desde el inicio el aumento de los rendimientos y con ello trajo los primeros problemas importantes de agotamiento de recursos físicos. El suelo es el principal recurso que se agota por una mala acción combinada de técnicas de cultivo y de mala calidad del agua de riego y su excesivo contenido de sales.

¹ COLETO MARTÍNEZ, José Miguel. *La agricultura y la ganadería extremeñas en 2004*. p. 215.

El descubrimiento de América en 1492 llegó a Europa una gran gama de especies de interés agrícola como la judía, el maíz, la patata, el tomate, el pimiento, la barata, el girasol, el tabaco y el cacao y una diversificación de los productos vegetales empleados en la alimentación humana y, con ello, en el siglo XIX se produce la gran expansión de una forma peculiar de hacer agricultura, impuesta por las potencias colonizadoras cuyo objetivo es el comercio mundial, provocando grandes economías de capital y el descubrimiento de nuevos productos químicos, fertilizantes, pesticidas y los reguladores de crecimiento que contribuyeron al aumento de los rendimientos para la producción de alimentos.

1.1.1. La agricultura convencional

La práctica común de agricultura a escala masiva se implantó a lo largo del siglo XX basada en la explotación de los recursos naturales y su gran dependencia del uso de agroquímicos, siendo una tradición de milenios. Sin embargo, fueron la clave para combatir el hambre en el mundo produciendo excedentes agrícolas con la India, Pakistán, China e Indonesia los principales productores y exportadores de alimentos. En contradicción, África nunca fue un productor y tiene un problema de extrema pobreza y una gran dependencia de la ayuda humanitaria por países desarrollados en cuanto a abastecerlos de alimentación y medicinas, ya que no se logra crear riqueza y repartirla.

1.1.2. La agricultura sostenible o sustentable

El nuevo modelo de producción agrícola se basa en estos nuevos conceptos, desarrollando la agricultura sostenible, y donde los actuales factores de producción agraria como el suelo, el agua y lo biológico, no se degraden en el proceso productivo y que mantengan su potencialidad en el tiempo.

Este nuevo modelo de desarrollo agrícola busca la conservación de los recursos naturales y la protección del medio ambiente, reciclando para que el suelo restituya sus nutrientes y con ello favoreciendo a la fauna y la flora. Esto es muy importante para la humanidad, si no se quiere extinguir por el masivo consumo de los recursos naturales como se plantea, lo que les sucedió a las antiguas civilizaciones.

1.1.3. La producción integrada

El concepto de producción integrada se basa en la unión de las ventajas de la agricultura convencional y las que se plantean en la agricultura ecológica. En donde el empleo racional de los recursos productivos y las tecnologías de cultivo; sumado a la conservación de los recursos naturales y la protección del medio ambiente aportan viabilidad económica y equidad social. Algunos fundamentos de la producción integrada pueden verse de la siguiente manera:

- La adecuación entre el medio y el material vegetal o animal, en donde se va a implantar la actividad agrícola o ganadera, así como la elección de variedades y razas adecuadas.
- El empleo de la tecnología de producción tiene efecto en los sistemas de protección, riego, mantenimiento del suelo y, principalmente, la fertilización.

1.1.4. La agricultura de conservación

Esta se basa en la reducción o eliminación del laboreo y la quema de rastrojos. El objetivo es dejar los restos vegetales en el suelo para que estos se vuelvan fertilizante natural y evitar la pérdida de fertilidad de los suelos, la erosión y la contaminación de las aguas; y así contribuir a la reducción de las emisiones

de CO₂. Sin embargo, existe una probabilidad mayor de micotoxinas presentes y producidas por hongos en comparación con los producidos por residuos de un plaguicida. En donde las aplicaciones de los pesticidas presentan niveles más bajos de micotoxinas, y con esto se genera una gran contradicción entre la agricultura convencional y la agricultura ecológica, donde los alimentos ecológicos deben de tener controles más severos en comparación de los convencionales.

1.2. La agricultura de precisión

En la actualidad existe literatura que centra la definición en función de la escala de avance de la tecnología en esta, se hace la salvedad que, en algunos países como Argentina y Brasil ya existe tecnología de última generación, como monitoreo de suelos mediante GPS y corrección de dosis variable para los cultivos, mediante la maquinaria configurada para estos procesos, en otras regiones del planeta aún no se cuentan con sofisticados medios para la automatización de procesos, por lo que la agricultura de precisión se lleva a cabo empleando las técnicas que dieron origen a lo que hoy se conoce holísticamente como agricultura de precisión.

1.2.1. Concepto de agricultura de precisión

El concepto de agricultura de precisión es algo nuevo y nace en EE. UU., entre los años de 1980-1990 y se define como un sistema de gestión en pequeñas o extensas áreas agrícolas que, mediante el uso de tecnologías de información georreferenciado, monitorean la variabilidad espacio-temporal del terreno aportando a los factores de producción necesarios para que el cultivo exprese su máxima potencialidad a través de acciones posteriores.

1.2.2. La relación de variabilidad espacio temporal

Santillán & Rentería indican en su artículo *Agricultura de precisión*, que la variación espacial se refiere a la diferencia en el estado de fertilidad de ciertas partes de terreno y las que se dan en el crecimiento de plantas o sembradíos ya cultivados.

Los autores indican, además, que la variación temporal se entiende por las diferencias observadas en la producción de una misma área de terreno entre una temporada y otra de determinados cultivos. La relación de ambas variables, espacio temporal están presentes en pequeñas o grandes extensiones de tierra.

1.2.3. Diferencia entre la agricultura de precisión y la agricultura convencional

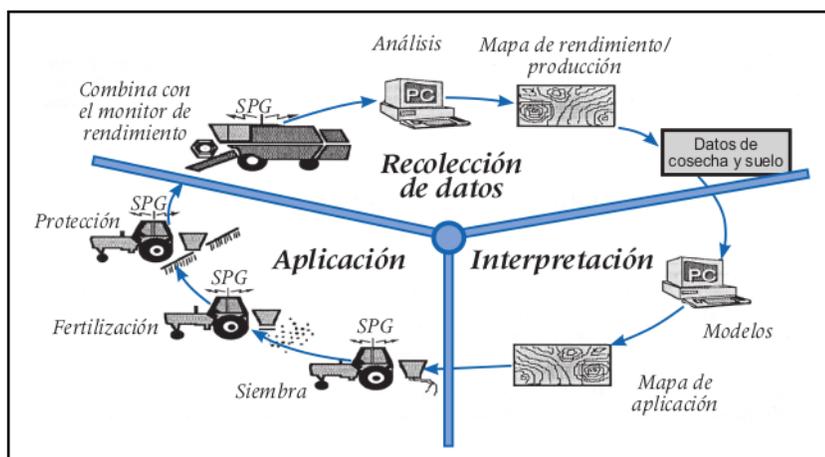
La agricultura convencional basa su idea que las condiciones de un terreno son homogéneas, por lo que los cultivos que se disponen en el área reciben una cantidad considerable de insumos (semillas, fertilizantes, entre otros) sin un balance adecuado en proporciones, lo que supone una mala gestión del recurso y conlleva un elevado costo monetario y una propicia contaminación del subsuelo.

Por su parte, la agricultura de precisión busca que los recursos disponibles sean gestionados de manera correcta y eficiente en cantidades adecuadas, y de acuerdo con la necesidad de cada área de terreno, previamente estudiada, para alcanzar este fin de la tecnología.

1.3. Las etapas principales de la agricultura de precisión

El proceso que conlleva a la agricultura de precisión se suele dividir en tres etapas. En primer lugar, se recolectan los datos mediante sensores de temperatura y humedad relativa tipo sonda, de precipitación de lluvia mediante pluviómetros, de radiación solar incidente a través de piranómetros y de la velocidad del viento mediante anemómetros o veletas, entre otros. Dichos sensores tienen la capacidad de medir en tiempo real a partir de la variabilidad de los suelos y los cultivos creando mapas de rendimientos sobre la fertilidad del lugar. En segundo lugar, se procesan los mapas de rendimientos a fin de establecer los rendimientos de producción en las áreas (variabilidad espacial) de la cosecha y con relación a las variaciones climáticas (variabilidad temporal) y sus modificaciones del suelo. Luego de obtenidos los datos cuantificados se procede a la interpretación de la variabilidad de los rendimientos de producción o fertilidad. Por último, tomar acciones para las correcciones en los suelos o para aplicar insumos necesarios como algún agroquímico, por ejemplo, el nitrógeno.

Figura 1. Las etapas de la agricultura de precisión



Fuente: CHARTUNI, Evandro; ASSIS DE CARVALHO, Francisco. Revista Comunica.

Agricultura de precisión. p. 25.

1.4. La tecnología asociada a la agricultura de precisión

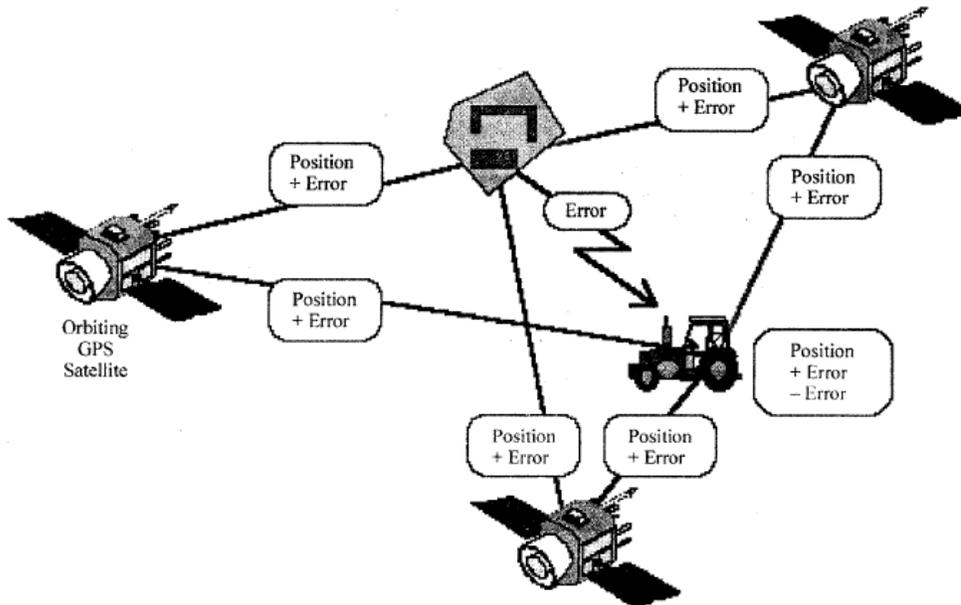
En el siguiente apartado se describen las tecnologías que guardan relación con la agricultura de precisión, por lo que su entendimiento es de vital importancia.

1.4.1. El sistema diferenciado de posicionamiento global (DGPS)

En la agricultura de precisión (AP), el sistema diferenciado de posicionamiento global ayuda a la identificación de la variabilidad espacio temporal mediante la visualización de las imágenes satelitales que pueden arrojar datos para el control de maquinaria agrícola en tiempo real en el terreno de cultivo. La diferencia entre el sistema GPS y el DGPS radica en que el primer sistema permite errores de medición de hasta 20 metros, situación que no es conveniente en la AP, por lo que para lograr una precisión de error de no menos de 1 metro, se recurre al uso de una base de radiofrecuencia comúnmente instalado en la maquinaria agrícola que se enlaza a una estación base.

La estación base se encarga de recibir la misma señal que es transmitida a la maquinaria agrícola, la diferencia de error entre la señal de la posición de la maquinaria agrícola y la estación base, se denominan señales de corrección diferencial. Dicha señal suele transmitirse por medio de antenas situadas en un punto intermedio entre la maquinaria y la estación base o a menudo se recurre a satélites geoestacionarios que indican el error entre los dos elementos descritos anteriormente (maquinaria y estación base).

Figura 2. Principio de funcionamiento de un sistema DGPS



Fuente: REMUS SILVEIRA, Juan. *La agricultura de precisión: una revolución en progreso*. p. 2.

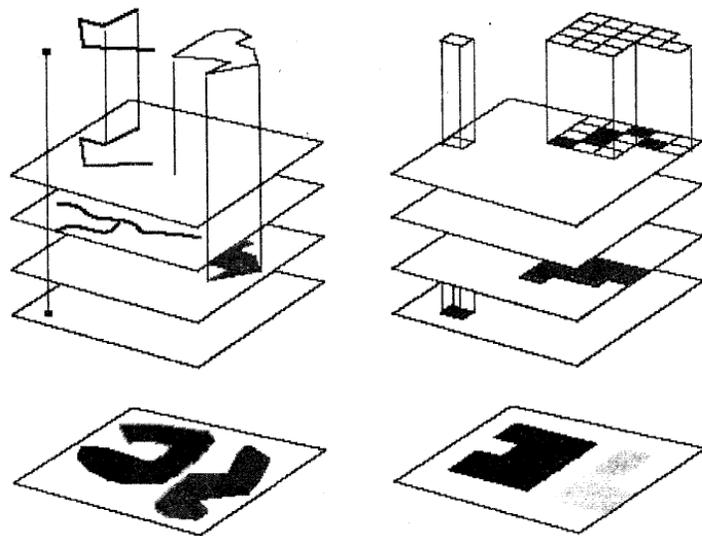
1.4.2. El sistema de información geográfica (GIS)

Este sistema permite el almacenamiento de la información recolectada por los sensores en el campo a fin de proporcionar datos que puedan ayudar a la toma de decisiones de acuerdo con lo que se haya evaluado en el ámbito geográfico. Remus Silveira, en su trabajo *La agricultura de precisión: una revolución en progreso* indica que estos sistemas están también apegados a sistemas informáticos establecidos en un centro base que se encarga de ser el punto receptor de toda la información y que puede ser transmitido a otros dispositivos para su consulta, tales como computadoras personales o teléfonos.

Este sistema es el encargado de captar, almacenar, manipular, analizar, actualizar y mostrar todas las formas de información georeferenciado.

La forma de trabajar del GIS se basa en que utiliza la representación de los datos de dos maneras: modo vector y rastreo; el modo vector supone que la representación cartográfica del terreno se basa en interpretación de puntos, líneas o polígonos; el modo rastreo, por el contrario, basa su funcionamiento en la proyección de una matriz de celdas que identifican pequeñas porciones de terreno localizado.

Figura 3. **Representación de los datos en el sistema GIS: modo vector y rastreo**



Fuente: REMUS SILVEIRA, Juan. *La agricultura de precisión: una revolución en progreso*. p. 3.

1.4.3. La red de sensores inalámbricos (WSN)

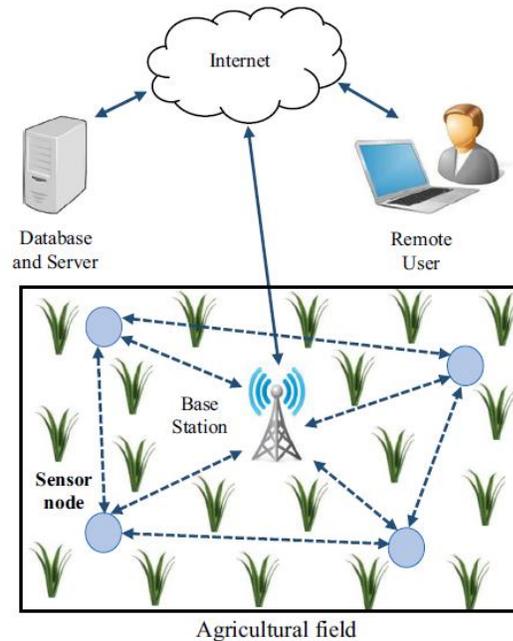
Estos dispositivos que reciben muchas denominaciones (mote, nodo sensor, entre otros) son los elementos encargados de recolectar todo lo referente a la variable espacial en términos de fertilidad del suelo, y en la variable temporal en términos de variación climática que afecta directamente a la primera.

La red de sensores se distribuye en puntos estratégicos de terreno y recogen la información que más tarde será interpretada, consultada y gestionada por el agricultor que tomará las decisiones pertinentes.

López Riquelme, en su trabajo *Contribución a la red de sensores inalámbricos. Estudio e implementación de soluciones hardware para agricultura de precisión* expresa que la red de sensores tiene la versatilidad de presentar recursos equipados con potentes transceptores de radio de largo alcance, potentes procesadores, y principalmente, un sistema de alimentación basado en energías renovables.

También se han tenido evoluciones de las WSN, adecuando a su estructura los actuadores, denominándose bajo este aspecto WSAN, una red inalámbrica de sensores y actuadores. Este tipo de redes cumplen la doble función de la recolección de los datos por parte de los sensores y la reacción adecuada a los eventos que producen por la interpretación de los datos.

Figura 4. **Red de sensores en la agricultura de precisión**



Fuente: MAURYA, Sonam. *Fuzzy based energy efficient sensor network protocol for precision agriculture*. p. 21.

1.4.4. La red de actuadores y monitores de rendimiento/aplicación

Estos dispositivos son los encargados de ejecutar las acciones que se toman posteriores al análisis del terreno, se asocian a actuadores en temas de riego monitorizado, dosificadores de semillas, dosificadores de agroquímicos en cantidades reguladas, servomecanismos de acción dentro de parcelas automatizadas, entre otros. Por ser elementos que reúnen las cualidades de efectuar un trabajo, requieren de una fuente de alimentación de energía al igual que la red de sensores, por lo cual, cobra importancia su análisis en el dimensionamiento del colector de energía. En el mercado existen diversos

actuadores o monitores que destacan por su versatilidad para efectuar las tareas en la AP, tales como: *AG leader* (monitor de rendimiento de grano), *TopCon position systems* (monitor de humedad); *Trimble GreenSeeker agriculture* (sensor de rendimiento de semilla), entre otros.

1.4.5. La maquinaria inteligente

Es una de las últimas tendencias de la agricultura de precisión, puesto que viene a sustituir directamente la forma de cultivo por el hombre, y lo traduce en la automatización de máquinas agrícolas equipadas con sistemas de posicionamiento. No en todas las regiones se puede utilizar este tipo de maquinaria, ya que guarda relación directa con la geografía del lugar y a veces es necesario recurrir a la forma convencional, pero apoyándose de las otras tecnologías asociadas a la agricultura de precisión.

1.5. La red de sensores inalámbricos WSN (*Wireless sensors networks*)

“El concepto de red de sensores inalámbricos o su traducción a la lengua inglesa *Wireless sensor networks* (WSN) es la tecnología que implica la interacción de pequeños dispositivos electrónicos, actuadores (servomotores, pequeños pistones neumáticos, entre otros) y sensores que la mayoría de las veces monitorean variables en exteriores o del ambiente cuya información se transfieren en forma de señales análogas o digitales a centros de recolección de datos para su posterior interpretación”².

Es de especial interés, dentro del diseño de las redes de sensores inalámbricos, el tema del consumo de energía y la vida útil de la batería de los nodos. El tiempo de vida de un nodo dentro de una red de sensores inalámbricos

² GASCÓN, David. *Redes de sensores inalámbricos, la tecnología invisible*. p. 53.

viene definido por el tiempo de vida de su batería, por lo que la manera de dimensionar los arreglos de baterías cobra especial interés, ya que de ello depende en gran medida la vida y el ciclo de trabajo de estas.

La forma de establecer el dimensionamiento del banco de baterías se obtiene por medio de cálculos de acuerdo con lo establecido por la Norma IEEE Std. 485-2020 *Práctica recomendada para el dimensionamiento de baterías de ácido plomo para aplicaciones estacionarias* y el dimensionamiento de la corriente de las propias baterías.

Martínez Navarro, en su trabajo *Diseño de un sistema de generación de energía eléctrica basado en la utilización de las energías solar y eólica, e integrado en el medio natural* sugiere que el dimensionamiento por medio de la capacidad en amperios hora se determina mediante la sumatoria de la corriente consumida y el tiempo de trabajo a la cual estará sujeto el sistema de almacenamiento mediante la siguiente expresión:

$$I_{bat} = \frac{C_{bat}}{V_{nominal}} \quad \text{[Ecuación 1]}$$

Donde:

I_{bat} = corriente del arreglo de baterías

C_{bat} = capacidad de la batería

V_{nom} = voltaje nominal

Por lo que el valor resultante estará medido en amperios hora; por otra parte, para conocer el número de celdas del banco de baterías, la Norma IEEE Std. 485-2020 indica en el numeral 6.2.2., cálculo del número de celdas máximas, la expresión a utilizar para este fin:

$$N = \frac{V_{max}}{V_e} \quad \text{[Ecuación 2]}$$

Donde:

N = número de celdas requeridas

$V_{m\acute{a}x}$ = voltaje máximo del sistema

V_e = voltaje de estabilización de la batería (se establece por parte de fabricante)

Por último, se puede determinar el número de baterías mediante el cociente del voltaje máximo del sistema y el valor de voltaje/celda de cada batería unitaria según el fabricante:

$$B = \frac{V_{m\acute{a}x}}{V_u} \quad \text{[Ecuación 3]}$$

Donde:

B = número de baterías dimensionadas

$V_{m\acute{a}x}$ = voltaje máximo del sistema

V_u = voltaje de las baterías unitarias dada por el fabricante

A manera de entender un poco el apartado anterior, se muestra en la tabla I, un ejemplo de un sistema que posee los parámetros siguientes:

Tabla I. **Parámetros de ejemplo para el cálculo de un banco de baterías**

Voltaje nominal del sistema	12 V
Capacidad de la batería	7 000 Wh
Voltaje máximo de la batería	12 V
Voltaje de estabilización	2,33 V

Fuente: elaboración propia.

Por lo que, para determinar el banco de batería se calcula la corriente del sistema de baterías según la ecuación 1:

$$I_{BAT} = \frac{7\,000\ Wh}{12\ V} = 583,33\ Ah$$

El número de celdas necesarias viene determinado por la ecuación 2:

$$N = \frac{12}{2,33} = 5,15 \approx 6\ celdas$$

Finalmente, el número de baterías en el sistema se da por la expresión 3:

$$B = \frac{12\ voltios}{2\ voltios} = 6\ baterías$$

En síntesis, son necesarias seis baterías con un voltaje de 2 V por celda y capacidad de corriente de 583,33 Ah para este ejemplo. Una opción es elegir dentro de los catálogos de fabricantes como FIAMM, por lo que a manera de ilustración se deja la opción (en recuadro verde), según los cálculos realizados.

Figura 5. **Catálogo de baterías FIAMM para aplicaciones de energía renovable**

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

- Nominal voltage: 2 V/cell
- Float voltage charge at 20°C: 2.23 V/cell
- Boost charge: 2.4 V/cell

TECHNICAL CHARACTERISTICS

FIAMM LM Solar OPzS range									
Battery Type	Capacity (Ah) at 20°C 120 hrs to 1,85 VPC	Short Circuit Current (A) IEC 60896-11	Internal Resistance (mohm) IEC 60896-11	Weight with electrolyte (kg)	Electrolyte (liters)	Dimensions			Terminals (+/-)
						Length	Width	Height	
LM/S 150	150	1220	1.860	14.2	4.4	103	206	420	1/1
LM/S 220	220	1840	1.240	16.4	4.0	103	206	420	1/1
LM/S 290	290	2330	0.857	17.7	3.8	103	206	420	1/1
LM/S 360	360	2650	0.745	21.8	5.0	124	206	420	1/1
LM/S 435	435	3170	0.620	25.2	5.7	145	206	420	1/1
LM/S 510	510	3090	0.641	28.8	6.6	124	206	536	1/1
LM/S 610	610	3700	0.534	33.1	7.5	145	206	536	1/1
LM/S 710	710	4320	0.458	38.1	8.7	166	206	536	1/1

Fuente: LIDERSOLAR. *Baterías solares*. <https://www.lidersolar.es/Baterias/Baterias-OPZS/FIAMM-LM>. Consulta: 10 de marzo de 2021.

Como se describió con el ejemplo anterior, un manejo eficiente de la gestión de la energía en los nodos es un factor crítico en el tiempo de vida de la red entera. Mora Delgado en su trabajo *Algoritmo de gestión energética aplicado dentro de las WSN's* indica que para prolongar el tiempo de vida de la red de sensores inalámbricos es crucial reducir el consumo de energía al mínimo posible o adecuar una forma de mantener el suministro de energía a la red mediante el correcto dimensionamiento del sistema de almacenamiento.

1.5.1. Arquitectura básica de una WSN

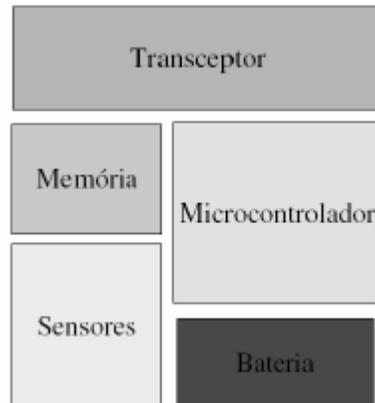
En una red de sensores inalámbricos es común denominar a su arquitectura red de nodos, lo cual implica todo el entramado que supone los dispositivos que llevan a cabo el proceso, para lo cual está estructurado diferenciando en ello el hardware y software, respectivamente.

Respecto al software, solo se analizará en un entorno general cómo están relacionados con el hardware, siendo el tema fundamental el medio por el cual se suministra la energía que hace eficiente a la red de sensores y actuadores.

La arquitectura básica de una red de sensores y actuadores incluyen los siguientes elementos:

- Transceptor
- Memoria
- Microcontrolador
- Batería
- Sensores

Figura 6. **Componentes del hardware de una red de sensores**



Fuente: TAPIA ZURITA, José Luis. *Tutorial de redes de sensores ad hoc con eficiencia en energía*. p. 6.

1.6. **Necesidad del suministro eficiente de energía a una red de sensores inalámbricos**

En una red de nodos de sensores se pueden establecer tres estados de funcionamiento que demandan de un consumo de energía, por el cual se puede establecer los valores de ellos, estos son los propios de los sensores y no se toman en cuenta los otros dispositivos que actúan de acuerdo con las operaciones que se registran por medio de la lectura y puesta en marcha de la función que sea requerida.

“Existen consumos debido a los siguientes procesos que se llevan a cabo dentro de la red de sensores: transmisión y recepción de datos y la información de control debido a órdenes de los sensores a los actuadores en campo”³.

³ LÓPEZ RIQUELME, Juan Antonio. *Contribución a la red de sensores inalámbricas. Estudio e implementación de soluciones hardware para agricultura de precisión*. p. 107.

En el proceso de consumo, también se reconoce que, de los componentes mencionados con anterioridad en el hardware, la batería juega un papel importante como elemento de suministro de energía, por lo que es muy importante la elección correcta del tipo de batería para este tipo de aplicaciones.

La necesidad de cubrir la demanda energética de toda la red de sensores va más allá de suministrar lo que se necesita en el proceso, ya que también se busca que ese suministro de energía se entregue sin interrupciones y de manera eficiente, de ello depende las lecturas de información entre los protocolos de comunicación, y también se relaciona una buena interpretación y ejecución de las acciones a tomar en aplicaciones como la agricultura de precisión.

1.7. Formas y dimensionamiento del suministro de energía a una WSN

Existen diversas formas de alimentar una red de sensores, pero cobra especial interés el hecho de integrar colectores de energía autónomos que puedan cubrir la demanda que estos necesitan, bajo estos aspectos se mencionan algunas formas de colectores, tales como, solares, elementos piezoeléctricos, aerogeneradores, pequeñas turbinas hidráulicas, entre otros.

Figura 7. **Colectores de energía para una red de sensores en agricultura de precisión**



Fuente: LÓPEZ RIQUELME, Juan. *Contribución a la red de sensores inalámbricos. Estudio e implementación de soluciones hardware para agricultura de precisión.* p. 106.

Es importante el dimensionamiento correcto del elemento colector de la energía, la idea fundamental de suministrar energía a la red de sensores no busca crear una alta tasa de producción de energía, más bien el fin de contar con un sistema fiable capaz de mantener un suministro constante las 24 horas del día.

Con esta fiabilidad se puede llegar a alcanzar una serie de técnicas o procesos en el diseño del colector de energía, de los cuales se pueden mencionar los siguientes.

- Técnicas de ahorro energético.
- Técnicas de aprovechamiento de la potencia generada por el colector (MPPT).
- Adecuación de mecanismos que busquen el óptimo desempeño del colector.

En el siguiente capítulo se describe el tema de los colectores de energía y su dimensionamiento, de acuerdo con las necesidades energéticas de una red de sensores aplicada a la agricultura de precisión.

2. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS Y COMPONENTES DE UN SISTEMA COLECTOR DE ENERGÍA

Los sistemas colectores de energía se basan en transductores que buscan la mayor captura de la energía de un medio natural como tal, para este efecto, deben auxiliarse de otros elementos que se describen a continuación.

