

Universidad de Alcalá  
Departamento de Electrónica  
Escuela Politécnica Superior

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**Trabajo Fin de Máster**

Prototipo a escala de un sistema de generación distribuida con  
almacenamiento

ESCUELA POLITECNICA  
**Autor:** Leonardo García Velásquez  
SUPERIOR  
**Director:** Francisco Javier Rodríguez Sánchez

2022

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ  
Escuela Politécnica Superior  
Departamento de Electrónica

**Máster Universitario en Ingeniería Electrónica**

Trabajo Fin de Máster

**Prototipo a escala de un sistema de generación distribuida con  
almacenamiento.**

Autor: Leonardo García Velásquez

Director: Francisco Javier Rodríguez Sánchez

Comisión Evaluadora:

Presidente: D. José Luis Martín Sánchez

Vocal 1º: D. Julio Pastor Mendoza

Vocal 2º: D. Felipe Espinosa Zapata

07 de septiembre de 2022

*A mi amada familia, por su apoyo incondicional y  
ser mi principal fuente de motivación.*

# *Agradecimientos*

Quiero agradecer en primer lugar a Dios por permitirme culminar una etapa importante en mi vida.

De todo corazón agradezco a toda mi familia en especial, a mi padre Álvaro, a mi madre Judith por todo el esfuerzo y sacrificio, por sus valiosos consejos y la educación brindada, a mi hermano Víctor por estar siempre a mi lado y creer en mí, por su confianza y por levantarme el ánimo en los momentos de desaliento, a ellos debo todo lo que soy. A Nahomy por llegar a mi vida y llenarla de momentos maravillosos, por acompañarme y apoyarme en esta travesía. A Omaira y a Héctor por brindarme su mano en un momento muy especial de mi vida.

Agradecer también a todos los profesores del máster que dieron lo mejor de sí en cada una de sus clases y reflejaron pasión y amor por su profesión. En especial agradecer a mi tutor Francisco Javier, por su acompañamiento, compromiso y los conocimientos compartidos en el desarrollo de este proyecto, siendo un honor trabajar a su lado.

Agradecer también a todas aquellas personas especiales que me han acompañado a lo largo de este proceso, por los momentos y experiencias compartidas: Pedro, Narek, a Roberto y a Yeny que me han apoyado y colaborado incondicionalmente.

A todos, muchas gracias, sin ustedes esto no hubiera sido posible, han pintado con bellos matices esta etapa de mi vida.

# Resumen

En el presente trabajo se implementa un prototipo a escala de un sistema de generación distribuida como equipo de laboratorio para uso en investigación basado en energía solar fotovoltaica, que permitirá identificar y conocer los componentes que integran el sistema, y donde se podrán evaluar y estudiar los parámetros característicos de su funcionamiento. Para llevar a cabo este proyecto se parte de un análisis teórico de las fuentes de generación y de almacenamiento, seguido del diseño de cada etapa del sistema de generación distribuida, tanto hardware como software. Por último, los resultados reflejan el funcionamiento del sistema ante diferentes condiciones de operación.

**Palabras claves:** generación distribuida, sistemas de almacenamiento, entrenador fotovoltaico, curvas características I-V, y P-V.

# ABSTRACT

In this work, a scale prototype of a distributed generation system is implemented as laboratory tool in order to use it in research. This device has been based on photovoltaic solar energy, and it will allow to understand and integrate all the components that make those systems work. To carry out this project, it is based on a theoretical analysis of the energy generation and storage sources, followed by the design of the stages of the distributed generation system, both hardware and software. The obtained results reflect the performance of the system under different operating conditions.

**Keywords:** distributed generation, storage systems, photovoltaic trainer, I-V and P-V characteristic curves.

# Contenido

Resumen.....	iv
ABSTRACT .....	v
Lista de figuras .....	x
Lista de tablas.....	xiv
Glosario de términos.....	xvi
1 Introducción .....	18
<b>1.1 Motivación .....</b>	<b>18</b>
<b>1.2 Objetivos.....</b>	<b>19</b>
<b>1.3 Organización de la memoria.....</b>	<b>19</b>
2 Sistema de Generación Distribuida.....	21
<b>2.1 Estado de la Generación distribuida .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2 Definición de Generación Distribuida .....</b>	<b>22</b>
<b>2.3 Arquitecturas de la Generación Distribuida.....</b>	<b>23</b>
<b>2.4 Tecnologías para la generación distribuida. ....</b>	<b>24</b>
2.4.1 Cogeneración.....	25
2.4.2 Motor alternativo.....	26
2.4.3 Turbina de gas .....	27
2.4.4 Minihidráulica.....	27
2.4.5 Eólica .....	28
2.4.6 Solar térmica .....	28
2.4.7 Fotovoltaica (FV) .....	29
2.4.8 Residuos .....	30
2.4.9 Biomasa .....	31
2.4.10 Microturbina .....	32
2.4.11 Pila de combustible .....	32
2.4.12 Marina .....	33
2.4.13 Geotérmica.....	34
<b>2.5 Sistemas de almacenamiento en Generación Distribuida .....</b>	<b>35</b>
2.5.1 Bombeo de agua .....	36
2.5.2 Baterías.....	36
2.5.3 Aire comprimido.....	37

2.5.4	Volantes de inercia.....	38
2.5.5	Supercondensadores.....	39
2.5.6	Almacenamiento térmico.....	39
2.5.7	Hidrógeno.....	40
<b>2.6</b>	<b>Interconexión a la red de la GD .....</b>	<b>41</b>
<b>2.7</b>	<b>Componentes del sistema de interconexión.....</b>	<b>41</b>
2.7.1	Conexión a la red.....	41
2.7.2	Equipos de medida.....	42
2.7.3	Red de distribución y transporte.....	42
2.7.4	Equipos de comunicación.....	42
2.7.5	Monitorización .....	42
2.7.6	Conversión de energía.....	42
2.7.7	Aparamenta de conexión .....	43
<b>3</b>	<b>Diseño e implementación del prototipo a escala de un sistema de generación distribuida con almacenamiento .....</b>	<b>44</b>
<b>3.1</b>	<b>Consideraciones de diseño del prototipo .....</b>	<b>44</b>
3.1.1	Consideraciones técnicas .....	44
<b>3.2</b>	<b>Planteamiento del diseño del sistema de GD .....</b>	<b>45</b>
<b>3.3</b>	<b>Turbina eólica como sistema de generación.....</b>	<b>46</b>
3.3.1	Funcionamiento de las turbinas eólicas.....	47
3.3.2	Partes de la turbina eólica.....	47
3.3.3	Modelos de aerogeneradores.....	49
3.3.4	Modelado de la turbina eólica .....	50
3.3.5	Descripción general de una instalación de energía eólica .....	53
<b>3.4</b>	<b>Panel fotovoltaico como sistema de generación.....</b>	<b>54</b>
3.4.1	Funcionamiento del panel fotovoltaico .....	54
3.4.2	Partes del panel fotovoltaico .....	54
3.4.3	Modelado y curvas características del panel fotovoltaico.....	56
3.4.4	Descripción general de una instalación fotovoltaica .....	59
3.4.5	Módulo fotovoltaico adquirido .....	62
<b>3.5</b>	<b>Sistema de generación híbrida solar-eólica .....</b>	<b>63</b>
3.5.1	Descripción general de una instalación híbrida .....	63
<b>3.6</b>	<b>Sistema de interconexión.....</b>	<b>65</b>



3.6.1	Inversor .....	65
3.6.2	Regulador de carga.....	66
<b>3.7</b>	<b>Sistema de almacenamiento .....</b>	<b>68</b>
3.7.1	Parámetros eléctricos del sistema de almacenamiento .....	69
3.7.2	Sistema acumulador adquirido .....	69
<b>3.8</b>	<b>Sistema de caracterización .....</b>	<b>70</b>
3.8.1	Circuito de potencia .....	71
3.8.2	Acondicionamiento de la señal e implementación .....	74
3.8.3	Sistema de control.....	76
3.8.4	Componentes electrónicos empleados en el sistema de caracterización .....	81
<b>3.9</b>	<b>Diseño prototipado electrónico .....</b>	<b>81</b>
<b>3.10</b>	<b>Implementación del prototipo.....</b>	<b>82</b>
<b>3.11</b>	<b>Interfaz de usuario.....</b>	<b>84</b>
3.11.1	Configuración puerto serial.....	85
3.11.2	Selección y almacenamiento de datos.....	86
3.11.3	Tratamiento de los datos del sistema de caracterización.....	88
3.11.4	Graficado de curvas y obtención de parámetros .....	88
<b>4</b>	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>	<b>89</b>
<b>4.1</b>	<b>Instrucciones de conexionado .....</b>	<b>89</b>
4.1.1	Conexión de los módulos fotovoltaicos .....	89
4.1.2	Conexión de los equipos según sistema.....	90
<b>4.2</b>	<b>Interfaz gráfica.....</b>	<b>92</b>
4.2.1	Funcionamiento de la aplicación.....	92
4.2.2	Generación de archivos de datos.....	95
<b>4.3</b>	<b>Sistema de generación .....</b>	<b>96</b>
4.3.1	Información obtenida del regulador .....	96
4.3.2	Modos de funcionamiento del sistema de generación.....	97
4.3.3	Pruebas experimentales sistema de generación.....	100
<b>4.4</b>	<b>Sistema de caracterización .....</b>	<b>104</b>
4.4.1	Circuito de potencia .....	105
4.4.2	Sistema de adquisición de datos.....	105
4.4.3	Parámetros que afectan la producción de energía – simulación.....	105
4.4.4	Pruebas experimentales en exteriores.....	111

4.4.5	Pruebas experimentales en interiores .....	122
<b>4.5</b>	<b>Características del prototipo de GD .....</b>	<b>129</b>
4.5.1	Datos técnicos .....	129
4.5.2	Prácticas realizables .....	129
5	Conclusiones y trabajos futuros .....	131
<b>5.1</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>131</b>
<b>5.2</b>	<b>Trabajos futuros .....</b>	<b>133</b>
6	Presupuesto .....	135
<b>6.1</b>	<b>Coste del diseño hardware y software .....</b>	<b>136</b>
<b>6.2</b>	<b>Coste del personal .....</b>	<b>137</b>
<b>6.3</b>	<b>Presupuesto total .....</b>	<b>137</b>
	Bibliografía .....	138