2.1. Colectores de energía

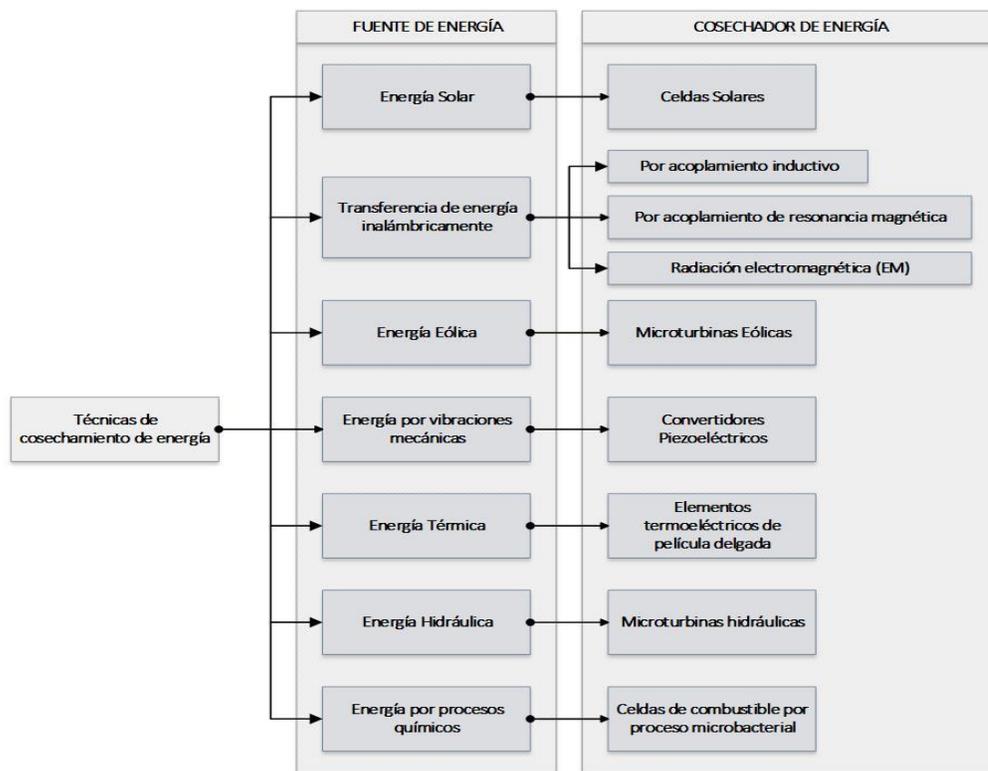
Basagni, et al, en su trabajo *Wireless Sensor Networks with Energy Harvesting* señalan que los colectores de energía o cosechadores de energía son dispositivos que capturan y transforman energía del ambiente para efectuar una conversión a energía eléctrica. Actualmente, su uso y aplicación ha tenido mayor relevancia, puesto que son sistemas compuestos por diferentes colectores que pueden estar sujetos a una acción mecánica por voluntad humana o bien solamente por la interacción de la naturaleza y su entorno.

Por otro lado, toma mayor importancia dichos colectores, ya que pueden suministrar una cantidad de potencia eléctrica a dispositivos que no requieren de una mayor tasa de esta, pero que necesitan que este flujo de carga sea permanente y estable a fin de llevar a cabo funciones de generación de trabajo o de emisión de señales electromagnéticas; lo que se traduce en procesamiento de datos o bien en un proceso de generación de iluminación.

2.2. Clasificación de los colectores por el medio de obtención de la energía

“Los colectores de energía pueden efectuar la captura del recurso energético del ambiente, dependiendo del transductor que se emplea para tal función, esta energía puede estar presente en el ambiente o en procesos biológicos que día con día el hombre forma parte de este”⁴, lo cual se puede describir en la figura 8.

Figura 8. Esquema de los diferentes fuentes de energía y su forma de recolección



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

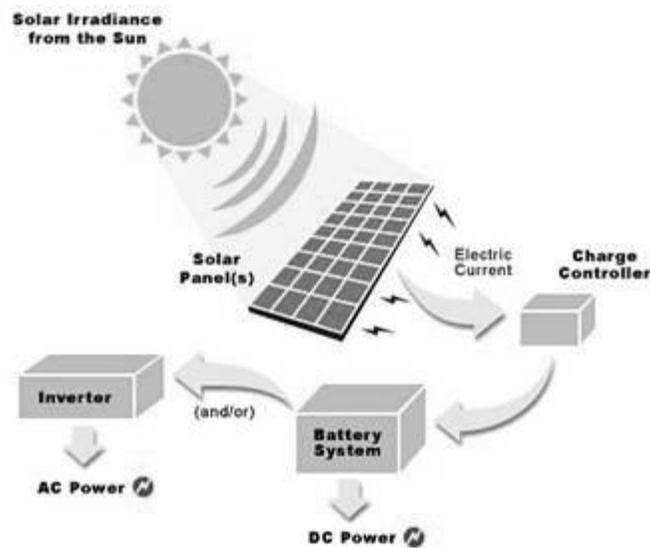
⁴ JAWAD, Haider. et. al. Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture: A review. p. 9.

2.2.1. Colectores de energía con base en el medio ambiente

Los colectores de energía son sistemas que pueden componerse de varios procesos, desde la captura de la forma de energía que, en este caso, la energía provista del medio ambiente, hasta la transformación de esta en potencia eléctrica; un colector de energía con base en el ambiente no necesita ningún esfuerzo mecánico para llevar a cabo su función.

Cuando se trata de recolectar la energía provista por el medio ambiente se clasifican dichos procesos por el tipo de fuente, del cual se describe la fuente de luz solar, elementos de radiación electromagnética o bien por procesos bioquímicos.

Figura 9. Colector de energía solar



Fuente: TIPOS DEES. *Tipos de energía solar*. <https://tiposde.es/tipos-de-energia-solar/>.

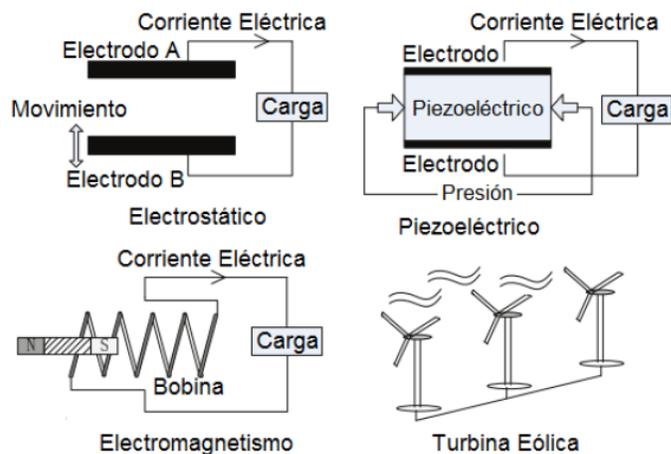
Consulta: 10 de julio de 2020

2.2.2. Colectores de energía por esfuerzos mecánicos

A diferencia de los colectores que no ejercen ningún esfuerzo mecánico para la obtención de recurso energético, los colectores basados en esfuerzos mecánicos integran en su sistema, elementos que desarrollan trabajo mediante una pieza mecánica, como un engranaje, un rotor, una viga, entre otros. El trabajo mecánico se convierte en energía eléctrica, mediante la conversión de esta.

En este tipo de colectores se mencionan a los piezoeléctricos, los colectores eólicos, colectores hidráulicos, entre otros.

Figura 10. **Colectores basados en esfuerzos mecánicos**



Fuente: JIMÉNEZ, Fredy. *Análisis del estado actual de la tecnología energy harvesting (recolectores de energía) basados en piezoelectricidad*. p. 15.

2.3. Transductores

“Componentes de una instalación o sistema, que se encarga de recibir el valor de una magnitud preferiblemente no eléctrica para convertirla en una señal eléctrica pura, por lo general, con un valor de tensión o corriente de bajo valor, de fácil aplicación para suministro en un sistema complejo”⁵.

Estos dispositivos pueden llegar a clasificarse, por su forma de captar la magnitud, de la siguiente forma:

- De efecto termoelectrico
- De efecto piezoelectrico
- De efecto resistivo/capacitivo/inductivo
- De efecto electromagnetico
- De efecto fotovoltaico

2.3.1. Celdas fotovoltaicas

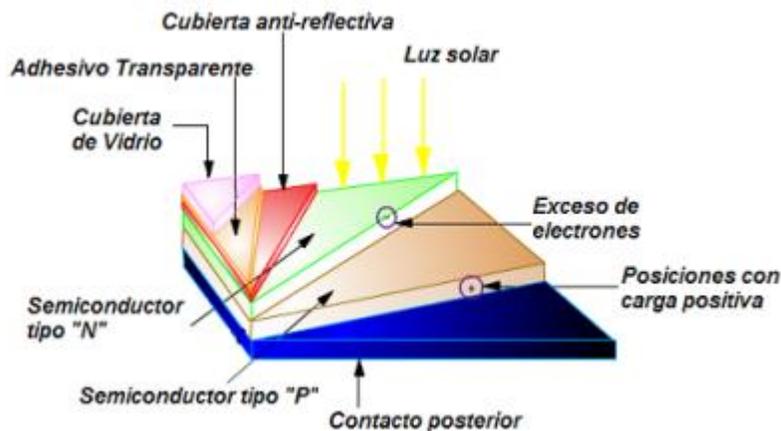
Son transductores y cumplen el proceso de recolección de energía solar mediante un panel diseñado para este fin. Es el proceso de conversión de los fotones provenientes de la luz solar u otra fuente lumínica en electricidad. La energía fotovoltaica puede ser aprovechada utilizando celdas fotovoltaicas (PV). Estas consisten en dos diferentes tipos de materiales semiconductores llamados tipo N y tipo P, un campo eléctrico es formado en el área de contacto, entre estos dos materiales, el cual es llamado unión P-N, tras la exposición de luz, una celda fotovoltaica emite electrones.

⁵ SOBREVILA, Marcelo Antonio. FARINA, Alberto. *Instalaciones de potencia*. p. 66.

La conversión de energía fotovoltaica es una tecnología de cosechamiento de energía tradicional, hecha y comercialmente establecida.

Proporciona altos niveles de potencia a la salida, comparado con otras técnicas de cosechamiento de energía y es la adecuada para sistemas de cosechamiento energético a gran escala. Sin embargo, la potencia generada y la eficiencia del sistema dependen de la disponibilidad de luz y de las condiciones ambientales. Otros factores, incluyendo los materiales usados para la celda fotovoltaica, afectan la eficiencia y el nivel de potencia producida por los cosechadores de energía fotovoltaica. Se conocen implementaciones de cosechadores de energía solar en nodos de sensores los cuales son: *fleck*, *enviromote*, *trio*, *everlast* y *solar biscuit*.

Figura 11. **Composición de una celda solar**

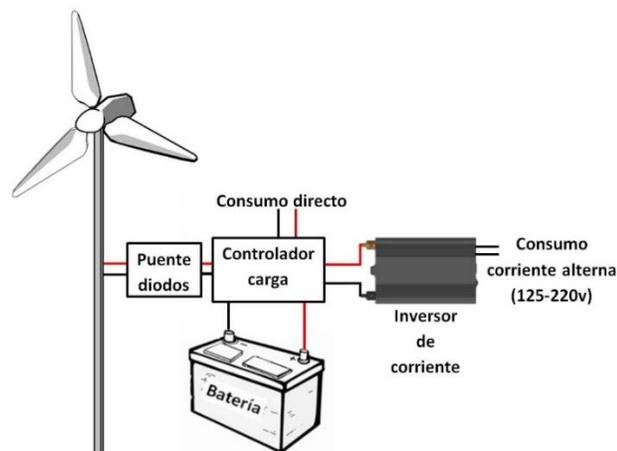


Fuente: NIEVA, Juan Carlos. *Celdas solares*. celdassolares.wordpress.com. Consulta: 10 de julio de 2020.

2.3.2. Miniturbinas eólicas

Se compone, básicamente, del proceso de conversión de la energía de flujo de aire (viento) en energía eléctrica. Es un proceso inductivo, puesto que la acción mecánica del eje de la turbina ejerce a crear un campo magnético traducido en corriente eléctrica a su vez. Un tamaño apropiado de turbina de aire es usado para explotar el movimiento lineal de viento para generar energía eléctrica. Existen miniturbinas eólicas que son capaces de producir suficiente energía y potencia a un nodo WSN. Sin embargo, la eficiencia del cosechador de energía eólica en pequeña escala está aún bajo investigación, desafiada también, por muy bajas proporciones de flujo de aire, fluctuaciones en la fuerza del viento, las impredecibles fuentes de flujo de aire entre otros. Además, aunque el rendimiento de las turbinas eólicas a gran escala es altamente eficiente, las miniturbinas eólicas muestran una eficiencia inferior debido al relativamente arrastre viscoso en las aspas a un bajo número de Reynolds.

Figura 12. Esquema de una mini turbina eólica o aerogenerador



Fuente: GENERATULUZ. *Aerogeneradores*. <https://www.generatuluz.com/generar-electricidad/aerogeneradores/>. Consulta: 10 de julio de 2020.

2.4. Rectificadores de señal

Los rectificadores de señal generalmente son dispositivos que convierten la señal de onda senoidal a una onda lineal con un valor de tensión constante, a decir de esto, la corriente AC es convertida en corriente DC, esto lo logran a través de dispositivos semiconductores capaces de lograr este efecto, entre los que destaca comúnmente el diodo rectificador. Este dispositivo es capaz de rectificar una señal a la entrada de este, llamado ánodo hasta la salida de este, denominada cátodo.

Un rectificador de señal puede tomar dos configuraciones básicas mediante arreglo de diodos, el cual es llamado circuito rectificador, los cuales son:

- Circuito rectificador de media onda
- Circuito rectificador de onda completa

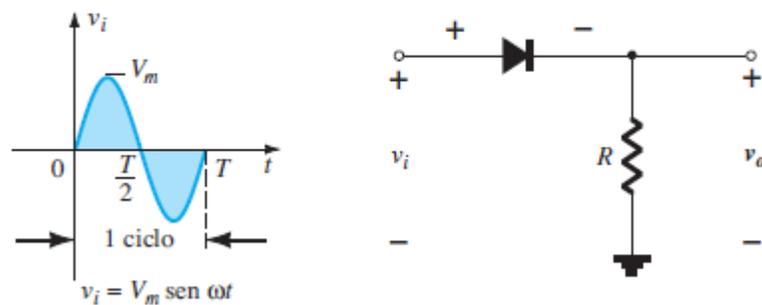
2.4.1. Circuito rectificador de media onda

Las señales de entrada de la energía capturada, por lo general, se describen como “una onda senoidal, esta onda si se analiza su forma, está compuesta por un periodo T , como se observa en la figura 13, se dice que el valor promedio de la suma algebraica de las dos áreas contenidas arriba y abajo, es cero”⁶. El circuito de la derecha es denominado circuito rectificador de media onda, este generará una forma de onda v_0 que tendrá un valor promedio de uso particular en el proceso de conversión de CA a CD. “Cuando se emplea en el proceso de rectificación, el diodo se le denomina comúnmente, rectificador.

⁶ BOYLESTAD, Robert. NASHESKY, Louis. *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. p. 76.

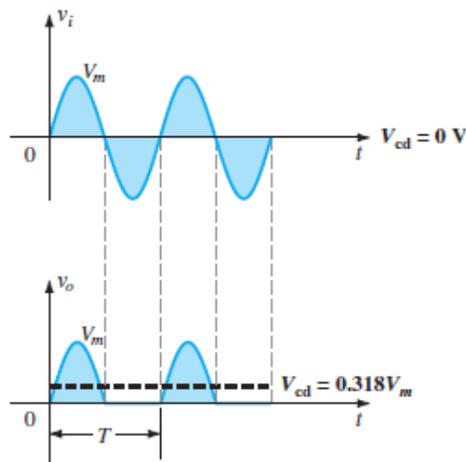
Por lo general, bajo esta configuración, las capacidades de potencia y corriente son mucho más altas que las de los diodos empleados en otras aplicaciones⁷.

Figura 13. Rectificador de media onda



Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. p. 76.

Figura 14. Señal rectificada de media onda



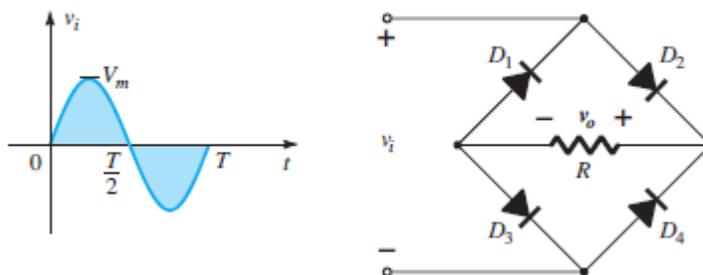
Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. p. 77.

⁷ BOYLESTAD, Robert. NASHESKY, Louis. *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. p. 77.

2.4.2. Circuito rectificador de onda completa

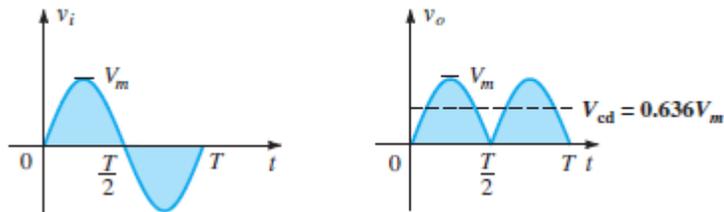
Si bien la rectificación por medio de un arreglo de diodos para formar un rectificador de media onda cumple con el proceso de mejora en la señal de entrada, esta puede tener mejoras a un 100 % en la misma si se utiliza un rectificador de señal de onda completa o bien como se le denomina rectificador de puente. Un rectificador de onda completa utiliza un arreglo de cuatro diodos dispuestos como se muestra en la figura 15, estos hacen la primera etapa de la rectificación como si se tratara de una rectificación de media onda, lo que, a su vez, también da paso a que el otro par de diodos realicen el mismo proceso, la rectificación completa se logra cuando en su primera fase los diodos D_2 y D_3 se encuentran en conducción, a su vez luego de ello los diodos D_1 y D_4 están en conducción. Lo que se obtiene de la onda senoidal es invertir la curva negativa de la curva original, lo que logra reducir significativamente el nivel de tensión DC para lograr un suministro constante.

Figura 15. Rectificador de onda completa en configuración puente



Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. p. 79.

Figura 16. **Formas de entrada y salida para un rectificador de onda completa**



Fuente: BOYLESTAD, Robert. *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. p. 80.

2.5. Reguladores de carga

Los reguladores de carga son dispositivos capaces de controlar un flujo de carga estable entre la que se obtiene de parte de un colector y que es enviada a un banco de baterías o a un capacitor, muchas veces tiene más auge mencionarlas en cosechadores fotovoltaicos, pero tienen igual función en un cosechador eólico.

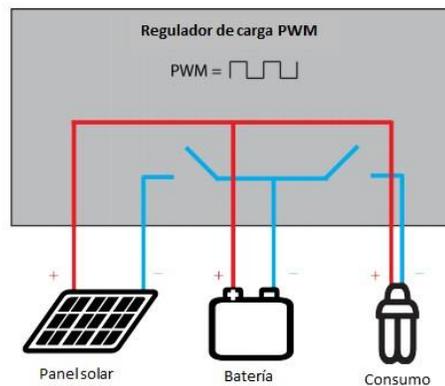
Existen dos tipos de reguladores de carga, por modulación de ancho de pulsos (PWM) y los de seguimiento del punto máximo de potencia (MPPT).

2.5.1. Regulador de carga tipo PWM

Estos reguladores tienen en su configuración un diodo rectificador de silicio que hace las veces de filtro unidireccional, esto supone que la tensión y la corriente del colector solar que provienen de las baterías o capacitores son del mismo valor; sin embargo, esto tiene ciertas características que no hacen del todo bien al sistema, puesto que el suministro de energía solo deviene de lo que

se encuentre almacenado en la batería/capacitor sin importar su punto máximo de potencia, lo que produce una pérdida de potencia que oscila entre los 25 y 35 por ciento.

Figura 17. **Regulador de carga tipo PWM**



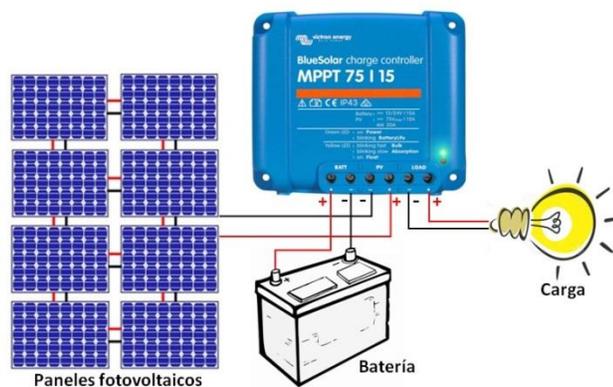
Fuente: GENERATULUZ. *Reguladores de carga*. <https://www.generatuluz.com/tu-propia-instalacion-aislada/controladores-carga/>. Consulta: 16 de febrero de 2020.

2.5.2. **Reguladores de carga tipo MPPT**

Por otra parte, los MPPT están configurados, básicamente por un diodo de protección, un convertidor de tensión y de un seguidor de máxima potencia, esto permite que en conjunto puedan; primero, suministrar diferentes niveles de tensión entre el cosechador de energía, y segundo, en el dispositivo de almacenamiento; por otro lado, el seguidor de máxima potencia controla el nivel de potencia en el cosechador a fin de suministrar esa máxima potencia cuando se alcance maximizando todo el recurso capturado por el cosechador.

La diferencia radica, principalmente, que la tensión no es la misma que la corriente tanto del lado del cosechador como del lado del almacenamiento, por lo cual se garantiza que en los MPPT se logra una reducción de las pérdidas de potencia.

Figura 18. **Regulador de carga tipo MPPT**



Fuente: GENERATULUZ. *Reguladores de carga*. <https://www.generatuluz.com/tu-propia-instalacion-aislada/controladores-carga/>. Consulta: 16 de febrero de 2020.

2.6. Almacenaje y gestión de la energía colectada

El almacenamiento de la energía es un proceso muy importante en toda la cadena de suministro de los nodos del WSAN, por una parte, se tiene conocimiento de que algunos sistemas pueden utilizar la energía colectada de manera directa y suministrar a la red de nodos y posteriormente el excedente puede ser almacenado, aunque la primera opción de suministrar de manera directa no es una situación viable para el sistema.

Por lo cual se maneja un sistema que trabaja con componentes almacenadores los cuales hacen, a su vez, la función de estabilizadores de señal

de voltaje proveniente de la conversión de la energía del ambiente en energía eléctrica. Por otra parte, también cumple su principal función que es preservar y almacenar la energía recolectada.

Cuando la tasa de energía cosechada es mucho mayor que la corriente utilizada, el componente estabilizador puede guardar la energía excedente para su uso posterior; esto es muy importante y es el punto neurálgico de todo el sistema junto con los cosechadores de energía, puesto que un abastecimiento de energía garantiza que cuando no exista cosecha de energía, se tenga una reserva para el funcionamiento del sistema. El nivel de energía colectada depende en gran parte de la fuente del ambiente donde se genera.

A continuación, se describen las dos alternativas en cuanto a almacenamiento de energía se refiere.

2.6.1. Bancos de baterías

Son usualmente vistos como los dispositivos ideales para almacenamiento de energía, estas contienen una gran cantidad de pequeñas unidades de energía en su interior a su vez. Esto se traduce en la siguiente forma; cuando se ejecuta la operación de un nodo, por ejemplo, al enviar o recibir un paquete de datos por la red sensora, se utiliza cierta cantidad de unidades de energía, pero también depende del costo de operación de la energía que se ha producido. Hasta aquí se tiene la noción que el estado de la batería y su capacidad almacenada de energía se ve reducida solo cuando es requerida durante la operación antes mencionada.

Las baterías operan de manera diferente. Como se tiene conocimiento, las baterías en su estado real están sujetas a autodescargas de su capacidad

almacenadora, inclusive las celdas de baterías que no presentan actividad alguna sufren una experiencia de reducción de su carga debido a cambios químicos internos. Las baterías, inclusive tienen una eficiencia en su carga y descarga estrictamente menor a 1, esto quiere decir, que algunas cantidades de energía se pierden cuando se da el proceso de carga y descarga de la misma.

Adicionalmente, es importante el análisis del comportamiento de las propiedades no lineales de las baterías, las cuales se pueden describir de la siguiente forma.

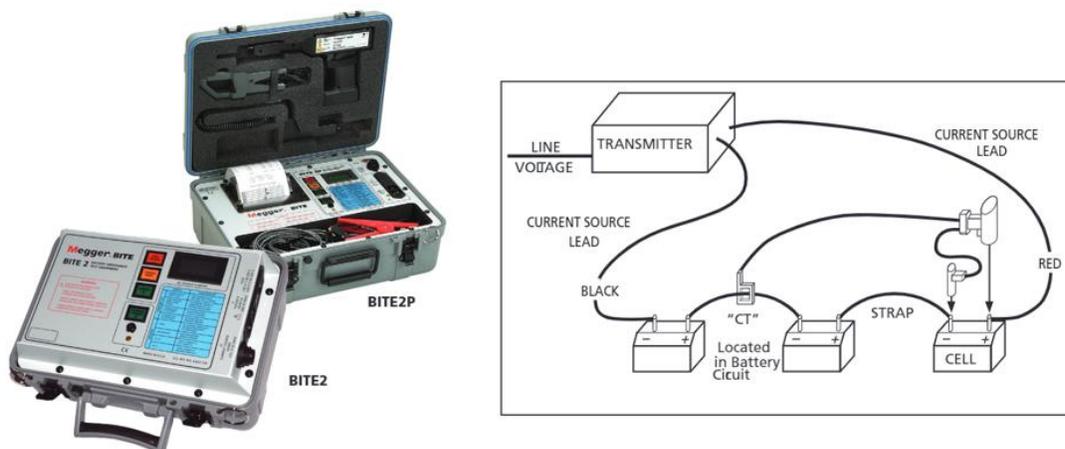
- Capacidad dependiente de la tasa de energía colectada: la capacidad de energía entregada por las baterías disminuye de manera no lineal a medida que disminuye la tasa de descarga.
- El efecto de la temperatura: la temperatura de operación afecta directamente el comportamiento de la descarga de la batería y directamente impacta en la tasa de autodescarga de la misma.
- El efecto de recuperación: el tiempo de vida útil y la capacidad de entrega de una batería aumenta si se produce la descarga en periodos alternados de inactividad (pulsos de descarga); sin embargo, las baterías recargables experimentan una reducción de su capacidad en el ciclo de recarga, y su voltaje depende en el nivel de carga de la batería y varía durante la descarga.

Por lo tanto, estas características deberían ser tomadas en cuenta a la hora de dimensionar y simular el sistema cosechador de energía debido a que estas pueden fácilmente llevar a estimaciones erróneas en el tiempo de vida útil de la batería. Es decir, si el sistema cosechador usa baterías recargables para

almacenamiento de la energía colectada del ambiente, es importante considerar que la reducción en la capacidad experimentada por la batería en el ciclo de recarga es probable que la capacidad de entrega y la vida útil se reduzcan ambas por los efectos antes explicados.

Algunas maneras de verificar la vida de las baterías del sistema son a través de planes de monitoreo de la vida útil mediante ensayos de pruebas de capacidad o pruebas de descarga, de acuerdo con las normas IEEE 1188 & 1106, según aplique el tipo de batería a emplear, además de contar con instrumentos de medición del estado de la batería tales como Megger BITE2 & BITE 2P.

Figura 19. **Equipo de prueba de impedancia de baterías Megger BITE2 & BITE 2P y configuración común para la prueba**



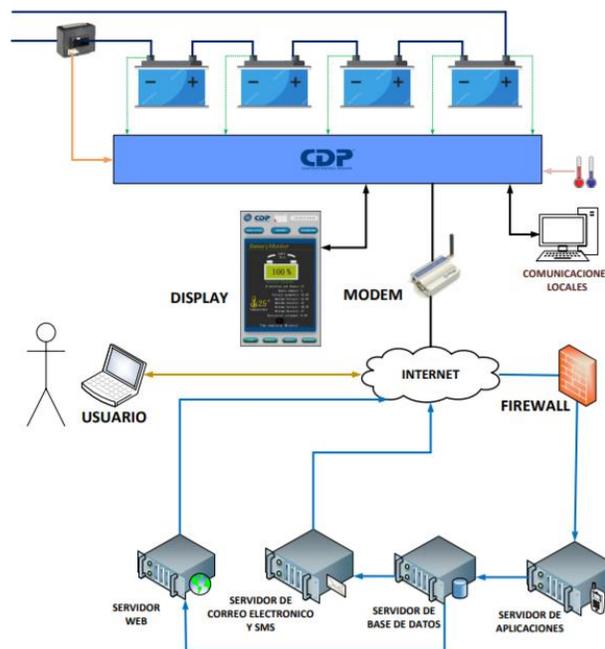
Fuente: MEGGER. *Prueba de baterías*. <https://csa.megger.com/equipo-de-prueba-de-impedancia-de-baterias-bite2-y-bite2p>. Consulta: 8 de abril de 2021.

Además, en la actualidad existen sistemas de monitoreo denominados inteligentes puesto que integran soluciones mediante el enlace de redes de internet para transmitir el estado de la batería hacia un ordenador o un dispositivo portátil en tiempo real, en el cual se establecen las estadísticas de monitoreo para

variables como la corriente de descarga de la batería, el voltaje y la temperatura del ambiente donde se sitúa la batería o el banco de baterías.

Las ventajas del uso de los sistemas de monitoreo de baterías es que se basa en el seguimiento de las unidades de forma individual de modo que se tienen un nivel de confianza en los datos del estado real, además que se ajusta a diferentes tipos de baterías (plomo-ácido, níquel, cadmio, níquel metal, entre otros), por lo que lo hace muy versátil en diferentes aplicaciones.