# Lista de figuras

Figura 2.1. Esquema de un sistema de generación distribuida. ....	24
Figura 2.2. Esquema típico de una planta de cogeneración [8]. ....	26
Figura 2.3. Esquema de un motor de combustión interna [23]. ....	26
Figura 2.4. Turbina de gas [24]. ....	27
Figura 2.5. Microturbina Hidráulica [25]. ....	28
Figura 2.6. Turbina eólica, vista interior [26]. ....	28
Figura 2.7. Esquema básico de instalación solar térmica [27]. ....	29
Figura 2.8. Esquema básico de conexión de una instalación fotovoltaica aislada [28]. ....	30
Figura 2.9. Vertedero de basura [29]. ....	30
Figura 2.10. Microturbina [31]. ....	32
Figura 2.11. Esquema pila de combustible tipo PEM [32]. ....	33
Figura 2.12. Partes de una pila de combustible [32]. ....	33
Figura 2.13. Tecnologías para la generación de energía marina [33]. ....	34
Figura 2.14. Esquema de funcionamiento de una central de bombeo [37]. ....	36
Figura 2.15. Esquema de batería electroquímica [21]. ....	37
Figura 2.16. Esquema de funcionamiento de un sistema de almacenamiento de aire comprimido [39]. ....	38
Figura 2.17. Sistema de almacenamiento con volante de inercia [40]. ....	38
Figura 2.18. Supercondensadores comerciales (Maxwell Technologies) [8]. ....	39
Figura 2.19. Esquema de funcionamiento de sistema térmico [38]. ....	40
Figura 2.20. Esquema de aprovechamiento del hidrógeno [43]. ....	40
Figura 2.21. Esquema de conexión de un sistema de generación distribuida [44]. ....	42
Figura 2.22. Esquema del sistema eléctrico con generación distribuido [45]. ....	43
Figura 3.1. Diagrama básico de un sistema de generación distribuida. ....	45
Figura 3.2. Diagrama de bloques general del prototipo de GD diseñado. ....	46
Figura 3.3. Topología de una turbina eólica [46]. ....	47
Figura 3.4. Partes de una turbina eólica (izquierda: [47], derecha: [48]) ....	47
Figura 3.5. Modelos de turbinas eólicas verticales. a) Sanovius, b) Darrieus y c) H- Darrieus. [49].	49
Figura 3.6. Modelos de aerogeneradores horizontales, a sotavento y a barlovento [50]. ....	50
Figura 3.7. Modelado del aprovechamiento energético de una turbina ....	50
Figura 3.8. Características de una curva de potencia típica de una turbina eólica [51]. ....	51
Figura 3.9. Curva de potencia de un aerogenerador AW 70-1500 Clase I [52]. ....	52
Figura 3.10. Clasificación y componentes de una instalación eólica. ....	53
Figura 3.11. Esquema general de sistema eólico distribuido. ....	54
Figura 3.12. Componentes de los paneles fotovoltaicos [53]. ....	55
Figura 3.13. Curva características, con sus principales parámetros [54]. ....	56
Figura 3.14. Curvas I-V para distintos valores de irradiancia [55]. ....	57
Figura 3.15. Curva I-V para distintas temperaturas [55]. ....	58
Figura 3.16. Representación eléctrica de una celda solar [56]. ....	58
Figura 3.17. Física de la células solares [53]. ....	59
Figura 3.18. Clasificación y componentes de una instalación fotovoltaica. ....	60
Figura 3.19. Esquema básico de conexión de una instalación fotovoltaica aislada. ....	61

Figura 3.20. Representación de una central fotovoltaica. ....	61
Figura 3.21. Sistema fotovoltaico conectado a la red con autoconsumo. ....	62
Figura 3.22. Módulo fotovoltaico Victron 30W-12V (Victron). ....	62
Figura 3.23. Clasificación y componentes de una instalación híbrida eólico - fotovoltaica. ....	64
Figura 3.24. Esquema general de una instalación híbrida eólico-fotovoltaica. ....	64
Figura 3.25. Regulador MPPT 75 10 Victron (Victron) ....	68
Figura 3.26. Proceso de funcionamiento de las baterías. ....	69
Figura 3.27. Batería AGM Super Cycle 12V - Victron Energy. ....	70
Figura 3.28. Diagrama de bloques del sistema de caracterización. ....	71
Figura 3.29. Esquema circuito de potencia – simulación. ....	73
Figura 3.30. Simulación de curvas características, 2 paneles conectados en serie, carga capacitiva de 2.2mF. ....	73
Figura 3.31. Esquema circuito de potencia implementado. ....	74
Figura 3.32. Esquema de un divisor de tensión y ecuación característica. ....	75
Figura 3.33. Divisores de tensión: izquierda módulos FV, derecha sensor de corriente. ....	75
Figura 3.34. Acondicionamiento del voltaje y corriente de panel fotovoltaico. ....	76
Figura 3.35. Acondicionamiento del sensor de temperatura NTC. ....	76
Figura 3.36. Representación gráfica de configuración del microcontrolador. ....	78
Figura 3.37. Algoritmo de operación del sistema de control. ....	79
Figura 3.38. Circuito de control y de adquisición de datos. ....	80
Figura 3.39. Esquema electrónico del circuito de caracterización. ....	82
Figura 3.40. Prototipo del sistema de generación y gestión de energía. ....	83
Figura 3.41. Montaje - prototipo del sistema de caracterización. ....	83
Figura 3.42. Prototipo electrónico del sistema de caracterización. ....	84
Figura 3.43. Izquierda: Interfaz VE.Direct a USB. Derecha: módulo TTL a USB. ....	84
Figura 3.44. Proceso de funcionamiento de la interfaz del sistema de generación. ....	85
Figura 3.45. Proceso de funcionamiento de la interfaz del sistema de caracterización. ....	85
Figura 3.46. Bloques para la configuración de comunicación serial, y escritura y/o lectura de datos. ....	86
Figura 3.47. Selección de datos y almacenado en arreglo. ....	87
Figura 3.48. Selección de datos del sistema de caracterización y almacenado en arreglos. ....	87
Figura 3.49. Conversión valores de datos del ADC a magnitudes físicas. ....	88
Figura 3.50. Obtención de curvas y parámetros característicos de los módulos solares. ....	88
Figura 4.1. Conexión del sistema de generación distribuida (tomado y editado de [65]). ....	91
Figura 4.2. Conexión del sistema de caracterización. ....	92
Figura 4.3. Menú de opciones de la interfaz gráfica. ....	93
Figura 4.4. Interfaz para sistema de caracterización de un solo panel. ....	94
Figura 4.5. Interfaz para sistema de caracterización de múltiples paneles. ....	94
Figura 4.6. Interfaz del sistema de generación. ....	95
Figura 4.7. visualización de archivos generados. ....	96
Figura 4.8. Conexión sistema generación implementado. ....	98
Figura 4.9. Modo 0: detección automática de tensión de batería. ....	98
Figura 4.10. Modo 1: voltaje de control fotovoltaico. ....	98
Figura 4.11. Modo 2 y 3: Carga de batería con o sin MPPT. ....	99

Figura 4.12. Modo 4: seguimiento de máxima potencia con almacenamiento de energía. ....	99
Figura 4.13. Modo 5: seguimiento de máxima potencia con descarga de batería. ....	99
Figura 4.14. Modo 6: batería alimenta carga. ....	100
Figura 4.15. Modo 7: modo mppt sin batería. ....	100
Figura 4.16. Bloque de configuración de los parámetros de un arreglo fotovoltaico en MATLAB. ....	106
Figura 4.17. Curvas características de IV y PV para un panel de 30W en función de la temperatura. ....	107
Figura 4.18. Curvas características de IV y PV para un panel de 30W en función de la irradiancia. ....	107
Figura 4.19. Curvas características de IV y PV para un arreglo de dos paneles de 30W en paralelo en función de la temperatura. ....	108
Figura 4.20. Curvas características de IV y PV para un arreglo de dos paneles de 30W en paralelo en función de la irradiancia. ....	109
Figura 4.21. Curvas características de IV y PV para un arreglo de dos paneles de 30W en serie en función de la temperatura. ....	110
Figura 4.22. Curvas características de IV y PV para un arreglo de dos paneles de 30W en serie en función de la irradiancia. ....	110
Figura 4.23. Curva I-V para un solo panel en posición de máxima irradiancia. ....	112
Figura 4.24. Curva P-V para un solo panel en posición de máxima irradiancia. ....	112
Figura 4.25. Curvas I-V: influencia de la sombra en un solo panel. ....	113
Figura 4.26. Curvas P-V: influencia de la sombra en un solo panel. ....	113
Figura 4.27. Curvas I-V: un solo panel a diferentes ángulos de inclinación. ....	114
Figura 4.28. Curvas P-V: un solo panel a diferentes ángulos de inclinación. ....	114
Figura 4.29. Curva I-V paneles en serie, posición de máxima irradiancia. ....	115
Figura 4.30. Curva P-V paneles en serie, posición de máxima irradiancia. ....	115
Figura 4.31. Curvas I-V paneles en serie, comparación paneles con sombra y despejado. ....	116
Figura 4.32. Curvas P-V paneles en serie, comparación paneles con sombra y despejado. ....	116
Figura 4.33. Curvas I-V paneles en serie, influencia de la sombra. ....	117
Figura 4.34. Curvas P-V paneles en serie, influencia de la sombra. ....	117
Figura 4.35. Curvas I-V: paneles en serie a diferentes ángulos de inclinación. ....	118
Figura 4.36. Curvas P-V: paneles en serie a diferentes ángulos de inclinación. ....	118
Figura 4.37. Curva I-V paneles en paralelo, posición de máxima irradiancia. ....	119
Figura 4.38. Curva P-V paneles en paralelo, posición de máxima irradiancia. ....	120
Figura 4.39. Curvas I-V paneles en paralelo, comparación paneles con sombra y despejado. ....	120
Figura 4.40. Curvas P-V paneles en paralelo, comparación paneles con sombra y despejado. ....	121
Figura 4.41. Curvas I-V: paneles en paralelo a diferentes ángulos de inclinación. ....	121
Figura 4.42. Curvas P-V: paneles en paralelo a diferentes ángulos de inclinación. ....	122
Figura 4.43. Curvas I-V: un solo panel de 30W a diferentes distancias de la fuente de luz. ....	123
Figura 4.44. Curvas P-V: un solo panel de 30W a diferentes distancias de la fuente de luz. ....	123
Figura 4.45. Curvas I-V: un solo panel de 30W, influencia de la temperatura. ....	124
Figura 4.46. Curvas P-V: un solo panel de 30W, influencia de la temperatura. ....	124
Figura 4.47. Curvas I-V: un solo panel de 40W a diferentes distancias de la fuente de luz. ....	125
Figura 4.48. Curvas P-V: un solo panel de 40W a diferentes distancias de la fuente de luz. ....	125
Figura 4.49. Curvas I-V: un solo panel de 40W, influencia de la temperatura. ....	126

Figura 4.50. Curvas P-V: un solo panel de 40W, influencia de la temperatura. ....	126
Figura 4.51. Curvas I-V: paneles en serie a diferentes distancias de la fuente de luz. ....	127
Figura 4.52. Curvas P-V: paneles en serie a diferentes distancias de la fuente de luz. ....	127
Figura 4.53. Curvas I-V: paneles en paralelo a diferentes distancias de la fuente de luz. ....	128
Figura 4.54. Curvas P-V: paneles en serie a diferentes distancias de la fuente de luz. ....	128

# Lista de tablas

Tabla 3.1. Especificaciones del módulo solar [57].	63
Tabla 3.2. Características eléctricas del regulador fotovoltaico	67
Tabla 3.3. Características del acumulador.	70
Tabla 3.4. Valores de tensión de entrada y salida de los sensores.	75
Tabla 3.5. Configuración de pines y periféricos de la tarjeta STM32F411.	78
Tabla 3.6. Componentes electrónicos del sistema de caracterización.	81
Tabla 3.7. Configuración del puerto serie para el regulador MPPT y la tarjeta STM32F411.	85
Tabla 3.8. Identificadores de los parámetros transmitidos.	86
Tabla 4.1. Conexión de los módulos fotovoltaicos.	89
Tabla 4.2. Datos obtenidos del regulador.	97
Tabla 4.3. Modos de operación con módulos fotovoltaicos desconectados.	101
Tabla 4.4. Resultados para el sistema de generación de un solo panel.	101
Tabla 4.5. Resultados para el sistema de generación de paneles en serie.	102
Tabla 4.6. Resultados para el sistema de generación de paneles en paralelo.	104
Tabla 4.7. Parámetros característicos experimentales: panel aislado en posición de máxima irradiancia.	112
Tabla 4.8. Parámetros característicos experimentales: panel aislado bajo sombra.	113
Tabla 4.9. Parámetros característicos experimentales: panel aislado a diferentes ángulos de inclinación	114
Tabla 4.10. Parámetros característicos experimentales: paneles en serie, posición de máxima irradiancia.	116
Tabla 4.11. Parámetros característicos experimentales: paneles en serie, comparación respuesta de panel bajo sombra y despejado	117
Tabla 4.12. Parámetros característicos experimentales: paneles en serie a diferentes ángulos de inclinación	118
Tabla 4.13. Parámetros característicos experimentales: panel aislado en posición de máxima irradiancia.	120
Tabla 4.14. Parámetros característicos experimentales: paneles en paralelo, comparación respuesta de panel bajo sombra y despejado.	121
Tabla 4.15. Parámetros característicos experimentales: paneles en paralelo a diferentes ángulos de inclinación.	122
Tabla 4.16. Parámetros característicos experimentales: panel aislado de 30W a diferentes distancias de la fuente de luz.	124
Tabla 4.17. Parámetros característicos experimentales: panel aislado de 30W, influencia de la temperatura.	125
Tabla 4.18. Parámetros característicos experimentales: panel aislado de 40W a diferentes distancias de la fuente de luz.	126
Tabla 4.19. Parámetros característicos experimentales: panel aislado de 40W, influencia de la temperatura.	127
Tabla 4.20. Parámetros característicos experimentales: paneles de 30W en serie a diferentes distancias de la fuente de luz.	128

Tabla 4.21. Parámetros característicos experimentales: paneles de 30W en paralelo a diferentes distancias de la fuente de luz. ....	129
Tabla 6.1. Coste de los materiales para el diseño hardware y software. ....	136
Tabla 6.2. Coste del personal. ....	137
Tabla 6.3. Coste total del trabajo. ....	137



# Glosario de términos

<b>Abreviatura</b>	<b>Significado</b>
A	Amperios
AC	Corriente Alterna
ACS	Agua Caliente Sanitaria
ADC	Analog-to-Digital Converter
AFC	Alcaline Fuel Cell
AGM	Absorbet Glass Mat
Ah	Amperio hora
CAES	Compressed Air Energy Storage
CECRE	Centro de Control de Energías Renovables
CH4	Metano
CIGRE	Consejo Internacional sobre Grandes sistemas Eléctricos
CO	Monóxido de carbono
CO2	Dioxido de carbono
CP	Coefficiente de potencia
DC	Corriente Directa
DMA	Acceso directo a memoria
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
DOD	Profundidad de descarga
EC	Energía Cinética
FV	Fotovoltaica
GD	Generación Distribuida
GW	GigaWatts
H	Hidrógeno
HMI	Human-Machine Interface
IEA	International Energy Agency
IL	Radiacion solar
I <sub>pmax</sub>	Maximum power current
I <sub>sc</sub>	Corriente de cortocircuito
KW	Kilowatts
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Seguimiento del Punto de Máxima Potencia
MW	Megavatios
NTC	Negative Temperature Coefficient
°C	Grados Célsius
OPC	Columna de agua oscilante
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
PEMFC	Proton-Exchange Membrane Fuel Cells

RPM	Revoluciones por Minuto
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SMES	Almacenamiento de energía en Superconductores Magnéticos
SOC	Estado de carga
SOFC	solid oxide fuel cell
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
USART	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver-Transmitter
V	Voltios
VOC	Voltaje de circuito abierto
Vpmax	Maximum Power Voltage
VRLA	Baterías de Válvula de Control cerrada
W	Watts

# 1 Introducción

En las últimas décadas se ha formulado el plan de generación de energía centralizada y la generación distribuida se ha ido introduciendo gradualmente a través de la generación de energía renovable y cogeneración, cerca del punto o en la misma instalación de consumo.

La generación distribuida es un modelo de distribución alternativo que, consiste en la producción de energía eléctrica mediante muchas pequeñas fuentes de generación situadas cerca del consumidor. La generación distribuida junto con el sistema de generación centralizada convencional forma un complemento que será la base para futuros desarrollos eléctricos [1]–[4].

Encaminado en el uso de energías renovables el concepto de microrred cobra sentido; sistema de generación eléctrica bidireccional, que permite la distribución de la electricidad desde los proveedores hasta los consumidores. Estos sistemas integran fuentes de energía distribuida, diferentes tipos de cargas y sistemas de almacenamiento energético, todo ello interconectado entre sí [1]–[4].

El uso de fuentes de generación distribuida presenta grandes ventajas como: alta eficiencia energética; al estar las fuentes cercas del consumidor las pérdidas de energía en el transporte se ven notablemente reducidas, por otro lado, favorece la generación sostenible ya que las principales instalaciones de generación aprovechan las fuentes renovables y reducen el impacto ambiental [4].

Con el fin de fomentar la investigación en el campo de la gestión inteligente de energía y conocer un poco más sobre las diferentes fuentes y sistemas de almacenamiento de energía, en este trabajo fin de máster se diseñará, implementará y verificará un prototipo a pequeña escala de un sistema de generación distribuida.

## 1.1 Motivación

En la actualidad, la energía eléctrica representa la forma de energía más útil y, por su amplia gama de usos, ha aparecido en todos los ámbitos de la sociedad, donde la generación, transmisión y consumo de energía eléctrica son los requisitos básicos del avance y desarrollo social y económico.

Debido a la necesidad de satisfacer de un modo sostenible y eficiente la progresiva demanda de energía, la generación distribuida ha sido estudiada durante largo tiempo con el fin de encontrar métodos para la integración de los distintos tipos de fuentes de energía renovables y sistemas de gestión inteligentes, permitiendo que los recursos energéticos fundamentales sean aprovechados de manera controlada y eficiente [1]–[6].

En su estado actual, la generación centralizada es la forma más común de producción de energía eléctrica. Su producción se basa principalmente en tecnologías que emplean combustibles fósiles, dando lugar así a la emisión de CO<sub>2</sub>. Por lo general las centrales eléctricas están alejadas de los lugares de consumo, lo que implica que se generen pérdidas de potencia en el transporte de la energía y un elevado coste en infraestructura [1]–[6].

El uso de un sistema de generación distribuida reduce las pérdidas en la red eléctrica. Al estar más cerca del consumidor, las redes de transporte son más cortas, lo cual contribuye al ahorro a la hora

de elevar la tensión para su transporte. De la misma manera, como hay pequeñas fuentes de generación (micro-generación) repartidas por el territorio, el fallo de una de las fuentes no supone un grave problema para el sistema eléctrico, por lo que mejora la fiabilidad, calidad y seguridad del sistema eléctrico. Además, potencia la generación sostenible debido a que las principales fuentes de los sistemas de distribución de energía son renovables. El desarrollo de las mismas permitirá una reducción de las emisiones nocivas, categorizándose como sistemas más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente [1]–[6].

En la generación distribuida el usuario mantiene su conexión a la red centralizada, que utiliza en momentos en los que no hay disponibilidad de generación debido a la intermitencia natural de las fuentes renovables. La energía generada puede ser utilizada para consumo propio (autoconsumo) o para ser vertida a red. La integración de un sistema de almacenamiento de electricidad reduce la dependencia de la red y permite gestionar el excedente de energía almacenándola para un posterior uso [1]–[6].