Figura 20. **Principio de funcionamiento de los sistemas inteligentes de monitoreo de baterías**



Fuente: CHICAGO DIGITAL POWER. *Sistema de monitoreo y medición de baterías.*

http://www.cdpups.com/Content_Elements/downloads/Catalogs/426-Guia%20rapida%20Sistema%20de%20monitoreo%20y%20medicion%20de%20baterias.pdf. Consulta: 8 de abril de 2021.

Lo anterior se traduce en la reducción de altos costos de mantenimiento, que muchas veces depende solamente de la vida útil de la batería, que como se ha mencionado, es un elemento crucial para el suministro adecuado de la energía a los elementos que lo requieran. Existen opciones dentro del mercado de estos sistemas inteligentes de monitoreo de baterías, tales como:

Tabla II. **Modelos comerciales de sistemas inteligentes de monitoreo de baterías**

Modelo	Casa comercial
BATTERIE+	CDP (Chicago Digital Power)
BDS-256 / BDS-40 / MPM-100	ALBER
PBAT 61-02 / PBAT 61-12 / PBAT 600	OSONIX
MIBAT	BECOR
EABA01	POWEST

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Sistema de monitorización PBAT Osonix**



Fuente: KENJITSU. *Sistema de monitoreo de baterías.*

<https://kenjitsulatam.com/baterias/sistema-monitoreo-baterias/>. Consulta: 8 de abril de 2021.

2.6.2. Supercapacitores

Son dispositivos que están formados por pares de placas conductoras separadas por un medio dieléctrico. Su funcionamiento es muy similar al de un condensador a gran escala. Sin embargo, el nombre de súper condensador indica su mayor capacidad (medida en faradios), miles de veces mayor que la capacidad de los condensadores electrolíticos de alta capacidad, además, cargar y descargar en brevísimos periodos de tiempo. Los EDLC más potentes del mercado llegan hasta los 5 000 F de capacidad.

Con los supercapacitores se debe tener muy en cuenta la corriente de fuga que se presenta en estos, más cuando se plantean escenarios donde los sistemas cosechadores de energía necesitan almacenar cuanta energía posean por largos periodos de tiempo. En un nivel general, si la fuente de energía es esporádica o si solo está disponible en pequeñas cantidades de energía, la pequeña porción de energía cosechada puede presentar pérdidas por la corriente de fuga, la cual puede ser muy significativa para todo el sistema.

La corriente de fuga es de particular relevancia para los supercapacitores, porque su densidad de energía es de un orden de magnitud menor que la de las baterías electroquímicas, pero sufren de un considerable autodescarga mucho mayor.

La corriente de fuga de un supercapacitor es fuertemente variable y depende de varios factores, incluyendo el valor de la capacitancia del dispositivo, la cantidad de energía almacenada, la temperatura de operación, la duración de la carga, entre otros. Por esta razón, el patrón de la corriente de fuga de un supercapacitor, en particular, debe ser determinado experimentalmente.

Adicionalmente, esta corriente tiene variaciones respecto a la variable tiempo; es considerablemente alta, inmediatamente después de que este ha sido cargado; luego de ello, esta disminuye.

Es importante tomar en cuenta, también, que se pueden evaluar comparativamente las características de las baterías versus los supercapacitores. Bajo este escenario, cabe resaltar que en los supercapacitores no es posible usar toda la energía almacenada en los mismos. El voltaje de un supercapacitor cae de un voltaje alto a cero linealmente, a diferencia de la curva plana que se resalta y es típica en las baterías electroquímicas. En realidad, las baterías y los supercapacitores se complementan. Las baterías aportan la energía y los supercapacitores aportan los picos de potencia.

2.7. Inversores de voltaje

Los inversores de voltaje son dispositivos capaces de convertir la energía proveniente de la fuente natural en forma DC a una corriente pura o senoidal AC. En el inversor se busca la relación que tiene el voltaje del arreglo de colectores y la potencia que se demanda.

Para la elección del inversor hay que tomar en cuenta los siguientes puntos:

- Una conexión en serie del modelo colector determinará un aumento de la tensión (V_{oc}) y mantendrá el valor de la corriente del sistema.
- Una conexión en paralelo del modelo colector determinará un aumento en el valor de corriente (I_{sc}) y mantendrá el voltaje.

Figura 22. **Esquema de variables de un inversor**



Fuente: LILLO PANIAGUA, Pedro. *Manual para el dimensionamiento y evaluación de un arreglo fotovoltaico monofásico a nivel residencial en Chile*. p. 37.

2.8. Conductores eléctricos

Los conductores eléctricos son los elementos capaces de transportar la energía que se captura en el modelo colector de energía, por lo cual su capacidad viene determinada por la capacidad de conducción de la corriente y el nivel de tensión a lo cual están diseñados; así como a una serie de variables a las cuales están sujetas tales como: el nivel de temperatura de exposición, los rayos UV, los desgarros, impactos, la abrasión, entre otros.

Los materiales de los cuales están constituidos los conductores a menudo son cobre y aluminio, por su alto grado de conductividad, también es importante el material de aislamiento, pues no todas las aplicaciones se establecen para las mismas condiciones de trabajo a la cual estarán sujetos dichos conductores.

Figura 23. **Cables para aplicaciones de energía solar y eólica**



Fuente: SOLARTEX. *Cable fotovoltaico*. <https://www.solartex.co/tienda/producto/cable-solar-4mm>. Consulta: 20 de abril de 2021.

2.9. **Dispositivos de protección contra sobretensiones**

Por lo general, en cualquier instalación eléctrica o cualquiera que se involucre manejo de tensiones o corriente de trabajo deberán existir dispositivos que proteja contra los siguientes elementos:

- Contacto eléctrico
- Sobrecorrientes
- Sobretensiones y rayos (descargas)

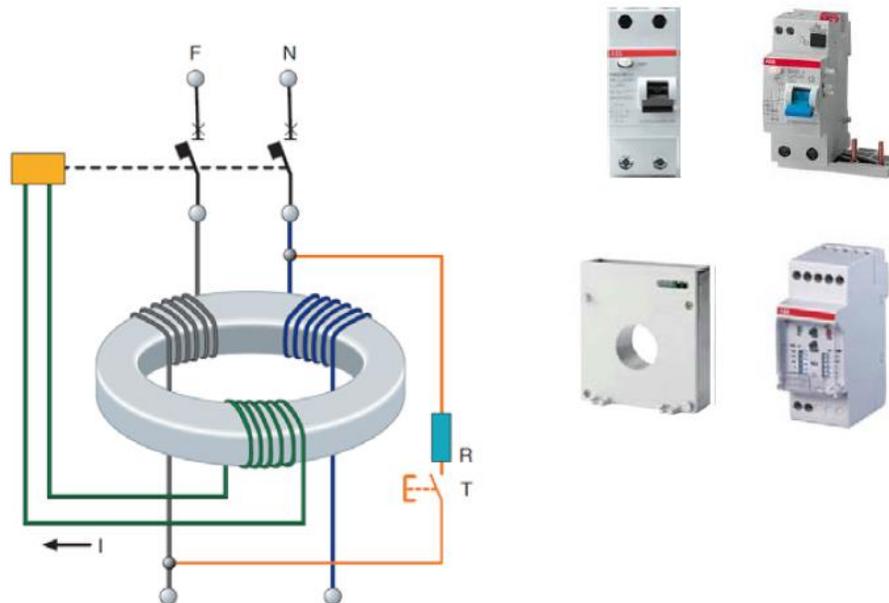
Los dispositivos contra sobretensiones (DPS) son elementos que contienen materiales disipadores del calor producido por el efecto del aumento de temperatura que provoca un pico de tensión o corriente o un rayo atmosférico, esto mediante la composición de óxidos de zinc o metal según sea el caso.

Para aplicaciones como la del sistema colector, se establece un nivel de DPS como se describe a continuación:

- DPS tipo 1: explosores o tubos de gas (diodos controlados) cuando el voltaje excede un valor dado instantáneamente reduce su impedancia.
- DPS tipo 2: basado en varistores o diodos Zener, decrece gradualmente la impedancia cuando el voltaje aumenta.
- DPS tipo 1+2: combinado incluye los dos tipos anteriores conectados en serie o en paralelo.

La elección de alguna de las opciones antes mencionadas depende de los cálculos de corriente de cortocircuito del modelo colector, así como de la tensión máxima a circuito abierto. Esto se describe en el capítulo de cálculos.

Figura 24. Esquema de protección de un DPS



Fuente: RONDON, Freddy. *ABB-sistemas fotovoltaicos, consideraciones técnicas*. p. 14.

2.10. Potencia eléctrica de salida

La carga o potencia eléctrica es el último paso de una cadena de microprocesos antecesores, la potencia eléctrica de salida es, por lo general, la fuente de alimentación de la electrónica de bajo consumo y otros dispositivos de consumo medio (sensores de acción mecánica). En este caso, la fuente de potencia que proviene de los dispositivos de almacenamiento puede alimentar a su vez a la red de sensores, los cuales pueden estar presentes en áreas de domótica, automatización de procesos industriales, sistemas de circuito cerrado de seguridad, sensores aplicados a la agricultura, entre otros.

2.11. Análisis de los sistemas mecánicos para los colectores de energía solar y eólico

Los sistemas mecánicos para los colectores de energía son una de las partes importantes, ya que estos son las estructuras físicas de las cuales depende el trabajo relacionado a la eficiencia del colector propio.

Dichas estructuras mecánicas están diseñadas de tal forma que, una vez adheridas al colector de energía, todo el conjunto pueda trabajar de manera que ambos provean de las condiciones necesarias para lograr alcanzar la mayor eficiencia de la recolección de la energía del medio ambiente.

Por otra parte, el diseño de estos mecanismos debe estar sujeto a análisis mecánicos, tales como la interacción de las fuerzas que pueden causar momentos concentrados y de los cuales no se desea una contingencia por causa de falla en los mismos, a su vez, siguen también un análisis de su funcionamiento mediante el empleo de sensores, los cuales actúan dependiendo la variable a los cuales pueden estar sujetos (radiación, posición azimutal, velocidad del viento, flujo hídrico, entre otros). Por lo cual, la tarea del diseño es un verdadero desafío de ingeniería buscando el objetivo que garanticen la eficiencia del conjunto mecanismo colector que se espera.

2.11.1. Sistemas mecánicos MPPT para colectores solares

Los sistemas mecánicos de posicionamiento para seguidores tipo solar son los que más auge y desarrollo han tenido de cierta manera en el transcurso del uso de la energía solar convertida a energía fotovoltaica.

Las estructuras de estos guardan relación con una serie de variables las cuales se deben tomar en cuenta a la hora de su diseño, estas serán descritas de manera general en los siguientes apartados. A continuación, se aborda una clasificación de los sistemas por su función específica.

2.11.1.1. Según los componentes de movimiento

Un sistema de seguimiento solar se puede clasificar en dos tipos por la naturaleza de los componentes que brindan el movimiento, estos pueden ser:

- Seguidor solar pasivo

Este tipo de seguidor basa su funcionamiento en fluidos de tipo gaseoso que, al entrar en contacto con el calor, crean desbalances debido a la interacción de las moléculas, lo que luego se traduce en movimiento en un solo sentido.

- Seguidor solar activo

Basa su funcionamiento mediante dispositivos como motores y controladores, los cuales monitorean la posición del sol e interpretan esto para dar movimiento respecto a esta variable.

2.11.1.2. Según el sistema fotovoltaico

- Sistemas concentrados: son sistemas fotovoltaicos concentrados los que necesitan que la radiación solar se concentre en un punto específico, lo cual requiere de un alto porcentaje de precisión.

- Sistemas no concentrados: a diferencia de los sistemas no concentrados, la precisión de la radiación incidente no es requerida, pero se ve su diferencia en la potencia que entregan los mismos.

2.11.1.3. Según los grados de libertad

Los grados de libertad en un seguidor solar se asocian al número de ejes de rotación que tienen los mismos, por lo cual estos pueden subclasificarse de la siguiente manera:

- Seguidores solares de un solo eje

Son seguidores de un solo grado de libertad, por lo cual su movimiento hace que esté concentrado en un solo eje, pueden ser de eje horizontal, eje vertical o bien inclinados.

- Seguidores solares de doble eje

Su eje de rotación se describe por dos grados de libertad o bien por dos movimientos simultáneos, pero diferenciados por la posición de los componentes que producen dicho movimiento.

2.11.2. Estructura básica de un sistema mecánico seguidor solar

Pelayo López, et al, en su trabajo *Comparativa entre la eficiencia de un sistema fotovoltaico con seguimiento solar y la de un sistema fotovoltaico fijo* indican que los seguidores solares o denominados también sistemas de

seguimiento solar, están constituidos por cuatro partes básicas de las cuales una es directamente una estructura mecánica y los demás son sistemas.

- Estructura de soporte
- Sistema de control de movimiento
- Sistema de transmisión o de potencia
- Sistema de adquisición de datos

Figura 25. **Esquema básico de un seguidor solar**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

2.11.2.1. Estructura de soporte

Por lo general se compone de perfiles de acero galvanizado o de acero con tratamientos térmicos que protegen el material de agentes ambientales que producen corrosión galvánica.

Estas estructuras se diseñan de tal forma, que pueden ser ajustables para la colocación de los demás dispositivos que pueden hacer de la operación algo de fácil maniobrabilidad.

Figura 26. **Estructuras de soporte para sistema fotovoltaico con seguimiento solar**



Fuente: PELAYO, Jorge. *Comparativa entre la eficiencia de un sistema fotovoltaico con seguimiento solar y la de un sistema fotovoltaico fijo*. p. 6.

2.11.2.2. Sistema de control de movimiento

El sistema de control de movimiento se fundamenta en sensores de radiación solar independientes, los cuales, por lo general se constituyen como celdas solares, estas están ubicadas en los dos ejes rotacionales (horizontal y vertical) en una posición a 90 grados una de otra.

Su funcionamiento obedece a la captura de la radiación solar bajo parámetros de comparación que hace posible el movimiento en el eje que detecte los valores que se necesitan por el azimut del sol.

Figura 27. **Seguidor solar con sensores de movimiento**



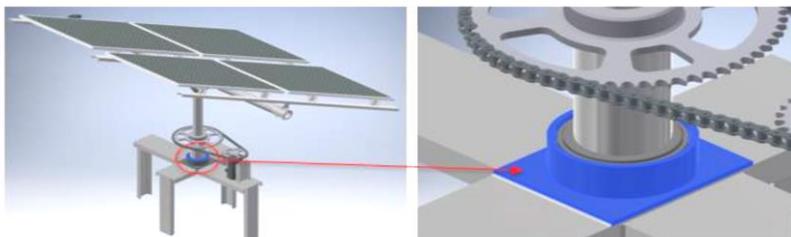
Fuente: PELAYO, Jorge. *Comparativa entre la eficiencia de un sistema fotovoltaico con seguimiento solar y la de un sistema fotovoltaico fijo*. p. 6.

2.11.2.3. Sistema de transmisión o de potencia

Es un conjunto de mecanismos que hacen posible la transmisión de las fuerzas longitudinales o transversales para el debido movimiento de los colectores solares.

Estos mecanismos pueden ser: ruedas dentadas, servomotores, motores eléctricos DC, cremalleras, brazos hidráulicos, brazos neumáticos, entre otros.

Figura 28. **Mecanismo transmisor de potencia por cadena y rueda dentada**



Fuente: JIMÉNEZ, Javier. *Diseño de un seguidor solar automático para un arreglo de paneles fotovoltaicos*. p. 66.

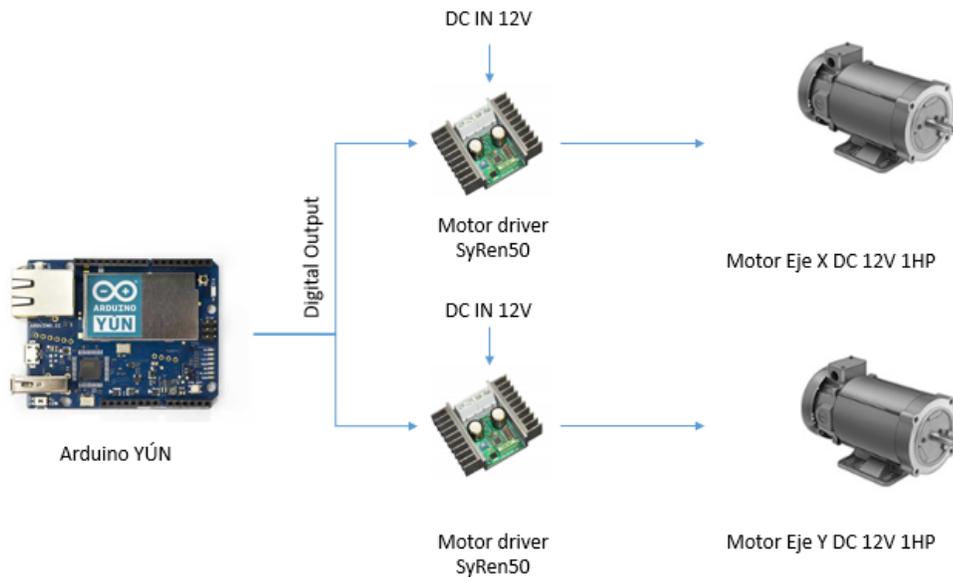
2.11.2.4. Sistema de adquisición de datos

Este sistema se refiere al que administra la información obtenida de sensores de radiación, también se le conoce como un sistema de control. Este busca “cumplir con el objetivo de aumentar la energía generada por los paneles solares, es necesario que estén lo más perpendiculares al sol en cada momento; por lo tanto, es un sistema de control el cual se encargue de coordinar los movimientos necesarios para ubicar las celdas perpendiculares al sol en cada momento”⁸.

Los componentes que hacen posible esta función son, principalmente, una tarjeta de adquisición de datos electrónica (Arduino), los motores que interactúan con el movimiento del seguidor y sensores de voltaje y corriente como elementos de comparación de las variables de entrada y salida. En la imagen de la figura 29 se puede apreciar la representación de un sistema de adquisición de datos básico.

⁸ JIMÉNEZ ALJURE, Javier Alfonso. *Diseño de un seguidor solar automático para un arreglo básico de paneles fotovoltaicos*. p. 113.

Figura 29. **Sistema de adquisición de datos**

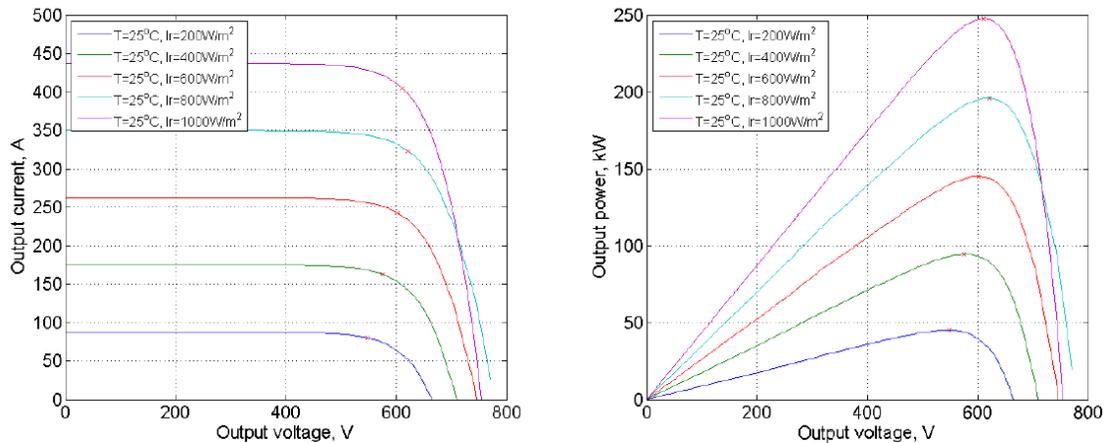


Fuente: JIMÉNEZ, Javier. *Diseño de un seguidor solar automático para un arreglo de paneles fotovoltaicos*. p. 113.

2.11.3. Estrategias de control MPPT para colectores solares

Muñoz Moreno, en su trabajo *Modelo y control de un sistema híbrido PV-eólico para una micro red eléctrica DC* manifiesta que las estrategias de control MPPT (Máximo Power Point Tracking) son algoritmos o métodos que buscan que el arreglo fotovoltaico o los colectores solares operen en la región conocida como punto de máxima potencia, para condiciones de radiación solar y temperatura determinados. Estas condiciones dadas por el entorno climatológico son muy variables e inestables en términos de corriente, voltaje y potencia de salida, por lo cual es difícil determinar con una precisión el punto máximo de potencia. En la figura 30 se muestran las curvas características de los colectores solares.

Figura 30. **Curvas características I-V y P-V para distintas radiaciones solares.**



Fuente: MUÑOZ, Ignacio. *Modelo y control de un sistema híbrido PV-eólico para una microrred eléctrica DC*. p. 18.

Estas estrategias de control buscan mantener la continuidad del suministro de energía proveniente de los colectores tratando de hacer eficiente dicho suministro, por medio de los convertidores o reguladores como se abordó en el punto 2.5. reguladores de carga. Cuéllar Guarnizo indica en su trabajo *Diseño de un controlador para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) en paneles solares* que los convertidores son dispositivos mediante los cuales es posible la conversión del voltaje DC a AC, si así se requiere, por lo cual existen diversas aplicaciones de estos, pero los que sobresalen de manera particular son los denominados convertidores conmutados, los cuales su función principal es modificar o adecuar los niveles de tensión e intensidad según se necesite.

2.11.3.1. Método perturbación y observación (P&O)

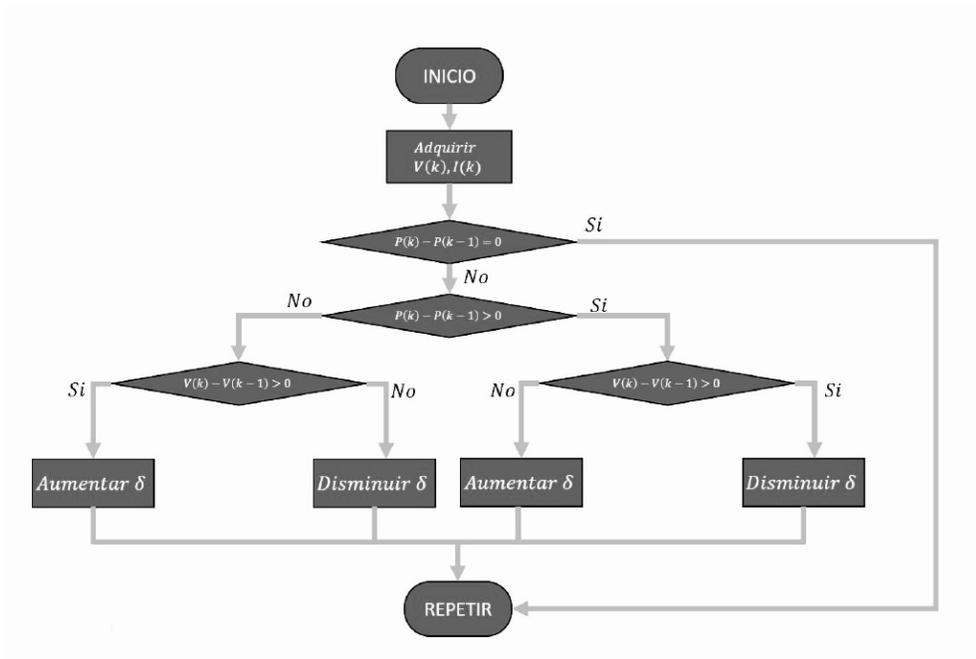
Este método es uno de los más conocidos en los algoritmos de control para seguimiento del máximo punto de transferencia de potencia en colectores solares. Su principio de funcionamiento se basa en la modificación temporal del ciclo útil de trabajo bajo las siguientes condiciones:

- Se perturba el nivel de tensión a la entrada de la red del convertidor, con lo cual se da paso a la observación del comportamiento de la variación de la potencia en la salida de este.
- En la observación del comportamiento del nivel de potencia se toman dos decisiones, si el nivel de potencia aumenta, se continúa con el grado de perturbación hasta alcanzar el MPPT del sistema. Si el nivel de potencia disminuye, entonces las perturbaciones deben ser invertidas.

“Este método presenta las desventajas que existe un porcentaje de oscilaciones en la búsqueda del punto máximo de potencia, lo que a su vez representa un grado alto de tiempo en la búsqueda de este y, por consiguiente, también la pérdida de energía, la cual está asociada a los parámetros de la irradiación y la temperatura que se está capturando por el colector”⁹.

⁹ CÓRDOBA PACHECO, Andrés Felipe. *Estudio comparativo entre controladores implementados en un sistema de energía solar fotovoltaico*. p. 18.

Figura 31. Algoritmo del método perturbación y observación (P&O)

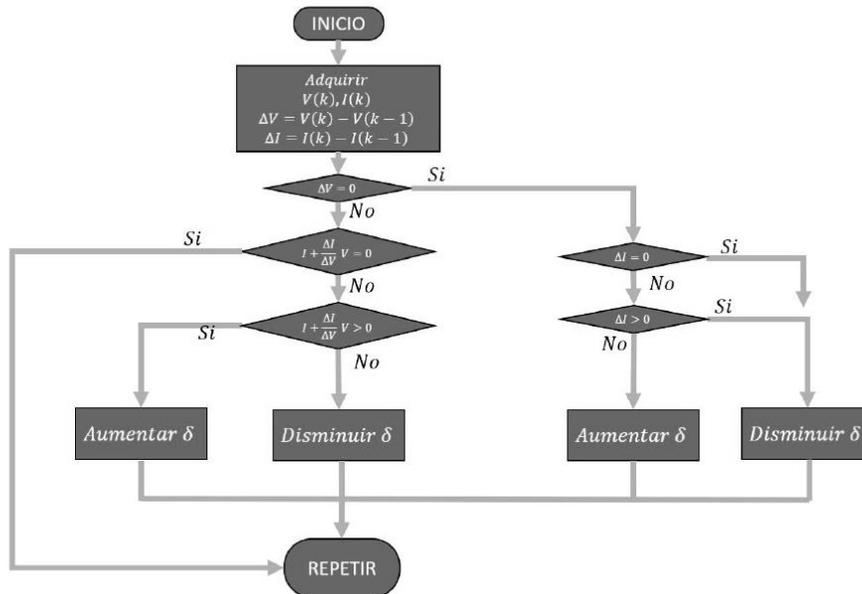


Fuente: CÓRDOBA P., Andrés. *Estudio comparativo entre controladores implementados en un sistema de energía solar fotovoltaico*. p. 18.

2.11.3.2. Método de conductancia incremental (IC)

Este método guarda similitudes con el P&O que, aunque no se provocan perturbaciones para hallar el punto de máxima potencia, busca las variaciones en las variables de irradiación y temperatura, lo que da lugar a que, en vez de perturbar el nivel de tensión en la entrada del controlador, lo que se busca es alterar el nivel de conductancia. La conductancia es la propiedad inversa a la resistencia eléctrica, por lo cual, este parámetro se utiliza analizando la curva de la potencia versus la tensión para determinar el MPPT.

Figura 32. **Algoritmo del método conductancia incremental (IC)**



Fuente: CÓRDOBA P., Andrés. *Estudio comparativo entre controladores implementados en un sistema de energía solar fotovoltaico*. p. 19.

2.11.4. Redes circuitales para convertidores conmutados

Existen diversos tipos de convertidores conmutados, destacando los convertidores CC/CC, convertidores AC/CC (fuentes reguladas), convertidores CC/AC (inversores), convertidores AC/AC (rectificadores). Estos dispositivos han cobrado auge en la parte de la electrónica de potencia y de suministros eléctricos para obtener una señal lo más estable posible en el nivel de potencia de la carga.

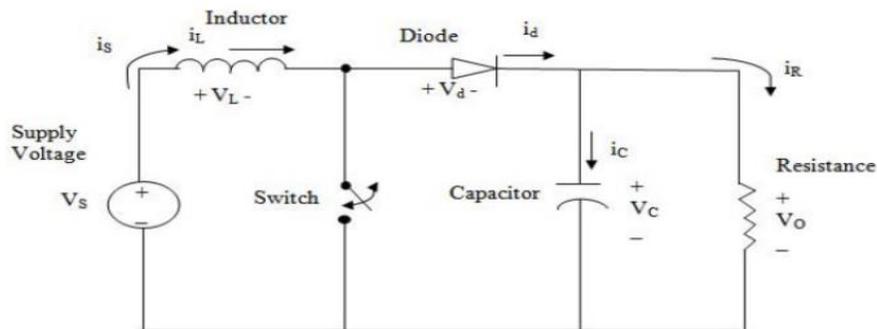
Pero no solamente depende en la mayor parte del trabajo que se haga por el convertidor, sino también de cómo esté configurada la red circuital del sistema

de control. A continuación, tres configuraciones que hacen posible alcanzar la eficiencia de los colectores solares.

2.11.4.1. Circuito tipo Boost

El circuito tipo Boost es uno de los más usados en la regulación de tensiones y, últimamente, ha tenido una variada aplicación en medios donde se genera energía por una forma renovable, específicamente en la generación de energía por medio solar.

Figura 33. Topología del convertidor Boost



Fuente: MARULANDA, Jesser. *Diseño y construcción de un convertidor DC/DC tipo Boost con PWM ajustable*. p. 10.

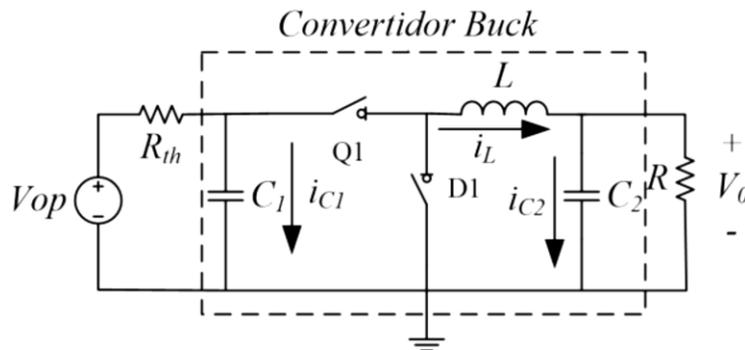
Según D'Alessio, González, & Cáceres, en su artículo *Diseño y construcción de un convertidor boost de pequeña potencia, con propósitos educativos y de investigación* afirma que, en el convertidor elevador o Boost, la tensión de salida es mayor a la tensión de entrada. Esto se debe, principalmente, porque utiliza las características del inductor y del capacitor como elementos almacenadores de energía para el aumento de corriente que proviene de una fuente de energía y esta se utiliza para suministrar al capacitor, lo que a su vez produce niveles de voltaje mayores en la carga que en los de la fuente de energía original.

2.11.4.2. Circuito tipo Buck

Una de las características principales del circuito convertidor tipo Buck es la capacidad de reducir el nivel de voltaje en la entrada de la red, de ahí que recibe, también el nombre de circuito reductor de voltaje. Este circuito es uno de los que se emplea frecuentemente en los temas de regulación de voltaje.

El esquema de funcionamiento del circuito Buck se fundamenta en el uso de elementos resistivos, capacitivos e inductivos, donde la corriente del circuito se asocia a inductores, los voltajes en la entrada y salida de la red se asocian a los capacitores y el elemento resistivo es la carga de trabajo del sistema.

Figura 34. Topología del convertidor tipo Buck



Fuente: RAMÍREZ, Carlos. SAAVEDRA, Andrés. RAMOS, Carlos. *Diseño de un convertidor CD-CD y su control para un sistema de generación eólico conectado a una carga aislada.*

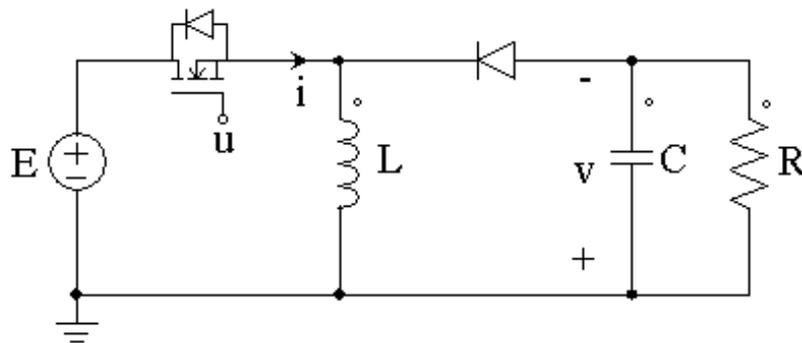
p. 101.

2.11.4.3. Circuito tipo Buck-Boost

Flores Torres, et al, en su trabajo *Análisis y diseño de un convertidor Buck-Boost* expresan que este circuito, también denominado circuito *Flyback* inversor, configura su función de trabajo a la doble acción que hace independiente el circuito Buck y el circuito Boost, es decir, este circuito convierte una tensión de entrada en una tensión de salida negativa regulada que puede ser mayor o menor que el valor absoluto de la tensión de entrada.

La configuración básica de un circuito convertidor tipo Buck-Boost se muestra en la figura 35, de la cual se puede mostrar los elementos que componen el mismo, un diodo Mosfet y un diodo rectificador, los cuales efectúan la función de un interruptor, mientras que los elementos pasivos están representados por un inductor, un capacitor y un elemento resistivo en configuración en paralelo.

Figura 35. **Modelo de circuito convertidor tipo Buck-Boost**



Fuente: LINARES, Jesús. VÁSQUEZ, Jacob. YESCAS, Edgardo. *Control de corriente por modos deslizantes del convertidor cd/cd Buck-Boost*. p. 1.

2.11.5. Sistemas mecánicos MPPT para microgeneradores eólicos

Los sistemas mecánicos provistos de métodos de seguimiento del punto máximo de potencia (MPPT, por sus siglas en inglés) para pequeños generadores eólicos tienen una relevancia, en gran parte debido a que su fin es buscar la mayor eficiencia en la conversión de la energía del ambiente a energía eléctrica, ya sea de baja o alta potencia. Su aplicación está diversificada actualmente, en innumerables aplicaciones que van desde la generación de bajo consumo domiciliario, suministro de energía en puntos remotos hasta los grandes parques eólicos que proveen de una cantidad considerable de kilowatts hora para el suministro de grandes ciudades.

Conocer las características de estos sistemas es significativo, puesto que ayuda a determinar cuál de todas sus formas puede adecuarse a las necesidades de consumo energético, y, por otro lado, ayuda a conocer la forma de construcción para hacer de estos, máquinas eficientes a la hora de buscar el máximo aprovechamiento de ellos.

En los siguientes apartados se describe una clasificación de estos, por sus características más relevantes y luego la descripción de la estructura básica de dichos sistemas.

2.11.5.1. Según la disposición del eje

Los aerogeneradores, (AG) por ser máquinas que proporcionan la energía derivada de la transformación de la energía del viento deben ser provistas de ese mecanismo que capture o colecte óptimamente dicha energía. El eje mecánico adherido al rotor de un motor donde se induce el campo electromagnético, que

luego se convierte en energía eléctrica, es el principal componente que puede ser determinante para este proceso; aparte es el medio de la transferencia mecánica entre las palas y el estator, de esto se conocen dos importantes configuraciones para los AG, de eje horizontal y eje vertical.

- Eje de giro horizontal

La característica más importante de estas máquinas se encuentra en la dirección del eje de rotación el cual está dispuesto paralelamente a la dirección del viento, asimismo, las palas o álabes que forman parte del AG se encuentran en una posición perpendicular al eje. La velocidad del eje de rotación depende del número de palas con el cual esté constituido.

Figura 36. **Aerogenerador de eje horizontal de tres palas**



Fuente: CRUZ, Ignacio. *La energía eólica de media potencia*.

https://www.aeeolica.org/uploads/documents/Ignacio_Cruz_La_energia_elica_de_media_potencia.pdf. Consulta: 6 de agosto de 2020.

- Eje de giro vertical

A diferencia de los aerogeneradores de eje de giro horizontal, estos tienen su eje de giro en disposición perpendicular al sentido de las corrientes de aire, por lo cual la constitución de las palas o álabes difiere mucho en su diseño para lograr colectar la mayor cantidad de la energía provista por el aire.

En este tipo de aerogeneradores vale mencionar dos diseños de mayor frecuencia en su uso, a decir que, su marcada diferencia lo hace el rotor, por lo cual se denomina rotor Savonius y el rotor Darrieus.

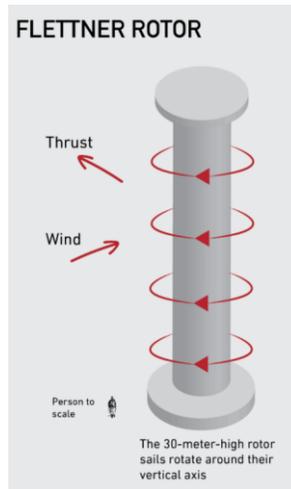
- Rotor Savonius

“Tiene sus orígenes a partir de 1929, debiendo su nombre al ingeniero finlandés Sigurd J. Savonius”¹⁰. Menciona que el rotor Savonius se forma cortando un cilindro Flettner en sentido longitudinal y luego desplazando las dos superficies semicilíndricas a lo largo del plano de corte, de tal manera que el corte tome forma de una letra S.

El principio de funcionamiento de un rotor Savonius se basa en las partes cóncavas que se forman de haber separado la estructura de un cilindro Flettner, dichas partes ofrecen una especie de receptáculo para que grandes masas de aire puedan entrar y generar un movimiento circular a lo largo del eje del mismo; por otro lado, las partes contrarias a las formas cóncavas, por su geometría semicircular, ofrecen un área con menor resistencia al viento, lo que supone una gran ventaja en términos de eficiencia a la hora de que este efectúe el trabajo de generación de energía.

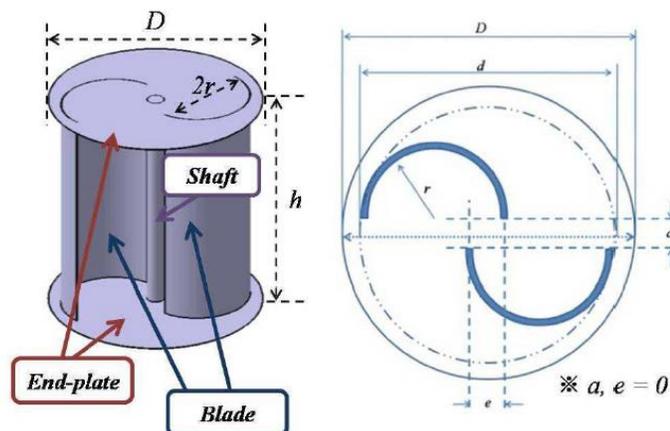
¹⁰ TOLOSA, Jorge Rubén. *Aerogeneración de energía*. p. 85.

Figura 37. **Cilindro Flettner**



Fuente: KHAIR, Raiyan. ASWA, Shubham. *Hapag-lloyd: getting a second wind*.
<https://iveybusinessreview.ca/6327/hapag-lloyd-getting-second-wind/>. Consulta: 6 de agosto de 2020.

Figura 38. **Configuración de un rotor Savonius**



Fuente: CHEONG, Cheolung. SANGHYEON, Kim. *Análisis numérico del diseño de una turbina savonius de bajo ruido por inducción de diferencia de fase por desprendimiento de vórtice p*.
270.

- Rotor Darrieus

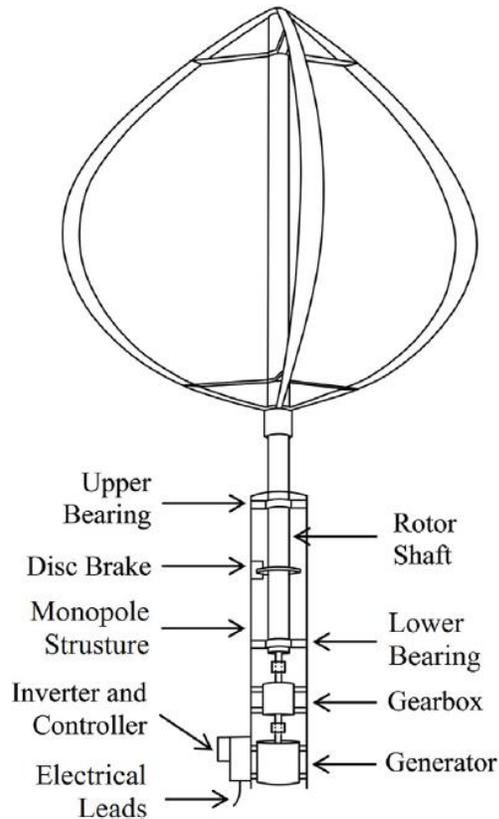
Conocido también como molino de viento Darrieus, le debe su nombre al ingeniero aeronáutico francés Georges Jean Marie Darrieus, quien fabricó este prototipo de turbina en 1925. Conocida en la actualidad, solamente como turbina o rotor Darrieus. A diferencia de la turbina Savonius, la geometría del rotor Darrieus difiere en gran parte debido a que esta se constituye, esencialmente de álabes en forma semielíptica paralelas al eje de rotación vertical.

Tolosa, en su libro *Aerogeneración de energía* señala que esta configuración es una de las características que hace que el rotor Darrieus reduzca sus costos de fabricación en comparación con un aerogenerador de eje horizontal, por otro lado, se hace hincapié que se han verificado mediante estudios, que el rotor Darrieus trabaja a menores RPM, lo cual conlleva a no tener problemas de autoarranque en el eje vertical.

En la actualidad, este tipo de turbina ha tenido una evolución considerable en temas de fabricación, puesto que han surgido otras formas de modificar la forma de los colectores de la energía, por una parte, se han tenido a la vista una forma híbrida de rotor Savonius-Darrieus, también se pueden encontrar rotores de tipo H-Darrieus, cuya diferencia radica, principalmente, en la configuración de las palas o álabes, los cuales en la forma original siguen una forma de curva, pero en las evoluciones recientes han presentado una forma recta, de lo cual hay más versiones basados en dicho prototipo

En la figura 39 se puede apreciar la estructura básica del tipo original de rotor Darrieus de tres álabes.

Figura 39. **Estructura de un rotor Darrieus**



Fuente: TJIU, Willy. MARNOTO, Tjukup. *Aerogenerador de eje vertical Darrieus para generación de potencia: apreciaciones de las configuraciones de las VAWT Darrieus*. p. 56.

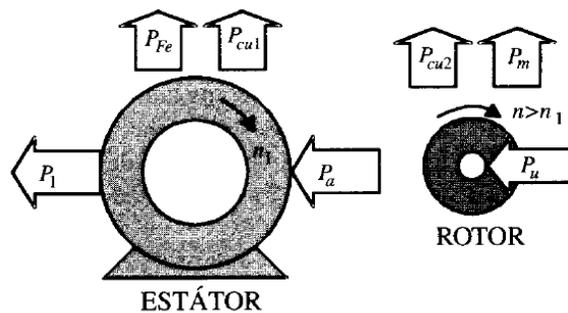
2.11.5.2. Según el tipo de generador eléctrico

Al hacer referencia al tipo de generador eléctrico se describe la máquina eléctrica acoplada en el eje mecánico del cuerpo de las palas del aerogenerador, bajo el concepto anterior, existen dos regímenes donde una máquina eléctrica puede funcionar, los cuales se detallan a continuación.

- Régimen generador asíncrono

Bajo este régimen, la máquina eléctrica trabaja en sentido generador asíncrono y lo que caracteriza a este estado, es que la energía mecánica proveniente de la fuerza del viento sobre las palas se traduce en “una fuerza que mueve el eje, lo cual hace que el rotor gire a una velocidad mayor que la de sincronismo; con ello se logra que los campos electromagnéticos produzcan un flujo eléctrico a través del estator, lo que se traduce en energía eléctrica”¹¹. El rotor puede tener diferentes configuraciones, los cuales se derivan dos principales, el rotor jaula de ardilla y el rotor en devanados o en anillos.

Figura 40. **Diagrama máquina eléctrica asíncrona en régimen generador**



Fuente: FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas eléctricas*. p. 311.

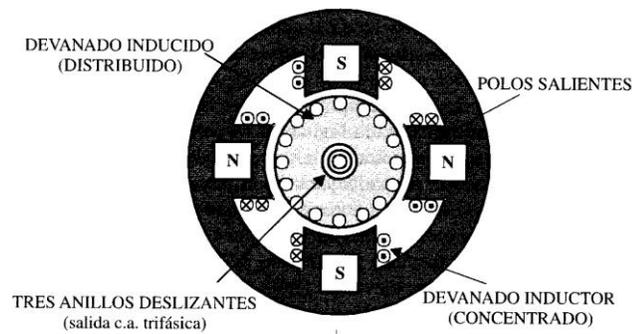
- Régimen generador síncrono

En esta configuración una máquina eléctrica puede funcionar como un generador y es una de las aplicaciones más usadas, hablando del régimen generador síncrono. Su principio de funcionamiento y diferencia del régimen

¹¹ FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas eléctricas*. p. 293.

asíncrono está fuertemente ligado a la frecuencia de la red a la que se suministra la generación de energía eléctrica y a la velocidad de rotación del eje que directamente esté acoplado al rotor de la máquina. La diferencia, también radica de acuerdo con la construcción del rotor, ya que este presenta dos formas: el rotor de polos salientes y el rotor de polos lisos.

Figura 41. **Máquina en régimen generador síncrono de baja potencia**



fuelle: FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas eléctricas*. p. 396.

2.11.5.3. Según la potencia nominal suministrada

La clasificación de los aerogeneradores puede entenderse, de mejor manera, considerando su potencial nominal de trabajo, por ello Cueva Barraqueta, en su trabajo *Diseño y construcción de un generador eólico de eje vertical tipo Savonius para producir 20 watts*, afirma que se pueden clasificar en microturbinas, pequeños y grandes aerogeneradores, aerogeneradores multimegavat, sistemas aislados y parques eólicos.

Esta clasificación tiene mejor comprensión en la tabla III comparativa de potencias nominales.

Tabla III. **Clasificación de los aerogeneradores, según su potencia nominal**

Tipo de aerogenerador	Potencia nominal	Tipo de generador eléctrico	Aplicaciones
Microturbinas	< 3 kW	Imanes permanentes	Residencias, equipos de telecomunicaciones
Pequeños generadores	2 a 10 kW	Síncrono o asíncrono	Sistemas híbridos, residencias
Grandes generadores	200 kW a 850 kW	Síncrono o asíncrono	Generación de energía eléctrica para redes de distribución
Aerogeneradores multimegavat	1,5 MW	Síncrono o asíncrono	Generación de energía eléctrica para redes de distribución
Sistemas aislados	<20 W	Síncrono o asíncrono	Pequeños consumidores
Parques eólicos	1 MW	Síncrono o asíncrono	Generación en tierra o plataformas marítimas

Fuente: elaboración propia.

2.11.6. Estructura básica de un microgenerador (AG) eólico

De acuerdo con Torres Morimitsu, en su trabajo *Diseño de un generador eólico de eje vertical de baja potencia*, la estructura básica de un aerogenerador dado su relación con la energía mecánica de rotación que, posteriormente es convertida en energía eléctrica puede comprenderse mediante el análisis de los sistemas que lo componen.

2.11.6.1. Sistema de captación

Es el elemento que está sujeto a las fuerzas del viento por acción de la energía cinética del mismo, este a su vez se transforma en energía mecánica, el mecanismo encargado de esta conversión y del cual se denomina captador es el rotor, el cual está compuesto por el eje y los álabes.

Los álabes son subcomponentes del sistema de captación que merecen una importante atención, ya que su diseño está en función de la velocidad del viento y, por lo tanto, estos son los componentes fundamentales, los cuales basan su diseño en parámetros de aerodinámica y el diseño propio de la turbina.

2.11.6.2. Sistema de transmisión mecánica

En este sistema se deben identificar sus componentes por función, de acuerdo con las variables con las cuales se configuran, de tal manera que estos componentes son el árbol o eje de transferencia, cajas multiplicadoras a base de engranajes y acoples.

El árbol, básicamente es el encargado de transferir la energía cinética del sistema captador que se convierte en un par torsional hacia los demás mecanismos acoplados al generador eléctrico. Las cajas multiplicadoras son elementos que pueden incrementar el par torsional, lo que refleja un aumento proporcional de la energía mecánica entregada por el árbol. Los demás acoples hacen alusión al conjunto de engranajes que hacen funciones de conectividad entre las distintas partes del sistema.

2.11.6.3. Sistema de generación eléctrica

Este sistema tiene como componente fundamental al generador eléctrico, el cual como se describió, puede ser síncrono o asíncrono. También complementan este sistema todos los elementos de carácter eléctrico, como transformadores de voltaje, cable de baja o media tensión dependiente de la capacidad de generación, controladores electrónicos que regulan la potencia generada y entregada al sistema de almacenamiento, entre otros.

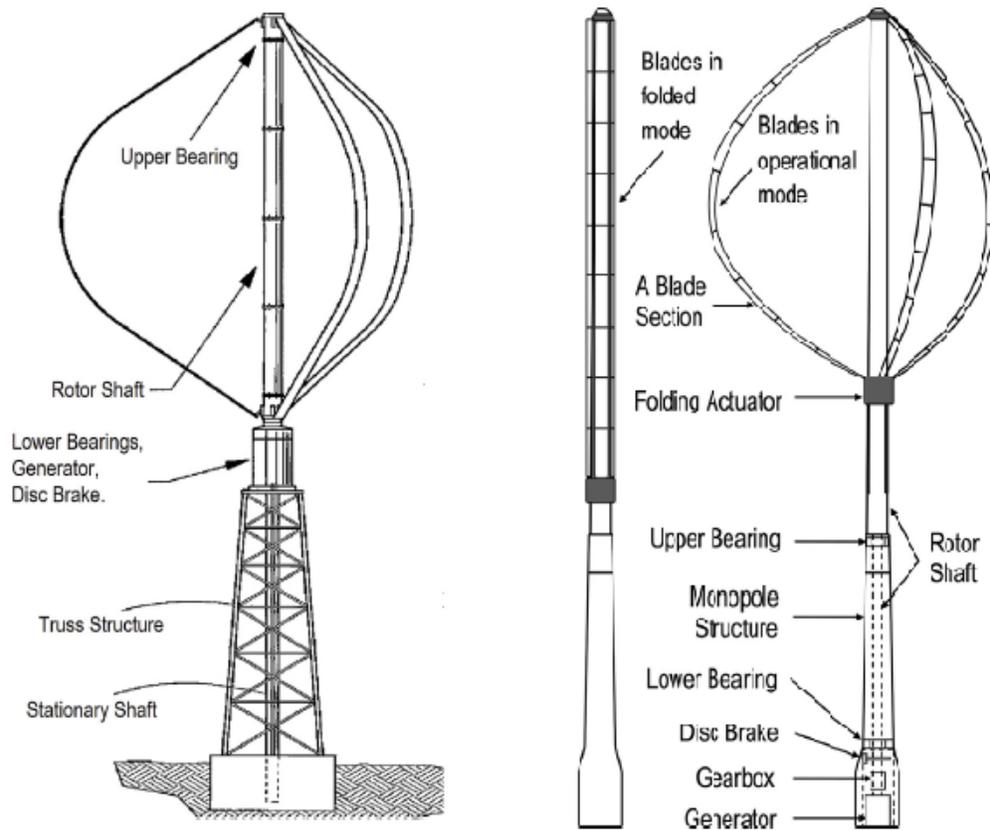
2.11.6.4. Sistema de regulación y control

Por lo general, ese sistema se asocia a sistemas electrónicos de control de potencia, voltaje, corriente, nivel de carga de almacenamiento, control de la velocidad de viento captada, y todo mecanismo que mediante sensores tienen como objetivo, mantener la estabilidad del sistema en general para evitar algún daño por alguna contingencia producto de algún cambio repentino en alguna de las variables antes descritas.

2.11.6.5. Sistema de soporte

Es el encargado de establecer un punto de apoyo para las cargas que suponen los pesos correspondientes al rotor, los álabes y los demás sistemas que están suspendidos y dependen de este sistema. Por lo general se compone de una torre sólida monopolar para aerogeneradores de baja potencia y de secciones o estructuras en celosía para aerogeneradores de media y alta potencia, las cuales están sujetas a parámetros de estabilidad, resistencia y peso.

Figura 42. Tipos de estructuras de soporte para un aerogenerador Darrieus



Fuente: TJIU, Willy. MARNOTO, Tjukup. *Aerogenerador de eje vertical Darrieus para generación de potencia: apreciaciones de las configuraciones de las VAWT Darrieus*. p. 57-58.

2.11.6.6. Sistema de almacenamiento de la energía

Al igual que el sistema de almacenamiento en una red de un colector solar, la gestión de la energía generada que no se utiliza inmediatamente por un proceso de almacenamiento en elementos que, por lo general, suelen ser bancos de baterías sistemas de generación eólico a baja potencia o bien en una

subestación eléctrica acondicionada, para tal fin, en grandes parques eólicos de mayor generación de potencia.

2.11.7. Estrategias de control MPPT para microgeneradores eólicos

Los sistemas MPPT (*Máximo Power Point Tracking*, por sus siglas en inglés) aplicado a los pequeños generadores eólicos, son sistemas de control basados, fundamentalmente en dos formas de desarrollar el control de la eficiencia del generador.

2.11.7.1. Sistema de control basado en la medición de la velocidad de rotación del eje

Por lo general, este tipo de sistemas de control están basados en las variables de toma de lecturas en la velocidad de rotación del eje mecánico, relacionándolas con la velocidad del viento, la potencia de entrada y la potencia de salida. Koutroulis & Kalaitzakis en su artículo *Diseño de un sistema MPPT para aplicaciones de conversión de energía del viento* indican que esta topología de sistema está basada en la potencia óptima de los aerogeneradores versus las características de la velocidad de rotación, las cuales usualmente son almacenados en la memoria de algún microcontrolador.

La forma de trabajo de este sistema se puede entender de la siguiente manera; la velocidad de rotación del aerogenerador es medida, por otro lado, se efectúa el cálculo de la potencia óptima de salida la cual es comparada con la potencia real de salida del aerogenerador. El resultado del proceso anterior es un error resultante el cual es usado para controlar la interfaz de potencia. De la misma manera se explica el proceso donde la potencia de salida es medida y en

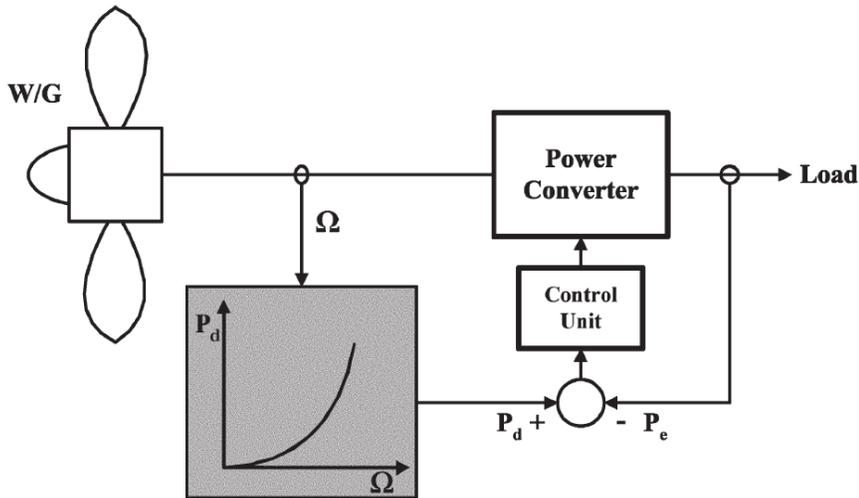
donde el parámetro base de la velocidad del rotor para una potencia óptima generada por este, se deriva de las características de la potencia óptima del AG versus la velocidad del rotor.

“El parámetro base de la velocidad de rotor es comparado con la velocidad real y el error resultante es usado para controlar un convertidor de potencia DC/DC. Asimismo es importante mencionar que el sistema del aerogenerador cuando se encuentra en régimen permanente de magnetización (PM), la corriente de salida y voltaje es proporcional al torque electromagnético y la velocidad del rotor respectivamente”¹².

Por lo tanto, la velocidad del rotor es calculada de acuerdo con la medición del voltaje de salida del AG, mientras que la corriente óptima de salida es calculada usando una aproximación de las características de la relación entre la corriente versus velocidad rotacional óptima. Koutroulis & Kalaitzakis concluyen en su trabajo *Diseño de un sistema MPPT para aplicaciones de conversión de energía del viento*, que las desventajas de estos métodos están basadas en el conocimiento de las características de potencia óptima de los aerogeneradores, las cuales, usualmente, no están disponibles con un alto grado de exactitud y, por otro lado, considerar los cambios que el rotor sufre cuando este envejece.

¹² KOUTROULIS, Eftichios. KALAITZAKIS, Kostas. *Diseño de un sistema MPPT para aplicaciones de conversión de energía del viento*. p. 486.

Figura 43. **Sistema de control para MPPT basado en la medición de la velocidad de rotación**



Fuente: KOUTROULIS, Eftichios. KALAITZAKIS, Kostas. *Design of a maximum power tracking system for wind energy conversion applications*. p. 487.

2.11.7.2. Sistema de control basado en la medición de la velocidad del viento

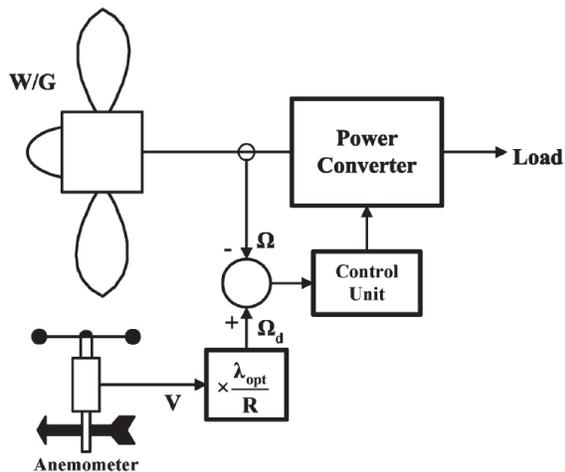
A diferencia del primer método que se explicó con anterioridad, la variable involucrada en este proceso es la velocidad del viento. La operación del sistema conserva el principio de determinar el error resultante de la relación de dos variables.

Un sistema de control basado en la medición de la velocidad del viento; la misma es medida y la velocidad requerida por parte del rotor del AG para lograr la máxima generación de potencia, es calculada. “La velocidad del rotor también es calculada y comparada con el valor obtenido de la velocidad óptima requerida

por este, mientras el error resultante de la relación es usado para el control de una interfaz de potencia”¹³.