## 1.2 Objetivos

El campo de aplicación de este proyecto se sitúa en el diseño y planificación de sistema de generación distribuida con almacenamiento para aplicaciones en urbanizaciones o ciudades con gestión de energía inteligente, también como sistemas de laboratorio de aprendizaje didáctico.

El objetivo de este proyecto es el estudio de las diferentes fuentes de energía eléctrica y sus sistemas de almacenamiento, para la posterior implementación de un prototipo a pequeña escala de un sistema de generación distribuida con principal interés en el desarrollo sostenible. Con este sistema se logrará el intercambio de las diferentes fuentes de energía usadas y se garantizará la integración de la energía almacenada. Se tiene en cuenta que las fuentes renovables son indispensables para este tipo de desarrollo, y se pretende utilizar la energía eólica, solar y baterías para el almacenamiento de energía.

## 1.3 Organización de la memoria

En el presente documento se detallan los resultados de la puesta en marcha de este sistema y se ha estructurado a través de seis capítulos de la siguiente manera:

Capítulo 1. Introducción: aquí se hace la presentación de forma general del proyecto.

Capítulo 2. Sistema de generación distribuida: en este se realiza una revisión bibliográfica de las diferentes fuentes de energía, sistemas de almacenamiento y equipos utilizados en la generación distribuida.

Capítulo 3. Diseño e implementación del prototipo a escala de un sistema de generación distribuida con almacenamiento: Se hace el planteamiento teórico de las condiciones del diseño, descripción detallada de los sistemas implementados y equipos utilizados.

Capítulo 4. Resultados y análisis: en este capítulo se hace una explicación del funcionamiento del sistema desarrollado y se presentan los resultados obtenidos de las distintas pruebas experimentales a las que fue sometido para la comprobación de su funcionamiento.

Capítulo 5. Conclusiones y trabajo futuro: aquí se exponen las observaciones finales del trabajo realizado y se proponen futuros estudios que servirán de complemento al sistema desarrollado.

Capítulo 6. Presupuesto: por último, en este capítulo se realiza el desglose del coste de este trabajo.

## 2 Sistema de Generación Distribuida

En este capítulo se expone los fundamentos teóricos de la generación distribuida; qué elementos conforman un sistema de generación distribuida, las principales fuentes usadas como suministro de energía y las tecnologías más usadas en el almacenamiento de la energía producida.

### 2.1 Estado de la Generación distribuida

En los últimos años, debido al desarrollo de los sistemas eléctricos convencionales, ha surgido el concepto de generación distribuida (GD), simbolizando un cambio en el modelo de la energía eléctrica centralizada. Aunque puede considerarse un concepto nuevo, la realidad es que se originó, en cierta medida, en los inicios mismos de la generación de eléctrica [6], [7].

En sus inicios, la industria eléctrica estaba condicionada a producirse cerca de los puntos de consumo, debido a que los primeros sistemas de generación operaban con corriente continua, por lo que el transporte de la energía a largas distancias era limitado. Los dispositivos de almacenamiento como las baterías se utilizan para lograr un cierto equilibrio entre la producción y la demanda de energía eléctrica [7].

La llegada de la corriente alterna permitió transportar la energía eléctrica en alta tensión prácticamente a cualquier punto alejado del centro de generación, este escenario provocó la evolución de los sistemas eléctricos compuestos por grandes centrales eléctricas y grandes redes de transmisión y distribución, con el fin de reducir los costos de producción y distribución. Estos sistemas estaban dotados con mecanismos de control, seguridad y protección para garantizar el uso racional de los recursos de generación de energía y la calidad de los servicios de acuerdo con las necesidades del usuario. La interrupción de suministro de una central era compensada mediante la interconexión de otra central al sistema haciendo posible la economía de escala en la producción de energía eléctrica [7], [8].

Sin embargo, en los últimos noventa años, esta imparable tendencia de crecimiento de la capacidad de generación de energía de las centrales no se ha mantenido constante, sino que se ha visto afectada por debates técnicos o políticos [9]. En los años 70 la crisis del petróleo y el impacto ambiental provocaron la aparición de nuevos problemas, que tuvieron un impacto decisivo en el desarrollo de la industria energética, provocaron la demanda de alternativas tecnológicas. En los últimos 20 años, la innovación tecnológica, el aumento de los costos de transporte y distribución, la economía cambiante, la atención al cambio climático y la emisión de reglamentos han despertado un nuevo interés en la generación distribuida [6], [8].

Poco a poco, la generación distribuida comenzó a integrarse en una red de menor tensión a la de transmisión. Esta alternativa tecnológica, consiste en generar la electricidad lo más cerca posible del punto de consumo, como en los orígenes de la industria energética, ahora combina las ventajas de la tecnología moderna y el respaldo de la red de sistema eléctrico. Este tipo de generación también es denominada Generación In-Situ, Generación Dispersa. Asimismo, esta tecnología ha

permitido que los consumidores produzcan su propia energía eléctrica para su consumo parcial o total [6], [8].

## 2.2 Definición de Generación Distribuida

No hay una definición exacta, ni consensuada sobre lo que es la generación distribuida, aunque en la literatura las definiciones tienen cierta similitud, difieren en algunos aspectos: tecnologías empleadas, límite de potencia, conexión a red [6]–[10]. Pero está claro que la generación debe ser aquella que está más cerca del consumidor, asumiendo el rol de “prosumidor” (productor-consumidor), quien estará conectado a la red de baja o media tensión e incluso a la red de transporte [8].

A continuación, se exponen algunas de las definiciones que se encuentran en la bibliografía consultada:

**International Energy Agency (IEA)**, define la Generación Distribuida como la producción de energía en las instalaciones de los consumidores, o bien en las instalaciones de la empresa distribuidora, brindando soporte a la red de distribución en baja tensión. Asimismo, se asocia a tecnologías como motores, mini- y micro-turbinas, pilas de combustible y energía solar fotovoltaica. En general, excluye la energía eólica, ya que esta se produce principalmente en parques eólicos en lugar de los puntos de consumo [11].

**El Consejo Internacional sobre Grandes Sistemas Eléctricos (CIGRE)**, define la generación distribuida como todos los generadores con una capacidad máxima entre 50 MW a 100 MW, conectados al sistema eléctrico de distribución, y que no están diseñados ni despachados de forma centralizada [12]. Esto último significa que la GD no forma parte del control del operador de la red de transmisión por tanto, los generadores instalados por las empresas eléctricas y despachados por los operadores de la red de transporte no se considera generación distribuida [8].

**El Congreso y Exposición Internacional sobre Distribución de Energía Eléctrica (CIRED)**, define la generación distribuida en función del nivel de tensión. Establece que la GD está conectada a un circuito que suministra directamente la energía requerida por el cliente. Del mismo modo, la generación distribuida tiene algunas características básicas, como el uso de energía renovable y la cogeneración [13].

**Willis y Scott**, definen la GD como los pequeños generadores con potencias comprendidas generalmente entre 15 kW y 10 MW, conectados a la red de distribución para proporcionar la energía que demandan los consumidores. También usan el concepto de Generación Dispersa para representar a los generadores más pequeños, de entre 10 y 250 kW, normalmente situados en las instalaciones de consumo y aislados de la red de distribución [14].

**Jenkins y col**, definen que la GD no se considera planificada, enviada o programada de forma centralizada, su potencia es inferior a 50 o 100 MW, y suele estar conectada a la red de distribución [7], [15].

**Dondi y col**, definen la GD como una fuente pequeña de generación o de almacenamiento de energía eléctrica (normalmente en un rango que oscila entre potencias inferiores a 1 kW hasta decenas de MW) que no forma parte de un sistema eléctrico centralizado y que está localizada cerca de la carga. Incluyen dentro de la definición las instalaciones de almacenamiento [7], [16].

**Ackermann y col**, propusieron la definición de GD en base a su propósito, la ubicación, la capacidad o tamaño de la instalación, el área de servicio, la tecnología de generación de energía, el impacto ambiental, el modo de operación, la propiedad y la permeabilidad de GD. Estos autores consideran que solo los dos primeros aspectos son relevantes y proponen la siguiente definición: “Generación Distribuida es una fuente de potencia eléctrica conectada directamente a la red de distribución o en las instalaciones de los consumidores”. La diferencia entre la red de distribución y la red de transporte depende de los requisitos legales de cada país [17].

En general, y teniendo en cuenta las exigencias regulatorias del sector eléctrico español, se puede decir que en España la generación distribuida incorpora las siguientes condiciones [8]:

- Baja potencia y ubicación cerca del punto de consumo.
- Conexión a la red de distribución.
- Por lo general, parte de esta generación se consumirá en la misma instalación, el resto será integrada a la red de distribución.
- No existe una planificación centralizada de dicha generación y no suele distribuirse centralizadamente.
- La potencia del grupo suele ser inferior a 50 MW.
- La generación distribuida no controlada se considera aquella de menor potencia o igual a 10 MW.

### 2.3 Arquitecturas de la Generación Distribuida

El sistema de generación distribuida está conformado básicamente por tres subsistemas (Figura 2.1) [18]:

- **Sistema de generación:** es el encargado de generar energía.
- **Sistema de almacenamiento:** permite acumular la energía producida.
- **Sistema de interconexión:** permite que los generadores distribuidos y los dispositivos de almacenamiento estén conectados físicamente al lugar de consumo y a la red eléctrica.



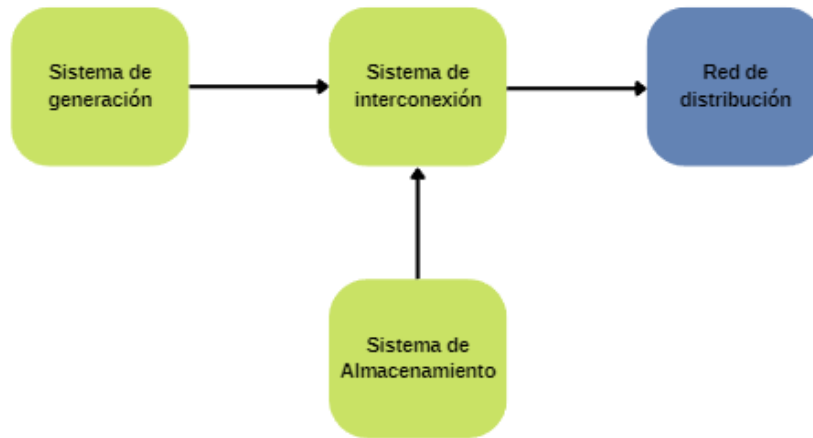


Figura 2.1. Esquema de un sistema de generación distribuida.