Por otro lado, se debe considerar la reducción de la precisión debido a la aproximación por cálculos de las características del AG, es importante mencionar que en este método de control se debe implementar un anemómetro con mayor precisión, lo que supone un aumento en el costo del sistema. Otras variables que se deben tomar en cuenta son las ráfagas de viento de bajo perfil de energía, las cuales al no ser predecibles deben obtenerse mediante un sistema de medición de la velocidad del viento donde dichas ráfagas pueden ser dimensionadas, lo que también supone la complejidad de la arquitectura del sistema.

Figura 44. **Sistema de control para MPPT basado en la medición de la velocidad del viento**



Fuente: KOUTROULIS, Eftichios. KALAITZAKIS, Kostas. Design of a maximum power tracking system for wind energy conversion applications. p. 487.

¹³ KOUTROULIS, Eftichios. KALAITZAKIS, Kostas. *Diseño de un sistema MPPT para aplicaciones de conversión de energía del viento*. p. 487.

3. LA CUESTIÓN DE LA EFICIENCIA EN COLECTORES DE ENERGÍA

En el presente capítulo se describen las circunstancias que dan lugar al trabajo desarrollado en la presente tesis, con lo cual se empieza a definir el problema o causa a investigar.

3.1. Planteamiento del problema

A continuación, se describe la definición del problema bajo el contexto que involucran las demás variables en estudio.

3.1.1. Definición del problema

Existen relaciones causales por las cuales la agricultura de precisión requiere de procesos tecnológicos eficientes con la finalidad de administrar y aprovechar de mejor manera los recursos para lograr una agricultura de calidad. No obstante, factores diversos pueden presentarse como un problema para lograr el objetivo que se requiere en esta técnica agrícola. El tema de la energía empleada en parte de este proceso es uno de esos factores. La ausencia de una buena fuente de energía, ineficiencia en los procesos de transformación de la energía del medio ambiente y un desaprovechamiento de los recursos naturales que el entorno ofrece son algunas causas que ocasionan un mal funcionamiento en las redes sensoras, inestabilidad en el suministro energético para los dispositivos eléctricos y un mal control en el sistema de transmisión/recolección de datos confiables. Por lo tanto, es importante la búsqueda de nuevas propuestas innovadoras que mejoren y hagan eficiente la recolección de la

energía que se suministra a todos los dispositivos asociados a la agricultura de precisión, lo cual es el objetivo buscado en el presente trabajo de investigación.

3.1.2. Delimitación del problema

Diseño de un modelo colector de energía, tipo renovable capaz de suministrar energía eléctrica a la red de sensores que se utilizan en la agricultura de precisión. El modelo debe ser capaz de optimizar toda la energía capturada del ambiente y posteriormente transformarla en energía eléctrica, de tal manera que, en condiciones adversas de la fuente renovable, esta pueda mantener un flujo eléctrico de manera constante. Se propone utilizar recursos de dos fuentes naturales como son la energía solar y la energía eólica. La implementación de colectores fotovoltaicos y microturbinas eólicas (pequeños aerogeneradores), que a su vez trasladarán a un centro de almacenaje compuesto por baterías recargables o supercapacitores. Por aparte se tendrá una unidad de gestión del manejo de la energía colectada, a fin de optimizarla y administrar el recurso cuando la red sensora (nodo de sensores) lo necesite o demande.

3.1.2.1. Límites

Descripción del entorno donde será llevado a cabo la implementación de los colectores de energía a fin de lograr la eficiencia de la red sensora propia de la agricultura de precisión.

Explicación teórica del funcionamiento y forma de trabajo de los colectores de energía a implementar, así como los posibles inconvenientes que se puedan presentar en su desarrollo.

3.1.2.2. Alcance

Proporcionar un estudio previo de la implementación de mecanismos de recolección de energía de un medio renovable, para su posterior conversión a energía eléctrica, a fin de optimizar dichos recursos y aplicarlos a un medio específico y el aporte de ideas que generen el máximo desempeño de estos instrumentos para lograr la eficiencia del trabajo requerido para la técnica de la agricultura de precisión en medios tradicionales.

3.2. Antecedentes

En el tema del desarrollo de la eficiencia de los colectores de energía se han tenido grandes avances en regiones de Europa o Asia. Existen estudios en estos países que muestran que dicha eficiencia a menudo se logra implementado otros mecanismos que hacen que el colector pueda capturar la energía del ambiente por un tiempo más prolongado, por otro lado, la eficiencia también va de la mano de los sistemas de almacenamiento, muchas de las baterías a menudo tienen un tiempo de vida útil determinado, por lo que gestionar ese almacenamiento de energía es un reto para este tipo de sistemas de recolección de energía del ambiente.

Para regiones como las de América Latina o bien en el país, no existen registros de estudios a profundidad que involucren el mejoramiento de la forma de recolectar la energía del ambiente por alguna vía, es decir, si bien ya se encuentra en el mercado múltiples formas de cómo capturar la energía (celdas solares, colector térmico, entre otros.), estos elementos no logran desarrollar su capacidad o una alta eficiencia.

Lo anterior tampoco quiere decir que no haya equipos que ya cuenten con mecanismos incorporados donde ya se empleen algoritmos, que hacen posible el óptimo aprovechamiento del recurso energético natural; sin embargo, por su alto costo no está al alcance de todos.

Por estas razones se busca la manera de aportar una vía para que los colectores de energía puedan lograr la captura de la energía del medio para la cual están diseñados. Esto lleva a involucrar otros elementos de carácter mecánico, electrónico o de programación que puedan aportar parte de la solución al problema planteado, tal cual se han experimentado en otras regiones del planeta.

3.3. Justificación

La importancia de optimizar la forma en cómo se recolecta la energía del ambiente y que esta tenga un correcto aprovechamiento a los diversos dispositivos eléctricos y electrónicos aplicados a actividades, tales como la agricultura es una premisa relevante del presente trabajo.

Se busca brindar una fuente de suministro eléctrico constante para el funcionamiento adecuado de la red de sensores, con estos se logra la segunda meta, monitorear la calidad y desarrollo de los cultivos expuestos a diagnósticos por los múltiples sensores, pero esto no puede ser posible sin una adecuada fuente de energía.

Ante el contexto dado se hace énfasis en el diseño de colectores de energía que se apeguen a las necesidades y atributos de la región donde se puedan implementar, valorando que estos pueden llegar a ser asequibles para pequeñas

o grandes extensiones de cultivos que podrían retribuir su uso en mejores productos agrícolas, lo que a su vez supone un retorno inmediato de la inversión.

Actualmente se desconoce si existen registros de implementación a gran escala de redes de monitoreo utilizando agricultura de precisión, al menos que puedan integrar colectores de energía óptimos, por lo que es oportuno sentar un precedente teórico para futuras contribuciones al desarrollo de estas formas de integración de tecnología con actividades diarias del hombre.

4. DISEÑO DEL MODELO COLECTOR DE ENERGÍA A FIN DE OPTIMIZAR EL SUMINISTRO ELÉCTRICO PARA UNA RED DE SENSORES EN LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

En el presente capítulo se describen las propuestas para las dos alternativas de colectores de energía que hagan óptimo el suministro de energía a la red de sensores en un área determinada donde se emplee la técnica de la agricultura de precisión.

4.1. Consideraciones generales del entorno de estudio

El trabajo no define un área específica que indique la implementación de los colectores de energía, puesto que el país es una región de variación climática, por lo que un modelo de colector solar puede ser óptimo en cierta región donde predomina un nivel de irradiación mayor contrario a mayores velocidades de viento como lo requiere un colector de energía eólica. Por lo tanto, la adecuación de un modelo respecto de otro dependerá de qué región del país tenga las características requeridas para su óptimo funcionamiento, se hará referencia a la zona de estudio como una caracterización generalizada de un lugar que reúna las condiciones de las variables que hagan posible la implantación del modelo colector.

4.1.1. Evaluación del recurso solar y eólico de la zona de estudio

Para la adecuación del modelo colector de energía es necesario conocer las condiciones de los recursos naturales correspondientes de donde se proveerá

al sistema de dicha fuente de energía. Para ello se evalúan mediante mapas de irradiación y condiciones de viento, los cuales arrojan los siguientes parámetros para la República de Guatemala, ver tabla IV.

Tabla IV. **Mapa de datos solares para Guatemala**

Dato	siglas	mínimo	máximo	unidad
Potencia fotovoltaica específica de salida	PVOUT	3,46	5,01	kWh/kWp
Irradiación normal directa	DNI	2,79	5,99	kWh/m ²
Irradiación horizontal global	GHI	4,19	6,10	kWh/m ²
Irradiación difusa horizontal	DIF	1,85	2,41	kWh/m ²
Inclinación para irradiación global	GTI	4,27	6,36	kWh/m ²
Inclinación óptima para módulos PV	OPTA	13	19	°
Temperatura del aire	TEMP	10,3	28,1	°C
Elevación del terreno	ELE	0	4,220	m

Fuente: Global solar atlas. *Mapas de datos solares en Guatemala*.

<https://globalsolaratlas.info/detail?c=15.792254,-90.230713,7&r=GTM>. Consulta: 12 de diciembre de 2020.

Los valores anteriores de las tablas se pueden visualizar en el anexo 1 del mapa de potencial fotovoltaico para la República de Guatemala.

Para la medición del potencial eólico del país se recurre nuevamente a los datos que se establecen como se describen en la tabla V.

Tabla V. **Mapa de datos del viento para Guatemala**

Datos del 10 % de las áreas con mayor viento del país		
Altura (m)	Velocidad media del viento (m/s)	Densidad de potencia media (W/m ²)
10	3,35	109
50	5,07	226
100	6,03	311
150	6,61	379
200	7,06	437

Fuente: Global wind atlas. *Mapas de datos de vientos en Guatemala*.
<https://globalwindatlas.info/area/Guatemala>. Consulta: 12 de diciembre de 2020.

De la misma forma, el mapa de las zonas con potencial eólico se puede consultar en el anexo 2.

4.1.2. Cálculos de la demanda de potencia necesaria para la red de sensores y actuadores en la zona empleada la técnica de agricultura de precisión

Los elementos que componen una red de sensores a menudo se le da la denominación de mote debido a la analogía de la palabra inglesa que deriva de mota o pequeña parte de polvo, estos elementos son de trascendente función en una WSN, son los encargados dentro de la técnica de la agricultura de precisión de recoger datos concernientes al estado del suelo, temperatura, humedad, entre otros; lo cual se envía por radiofrecuencia a otros subsistemas como los actuadores (servomotores, bombas de riego, accionamientos mecánicos, entre otros) que hacen cumplir la orden necesaria dada por los motes.

López Riquelme, en su trabajo *Contribución a la red de sensores inalámbricas. Estudio e implementación de soluciones hardware para agricultura de precisión* establece que las características de estos elementos, entre otros, es su limitada capacidad de memoria RAM, su procesador con funcionamiento a baja frecuencia y la fuente de alimentación que deben conservar durante el mayor tiempo que sea posible, siendo esto último el fin por el cual se busca que ese suministro sea eficiente desde la captación y gestión de la energía suministrada a los motes.

Para determinar la contribución que debe necesitar una red de motes básica para cumplir con las funciones necesarias en un área donde se implementa la técnica de agricultura de precisión, se describen los siguientes elementos con base en las últimas tendencias en su uso y su consumo energético, el cual será la demanda por cubrir por parte del modelo colector de energía.

4.1.2.1. Consumo energético de la red de sensores por su función

En el siguiente apartado se hace un breve recuento de los diferentes sensores que componen la arquitectura básica de una WSN aplicada a la técnica de agricultura de precisión, en la tabla VI se describen los detalles del tipo de sensor y su consumo energético.

Tabla VI. **Características de consumo energético de la red de sensores**

No.	Variable de medición	Sensor	Alimentación (V)		Corriente promedio	Potencia promedio W
			mínimo	máximo		
1	Sensor de humedad relativa y temperatura del ambiente	EE08	4,5	30	1,30 mA	0,039
		H301	---	12	350 mA	4,2
2	Sensor de temperatura y conductividad del suelo	SDI-12	9	20	20 mA	0,4
3	Sensor de potencial y depresión del suelo	2725ARL Jet Fill	12	40	20 mA	0,8
		Watermark	9	2,8	----	---
4	Temperatura de los cultivos	Apogee IRTS-P	---	---	----	---
5	Monitoreo del crecimiento del cultivo	DFg2,5	10	24	20 mA	0,48
	Demanda energética promedio		8,9	25,76		5,919

Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, es importante hacer notar que los actuadores más importantes dentro de la técnica de la agricultura y que necesitan de una fuente de energía son para el bombeo de agua y su posterior uso para el riego, por lo general esta técnica de riego se lleva por dos vías: goteo o aspersión. En la tabla VII se muestra el consumo energético que demandan dichos elementos.

Tabla VII. **Consumo energético por actividades con agua**

Actividad	Uso	Consumo (kWh/m³)
Riego	Bombeo a 100 m	0,42
	Riego localizado	0,18
	Riego por aspersión	0,23
	Total	0,83

Fuente: elaboración propia.

Los consumos anteriormente descritos están elaborados con base en referencias de extensiones de tierra menores o minifundios, pero no supone que su implementación se limite para pequeñas extensiones de terreno, basta con modificar los valores de cálculo de demanda energética para establecer la cantidad de energía eléctrica que se necesita suministrar.

4.2. Consideraciones y cálculos de la potencia demandada

El número de celdas solares y los criterios de diseño del colector eólico van asociados a la potencia que se demanda por parte del sistema, para ello se necesita conocer los parámetros como los consumos de los nodos sensores, este dato se tiene de la sección de la tabla III; se conocen el consumo promedio de los dispositivos básicos sugeridos para la operación en un área con técnicas de agricultura de precisión.

Demanda energética promedio de los equipos motes o nodos de sensores:
5,919 W

Demanda energética de los actuadores para mecanismo de riego el cual se toma el riego por aspersión, lo que viene dando el suministro de agua equivalente

en volumen a 1 m³ (1 000 L) durante un tiempo estimado de 8 horas efectivas:
81,25 W

La demanda total para cubrir es de 87,169 W de todos los equipos sugeridos a instalar. La demanda en términos de consumo por unidad de tiempo es diferente una de otra, por un lado, los equipos de la red sensora a menudo se estima su consumo por un día de monitoreo, es decir 24 horas, mientras que los equipos actuadores no funcionan a ese tiempo, sino como se mencionó, solamente se tomará el promedio de 8 horas efectivas, por lo que la demanda diaria se define de la siguiente forma:

$$Demanda\ diaria = potencia \times tiempo \quad [Ecuación\ 4]$$

$$Demanda\ diaria = (5,919\ W)(24\ h) + (81,25)(8\ h)$$

$$Demanda\ diaria = 0,792056\ kWh$$

4.3. Diseño del modelo colector de energía solar

En este apartado se busca describir los componentes que hacen posible la construcción del modelo colector de energía solar basado en los requerimientos de la demanda que se detalló en el subcapítulo anterior.

4.3.1. Consideraciones y cálculos del número de celdas solares para el modelo colector de energía

Con los valores de la tabla II se procede a formular el número de celdas solares necesarias para cubrir la demanda.

En condiciones estándar, el valor del parámetro de irradiación es de 1 000 W/m². Para establecer el valor de un punto máximo donde se sitúa la irradiación se obtiene la relación:

$$HSP = \frac{DNI}{STC} \quad \text{[Ecuación 5]}$$

Donde:

DNI: irradiación de la zona en el punto crítico

STC: condiciones estándar de prueba

Donde HSP equivale a horas solar pico como la medida de la irradiación estimada en unidad de tiempo, los datos de la tabla II se obtiene que:

$$HSP = \frac{5,99 \text{ kWh}/m^2}{1000 \text{ W}/m^2} = 5,99 \text{ horas}$$

Lo anterior supone que, para un escenario con condiciones desfavorables de irradiación solar, se tiene un estimado de 5,99 horas con perfecta irradiación que pueden ser aprovechados por este sistema colector.

Del dato anterior se emplea la siguiente expresión, considerando los valores de HSP, la potencia demandada y el factor de utilidad de las celdas solares tomando como ello el 80 % de vida útil para las mismas. Por lo que la expresión siguiente describe la potencia generada por las celdas solares como colectores de energía:

$$W = \frac{W_{demanda}}{F_{util} * HSP} \quad \text{[Ecuación 6]}$$

$$W = \frac{0,792056 \text{ kWh}}{0,8 * 5,99 \text{ h}} = 0,165287 \text{ kW}$$

El valor anterior es el que se busca cubrir con la adecuación de las celdas solares que se puedan encontrar en el mercado; del valor anterior se emplea la siguiente expresión:

$$N_{celdas} \times W_{celdas} \geq W_{generada} \quad \text{[Ecuación 7]}$$

El mercado ofrece celdas con potencias nominales desde 25 W hasta 150 W y demás valores, por lo que el número de celdas solares se establece con las siguientes opciones:

$$N_{celdas} \geq \frac{W_{generada}}{W_{celdas}} = \frac{0,165287 \text{ kW}}{25 \text{ W}} = 6,6114 \cong 6 \text{ celdas solares}$$

$$N_{celdas} \geq \frac{W_{generada}}{W_{celdas}} = \frac{0,165287 \text{ kW}}{150 \text{ W}} = 1,1019 \cong 1 \text{ celda solar}$$

4.3.2. Selección del módulo regulador de carga según estrategia de control

El módulo regulador de tensión se encargará de evaluar la generación de voltaje en función de la potencia pico estimada. Este regulador puede ser elegido mediante la función de intensidad de la corriente del sistema colector, y también tiene relación con el número de módulos elegidos. La expresión que se emplea para los cálculos es la siguiente:

$$I_{total} = N_{módulos} \times I_{módulos} \quad \text{[Ecuación 8]}$$

La corriente de los módulos depende del fabricante de las celdas solares, por lo que se toma como referencia la tabla VIII que describe valores de corriente, con lo cual se estima de acuerdo con los cálculos realizados.

Tabla VIII. **Características eléctricas de celdas solares TechnoSun**

Potencia máxima	18 W	25 W	50 W	60 W	100 W	120 W	150 W
Tensión máxima	19,4 V	19,8 V	17,6 V	17,5 V	17,8 V	22 V	17,6 V
Corriente máxima	0,93 A	1,26 A	2,84 A	3,43 A	5,62 A	5,45 A	7,39 A
Eficiencia de la célula	20,5 %	19,5 %	21,5 %	19,6 %	19,9 %	20,0 %	20,0 %

Fuente: elaboración propia, con base en datos de <https://www.technosun.com/es/>. Consulta: 20 de enero de 2021.

Para los valores de número de celdas se tiene:

$$I_{25W} = 6 \times 1,26 A = 7,56 A$$

$$I_{150W} = 1 \times 7,39 A = 7,39 A$$

El regulador que se ajusta a la condición de corriente puede ser estimado por medio de los valores de corriente que se han calculado, por lo que se utiliza un regulador de carga de por lo menos 10 A o 15 A, que son valores comerciales los cuales se ajustan a la necesidad del sistema.

El tipo de interfaz que maximiza la captación del recurso de la fuente de energía viene integrado, por lo que su elección es también importante.

En la figura 45 se muestra una sugerencia de regulador de tensión con algoritmo MPPT y sus principales características técnicas.

Figura 45. **Controlador de carga con algoritmo integrado MPPT**



Fuente: TECHNOSUN. *Maximizador MPPT.*

<https://www.technosun.com/es/productos/regulador-de-carga-VICTRON-BLUESOLAR-MPPT-100-15.php>. Consulta: 20 de enero de 2021.

4.3.3. Selección del sistema de almacenamiento de la energía recolectada

Para la selección del sistema de almacenamiento se tomarán en cuenta dos variables o cualidades que debe tener este; primero, la autonomía de acuerdo al rendimiento del sistema colector y, segundo, el ciclo de descarga profundo del sistema de almacenaje, por lo general la media de autonomía se da por tres días de operación, el valor de descarga profunda para las baterías de electrolito que

se sugieren en este sistema, tienen un rango de 70 a 90 % de su descarga profunda, por lo tanto se tomará una media de 80 %, la capacidad de las baterías vienen dadas por:

$$Capacidad_{BAT} = \frac{W \times n_a}{FDP} \quad \text{[Ecuación 9]}$$

Donde:

W: potencia requerida

n_a: días de autonomía del sistema

FDP: factor de descarga profunda

$$Capacidad_{BAT} = \frac{0,792056 \text{ kWh} \times 3}{0,85} = 2,7954 \text{ kWh}$$

Del valor anterior se determina el valor de corriente para la selección del número de baterías, por lo que se debe contar:

$$I_{BAT} = \frac{Capacidad_{BAT}}{V_{nominal}} \quad \text{[Ecuación 10]}$$

$$I_{BAT} = \frac{2,7954 \text{ kWh}}{12 \text{ V}} = 232,95 \text{ Ah}$$

El número de celdas necesarias viene determinado por la ecuación 2 descrita en el numeral 1.5 del primer capítulo del presente documento, nótese que el valor de voltaje de estabilización es el mismo, pues se toma el sugerido por fabricante.

$$N = \frac{12}{2,33} = 5,15 \approx 6 \text{ celdas}$$

Finalmente, el número de baterías en el sistema viene dado por la expresión 3, del mismo numeral anteriormente mencionado:

$$B = \frac{12 \text{ voltios}}{2 \text{ voltios}} = 6 \text{ baterías}$$

En síntesis, es necesario seis baterías con un voltaje de 2 V por celda y capacidad de corriente de 232,95 Ah para el sistema colector dimensionado. Nuevamente hay que referirse a las tablas del catálogo del fabricante FIAMM en la figura 5 del primer capítulo, teniendo como sugerencia los modelos de batería LM/S 290 de 2 V por celda, para los cálculos realizados en este apartado.

4.3.4. Selección del inversor de voltaje del sistema

El inversor de voltaje estará destinado a suministrar la corriente necesaria para los elementos de bombeo de agua, que son los que necesitan de una fuente mayor de potencia; en este caso, se hace el cálculo con base en la potencia demandada para este fin.

De la siguiente expresión parte el dimensionamiento para el cálculo del inversor:

$$W_{carga} = FS \times \left(\frac{P_{carga/AC}}{FP \times \eta} \right) \quad \text{[Ecuación 11]}$$

Donde:

W_{carga} = potencia del inversor

Fs = factor de seguridad de acuerdo con la capacidad del inversor, puede ser un 25 % adicional a lo establecido

$P_{carga/AC}$ = potencia de la demanda a cubrir

FP = factor de potencia del sistema

η = eficiencia del inversor (generalmente un 95 %)

Por lo que, con los datos que se tienen del sistema se procede al cálculo:

$$W_{carga} = 1,25 \times \left(\frac{81,25 W}{0,80 \times 0,95} \right)$$

$$W_{carga} = 133,6348 W$$

Con el valor obtenido se elige un inversor dentro de los que ofrecen en el mercado; a manera de ejemplo se presenta un inversor de voltaje de la marca Victron Energy, el cual está determinado por una potencia de 250 W para un voltaje de 12 V, lo cual cumple los requerimientos calculados del sistema.

Figura 46. **Inversor de voltaje Phoenix Victron Energy 250W 12V**



Phoenix 12/375 VE.Direct



Phoenix 12/375 VE.Direct

Fuente: VICTRON ENERGY. *Inversor Phoenix VE. Direct.*

<https://www.victronenergy.com.es/inverters/phoenix-inverter-vedirect-250va-800va>. Consulta: 5 de abril de 2021.

4.3.5. Selección del calibre del conductor para los subsistemas del sistema colector

En esta sección se calcula el calibre del conductor apropiado para los subsistemas presentes en el sistema colector, basado en los siguientes criterios que a continuación se describen:

- Capacidad máxima de corriente admisible
- Caída de tensión
- Intensidad de cortocircuito

Utilizando los criterios anteriores se procede a realizar el cálculo de la sección de cable para la corriente continua con la siguiente expresión:

$$S = \frac{2 \times L \times I \times \gamma}{V_a - V_b} \quad \text{[Ecuación 12]}$$

Donde:

S = sección nominal transversal del conductor en mm²

L= longitud del conductor

I = corriente

γ = resistividad específica a 20 °C

$V_a - V_b$ = cambio de la caída de tensión máxima admisible.

Según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) en su pliego de peticiones técnicas para los sistemas aislados, numeral 5.8 referente a cableado, establece los siguientes valores de caída de tensión permisibles en los subsistemas descritos en la tabla IX.

Tabla IX. **Valores para caída de tensión permisible en sistemas aislados de energía renovable**

Subsistema	Caída tensión permisible	Recomendada
Colector/generador regulador/inversor	3 %	1 %
Regulador-batería	1 %	0,5 %
Regulador-inversor	1 %	0,5 %
Inversor/regulador cargas	3 %	1 %

Fuente: elaboración propia, con base en PCT de IDEA. Consulta: 15 de marzo de 2021.

Por otro lado, también se establecen los valores para la conductividad eléctrica de los conductores de acuerdo con la temperatura de operación y el material propio, el cual se describe en la tabla X.

Tabla X. **Conductividad eléctrica del material de acuerdo con diferentes temperaturas**

Conductividad en función de la temperatura			
Temperatura	20 °C	70 °C	90 °C
Cobre	58,00	48,47	45,49
Aluminio	35,71	29,67	27,8

Fuente: elaboración propia.

Ahora se procede a calcular las secciones de los conductores para luego, establecer los criterios de capacidad máxima de corriente y de temperatura:

4.3.5.1. Subsistema colector–caja de conexionado

Se supone una longitud aproximada de 5 metros, la intensidad de corriente es la equivalente a la intensidad de corto circuito de un colector solar, aproximadamente 4,8 A, los demás valores vienen dados por las tablas anteriormente descritas, por lo que:

$$S = \frac{2 \times (5 \text{ m}) \times (4,8 \text{ A}) \times \frac{1}{58} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}}{1 \% \times 12 \text{ V}} = 6,89 \text{ mm}^2$$

Para estimar el calibre de conductor, hay que referirse a la tabla XI para dimensiones de calibre de conductores, por su sección de la Norma IEC 60228-2004.

Tabla XI. **Dimensiones de conductores AWG aislados, según su área nominal**

AWG			
Calibre conductor	Área nominal transversal (mm ²)	Calibre conductor	Área nominal transversal (mm ²)
-	-	-	-
-	-	-	-
20	0,519	4	21,2
18	0,823	3	26,7
16	1,31	2	33,6
14	2,08	1	42,4
12	3,31	1/0	53,5
10	5,26	2/0	67,4
8	8,37	3/0	85,0
6	13,3	4/0	107

Fuente: elaboración propia, con base en IEC 60228-2004. Consulta: 25 de marzo de 2021.

De la anterior tabla se observa que, para el área calculada, el valor ajustado sería de: 8,37 mm², lo que equivale a un calibre de conductor número 8 AWG, con este dato se procede a establecer el criterio de capacidad de corriente permisible, por lo que hay que consultar la tabla 310-16 de la National Electric Code (NEC) ampacidades permisibles para conductores aislados en el anexo 6.

Para lo anterior se establece un calibre conductor número 8 tipo THHN a 90 °C, tienen una ampacidad de 55 A, por lo que, para efectos de este sistema, sobrepasa el valor establecido por los colectores de 4,8 A, y da la pauta de garantizar un dimensionamiento correcto.

Por último, se comprueba la temperatura de operación del conductor de acuerdo con la siguiente expresión, con la cual se valida el criterio de corriente de cortocircuito:

$$T = T_o + (T_{m\acute{a}x} - T_o) \times \frac{I}{I_{m\acute{a}x}} \quad \text{[Ecuación 13]}$$

Donde:

T_o = temperatura ambiente del conductor.

T_{máx} = temperatura máxima permisible por el conductor, según su tipo de aislamiento (de acuerdo con tabla 310-16 de la NEC).

I = intensidad de corriente que pasa por el conductor.

I_{máx} = intensidad de corriente permisible por conductor, según su tipo de aislamiento (de acuerdo con tabla 310-16 de la NEC).

Entonces:

$$T = 20^\circ + (90^\circ - 20^\circ) \times \frac{4,8 A}{55 A}$$

$$T = 26,10^{\circ}$$

Lo que indica un valor ajustado a la temperatura de operación del conductor, no existe una variación significativa, por lo que es aceptable el resultado.

Se procede a realizar los cálculos para los subsistemas siguientes con base en los procedimientos antes descritos y bajo la consulta de las tablas listadas.

4.3.5.2. Subsistema caja de conexión–regulador de carga

Se calcula la sección nominal como se ha efectuado con anterioridad.

$$S = \frac{2 \times (3 \text{ m}) \times (4,8 \text{ A}) \times 1/58 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}}{2\% \times 12 \text{ V}} = 2,06 \text{ mm}^2$$

El valor de sección del conductor define los siguientes parámetros de acuerdo con tablas:

- Calibre de conductor estimado: núm. 12 AWG (3,31 mm²) (según tabla NEC 310-16)
- Ampacidad permisible estimada: 30 A @ 90° THHN (según tabla 310-16 NEC)
- Temperatura de operación del conductor:

$$T = 20^{\circ} + (90^{\circ} - 20^{\circ}) \times \frac{4,8 \text{ A}}{30 \text{ A}}$$

$$T = 31,2^{\circ}$$

4.3.5.3. Subsistema regulador de carga–batería

Sección nominal transversal:

$$S = \frac{2 \times (2 \text{ m}) \times (7,26 \text{ A}) \times \frac{1}{58} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}}{1 \% \times 12 \text{ V}} = 4,17 \text{ mm}^2$$

- Calibre de conductor estimado: Núm. 10 AWG (5.26 mm²) (según tabla NEC 310-16)
- Ampacidad permisible estimada: 40 A @ 90° THHN (según tabla 310-16 NEC)
- Temperatura de operación del conductor:

$$T = 20^\circ + (90^\circ - 20^\circ) \times \frac{7,26 \text{ A}}{40 \text{ A}}$$

$$T = 32,70^\circ$$

4.3.6. Protecciones para el modelo colector de energía

Las protecciones para el sistema del modelo colector de energía se centran en dos partes fundamentales; en el colector propio cuando se encuentra en el régimen de captura de la energía para su posterior conversión a energía eléctrica; y del lado del inversor donde se produce una transformación de dicha energía, por lo que para determinar el tipo de protección, según el manual de protecciones del fabricante. Eaton sugiere que se tome en cuenta con base en las siguientes expresiones:

Régimen del cable:

$$R.C. \geq 1,56 \times I_{sc}$$

[Ecuación 14]

- Régimen de corriente:

$$I_{sc} = (N_p - 1) \times 1,25 \times I_{sc} \quad \text{[Ecuación 15]}$$

- Régimen de tensión

$$R.T. = 1,20 \times V_{oc} \times N_s \quad \text{[Ecuación 16]}$$

Donde:

R.C. = régimen del conductor seleccionado para los colectores de energía.

I_{sc} = corriente de cortocircuito establecido para los colectores de energía, a menudo definido por el fabricante.

N_p = cantidad de arreglos de colectores en el sistema.

R. T. = régimen de tensión para la selección de la protección por medio de fusibles.

V_{oc} = voltaje del colector o panel a circuito abierto.

N_s = cantidad de celdas o módulos dispuestos en el sistema.

De los valores anteriores se hacen las siguientes observaciones: el voltaje a circuito abierto y la corriente de cortocircuito vienen determinados por el fabricante de las celdas solares, lo cual se tomará en cuenta en los cálculos siguientes, para la cantidad de celdas solares o paneles, en la sección 4.3.1. se determinaron los arreglos de celda solares para lo cual se tenían arreglos de 1 panel a 150 W o bien 6 de 25 W para cubrir la demanda, se harán los cálculos con base en el arreglo de 6 colectores, los datos obtenidos también del valor de corriente de los conductores se toman en cuenta, lo que se resume en la tabla XII.

Tabla XII. **Valores para la selección de las protecciones del sistema**

Np	6
Voc	22,54 V / módulo colector
Isc	1,20 A / módulo colector
Isc conductor	55 A (según NEC 310-16)

Fuente: elaboración propia.

De lo anterior se procede a determinar los parámetros para elegir el fusible adecuado para la protección:

Para el régimen del cable conductor:

$$R. C. \geq 1,56 \times 1,20 A$$

$$R. C. \geq 1,87 A$$

$$55 A \geq 1,87 A$$

El valor de ampacidad del cable seleccionado cubre la necesidad de capacidad de conducción.

Para el régimen de la corriente se establece de la siguiente manera:

$$I_{sc} = (6 - 1) \times 1,25 \times 1,20 A$$

$$I_{sc} = 7,5 A$$

Este valor establece la cantidad de corriente permisible en cortocircuito del arreglo de celdas o colectores.

Por último, para determinar el régimen de tensión, se establece como sigue:

$$R.T = 1,20 \times V_{oc} \times N_s$$

$$R.T = 1,20 \times 22,54 V \times 6$$

$$R.T = 162,28 V$$

Lo que es el valor de tensión a circuito abierto para el arreglo de colectores. Con los tres anteriores parámetros se puede elegir entre una amplia variedad de fusibles especializados para aplicaciones de energía renovable, por ejemplo, en el modelo colector se necesita un colector que cubra la protección de los 1,87 A y los 162,28 V del sistema; Eaton cuenta con un modelo de cartucho sobre estas magnitudes denominado Bussmann PVM-15, el cual se muestra en conjunto con diferentes portafusibles.

Figura 47. **Fusibles y portafusibles para aplicaciones de energía renovable**



Fuente: EATON. *Bussmann series photovoltaic fuses.*

<https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/electrical-circuit-protection/fuses/bussmann-series-photovoltaic-fuses/bus-ele-ds-2153-pvm-fuse.pdf>. Consulta: 21 de abril de 2021.

Para el inversor de voltaje, la protección viene establecida por el valor de voltaje calculado a partir de la ecuación 16, por lo que, para un valor de tensión de 162,28 V, la misma casa fabricante establece modelos como el SPD PV T1/PV T2 CC para voltajes menores a 600 V o como máximo a 1 000 V de los sistemas.

Esta protección está compuesta por varistores de óxido de metal, los cuales tienen la capacidad de disipación contra rayos y picos de sobretensiones.

Figura 48. **Protección contra sobretensiones (SPD) PV T1 / PV T2 Eaton**



Fuente: EATON. *SPDs - PV T2 estándar / de alto rendimiento.*

http://www.eaton.eu/ecm/groups/public/@pub/@europe/@electrical/documents/content/pct_119_3488_de.pdf. Consulta: 21 de abril de 2021.

4.3.7. Consideraciones de diseño mecánico para la eficiencia del modelo colector de energía

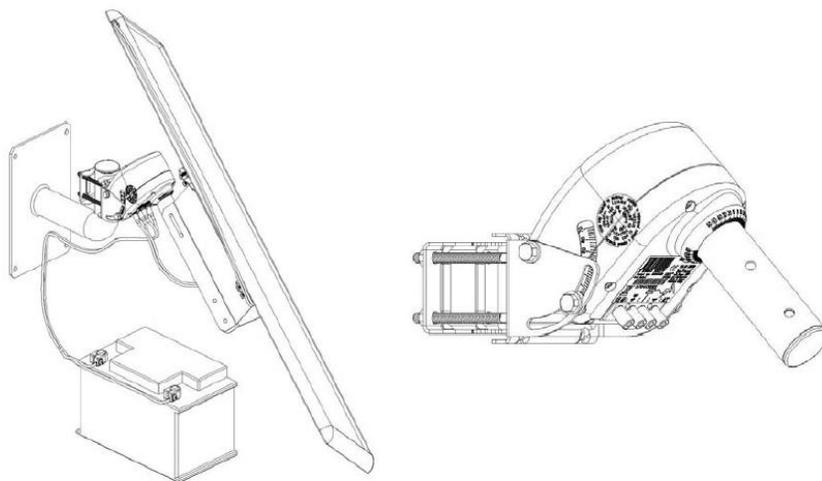
En el siguiente apartado se trata de establecer lineamientos básicos relacionados a estructuras mecánicas que complementan la función de seguidores para el modelo colector solar con el fin de que pueda ser concebida como una idea de implementación, a fin de lograr el objetivo de optimizar la entrega de la energía a la red de nodos.

En este tema es importante hacer notar que existen estructuras mecánicas que ofrece el mercado que busca satisfacer una necesidad puntual, por otro lado, también se predispone la elaboración de estas cuando los requerimientos son muy específicos, por lo que se hará la mención de ambas opciones a manera de tener dos perspectivas diferentes de estos elementos.

Las estructuras que se emplean para la configuración de mecanismos seguidores son, por lo general, con base en acero de perfil comercial o aluminio, no debe generarse mayor peso adicionado al que ya poseen las celdas solares.

En el presente esquema se muestra una estructura adecuada para la instalación de colectores solares de la marca SunTracer, por otro lado, se describen las características técnicas necesarias del mismo.

Figura 49. **Estructura de seguidor solar motorizada**



Fuente: TECHNOSUN. *Sistemas de montaje para instalación fotovoltaica.*
<https://www.technosun.com/es/estructuras-y-soportes/>. Consulta: 11 de enero de 2021.

Las características a cumplir los mecanismos se muestran en la tabla XIII.

Tabla XIII. **Especificaciones técnicas del seguidor activo SunTracer**

Características	Valores
Rotación horizontal	Típicamente 98° (100° máx.)
Inclinación/elevación del motor	75°
Máximo tamaño de panel solar	1,3m x 1m (con base en módulo)
Máximo peso del panel solar	22 kg desde el punto de gravedad
Velocidad de rotación	1,33°/s ±25% @50W panel solar, @ -10°C
Suministro de potencia del motor de un panel	de 7 a 43 VDC

Continuación de la tabla XIII.

Máxima corriente de carga	8,5 A
Consumo de potencia operacional (panel de 50w)	110-130 mA \pm 25%
Corriente de arranque	200 mA @ $t < 0,25$

Fuente: elaboración propia, con base en datos de <https://www.technosun.com/es/estructuras-y-soportes/>. Consulta: 11 de enero de 2021.

Estas características, también pueden emplearse en la adecuación de una estructura elaborada mediante un mecanismo de movimiento consistente en una cadena y un motor DC que ejerza el movimiento, la rotación debería tener como mínimo 100°. Una propuesta con características dinámicas se podrá ver en la integración de los equipos, más adelante.

4.4. Diseño del modelo colector de energía eólica

En este apartado se describe el proceso significativo para la adecuación del modelo colector de energía eólico, tomando las variables más importantes dadas las características relevantes del área de estudio.

4.4.1. Consideraciones medioambientales para la implantación del colector de energía eólica

El viento como un elemento natural, que es proporcional a la altitud del punto de medición, también es un recurso útil implementándolo de manera que pueda generar energía. Para su óptima utilización es necesario la consideración de algunos elementos que guardan relación directa con este recurso, los datos que se presentan han sido tomados de fuentes para la región de la República de

Guatemala, y tal como se ha mencionado al principio de este apartado, existen zonas donde el recurso eólico muestra condiciones para la adecuación de colectores de energía, por lo que a continuación se describen las variables involucradas.

4.4.1.1. Altitud

La altitud es la variable de longitud respecto de un punto de la tierra en relación con el nivel del mar, para la disposición del modelo colector de energía eólico, estos datos están contemplados en la tabla III del presente capítulo y para fines de cálculos se tomará una altitud promedio de 100 metros, justificando que la potencia que se genera no estima una cantidad mayor con relación a la altura a la cual se adecuará el colector eólico.

Tabla XIV. **Datos para el diseño del colector eólico**

Datos del 10 % de las áreas con mayor viento del país	
Altura (m)	Densidad de potencia media (W/m ²)
100	311

Fuente: elaboración propia, con información de *Global Wind Atlas*.
<https://globalwindatlas.info/area/Guatemala>. Consulta: 12 de diciembre de 2020.

4.4.1.2. Temperatura y densidad del aire

La temperatura es un factor determinante cuando se busca establecer mediciones de potencial eólico, pues está muy ligado al tema de la altura donde se pretende establecer el colector eólico y, también determina la densidad del aire para los cálculos de diseño. Tomando como referencia las propiedades

físicas del aire a una presión atmosférica, estos datos se pueden consultar en la tabla A-9 propiedades del aire a 1 atm de presión, del anexo 5.

Para el dato específico del lugar de estudio se tomará en cuenta como temperatura promedio a la República de Guatemala con 20 °C, teniendo en cuenta esto como un valor ponderado, puesto que en regiones que no necesariamente muestran potencial eólico, la temperatura será mayor.

Tabla XV. **Propiedades del aire del lugar de estudio para la implementación del colector eólico**

Propiedades del aire a presión atmosférica			
Temperatura	Viscosidad dinámica del aire (μ)	Viscosidad cinemática del aire (ν)	Densidad del aire (ρ)
20 °C	$1,825 \times 10^{-5}$ kg/m*s	$1,516 \times 10^{-5}$ m ² /s	1,204 kg/m ³

Fuente: elaboración propia.

La tabla XV determina una densidad de aire a condiciones ideales de temperatura, en el caso práctico que se recrea, este asume un valor de 1,00 kg/m³. La razón es sencilla, la densidad del aire varía de acuerdo con el punto donde se sitúe el colector, por lo que el valor es la media entre las densidades respecto a la altura y temperatura del lugar.

4.4.1.3. Velocidad del viento

La velocidad del viento determina implícitamente la altura a la cual puede estar colocado el colector y, también establece los criterios para la adecuación de los soportes mecánicos en tierra de este.

Tomando como base la tabla III de los datos recogidos para Guatemala, para una altura de 100 m sobre el nivel de referencia, la velocidad promedio del viento se establece con los valores que se muestran en la tabla XVI.

Tabla XVI. **Velocidad del viento promedio para el colector eólico sugerido**

Datos del 10 % de las áreas con mayor viento del país	
Altura (m)	velocidad media del viento (m/s)
100	6,03

Fuente: elaboración propia, con datos de *Global Wind Atlas*.

<https://globalwindatlas.info/area/Guatemala>. Consulta: 12 de diciembre de 2020.

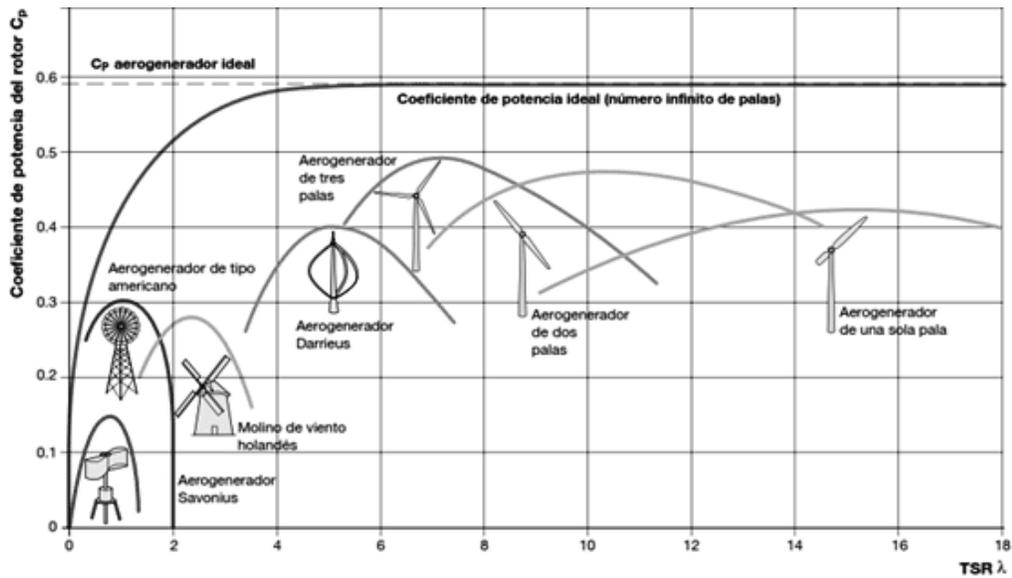
4.4.2. Consideraciones de diseño del modelo colector eólico

En el presente apartado se describen los fundamentos teóricos con base en expresiones matemáticas para el diseño experimental del modelo colector de energía eólica.

4.4.2.1. Potencia nominal del colector

La potencia nominal de trabajo del colector de energía está en función del rendimiento de los elementos mecánicos y eléctricos, asimismo, por las pérdidas del sistema. El coeficiente de potencia del rotor del colector de energía (C_p) también se puede interpretar por la relación con el radio de velocidad de este (TSR), se obtiene a partir de la figura 50.

Figura 50. **Coefficiente de potencia para varios tipos de aerogeneradores**



Fuente: BUENO LÓPEZ, Maximiliano. *Sistema de control para aerogeneradores empleando lógica difusa*. p. 6.

Es de hacer la observación que el modelo colector eólico propuesto para este trabajo es un aerogenerador de dos etapas tipo Savonius, por lo que su C_p es equivalente a 0,20

La eficiencia del modelo viene dada a partir de la ecuación:

$$\eta_s = \eta_m \eta_e C_p \quad \text{[Ecuación 17]}$$

Donde:

η_s = eficiencia del sistema

η_m = eficiencia mecánica del sistema

η_e = eficiencia eléctrica del sistema

C_p = coeficiente de potencia

Por lo tanto:

$$\eta_s = 0,90 \times 0,85 \times 0,20 = 0,153$$

Los valores de las eficiencias, tanto mecánicas como eléctricas, obedecen a pérdidas en fricción por rozamiento dentro de piezas y desgaste de operación, así como estrés térmico, pérdidas por calor, entre otros. Respectivamente.

La potencia nominal, entonces se describe por:

$$P_{nom} = \frac{P_{\acute{u}til}}{\eta_s} \quad \text{[Ecuación 18]}$$

Tomando el cálculo de la potencia demandada como la potencia útil necesaria se procede a calcular la potencia nominal:

$$P_{nom} = \frac{87,169 \text{ W}}{0,153} = 569,73 \text{ W}$$

El valor de la potencia nominal obtenida no es más que el valor de diseño para los demás parámetros del modelo colector, que a continuación se seguirán calculando.

4.4.2.2. Determinación de los parámetros del rotor

Las variables que involucran el diseño del rotor del modelo colector de energía vienen dadas por aspectos geométricos y de operación. Los geométricos obedecen al área de barrido del rotor y los de operación son propiamente aspectos eléctricos y mecánicos.

La siguiente expresión describe el cálculo del área sugerida para el rotor:

$$A = \frac{2P_e}{\eta_m \eta_e C_p \rho v^3} \quad [\text{Ecuación 19}]$$

Donde:

A = área de diseño del rotor (m²)

Pe = potencia eléctrica equivalente a la demanda del sistema (W)

η_m = eficiencia mecánica del sistema

η_e = eficiencia eléctrica del sistema

C_p = coeficiente de potencia

ρ = densidad del aire teórica (kg/m³)

v = velocidad nominal del viento del lugar de estudio (m/s)

Por lo tanto:

$$A = \frac{2(87,169 \text{ W})}{(0,9)(0,85)(0,20)(1 \text{ kg/m}^3)(6,03 \text{ m/s})^3} = 1,039 \text{ m}^2$$

Para el caso particular de un colector (rotor) tipo Savonius, el valor anterior calculado es el área del barrido y las expresiones para las dimensiones del colector están dadas por:

$$A = H \times D \quad [\text{Ecuación 20}]$$

Donde H es la altura del colector y d el diámetro total, cabe destacar que el sistema debe cumplir con un criterio de diseño, el cual indica que la H = 2d, por lo que:

$$A = 2D \times D = 2D^2 \quad [\text{Ecuación 21}]$$

Por lo tanto:

$$D = \sqrt{\frac{A}{2}} = \sqrt{\frac{1,039 \text{ m}^2}{2}} = 0,72 \text{ m}$$

$$H = 2D = 2(0,72 \text{ m}) = 1,44 \text{ m}$$

El valor del centro de eje viene dado por la siguiente expresión:

$$e = \frac{d}{6} \quad [\text{Ecuación 22}]$$

Y la relación entre el diámetro D y d es equivalente a:

$$D = 2d - e = 2d - \frac{d}{6} = \frac{11}{6}d$$

Por lo que el diámetro d es:

$$d = \frac{6}{11}D = \frac{6}{11}(0,72 \text{ m}) = 0,392 \text{ m}$$

Y:

$$e = \frac{d}{6} = \frac{0,392 \text{ m}}{6} = 0,065 \text{ m}$$

La tabla XVII describe las dimensiones resultantes de los cálculos establecidos con anterioridad, asimismo, la imagen da cuenta de la referencia de las variables de diseño.

Tabla XVII. **Dimensiones sugeridas para el colector eólico rotor Savonius**

Diámetro "D"	Diámetro "d"	Altura "H"	e
0,72 m	0,392 m	1,44 m	0,065 m

Fuente: elaboración propia.

4.4.2.3. **Velocidad de rotación de diseño y fuerza del viento**

La velocidad de rotación está asociada a la función propia del rotor y este asegura un valor de diseño óptimo, para que este elemento no sufra de esfuerzos causados por la fuerza del viento que puedan provocar un daño severo al colector.

Esta velocidad de rotación se obtiene de la expresión:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad \text{[Ecuación 23]}$$

Donde:

λ = velocidad tangencial del aspa con relación a la velocidad del viento

Para casos de rotores tipo Savonius se considera 0,8 como un valor efectivo de la relación anterior

ω = velocidad angular (rad/s)

R = radio del rotor

V = velocidad de diseño del viento

Por lo que:

$$\omega = \frac{\lambda v}{R} = \frac{(0,8)(6,03 \text{ m/s})}{\frac{0,72 \text{ m}}{2}} \times \frac{60}{2\pi} = 127,96 \text{ rpm}$$

Entonces, la velocidad de rotación de diseño es de aproximadamente 128 rpm, pero esta velocidad depende también de la fuerza de presión que ejerce el viento sobre las concavidades de las aspas, por lo que esta fuerza del viento viene dada por la expresión:

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad \text{[Ecuación 24]}$$

La velocidad del viento se establece como la velocidad a condiciones críticas de ráfagas, tomando el múltiplo dos de la velocidad de diseño, por lo que:

$$P = \frac{1}{2} (1 \text{ kg/m}^3) (2 \times 6,03 \text{ m/s})^2 = 72,721 \text{ N}$$

Este valor de fuerza es el valor de diseño máximo que podrá soportar las aspas del colector eólico tipo Savonius.

4.4.2.4. Determinación del sistema de transmisión

Para el sistema de transmisión se establecen dos propuestas; un mecanismo por banda y el otro por cadena, por razones de transmisión de potencia mecánica, se elige la cadena de eslabones, la cual estará en un extremo del colector y otra irá directo al generador eléctrico.

Para el cálculo de la relación de transmisión a las ruedas dentadas se establecen las siguientes ecuaciones.

$$d_1 N_1 = d_2 N_2 \quad \text{[Ecuación 25]}$$

Donde:

d_1 = diámetro polea 1 (rotor del colector)

N_1 = número de revoluciones por minuto polea 2 (velocidad del rotor)

d_2 = diámetro polea 2 (acople dentado hacia el generador)

N_2 = número de revoluciones por minuto polea 2 (velocidad del generador)

Los valores de N_1 y N_2 son valores de ruedas dentadas comercialmente establecidas y que, para fines del cálculo de la relación de transmisión, se determina de la siguiente manera:

$$i = \frac{d_1}{d_2} = \frac{180 \text{ mm}}{25 \text{ mm}} = 7,2$$

Por lo que, la velocidad permitida con la cual gira el acople dentado en el generador, conociendo la velocidad del rotor es:

$$N_2 = \frac{d_1 N_1}{d_2} = 7,2 (127,96 \text{ rpm}) = 921,312 \text{ rpm}$$

4.4.2.5. Selección del generador eléctrico

Una vez conocido las revoluciones de diseño, se establecen ciertos parámetros para la selección de un motor en régimen generador, capaz de entregar la potencia demandada.

Para este elemento se selecciona un motor en régimen generador que soporte las revoluciones establecidas con anterioridad, en la tabla XVIII se describen las características de un prototipo de la marca *AmpFlow*.

Tabla XVIII. **Características del generador eléctrico**

Modelo	G43-500-M
Potencia	500 W
Diámetro	4,3 pulg
Longitud	5,3 pulg
Eficiencia	80 %
Voltaje	12/18/24 V
RPM	3 300
Acople	engranaje
Peso	9,0 libras

Fuente: elaboración propia, con base en https://www.ampflow.com/standard_motors.htm.

Consulta: 8 de enero de 2021.

Las características y descripción técnica de dicho generador se encuentran en el anexo 3 del presente trabajo.

4.4.2.6. Selección del regulador de carga y el sistema de almacenamiento de la energía recolectada

Así como se pudo establecer la regulación de la carga y el tipo de batería para el almacenaje en el colector solar, se debe recordar que los tiempos establecidos son los que se necesitan para suministrar la corriente al equipo. En la tabla XIX se establecen los valores.

Tabla XIX. **Valores de corriente para el almacenamiento de carga del colector eólico**

Colector	Potencia	autonomía	Corriente batería (a 12 V)	Baterías por utilizar
Eólico	792,356 Wh	3 días	232,95 Ah	1 electrolítica

Fuente: elaboración propia.

El regulador de carga se dimensiona de acuerdo con el voltaje y potencia nominal, en el mercado se ofrecen soluciones, por lo que se debe tomar en cuenta la potencia nominal y el valor de voltaje. Para el modelo colector de energía se necesita cubrir una demanda de potencia de, por lo menos, los 569,73 W calculados, así que la selección del regulador deberá estar por encima de ese valor.

Figura 51. **Regulador de carga tipo eólico EcoEnergy**



Fuente: ECO-WORTHY. *400W 12V/24V Wind Turbine Generator With 20A Hybrid Controller.*
<https://www.eco-worthy.com/products/400w-12v-24v-wind-turbine-generator-with-20a-hybrid-controller>. Consulta: 9 de enero de 2021.

4.4.2.7. Consideraciones mecánicas para la eficiencia del modelo

Las consideraciones de estructura mecánica van en la selección del acero para fabricar los soportes donde se instalará el colector, esto es importante porque se trata de un mecanismo que se instalará en un ambiente a la intemperie y lo que se busca es prolongar la vida útil de las estructuras. Por otro lado, esta estructura estará adherida al sistema de monitoreo de la velocidad del viento, puesto que la estrategia de control y optimización del recurso capturado estará intrínsecamente vinculada al mismo.

Las estructuras se sugieren elaborarlas en acero respaldado por la Norma ASTM A36, la cual establece los valores de acero estructural de construcción, y en este caso, serían aceros de perfil cuadrado, en la figura 52 se recrea la sugerencia de los soportes de la estructura del colector eólico.

4.5. Propuesta de integración de los componentes del modelo colector

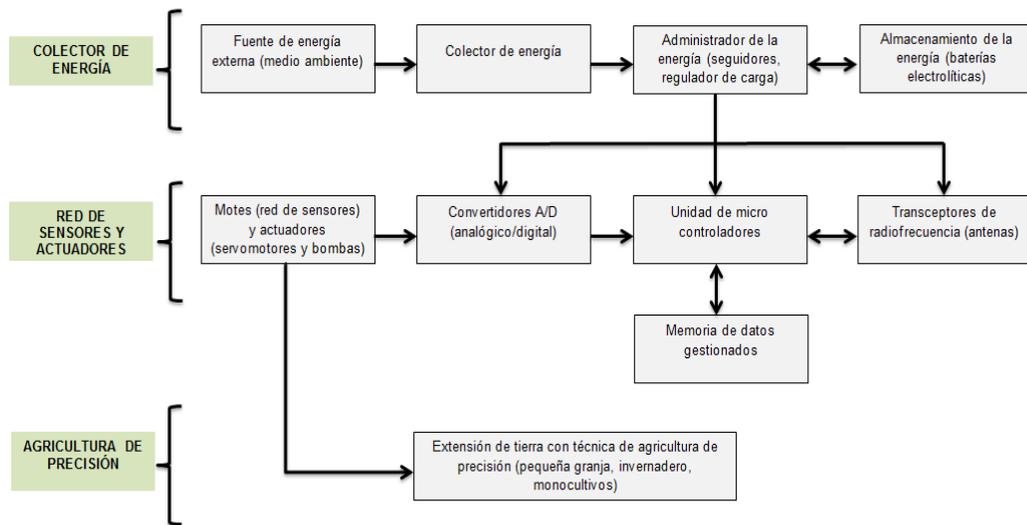
Determinados todos los componentes y las variables calculadas se presentan en el apartado siguiente la propuesta de integración de dichos elementos en el modelo colector de energía para cada una de las variantes propuestas.

4.5.1. Diagrama lógico general y específico de la estructura del modelo colector de energía integrando los demás componentes

En el siguiente diagrama se muestra la configuración de la estructura del bloque del modelo colector, el cual está en función de ciertos elementos de la red

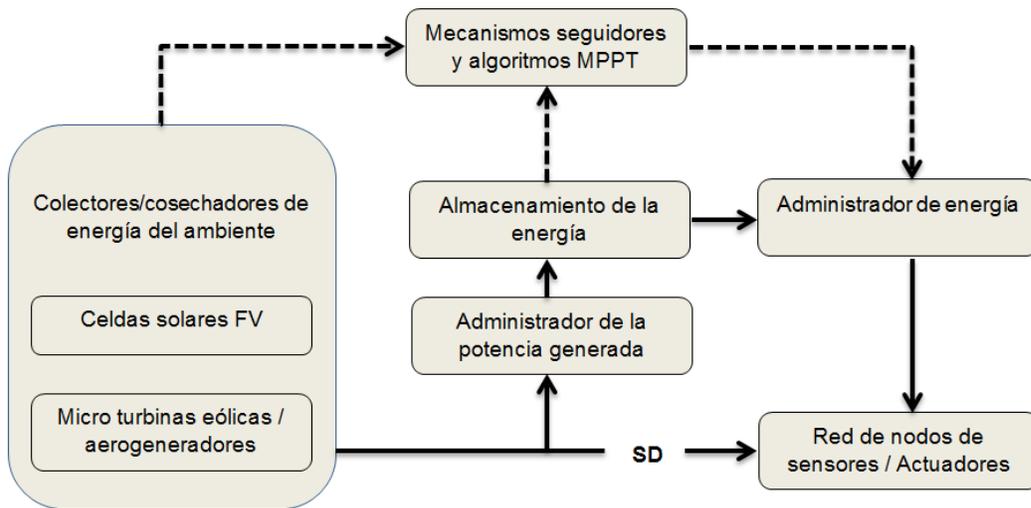
sensora y, por último, empleado en un área donde se utiliza la técnica de agricultura de precisión.