La aplicación de una u otra arquitectura en la GD depende de los requerimientos particulares del usuario. Los arreglos tecnológicos más habituales y sus funciones se describen a continuación [19], [20]:

**Carga base.** Se utiliza para generar energía eléctrica en forma continua; opera en conjunto con la red de distribución; puede tomar o vender parte de la energía, y usa la red para respaldo y mantenimiento.

**Carga en punta.** Se utiliza para proveer energía eléctrica en períodos pico, con lo que disminuye la demanda máxima del consumidor, ya que el costo de la energía en este período es el más alto.

**Generación aislada o remota.** Esta configuración se usa para generar energía eléctrica en el modo de autoabastecimiento, debido a que no es factible obtener energía a partir de la red eléctrica (sistema aislado o falta de capacidad del proveedor).

**Soporte a la red de distribución.** En ocasiones, por emergencias o periodicidad, por alta demanda específica o por fallas o fallas en la red, las empresas distribuidoras de energía necesitan fortalecer sus redes de distribución de energía instalando pequeñas plantas de emergencia.

## 2.4 Tecnologías para la generación distribuida.

Casi todas las tecnologías de energía renovable son adecuadas para la generación de energía distribuida en su estado de madurez, por lo que pueden proporcionar energía segura y de alta calidad. Además de los sistemas de generación de energía basados en energías renovables, también están las fuentes convencionales y las basadas en combustibles. Para la generación de energía eléctrica se hace uso, desde los motores térmicos alimentados a gasóleo o de gas natural, hasta las instalaciones fotovoltaicas, pasando por las termosolares tipo Stirling, la cogeneración, la biomasa, la eólica, la hidráulica y otras que se encuentran todavía en vía de desarrollo; así como la amplia gama que opera con la transferencia directa de calor. En general, todas las renovables son aptas para un sistema eléctrico de generación distribuida [8].

Cuando las actividades se concentran en el campo del autoconsumo de energía eléctrica, los recursos renovables existentes, la modularidad, la robustez y los costos de inversión y mantenimiento se convertirán en variables guías, orientando la selección de la tecnología más adecuada para la aplicación deseada.

La generación distribuida además de acercarse al consumo da lugar en algunos casos a que los usuarios sean prosumidores (consumidor y productor).

Puede verse en la literatura que la generación distribuida no tiene que hacer referencia a una tecnología de generación específica. Desde un punto de vista técnico y constructivo, existen diferentes tipos de tecnologías. La técnica de generación de energía distribuida se puede dividir en las de generación y las de almacenamiento. a su vez, en convencionales y no convencionales.

A continuación, se muestran diferentes tipos de tecnologías de generación que existen en la actualidad, ordenadas de mayor a menor teniendo en cuenta su madurez y grado de penetración en el mercado. Algunas de las tecnologías son usadas especialmente para la generación de electricidad a gran escala, su uso a pequeña escala puede ser también una solución GD factible.

### **Tecnologías de GD**

- Cogeneración
- Motor alternativo
- Turbina de gas
- Minihidráulica
- Eólica
- Solar térmica
- Fotovoltaica
- Residuos
- Biomasa
- Microturbina
- Pila de combustible
- Marina
- Geotérmica

#### **2.4.1 Cogeneración**

Esta tecnología produce en forma secuencial, a partir de un único combustible, energía eléctrica y térmica (Figura 2.2), donde esta última es útil a los procesos productivos en forma de un fluido caliente (vapor, agua, gases). Esta generación simultánea de calor y electricidad permite obtener eficiencias globales de más del 80%. Sus capacidades son muy amplias, debido al hecho de que utiliza todas las tecnologías que abarca la GD [21], [22].

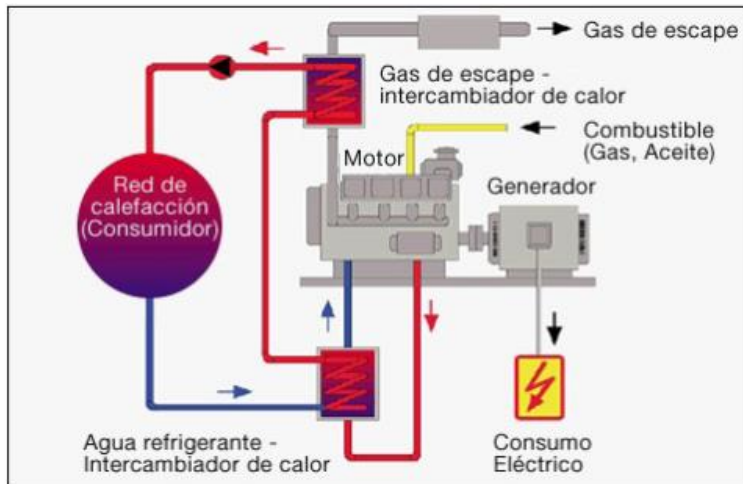


Figura 2.2. Esquema típico de una planta de cogeneración [8].

#### 2.4.2 Motor alternativo

Los motores de combustión interna (Figura 2.3) son motores térmicos, accionados por el empuje de un pistón en el interior de un cilindro, derivado del proceso de combustión, el empuje generado hace girar un cigüeñal y a través de un generador eléctrico esta energía potencial es transformada en energía eléctrica. Este tipo de motores son ampliamente utilizados para las plantas de emergencia. Pueden usar como combustible diesel, gasóleo o gas natural; existen en capacidades de 15 KW. a mayores de 20,000 KW; alcanzan eficiencias eléctricas del orden del 40% y eficiencias térmicas cercanas al 33%; su temperatura de gases de combustión es de 400°C; tienen un bajo costo de inversión, una vida útil de 25 años, alta eficiencia a baja carga, consumo medio de agua, poco espacio para instalación, flexibilidad de combustibles y su crecimiento puede ser modular [9], [21].

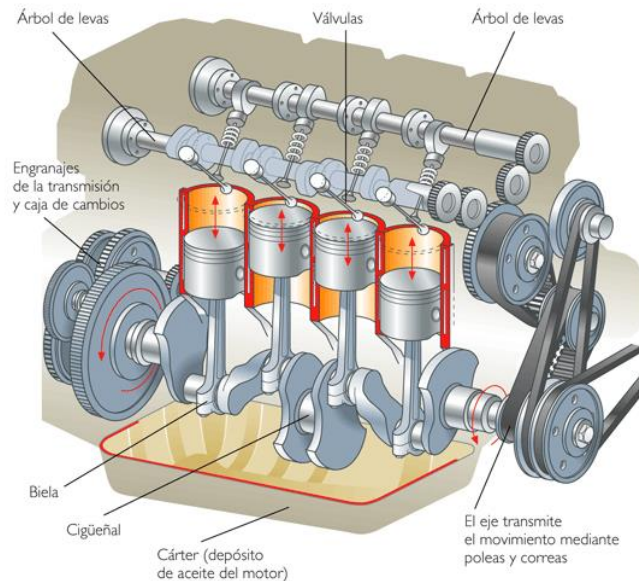


Figura 2.3. Esquema de un motor de combustión interna [23].

### 2.4.3 Turbina de gas

La turbina de gas (ver Figura 2.4) fue desarrollada originalmente para motores a reacción. Es un motor térmico rotativo con baja relación potencia-peso y alta velocidad. Realiza trabajos de expansión de gas, que puede ser gas natural, diésel, metano, etc. Ahora, las turbinas de gas de diferentes tamaños se han utilizado ampliamente en la industria energética. El tamaño de las turbinas varía entre 0.25-500 MW y en algunas aplicaciones comerciales entre 1 y 2 MW, en un ciclo simple, su eficiencia es de alrededor del 40%. Entre el 40-60%, en el ciclo combinado; en la combinación de calor y electricidad representaron el 70-90%. Son especialmente útiles cuando se requiere que la temperatura del vapor sea más alta que la de un motor alternativo. El costo de mantenimiento es ligeramente más bajo que el de un motor alternativo, pero también lo es la eficiencia de conversión eléctrica [8], [9], [11].

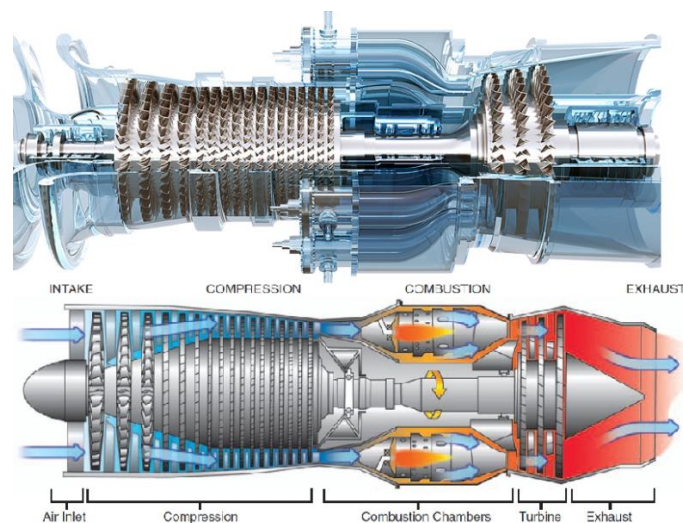


Figura 2.4. Turbina de gas [24].

### 2.4.4 Minihidráulica

Una pequeña central hidráulica consiste en una turbina conectada a un generador que convierte la energía cinética y potencial de un fluido (generalmente agua) en energía eléctrica (ver Figura 2.5). El caudal del agua es alterado mediante canales y tipos de estructuras que conducen el fluido hacia el generador. El rendimiento energético de esta tecnología ronda un 80%. Sus beneficios son una baja contaminación ambiental, un mantenimiento mínimo y su rendimiento es superior al de otras tecnologías de generación de energía distribuida [10], [21].