Figura 52. **Diagrama general del modelo colector integrado a la red de sensores en la agricultura de precisión**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

Figura 53. **Diagrama específico del sistema colector de energía utilizando cosechadores de energía del ambiente**



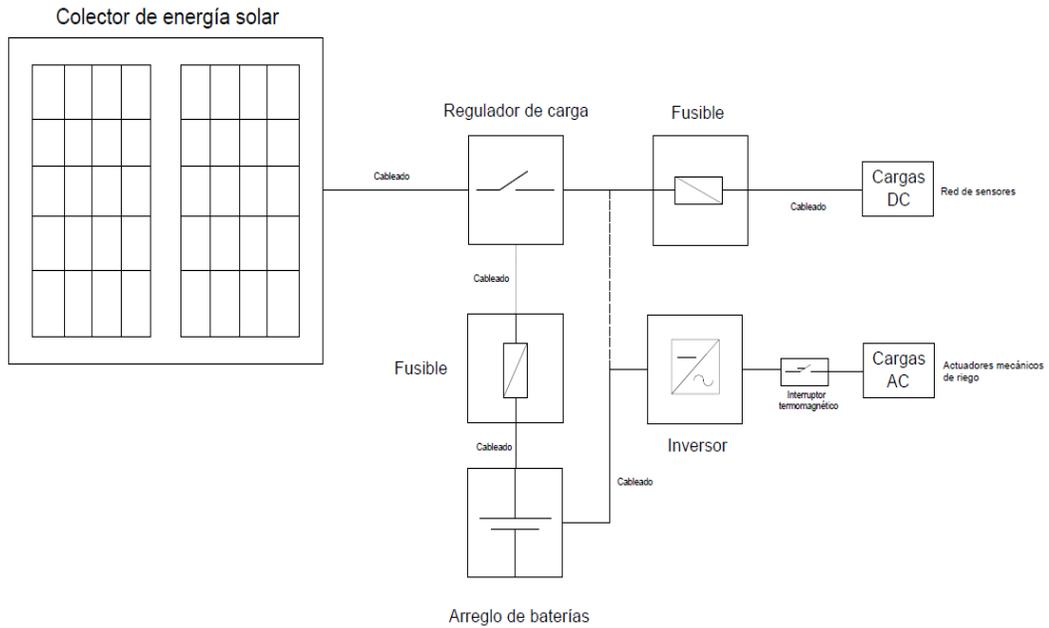
SD: Suministro directo solamente para actuadores directos en el campo cultivado
 ----- Función complementaria para optimización de la energía
 _____ Función básica de la operación

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

4.5.2. Diagrama unifilar del sistema modelo colector solar

En el siguiente diagrama (figura 54) se detalla cada uno de los componentes del sistema mediante el diagrama unifilar para una mejor comprensión.

Figura 54. Diagrama unifilar modelo colector solar

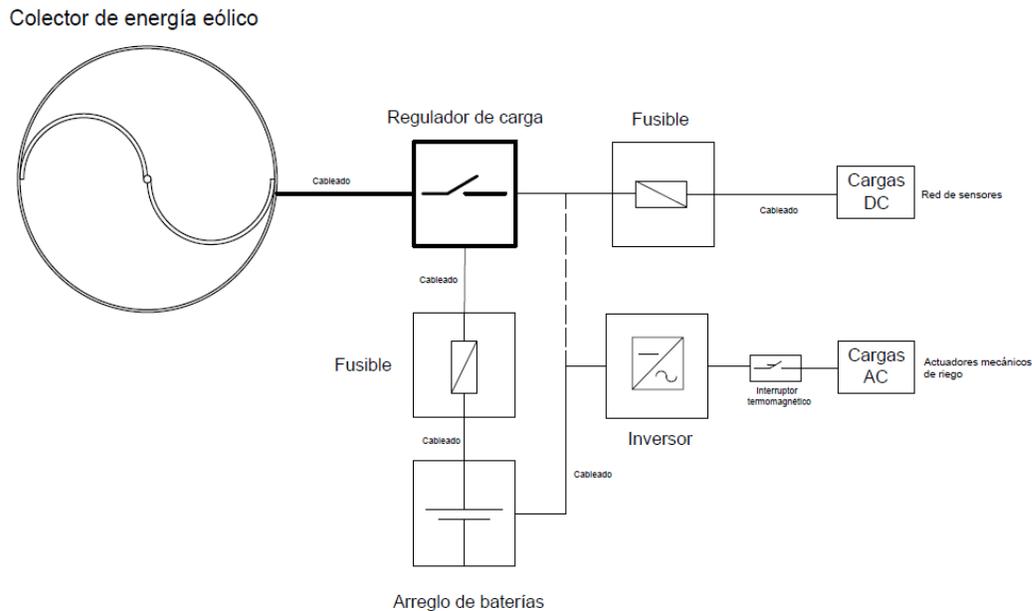


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2021.

4.5.3. Diagrama unifilar modelo colector eólico

Por otra parte, también se adjunta el diagrama del modelo colector eólico teniendo su diferencia en el cambio del tipo de colector que, como se había descrito con anterioridad, es un rotor tipo Savonius.

Figura 55. **Diagrama unifilar modelo colector eólico**



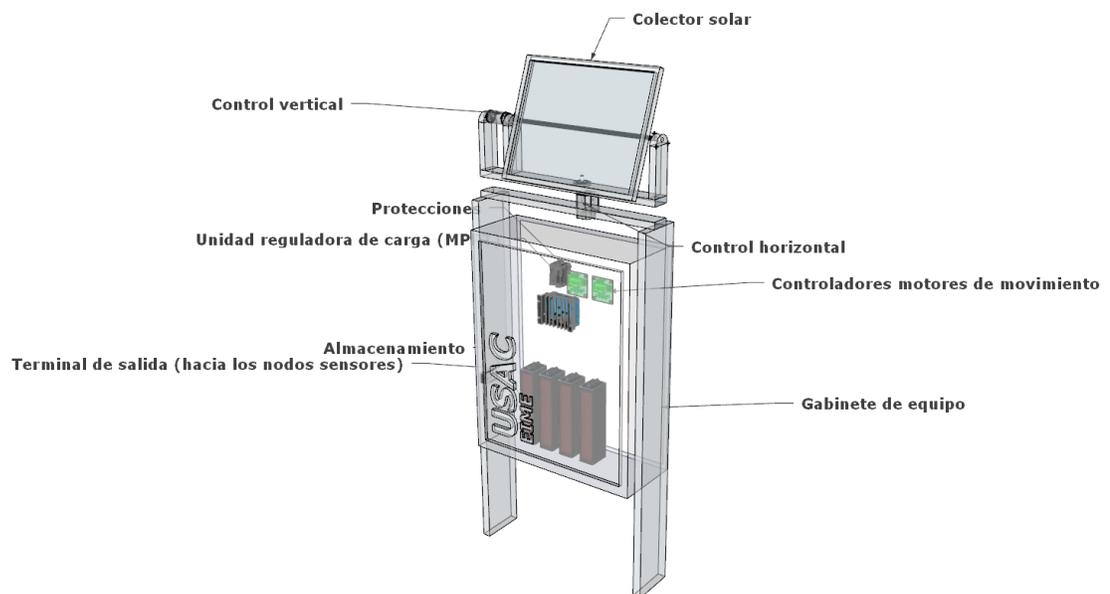
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2021.

4.5.4. **Modelo colector solar**

En el siguiente apartado, caracterización de la propuesta del modelo colector solar, se visualizan los elementos relevantes que hacen posible la optimización el suministro de energía que posterior es entregada a la red de sensores en la agricultura de precisión, como primer elemento se tiene al colector solar compuesto de celdas solares, la cual está sujeta a un mecanismo que gobierna la posición de este por medio de dos motores para las posiciones vertical y horizontal, este proceso se efectúa mediante la electrónica de control y los algoritmos de MPPT, específicamente perturbar y observar, con esto se asegura un correcto aprovechamiento del colector en los puntos máximos, cuando esto sucede, la unidad reguladora de carga establece el valor máximo

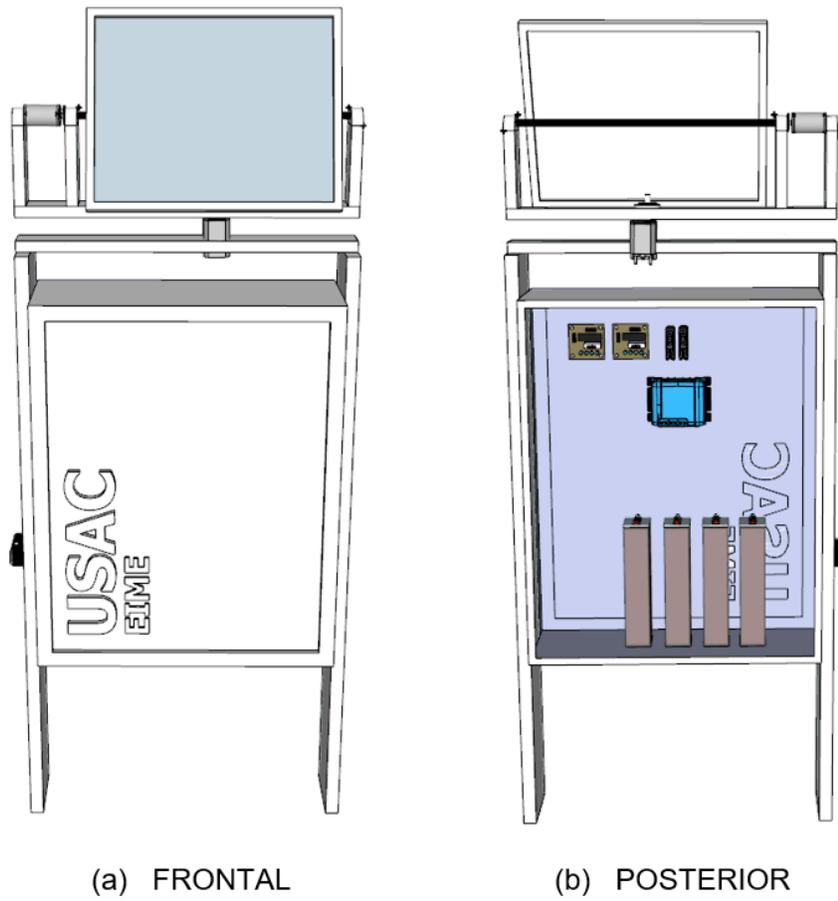
que produce los valores pico de energía, lo que a su vez, es trasladado hacia la unidad de almacenamiento compuesto por una serie de baterías electrolíticas de ciclo profundo, estas baterías almacenan la carga que se distribuye a través de una terminal al costado del gabinete de componentes, por su versatilidad, este colector puede ubicarse en alguna zona estratégica de la red de sensores donde pueda ser aprovechado en su máxima capacidad.

Figura 56. **Vista en isométrico del modelo colector solar y sus componentes**



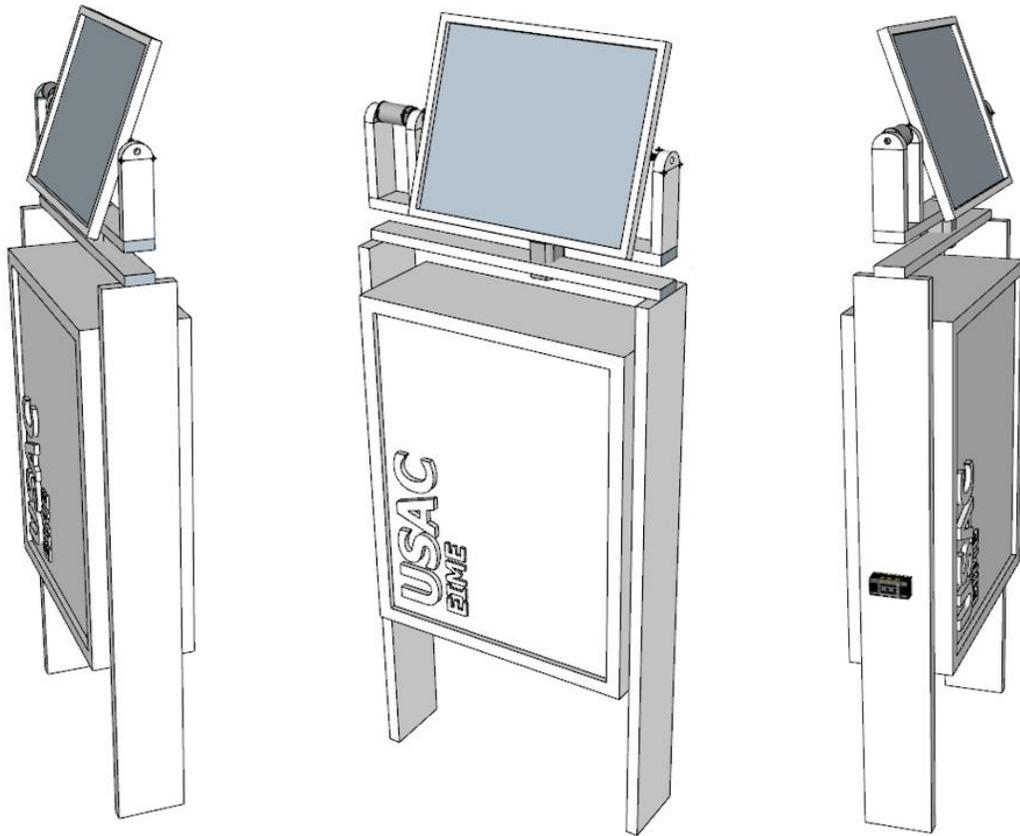
Fuente: elaboración propia, empleando Sketch Up Pro-2020.

Figura 57. Vista en perfil modelo colector solar



Fuente: elaboración propia, empleando Sketch Up Pro-2020.

Figura 58. **Vista en laterales modelo colector solar**



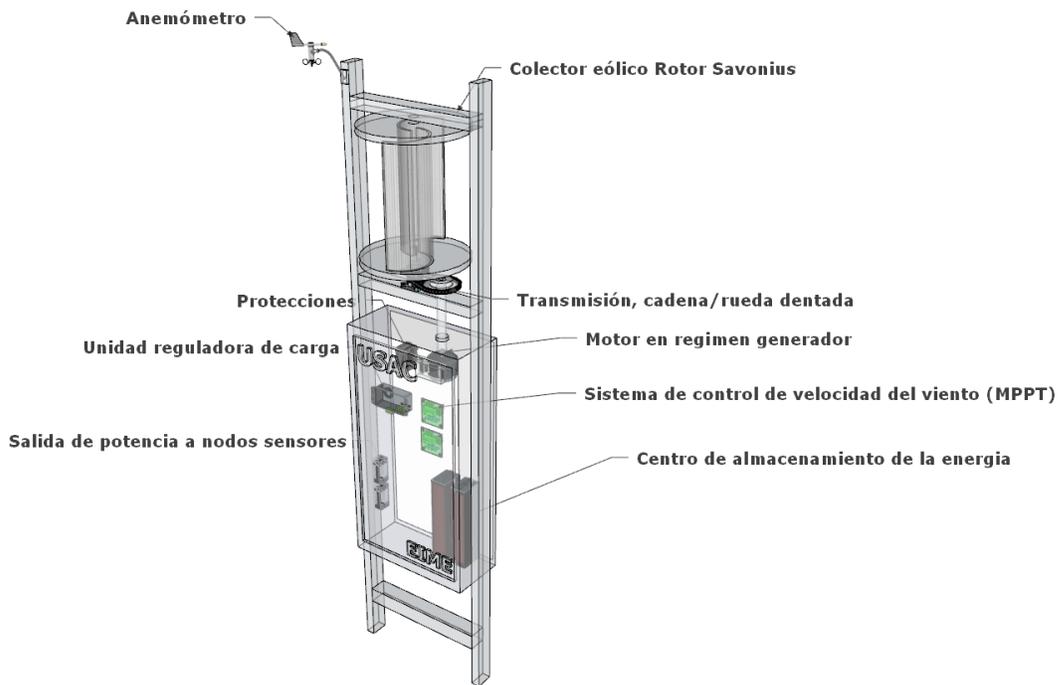
Fuente: elaboración propia, empleando Sketch Up Pro-2020.

4.5.5. Modelo colector eólico

El modelo colector eólico a diferencia del modelo colector solar, necesita de elementos mecánicos para transmitir el par de potencia generado en el eje del rotor Savonius, esto se logra mediante una transmisión de cadena y rueda dentada, que a su vez está acoplada al eje del generador, este generador cuenta con sus protecciones y la carga está enlazada a un circuito electrónico de un

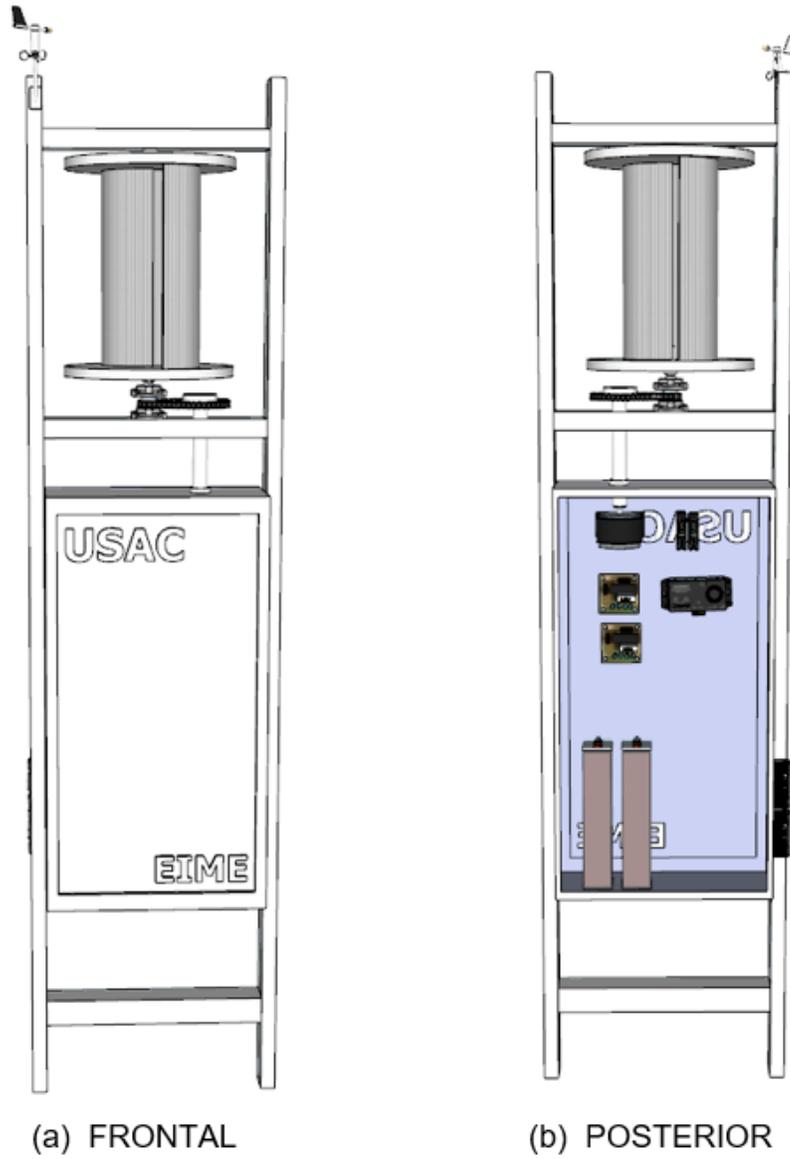
sistema de control, el cual compara la velocidad del viento por medio del anemómetro con la velocidad de rotación del colector, la variable de salida es la potencia que ingresa a la unidad reguladora, posteriormente trasladarlo al centro de almacenamiento compuesto por un pequeño banco de baterías que dispone de la energía para el suministro a la red de sensores.

Figura 59. **Vista en isométrico del modelo colector eólico y sus componentes**



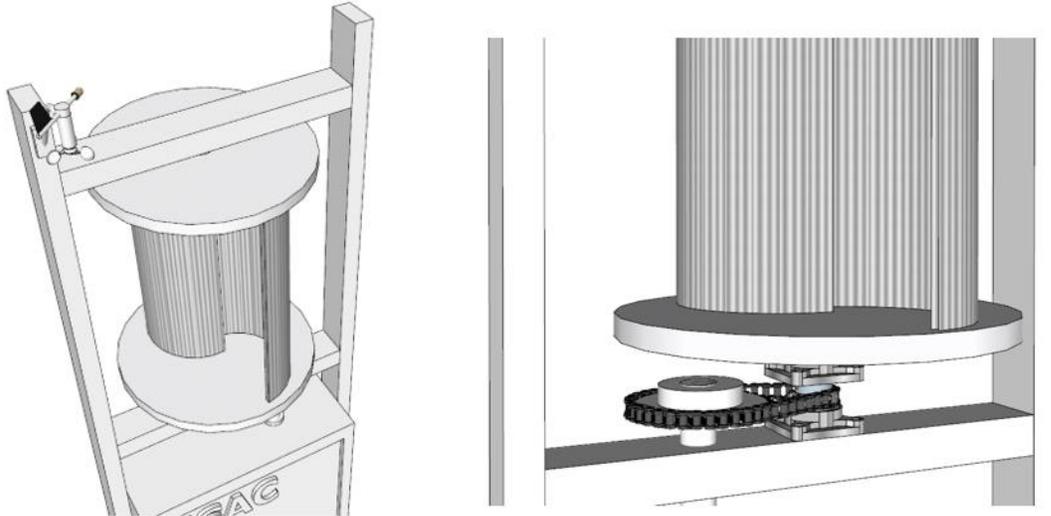
Fuente: elaboración propia, empleando Sketch Up Pro-2020.

Figura 60. Vista en perfil modelo colector eólico



Fuente: elaboración propia, empleando Sketch Up Pro-2020.

Figura 61. **Isométricos de componentes del modelo colector eólico**



Fuente: elaboración propia, empleando Sketch Up Pro-2020.

5. ANÁLISIS DE COSTOS DEL MODELO COLECTOR DE ENERGÍA

En el presente capítulo se describe cada uno de los costos en que se incurre al momento de evaluar la implementación de uno de los modelos propuestos, los valores aquí expresados son los que se encuentran en el mercado a la fecha de elaborado este trabajo. Algunos de los materiales se encuentran en el mercado local, otros se consideraron en un mercado internacional dadas las características necesitadas.

5.1. Costos asociados a los equipos y componentes eléctricos y electrónicos del colector sugerido

En las siguientes tablas se describen tres propuestas para los modelos de colectores, primero los de fuente de energía solar, siendo estos un conjunto de seis módulos solares; y, por otro lado, implementar un solo módulo, esto guardando el valor de demanda energética que se requiere.

En la tabla XXII se integran los equipos con los cuales se pretende implementar el colector eólico, la variación está directamente en la elaboración del colector propio, no así en los dispositivos de almacenamiento y regulación de carga, que se ajustan a la demanda requerida.

Tabla XX. Equipos y componentes del colector solar de 6 módulos

Equipos y componentes eléctricos/electrónicos					
Pieza/elemento	Componente	Cantidad	Unidad	Precio unitario*	Precio total*
Colector	Celdas solares 25 W 12 V "Solar TDC"	6	unidad	Q140,00	Q840,00
Sistema de regulación	Regulador de carga "Victron BlueSolar MPPT 75/15"	1	unidad	Q689,33	Q689,33
Inversor del sistema	Inversor Victron Energy Phoenix 12/250	1	unidad	Q958,15	Q958,15
Cables conductores	Cable solar fotovoltaico CENTELSA 4mm ² /12AWG	3	metro	Q9,95	Q29,85
Cables conductores	Cable solar fotovoltaico CENTELSA 6mm ² /10AWG	2	metro	Q12,28	Q24,56
Cables conductores	Cable solar fotovoltaico CENTELSA 8mm ² /8AWG	5	metro	Q11,55	Q57,75
Sistema de almacenamiento	Batería electrolítica "FIAMM LM300"	6	unidad	Q1 818,76	Q10 912,56
Dispositivos de protección	Eaton SPD PV T1/PVT2 cc	1	unidad	Q3 322,23	Q3 322,23
Dispositivos de protección	Eaton fusibles PVM-15 600 Vcd (5 unidades)	1	juego	Q829,44	Q829,44
Sistema de control/orientación colector	Motor Bringsmart A58SW31ZY, de engranaje helicoidal, 12 V cc con autobloqueo	2	unidad	Q233,86	Q467,72
Tarjeta de control electrónico	Driver A4988 para motor	1	unidad	Q29,00	Q29,00
TOTAL					Q18 160,59
Valor en US dólares					\$2 364,43

*Precios incluyen el IVA

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. Equipos y componentes del colector solar con un solo módulo

Equipos y componentes eléctricos/electrónicos					
Pieza/elemento	Componente	Cantidad	Unidad	Precio unitario*	Precio total*
Colector	Celdas solares 150 W 12 V "Solar TDC"	1	unidad	Q650,00	Q650,00
Sistema de regulación	Regulador de carga "Victron BlueSolar MPPT 75/15"	1	unidad	Q689,33	Q689,33
Inversor del sistema	Inversor Victron Energy Phoenix 12/250	1	unidad	Q958,15	Q958,15
Cables conductores	Cable solar fotovoltaico CENTELSA 4mm2/12AWG	3	metro	Q9,95	Q29,85
Cables conductores	Cable solar fotovoltaico CENTELSA 6mm2/10AWG	2	metro	Q12,28	Q24,56
Cables conductores	Cable solar fotovoltaico CENTELSA 8mm2/8AWG	5	metro	Q11,55	Q57,75
Sistema de almacenamiento	Batería electrolítica "FIAMM LM300"	6	unidad	Q1 818,76	Q10 912,56
Dispositivos de protección	Eaton SPD PV T1/PVT2 cc	1	unidad	Q3 322,23	Q3 322,23
Dispositivos de protección	Eaton fusibles PVM-15 600 Vcd (5 unidades)	1	juego	Q829,44	Q829,44
Sistema de control/orientación de colector	Motor Bringsmart A58SW31ZY, de engranaje helicoidal, 12 V cc con autobloqueo	2	unidad	Q233,86	Q467,72
Tarjeta de control electrónico	Driver A4988 para motor	1	unidad	Q29,00	Q29,00
TOTAL					Q17 970,59
Valor en US dólares					\$2 339,69

*Precios incluyen el IVA

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Equipos y componentes del colector eólico**

Equipos y componentes eléctricos/electrónicos					
Pieza/elemento	Componente	Cantidad	Unidad	Precio unitario*	Precio total*
Rotor	Plancha de PVC 5 mm de 1.22 x 2.44 m	2	unidad	Q79,00	Q158,00
Sistema de regulación	Regulador de carga MPPT "EcoEnergy"	1	unidad	Q428,03	Q428,03
Sistema de generación	Motor AmpFlow G-43 500-M	1	unidad	Q616,03	Q616,03
Control de flujo de aire	Sensor de velocidad anemómetro Calt 5V 0-5V salida analógica	1	unidad	Q521,68	Q521,68
Inversor del sistema	Inversor Victron Energy Phoenix 12/250	1	unidad	Q958,15	Q958,15
Cables conductores	Cable solar fotovoltaico CENTELSA 4mm ² /12AWG	3	metro	Q9,95	Q29,85
Cables conductores	Cable solar fotovoltaico CENTELSA 6mm ² /10AWG	2	metro	Q12,28	Q24,56
Cables conductores	Cable solar fotovoltaico CENTELSA 8mm ² /8AWG	5	metro	Q11,55	Q57,75
Sistema de almacenamiento	Batería electrolítica "FIAMM LM300"	6	unidad	Q1 818,76	Q10 912,56
Dispositivos de protección	Eaton SPD PV T1/PVT2 cc	1	unidad	Q3 322,23	Q3 322,23
Dispositivos de protección	Eaton fusibles PVM-15 600 Vcd (5 unidades)	1	juego	Q829,44	Q829,44
TOTAL					Q17 858,28
Valor en US dólares					\$2 325,07

*Precios incluyen el IVA

Fuente: elaboración propia.

5.2. Costos asociados a materiales estandarizados para la estructura del colector sugerido

Se entiende por estos materiales a aquellos que no necesitan un requerimiento técnico específico, por lo cual se encuentran libremente en el

mercado, su uso es generalizado tanto en el colector solar como en el colector eólico, la descripción se muestra en la tabla XXIII.

Tabla XXIII. Materiales para estructura de soporte de colector

Materiales estandarizados para estructura					
Pieza/elemento	Componente	Cantidad	Unidad	Precio unitario*	Precio total*
Fijación	Tornillo hexagonal 8.8 M6 – 1.0x30	100	unidad	Q3,88	Q387,50
Estructura	Tubería de acero perfil redondo cedula 20 3/4"	3	unidad	Q25,00	Q75,00
Estructura	Tubería de acero perfil redondo cedula 18 3/4"	5	unidad	Q38,75	Q193,75
Soldadura	Electrodo 3/32 60 ^a punto café	50	unidad	Q13,50	Q675,00
Rodamientos	Cojinete 25 mm x 62 mm x 17 mm	4	unidad	Q20,00	Q80,00
TOTAL					Q1 411,25
Valor en US dólares					\$199,28

*Precios incluyen el IVA

Fuente: elaboración propia.

5.3. Costos asociados a la mano de obra para ensamblaje de estructura

Este costo se generaliza, puesto que conlleva diversos procesos de maquinado que no se especifican por unidad o cantidad, por lo que la descripción se observa en la tabla XXIV.