En este tipo de generación de energía, solo se consideran GD las denominadas microcentrales hidroeléctricas, es decir, aquellas centrales con una potencia máxima instalada no mayor a 10 MW, y la potencia instalada se define como el producto del caudal por el salto. El caudal puede variar entre 0,4 y 200 m<sup>3</sup>/s, la altura puede estar entre 3 y 250 m, y se utiliza la turbina más adecuada en cada caso. Las turbinas más usadas son 3: Pelton, Francis y Kaplan. Asimismo, entre la toma de agua y el punto en el que se restituye de nuevo al cauce no suele haber más de un kilómetro [9].

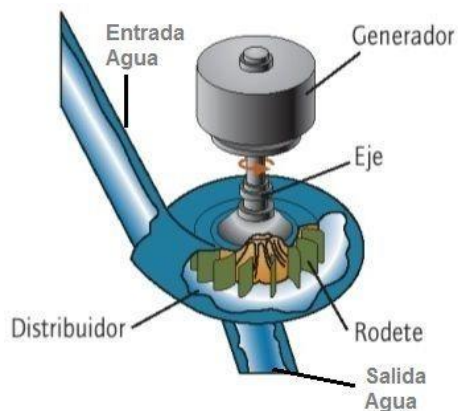


Figura 2.5. Microturbina Hidráulica [25].

### 2.4.5 Eólica

Esta tecnología de generación transforma la energía cinética del viento en energía potencial al hacer girar las palas del aerogenerador, a su vez, es transformada en energía eléctrica a través de un generador. La potencia de estos equipos se sitúa, en la actualidad, en rangos que van desde unos 30 kW hasta más de 5 MW. Es una tecnología bastante madura que alcanza índices de fiabilidad cercanos al 97%. Normalmente, la generación eólica se considera centralizada al estar aleja del punto de consumo y en forma de grandes parques eólicos. Existen desarrollos específicos para generación distribuida, llamados energía minieólica, que abarcan rangos desde poco más de 1 kW [9], [21]. En la Figura 2.6 se puede observar el esquema interno de una turbina eólica.

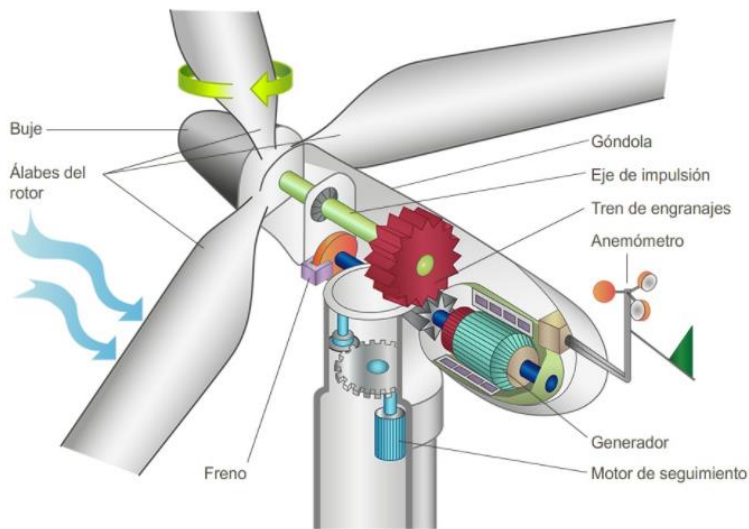


Figura 2.6. Turbina eólica, vista interior [26].

### 2.4.6 Solar térmica

La energía solar térmica se basa en la transformación de la energía procedente de la radiación solar en calor transferido a un fluido (normalmente agua). Se trata de dos circuitos cerrados con intercambiadores de calor, en el circuito principal, el fluido caloportador frío atraviesa los paneles solares, la radiación solar lo calienta y entra en el intercambiador de calor, donde la energía térmica

se transfiere al circuito secundario (Figura 2.7). En el caso de pequeñas instalaciones, no se produce electricidad de forma directa, aprovechándose la energía en su forma térmica.

Existen tres tipos de energía solar térmica, en función de la temperatura máxima alcanzada por el fluido: las plantas de **alta temperatura** se utilizan para generar electricidad (discos parabólicos y centrales de torre). Trabajan con temperaturas por encima de los 500 °C (773 kelvin). Las plantas de **media temperatura** (espejo cilindro-parabólico) trabajan con temperaturas entre los 100 y 300 grados Celsius. Las instalaciones de **baja temperatura** (captadores planos y captadores con tubo de vacío), se utilizan habitualmente en viviendas; calefacción, climatización de piscinas, agua caliente sanitaria, entre otras. Trabajan con temperaturas menores a 100 grados Celsius [9], [18].

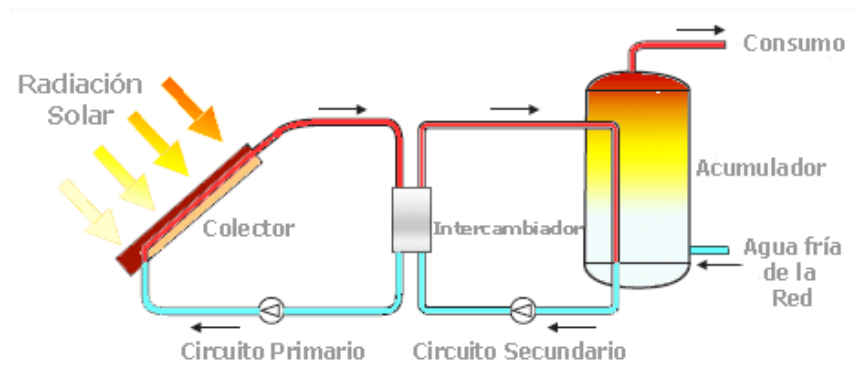


Figura 2.7. Esquema básico de instalación solar térmica [27].

#### 2.4.7 Fotovoltaica (FV)

La energía fotovoltaica utiliza la radiación solar para generar electricidad. Se basa en la absorción de la radiación solar por los materiales semiconductores que componen las llamadas células fotovoltaicas, lo que provoca el desplazamiento de cargas internas y la generación de corriente continua. Su eficiencia depende del material semiconductor utilizado en su fabricación, alcanzando un rendimiento entre un 12 y un 25 % [9].

El sistema de generación de energía fotovoltaica se puede dividir en tres modos de operación: **aislado**: se utiliza en lugares donde no se puede acceder a la red de distribución de energía y donde se requieren baterías y reguladores de carga. **Híbrido**: donde el panel fotovoltaico está conectado en paralelo con otra fuente de energía (como un motor diésel o un generador eólico). **Paralelo a la red**: el consumo se alimenta o de los paneles fotovoltaicos o de la red, conmutando mediante un inversor. La ventaja de esta solución es que no requiere batería ni regulador de carga, lo que reduce las pérdidas y la inversión requerida [10]. En la Figura 2.8 se muestra una representación de un sistema fotovoltaico aislado.

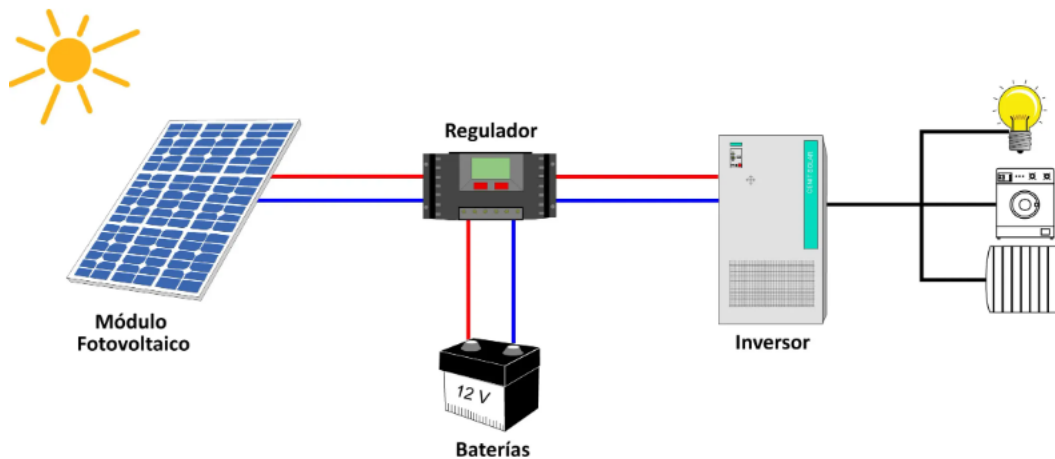


Figura 2.8. Esquema básico de conexión de una instalación fotovoltaica aislada [28].

Las ventajas de los sistemas fotovoltaicos incluyen un funcionamiento libre de emisiones, sin consumo de combustibles fósiles, baja temperatura de la cogeneración (utilizando módulos integrados en el edificio), excelente modularidad, mantenimiento mínimo (excepto en los casos de baterías) y alta efectividad. La desventaja de utilizar células fotovoltaicas es el alto coste de la energía entregada ya que supera el precio de otras tecnologías de generación de energía distribuida. Para la conversión de energía, generalmente se requieren baterías y otros equipos [21].

#### 2.4.8 Residuos

La gestión de residuos es el proceso realizado desde que se generan hasta la fase de su tratamiento. Es la recolección, transporte, procesamiento, tratamiento, reciclaje o disposición de material de desecho, generalmente producida por la actividad humana. La gestión de residuos puede involucrar a sustancias sólidas (Figura 2.9), líquidas o gaseosas con diferentes métodos de tratamiento para cada uno [9].



Figura 2.9. Vertedero de basura [29].

Hay diversos procedimientos para la eliminación o disposición final de los residuos sólidos urbanos que, con distinto grado de desarrollo tecnológico, permiten, unos la obtención de energía (digestión anaeróbica, incineración, gasificación o pirolisis y valorización energética del gas obtenido, etc.), y

otros contribuir de manera directa a ahorros energéticos o a la conservación de los recursos (reciclaje y compostaje) [9].

#### 2.4.9 Biomasa

Se entiende por biomasa toda materia orgánica que se pueda utilizar como energía. La fuente de energía de la biomasa puede ser animal o vegetal, se puede obtener de forma natural o se puede transformar artificialmente en plantas de biomasa. La sustancia se convierte en energía mediante procesos químicos, gracias a que la materia orgánica está constituida fundamentalmente por carbono e hidrógeno.