Tabla XXIV. **Costos por mano de obra estructura colector solar**

Mano de obra ensamblaje		
Pieza/elemento	Proceso	Costo aproximado
Estructura	Corte	
	Maquinado de las partes	
	Taladrado	
	Soldadura	
Total		Q455,00
Valor en US dólares		\$59,01

Fuente elaboración propia.

5.4. Costos totales de los modelos de colector

En las siguientes tablas se resumen los costos totalizados aproximados de los dos modelos de colector sugeridos, con las variaciones en cuanto a su diseño, estos valores que se describen están siempre sujetos a variaciones de acuerdo con los modelos de componentes u otros factores que puedan modificar su valor propio.

Tabla XXV. **Costo total modelo colector solar**

Costos totales	
Elementos	Costo aproximado
Colector (1 o 6 módulos, precio ponderado)	Q18 065,59
Estructura	Q1 411,25
Mano de obra	Q455,00
Total	Q19 931,84
Valor en US dólares	\$2 595,04

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Costo total modelo colector eólico**

Costos totales	
Elementos	Costo aproximado
Colector tipo rotor "Savonius"	Q17 858,28
Estructura	Q1 411,25
Mano de obra	Q455,00
Total	Q19 724,53
Valor en US dólares	\$2 568,05

Fuente: elaboración propia.

Todos los valores establecidos en moneda de dólar americano están referenciados al valor al cambio del día: 7,71553 quetzales por US dólar [Consulta: Banguat, 07/03/2021].

CONCLUSIONES

1. Realización del diseño con base en recursos naturales como el sol y el viento, un modelo de colector de energía, respectivamente, que optimiza el recurso natural de la zona de estudio, proveyendo de manera continua el suministro eléctrico en una red de sensores aplicado a un área donde se utilice la agricultura de precisión.
2. Se establecieron parámetros climatológicos de las regiones más propensas a altos niveles de irradiación solar como densidad de aire en Guatemala, esto permite evaluar el recurso necesario para la conversión de la energía del medio a energía eléctrica por el colector propuesto y apoya los cálculos efectuados para determinar valores de diseño.
3. Determinación de valores nominales de diseño que hacen posible la construcción de uno de los modelos de colector, de acuerdo con la demanda requerida por los equipos a suministrar el fluido eléctrico estimando una potencia aproximada de 569 watts que se prevé pueda ser optimizada su entrega por el colector.
4. Descripción por medio de un diagrama lógico y una caracterización gráfica la integración del modelo, el cual denota la importancia que tiene el colector de energía sobre la red de sensores y los actuadores y estos últimos sobre la agricultura de precisión, en ello, se identifican tres elementos relevantes, el colector propio, la unidad de gestión de la carga, y el sistema de almacenamiento, estos se integran a fin de lograr la

optimización del recurso aunado a elementos mecánicos que auxilian dicho proceso.

5. La propuesta de diseño del modelo colector de energía brindará una herramienta que ayudará a la implementación en zonas donde se busque la buena gestión de los recursos de la producción agrícola, por medio de la integración de tecnología, lo que supone un precedente para futuros trabajos en este campo de estudio.

RECOMENDACIONES

1. Explorar y emplear, de manera eficiente, los recursos energéticos del ambiente con los que cuenta el país por medio del estudio de la variación climatológica, en tal sentido. Por la importancia del análisis de valores estadísticos históricos de los parámetros del clima, se sugiere la evaluación previa de ellos antes de implementar propuestas como el colector de energía.
2. Buscar los valores de diseño para un modelo de colector sugerido, ya que la construcción e implementación es un reto, por lo que se exhorta a futuros graduandos, que este sea un documento de consulta y de apoyo a quienes deseen continuar en áreas como la generación renovable de energía y las redes de sensores aplicados a diversas áreas de la vida.
3. Utilizar grandes y complejos elementos tecnológicos, es una evolución que la agricultura de precisión presenta actualmente, sin embargo, algunos elementos no siempre se ajustan en áreas donde no existen condiciones favorables, por lo que se debe considerar diseños básicos, funcionales y óptimos como los que se proponen en ese trabajo, lo que a su vez, coadyuvan a pequeños productores a mejorar la gestión de sus recursos agrícolas.
4. Aprovechar las fuentes de energías del ambiente es un tema en auge y los elementos encargados de hacer la conversión a energía eléctrica para su aprovechamiento, también son objeto de estudio, por lo que se sugiere considerar propuestas de diseño de colectores de otros medios,

tales como la vibración mecánica o por efectos térmicos, electromagnéticos o piezoeléctricos que busquen una solución a una necesidad latente de suministrar óptimamente el recurso energético.

BIBLIOGRAFÍA

1. BARRAZUETA CUEVA, Luis Vinicio. *Diseño y construcción de un generador eólico de eje vertical tipo savonius para producir 20 watts*. Trabajo de graduación de Ingeniería Mecánica. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, 2015. 129 p.
2. BASAGNI, Stefano. NADERI, Yousof. PETRIOLI, Chiara. SPENZA, Dora. *Wireless Sensor Networks with Energy Harvesting. Mobile ad hoc networking*. Estados Unidos. Vol.1., 2013. 736 p.
3. BOYLESTAD, Robert. NASHELSKY, Louis. *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. 10a ed. México: Pearson Educación, 2009. 912 p.
4. COLETO MARTÍNEZ, Jose Miguel. *La agricultura y la ganadería extremeñas en 2004. Caja de ahorros de Badajoz*. España: 2012. 225 p.
5. CÓRDOBA PACHECO, Andrés Felipe. *Estudio comparativo entre controladores implementados en un sistema de energía solar fotovoltaico*. Trabajo de graduación de Magíster en Ingeniería Electrónica. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana, 2018. 50 p.

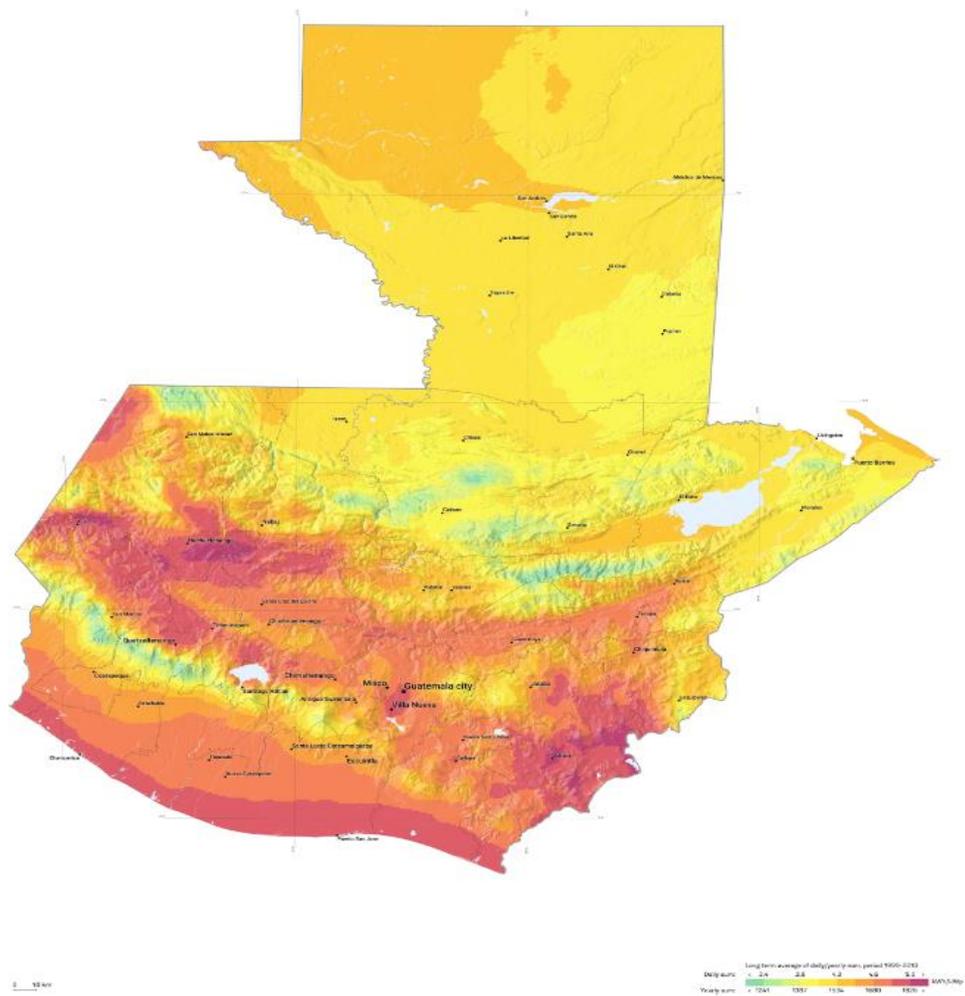
6. CUÉLLAR GUARNIZO, Jairo Alberto. *Diseño de un controlador para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) en paneles solares*. Trabajo de graduación de Magister en Ingeniería Electrónica. Bogotá, Colombia: Universidad Santo Tomás, 2019. 95 p.
7. D'ALESSIO, Luis Antonio; GONZÁLEZ, Luis Gerardo.; CÁCERES, Ramón. *Diseño y construcción de un convertidor Boost de pequeña potencia, con propósitos educativos y de investigación. Avances en ciencias e ingenierías*. 6(2). Venezuela: 2014. 183 p.
8. FLORES TORRES, Ángel. et. al. *Análisis y diseño de un convertidor Buck-Boost. La mecatrónica en México*, 8(2). México: 2019. 80 p.
9. FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas eléctricas*. 5a ed. Madrid, España: McGraw-Hill, 2003. 809 p.
10. GASCÓN, David. *Redes de sensores inalámbricos, la tecnología invisible. Revista BIT*, (180-181). España: 2010. 55 p.
11. JAWAD, Haider. et. al. *Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review. Sensors*, 17(8):1781. Malaysia, Iraq: 2017. 45 p.
12. JIMÉNEZ ALJURE, Javier Alfonso. *Diseño de un seguidor solar automático para un arreglo básico de paneles fotovoltaicos*. Trabajo de graduación de Ingeniería Mecánica. Bogotá, Colombia: Fundación Universidad de América, 2016. 184 p.

13. KOUTROULIS, Eftichios; KALAITZAKIS, Kostas. *Diseño de un sistema MPPT para aplicaciones de conversión de energía del viento. Ieee Transactions on Industrial Electronics*. 53(2). Grecia: 2006. 494 p.
14. LÓPEZ RIQUELME, Juan Antonio. *Contribución a la red de sensores inalámbricas. Estudio e implementación de soluciones hardware para agricultura de precisión*. Trabajo de graduación de Doctorado. Cartagena, Colombia: Universidad Politécnica de Cartagena, 2011. 310 p.
15. LÓPEZ, David; LIZÁRRAGA, Alejandro; DURÁN, José. *Diseño y consideraciones de un lazo de compensación para el convertidor tipo BOOST (elevador) CD-CD controlado en modo de voltaje. Revista Ra Ximhai*, 1(2). México: 2005. 362 p.
16. MARTÍNEZ NAVARRO, Diego. *Diseño de un sistema de generación de energía eléctrica basado en la utilización de las energías solar y eólica, e integrado en el medio natural*. Trabajo de graduación Ingeniería Mecánica. Cartagena, Colombia: Universidad Politecnica de Cartagena, 2016. 140 p.
17. MORA DELGADO, Diego. *Algoritmo de gestión energética aplicado dentro de las WSN's. Revista Nthe*. (29) México: 2019. 30 p.
18. MUÑOZ MORENO, Ignacio Javier. *Modelo y control de un sistema híbrido PV-Eólico para una microred eléctrica DC*. Trabajo de graduación de Magíster en Ingeniería Electrónica. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana, 2015. 40 p.

19. PELAYO LÓPEZ, Jorge. et. al. *Comparativa entre la eficiencia de un sistema fotovoltaico con seguimiento solar y la de un sistema fotovoltaico fijo*. Revista Iberoamericana CIBA, 7(13). México: 2018. 129 p.
20. REMUS SILVEIRA, Juan A. *La agricultura de precisión: una revolución en progreso*. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. 10(3). Cuba: 2001. 6 p.
21. SANTILLÁN, Orlando. RENTERÍA RODRÍGUEZ, Miguel Enrique. *Agricultura de precisión. Nota INCyTU, (15)*. México: 2018. 6 p.
22. SOBREVILA, Marcelo Antonio. *Instalaciones de potencia*. Argentina: Editorial Alsina, 2009. 282 p.
23. TAPIA ZURITA, José Luis. *Tutorial de redes de sensores ad hoc con eficiencia en energía*. Trabajo de graduación de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones. Cholula, Puebla, México: Universidad de las Américas, 2006. 122 p.
24. TOLOSA, Jorge Rubén. *Aerogeneración de energía*. Ed. final. Ecuador: OLADE, 1981. 121 p.
25. TORRES MORIMITSU, Daniela. *Diseño de un generador eólico de eje vertical de baja potencia*. Trabajo de graduación de Ingeniería Mecánica. Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira, 2015. 190 p.

ANEXOS

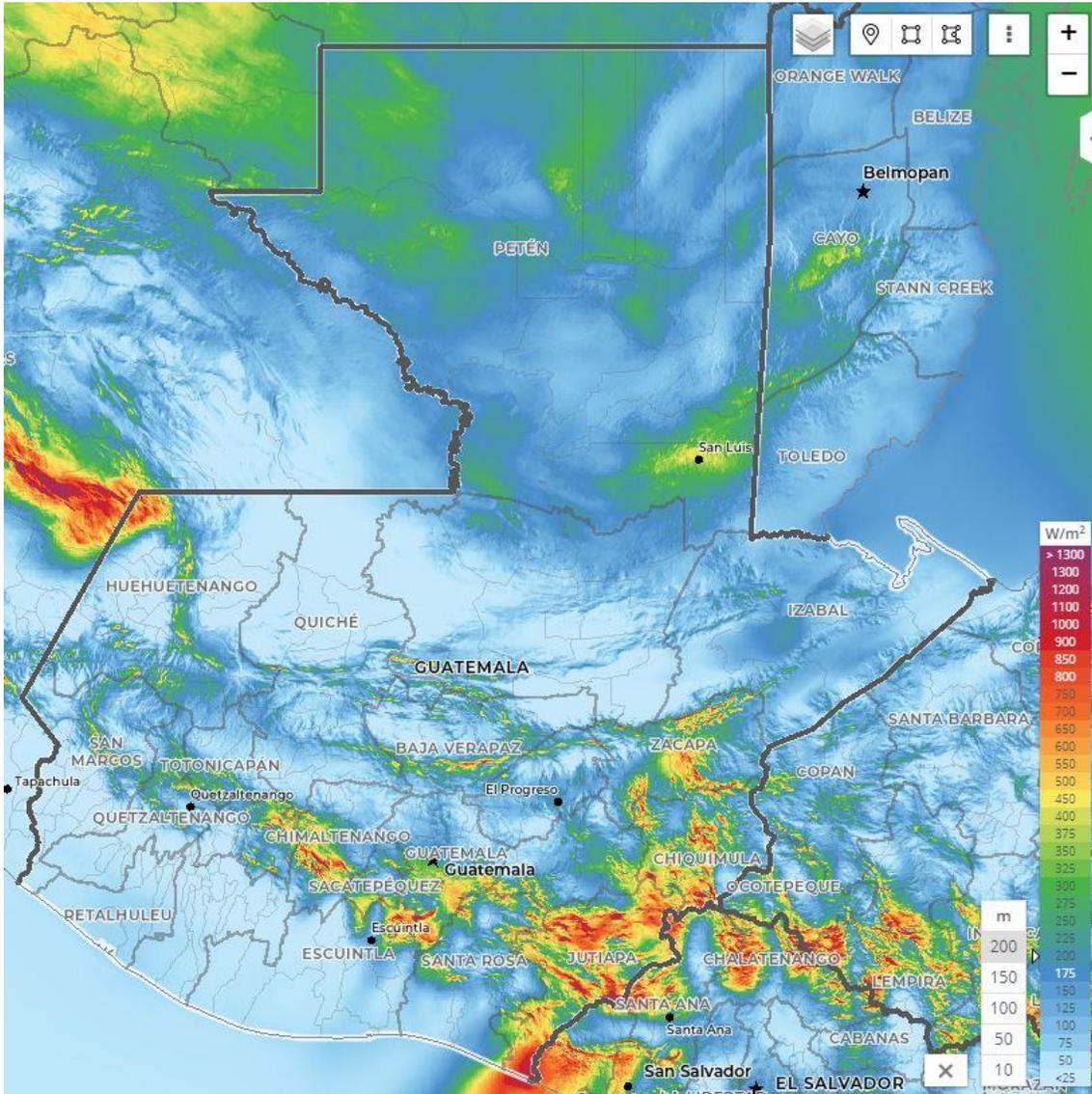
Anexo 1. Mapa de potencial fotovoltaico para la república de Guatemala



Fuente: WORLD BANK. *Global Solar Atlas*

<https://globalsolaratlas.info/download/guatemala?c=15.786968,-90.22522,8>. Consulta: 12 de enero de 2021.

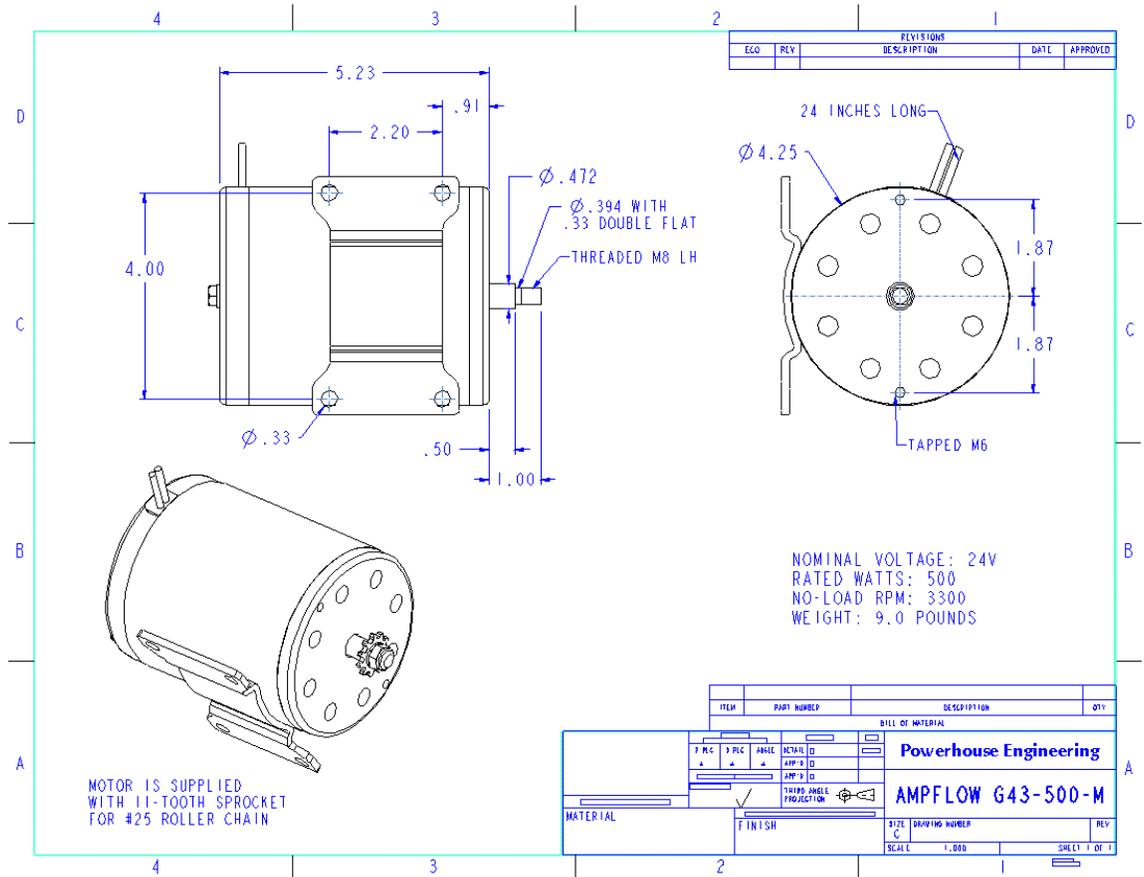
Anexo 2. Mapa de densidad de potencia del aire para la República de Guatemala



Fuente: WORLD BANK. *Global Wind Atlas*. <https://globalwindatlas.info/area/Guatemala>.

Consulta: 12 de enero de 2021.

Anexo 3. Hoja de características técnicas motor *AmpFlow* modelo G43-500-M



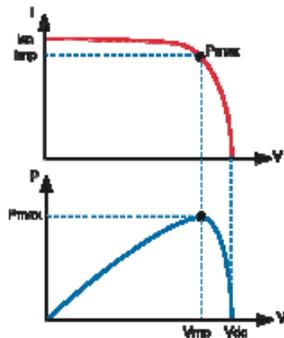
Fuente: AMPFLOW. *Standard motors*. https://www.ampflow.com/standard_motors.htm.

Consulta: 13 de enero de 2021.

Anexo 4. Especificaciones técnicas, unidad de control de carga



Controlador de carga solar
MPPT 75/15



Seguimiento del punto de potencia máxima

Curva superior:

Corriente de salida (I) de un panel solar como función de tensión de salida (V). El punto de máxima potencia (MPP) es el punto Pmax de la curva en el que el producto de I x V alcanza su pico.

Curva inferior:

Potencia de salida $P = I \times V$ como función de tensión de salida. Si se utiliza un controlador PWM (no MPPT) la tensión de salida del panel solar será casi igual a la tensión de la batería, e inferior a V_{min} .

BatteryLife: gestión inteligente de la batería

Cuando un controlador de carga solar no es capaz de recargar la batería a plena capacidad en un día, lo que sucede es que el ciclo de la batería cambia continuamente entre los estados "parcialmente cargada" y "final de descarga". Este modo de funcionamiento (sin recarga completa periódica) destruirá una batería de plomo-ácido en semanas o meses.

El algoritmo BatteryLife controlará el estado de carga de la batería y, si fuese necesario, incrementará día a día el nivel de desconexión de la carga (esto es, desconectará la carga antes) hasta que la energía solar recogida sea suficiente como para recargar la batería hasta casi el 100%. A partir de ese punto, el nivel de desconexión de la carga se modulará de forma que se alcance una recarga de casi el 100% alrededor de una vez a la semana.

Componentes electrónicos encapsulados en resina

Protegen a los componentes electrónicos de la intemperie.

Controlador de carga BlueSolar	MPPT 75/15	MPPT 100/15
Tensión de la batería	Selección automática: 12/24 V	
Corriente de carga nominal	15 A	
Potencia FV máxima, 12V 1a,b)	200 W (rango MPPT 15 V y 70 V respectivamente, 95 V)	
Potencia FV máxima, 24V 1a,b)	400 W (rango MPPT 30 V y 70 V respectivamente, 95 V)	
Desconexión automática de la carga	Sí, carga máxima 15 A	
Tensión máxima del circuito abierto FV	75 V	100 V
Eficiencia máxima	98 %	
Autoconsumo	10 mA	
Tensión de carga de "absorción"	14,4 V/28,8 V	
Tensión de carga de "flotación"	13,8 V/27,6 V	
Algoritmo de carga	variable multietapas	
Compensación de temperatura	-16 mV / °C, -32 mV / °C resp.	
Corriente de carga continua/cresta	15A/50A	
Desconexión de carga por baja tensión	11,1 V / 22,2 V o 11,8 V / 23,6 V o algoritmo de BatteryLife	
Reconexión de carga por baja tensión	13,1 V / 26,2 V o 14 V / 28 V o algoritmo de BatteryLife	
Protección	Polaridad inversa de la batería (fusible) Cortocircuito de salida Sobretensión	
Temperatura de trabajo	-30 a +60°C (potencia nominal completa hasta los 40°C)	
Humedad	100 %, sin condensación	
Puerto de comunicación de datos	VE.Direct Consulte el libro blanco sobre comunicación de datos en nuestro sitio web	
CARCASA		
Color	Azul (RAL 5012)	
Terminales de conexión	6 mm ² / AWG10	
Tipo de protección	IP65 (componentes electrónicos), IP22 (área de conexión)	
Peso	0,5 kg	
Dimensiones (al x an x p)	100 x 113 x 40 mm	
1a) Si hubiese más potencia FV conectada, el controlador limitará la potencia de entrada a 200 W o 400 W, resp.		
1b) La tensión FV debe exceder en 5V la Vbat (tensión de la batería) para que arranque el controlador. Una vez arrancado, la tensión FV mínima será de Vbat + 1V.		

Victron Energy B.V. | De Paal 35 | 1351 JG Almere | Países Bajos
Centralita: +31 (0)36 535 97 00 | Fax: +31 (0)36 535 97 40
E-mail: sales@victronenergy.com | www.victronenergy.com



Fuente: VICTRON ENERGY. Controladores de carga solar.

<https://www.victronenergy.com.es/solar-charge-controllers/mppt7510>. Consulta: 15 de enero de 2021.

Anexo 5. Propiedades del aire a presión atmosférica

894
TABLAS Y GRÁFICAS

TABLA A-9

Propiedades del aire a 1 atm de presión

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Densidad $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico c_p $\text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad dinámica $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Nota: Para gases ideales, c_p , k , μ y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , ν y α a una presión P distinta a 1 atm se determinan cuando se multiplican los valores de ρ a la temperatura dada por P (en atm) y cuando se dividen ν y α entre P (en atm).

Fuente: Datos generados a partir del Software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198; and Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena, y P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

Fuente: ÇENGEL, Yunus A. y John M. CIMBALA, *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. p. 894.

Anexo 6. Ampacidades permisibles para conductores aislados

ARTICLE 310: Conductors for General Wiring NEC Table 310.16

Table 310.16 Allowable Ampacities of Insulated Conductors Rated 0 Through 2000 Volts, 60°C Through 90°C (140°F Through 194°F), Not More Than Three Current-Carrying Conductors in Raceway, Cable, or Earth (Directly Buried), Based on Ambient Temperature of 30°C (86°F)

or kcmil	Temperature Rating of Conductor						or kcmil
	60°C (140°F)	75°C (167°F)	90°C (194°F)	60°C (140°F)	75°C (167°F)	90°C (194°F)	
	Types TW, UF	Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE, ZW	Types TBS, SA, SIS, FEP, FEPB, MI, RHH, RHW-2, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	Types TW, UF	Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE	Types TBS, SA, SIS, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, RHH, RHW-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	
	COPPER			ALUMINUM OR COPPER-CLAD ALUMINUM			
18	—	—	14	—	—	—	—
16	—	—	18	—	—	—	—
14*	20	20	25	—	—	—	—
12*	25	25	30	20	20	25	12*
10*	30	35	40	25	30	35	10*
8	40	50	55	30	40	45	8
6	55	65	75	40	50	60	6
4	70	85	95	55	65	75	4
3	85	100	110	65	75	85	3
2	95	115	130	75	90	100	2
1	110	130	150	85	100	115	1
1/0	125	150	170	100	120	135	1/0
2/0	145	175	195	115	135	150	2/0
3/0	165	200	225	130	155	175	3/0
4/0	195	230	260	150	180	205	4/0
250	215	255	290	170	205	230	250
300	240	285	320	190	230	255	300
350	260	310	350	210	250	280	350
400	280	335	380	225	270	305	400
500	320	380	430	260	310	350	500
600	355	420	475	285	340	385	600
700	385	460	520	310	375	420	700
750	400	475	535	320	385	435	750
800	410	490	555	330	395	450	800
900	435	520	585	355	425	480	900
1000	455	545	615	375	445	500	1000
1250	495	590	665	405	485	545	1250
1500	520	625	705	435	520	585	1500
1750	545	650	735	455	545	615	1750
2000	560	665	750	470	560	630	2000

CORRECTION FACTORS							
Ambient Temp. (°C)	For ambient temperatures other than 30°C (86°F), multiply the allowable ampacities shown above by the appropriate factor shown below.						Ambient Temp. (°F)
21-25	1.08	1.05	1.04	1.08	1.05	1.04	70-77
26-30	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	78-86
31-35	0.91	0.94	0.96	0.91	0.94	0.96	87-95
36-40	0.82	0.88	0.91	0.82	0.88	0.91	96-104
41-45	0.71	0.82	0.87	0.71	0.82	0.87	105-113
46-50	0.58	0.75	0.82	0.58	0.75	0.82	114-122
51-55	0.41	0.67	0.76	0.41	0.67	0.76	123-131
56-60	—	0.58	0.71	—	0.58	0.71	132-140
61-70	—	0.33	0.58	—	0.33	0.58	141-158
71-80	—	—	0.41	—	—	0.41	159-176

* Small Conductors. Unless specifically permitted in 240.4(E) through (G), the overcurrent protection shall not exceed 15 amperes for 14 AWG, 20 amperes for 12 AWG, and 30 amperes for 10 AWG copper; or 15 amperes for 12 AWG and 25 amperes for 10 AWG aluminum and copper-clad aluminum after any correction factors for ambient temperature and number of conductors have been applied.

Fuente: WALRAD USA LLC. *Conductors for General Wiring NEC Table 310.16.*

<http://www.walrad.com/wp-content/uploads/2015/08/WALRAD-USA-LLC-Wire-Chart.pdf>

Consulta: 6 de marzo de 2021.