La biomasa se puede dividir en tres categorías: **natural**. Es la que se produce en la naturaleza sin la intervención humana. **Residual**, son residuos orgánicos de la actividad humana (como los residuos sólidos urbanos (RSU)). La **biomasa producida**, son los cultivos energéticos, es decir, campos de cultivo donde se produce un tipo de especie concreto con la única finalidad de su aprovechamiento energético [30].

La transformación de la biomasa se realiza, normalmente, a través de procesos termoquímicos, el cual consiste en la descomposición térmica de la biomasa. Los materiales que funcionan mejor son los de menor humedad (madera, paja, cáscaras, etc.), inferior al 60%. Los principales procesos para la obtención de la energía son los siguientes [30]:

**Combustión.** Se realiza con exceso de oxígeno a una temperatura entre 600 y 1.300°C. Es el modo más básico para recuperar la energía de la biomasa, de donde salen gases calientes para producir calor y poderla utilizar en casa, en la industria y para producir electricidad.

**Pirólisis.** Se trata de descomponer la biomasa en ausencia de oxígeno utilizando el calor (a unos 500°C). A través de este proceso se obtienen gases formados por hidrógeno, óxidos de carbono e hidrocarburos, líquidos hidrocarbonatos y residuos sólidos carbonosos. Este es el método más usado para la obtención de carbón vegetal.

**Gasificación.** Existe cuando hay una combustión y se producen diferentes elementos químicos: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrógeno (H) y metano (CH<sub>4</sub>), en cantidades diferentes. La temperatura de la gasificación puede estar entre 700 y 1.500°C y el oxígeno entre un 10 y un 50%. Según se utilice aire u oxígeno, se crean dos procedimientos de gasificación distintos. Por un lado, el gasógeno o “gas pobre” y por otro el gas de síntesis. Este último transformarse en combustibles líquidos (metanol y gasolinas) y de ahí su importancia. Por eso se están haciendo grandes esfuerzos que tienden a mejorar el proceso de gasificación con oxígeno.

**Co-combustión.** Consiste en la utilización de la biomasa como combustible auxiliar durante la quema de carbón en la caldera. Mediante este proceso, se pueden reducir el consumo y las emisiones de carbono.



#### 2.4.10 Microturbina

Las microturbinas amplían la tecnología de las turbinas de gas a una escala menor (ver Figura 2.10). Son turbinas de gas con potencia en el rango de 20-500kW, que se desarrollan a partir de la tecnología de turbosoplantes en la industria automotriz y la tecnología de pequeños turborreactores en la industria de la aviación. Consisten en compresores, turbinas, recuperadores y generadores generalmente montados en un solo eje. Sus principales ventajas son menos partes móviles, tamaño compacto, varios tamaños y menos ruido y emisiones que las turbinas de gas. Su principal desventaja es su elevado coste [10].

Permiten dos modos de funcionamiento: **con recuperador de calor**, puede transferir parte del calor de los gases de escape al aire que ingresa al compresor, aumentando así su temperatura y aumentando significativamente la eficiencia eléctrica entre un 27% y un 30%. **Sin recuperador de calor**, el uso de calor residual tiene prioridad sobre la generación de energía en aplicaciones de cogeneración. En este caso, la eficiencia eléctrica se reduce al 15-18%, pero la eficiencia total puede alcanzar el orden del 80% [10].

Las microturbinas pueden ser empleadas en diversas aplicaciones, en la GD, como generador independiente o como elemento de respaldo, también como integrante de instalaciones híbridas con celdas de combustible y vehículos eléctricos híbridos.

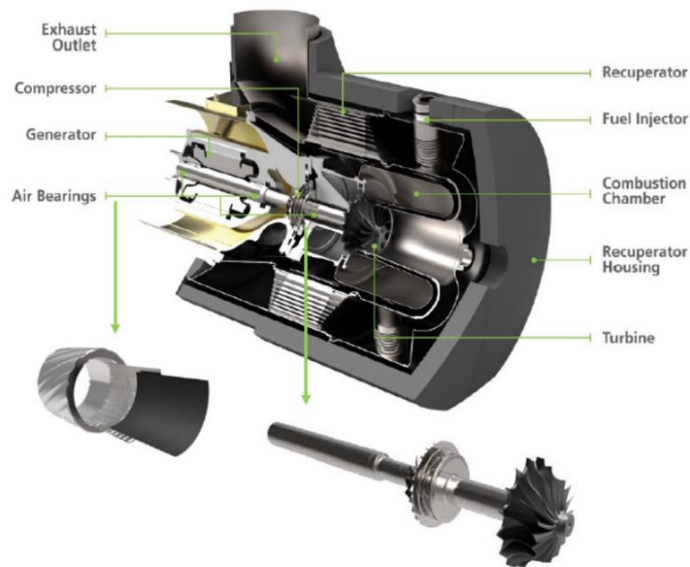


Figura 2.10. Microturbina [31].

#### 2.4.11 Pila de combustible

Es un dispositivo capaz de convertir la energía química directamente en energía eléctrica sin producir combustión. El funcionamiento es similar al de las baterías, pero no se agotan mientras se les esté suministrando el combustible necesario. Está formado por un ánodo y un cátodo, en presencia de un medio electrolítico el cual permite el intercambio de iones en el proceso de electrólisis inversa, en el que, el oxígeno es reducido y el hidrógeno oxidado (Figura 2.11). En esta

reacción se obtiene electricidad y agua, adicionalmente, por tratarse de una reacción exotérmica se genera calor.

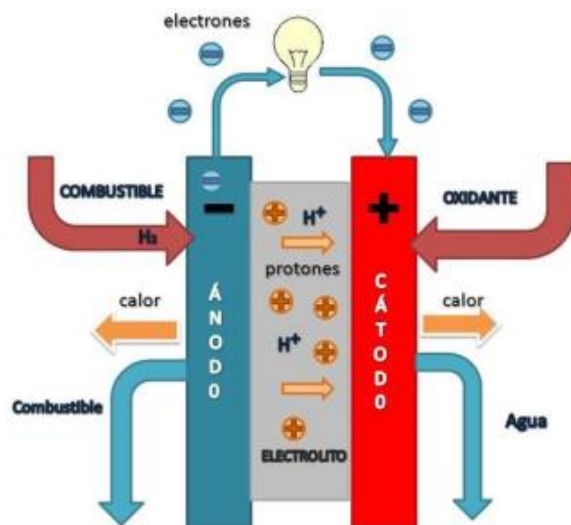


Figura 2.11. Esquema pila de combustible tipo PEM [32].

Las pilas de combustible (Figura 2.12) poseen una eficiencia de conversión muy alta comparadas con tecnologías convencionales (35%-65%). Su eficiencia limita las emisiones de CO<sub>2</sub> y, como no hay combustión, otras emisiones nocivas son bajas, además, permite una gran seguridad de suministro. Hay diferentes tipos celdas: alcalinas (AFC), de membrana polimérica (PEMFC), conversión directa de metanol (DMFC), ácido fosfórico (PAFC), carbonato fundido (MCFC), óxido sólido (SOFC), y se clasifican por el tipo de electrolito empleado y por la temperatura de trajo.

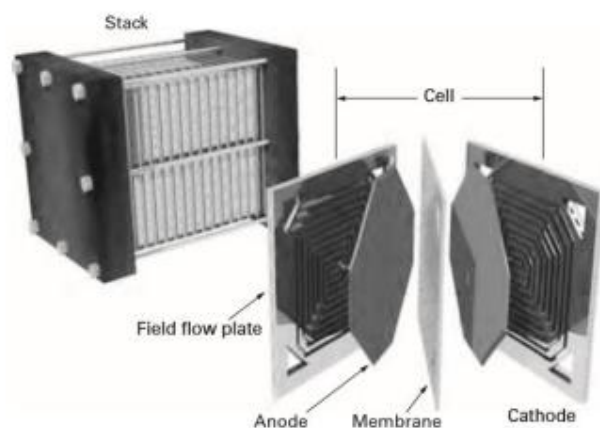


Figura 2.12. Partes de una pila de combustible [32].

#### 2.4.12 Marina

Se conoce como energía marina el conjunto de tecnologías que aprovechan la energía del mar (ver Figura 2.13). El mar tiene un alto potencial energético; energía mareomotriz debidas a los efectos gravitatorios, energía térmica oceánica (o maremotérmica), debido a las diferencias de temperatura

del agua y la energía cinética de las olas o energía undimotriz (producidas por la acción del viento). Esta tecnología aún presenta bajo grado de desarrollo tecnológico y elevados costes de instalación. Los tipos de aprovechamiento energético de la energía del mar se describen a continuación [8].

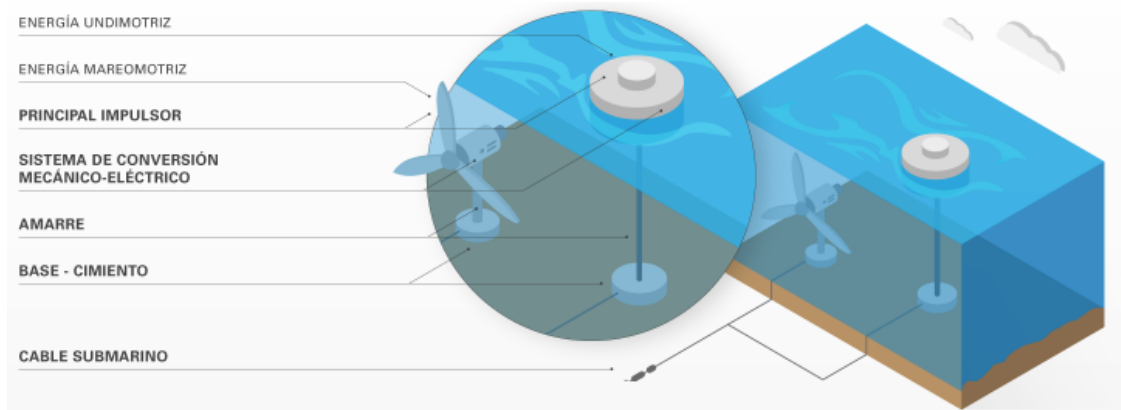


Figura 2.13. Tecnologías para la generación de energía marina [33].

La eficiencia en la generación de energía depende, principalmente, del tipo de energía marina que se quiere aprovechar. A continuación, se enumeran las principales tecnologías [34]:

**Mareomotriz:** aprovecha el movimiento natural de ascenso (pleamar) o descenso (bajamar) de las aguas. Su rendimiento es de un 25% y su principal inconveniente es el reducido número de horas en que se puede utilizar.

**Maremotérmica:** aprovecha la diferencia de temperatura del agua entre la superficie y la profundidad para generar electricidad. El gradiente mínimo aprovechable es de 18°C y el rendimiento actual apenas es del 2%.

**Undimotriz:** aprovecha la acción del viento sobre la superficie del mar que provoca el movimiento del agua en forma de olas. Se han desarrollado diferentes convertidores que presentan diversos grados de madurez. Flotantes (pelamis y boyas flotantes), anclados a la costa (columna de agua oscilante – OPC), Anclados al fondo marino.

**Energía de las corrientes marinas:** se basa en el uso de las corrientes oceánicas para generar electricidad. Su funcionamiento es similar al de la turbina eólica, pero en este caso el giro del rotor es provocado por las corrientes de agua.

**Gradiente de salinidad:** energía obtenida debido a las diferencias de presión osmótica, lo que se denomina energía del gradiente salino.

#### 2.4.13 Geotérmica

La energía geotérmica es una de las fuentes de energía renovable menos conocidas, pero tiene el mayor potencial de obtención de energía. Es la energía que encierra la Tierra en forma de calor, y que ha sido generada principalmente en la desintegración de materiales radiactivos en su núcleo. Esta energía en forma de calor tiende a difundirse en el interior hasta escapar por la superficie de la

corteza terrestre, también se almacena en rocas, suelos y agua subterráneas, a diferentes temperaturas y profundidades [35].

Los recursos geotérmicos se clasifican en función de su nivel térmico y su aplicación depende de las características de cada fuente. La temperatura es el principal factor que condiciona su forma de aprovechamiento [35]:

Alta temperatura, superiores a 150 °C, permite transformar directamente el vapor de agua en energía eléctrica. Media temperatura, entre 90 °C y 150 °C, la electricidad se genera a través de un fluido de intercambio, que puede alimentar la planta de energía. Baja temperatura, entre 30 °C y 90 °C, su contenido en calor es insuficiente para producir energía eléctrica, pero su aprovechamiento es adecuado para calefacción en edificios, procesos industriales y agrícolas, se puede usar de manera directa o mediante bomba de calor. Muy baja temperatura (por debajo de los 25°C), mediante bombas de calor geotérmicas, se utiliza para satisfacer necesidades domésticas, climatización y obtención de agua caliente sanitaria (ACS).

## 2.5 Sistemas de almacenamiento en Generación Distribuida

En el contexto de la GD, las nuevas fuentes de energía se basan en aprovechar directamente las fuentes renovables.

Las fuentes renovables se ven afectadas por las fluctuaciones en la naturaleza de su aprovechamiento, por ejemplo; una baja radiación solar, la producción de energía solar fotovoltaica es menor, por lo que puede que su generación no se ajuste a la demanda energética. Esta variabilidad hace necesario la utilización de sistemas de almacenamiento de energía que permitan disponer de energía de manera continua, permitiendo así, un mejor aprovechamiento y optimización de las energías renovables, ajustando la generación a la demanda.

El almacenamiento de energía implica conservar la generación de energía excedente para que pueda transferirse cuando sea necesario, de la misma manera en que se almacenó o en otra diferente. Hay muchas formas de almacenar energía a lo largo de la cadena de suministro: a gran escala (GW): hidroeléctrica reversible (bombeo), almacenamiento térmico. Almacenamiento en redes (MW): pilas y baterías; condensadores y superconductores; volantes de inercia. A nivel de usuario final (kW): baterías, superconductores, volantes de inercia [36].

La selección del sistema o tecnología de almacenamiento dependerá de la capacidad deseada, potencia aportada, tiempo de respuesta rápida, modulada y controlada; vida útil, costes, limitaciones constructivas, eficiencia energética e impacto ambiental [32].

Dentro los sistemas de almacenamiento energéticos más desarrollados y utilizados son los siguientes:

- Bombeo de agua.
- Baterías.

- Aire comprimido.
- Volantes de inercia.
- SMES (Almacenamiento de Energía en Superconductores Magnéticos).
- Supercondensadores.
- Almacenamiento térmico.
- Hidrógeno.

### 2.5.1 Bombeo de agua

El bombeo hidroeléctrico es una de las tecnologías más maduras de almacenamiento. Esta tecnología consiste en bombear agua (dulce o salada) de un depósito a otro, situados a una diferencia de altura (Figura 2.14), siendo almacenada en forma de energía potencial, esta agua se bombea en las horas de poca demanda hacia el depósito superior, de forma que cuando la demanda es alta (horas pico), su funcionamiento es similar a una central hidroeléctrica convencional, se deja descender el agua hacia el depósito inferior el cual acciona una turbina generadora de electricidad [32].

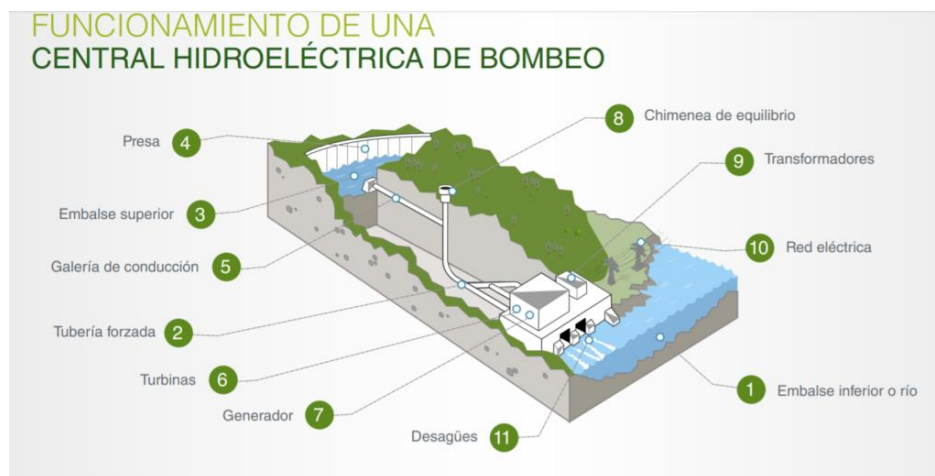


Figura 2.14. Esquema de funcionamiento de una central de bombeo [37].

La eficiencia global de los sistemas de bombeo hidroeléctrico bien diseñados está en el rango de 72% a 81%. El sistema de bombeo tiene una madurez alta, una gran vida útil, un buen coste por kWh, aunque un coste alto de instalación [8].

### 2.5.2 Baterías.

El funcionamiento de la batería (Figura 2.15) se basa en celdas electroquímicas. Hay dos electrodos, uno positivo y el otro negativo, cuando están conectados en circuito cerrado se genera una corriente, es decir, los electrones fluyen espontáneamente de un electrodo a otro. Una batería consta de varios pares de electrodos, que se encuentran en compartimentos separados llamadas celdas. En las celdas los electrodos están sumergidos en una solución electrolítica [32].

Las baterías son los sistemas más antiguos de almacenar energía en forma de corriente continua, actualmente la lista de tecnologías electroquímicas disponibles a nivel comercial y sus correspondientes familias es muy extensa. Las diferencias en las tecnologías de fabricación de baterías definen el costo, la capacidad, vida útil y tamaño entre otras. Se puede distinguir entre baterías de estado sólido y de flujo, las primeras consisten en una o más celdas electroquímicas que convierten energía química almacenada en energía eléctrica. Las segundas, la energía es almacenada directamente en una solución electrolítica lo cual les permite tener un ciclo de vida más prolongado y una respuesta más rápida [38].

Entre las baterías más comunes se encuentran las de plomo-ácido, níquel-cadmio y sodio-azufre. Las baterías basadas en plomo-ácido tienen una madurez alta y una vida útil baja, las basadas en sodio-azufre, una madurez media y una vida útil alta, por último, las baterías basadas en níquel-cadmio, tienen una madurez alta y una vida útil media [8].

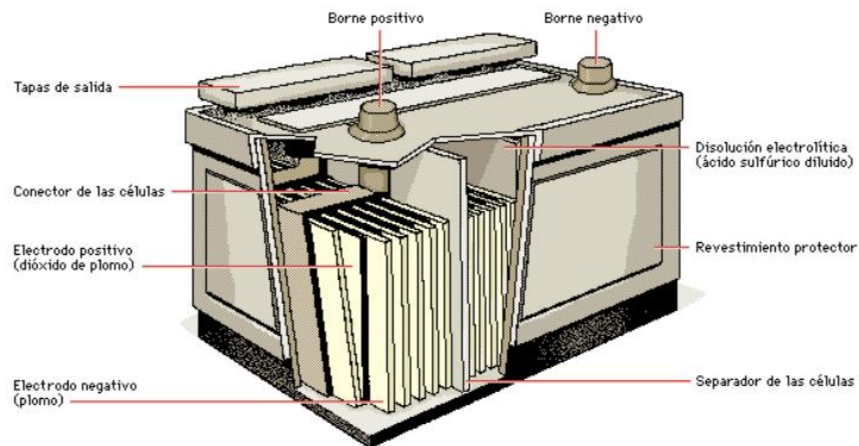


Figura 2.15. Esquema de batería electroquímica [21].

### 2.5.3 Aire comprimido

El almacenamiento de la energía con aire comprimido (CAES - *Compressed Air Energy Storage*) es semejante al almacenamiento por bombeo. En esta tecnología el aire se comprime y se almacena en depósitos, acuíferos o cavidades subterráneas que pueden ser naturales o artificiales, como se observa en la Figura 2.16. La energía almacenada se libera durante los intervalos de demanda de puntas, expandiendo el aire a través de una turbina [39].

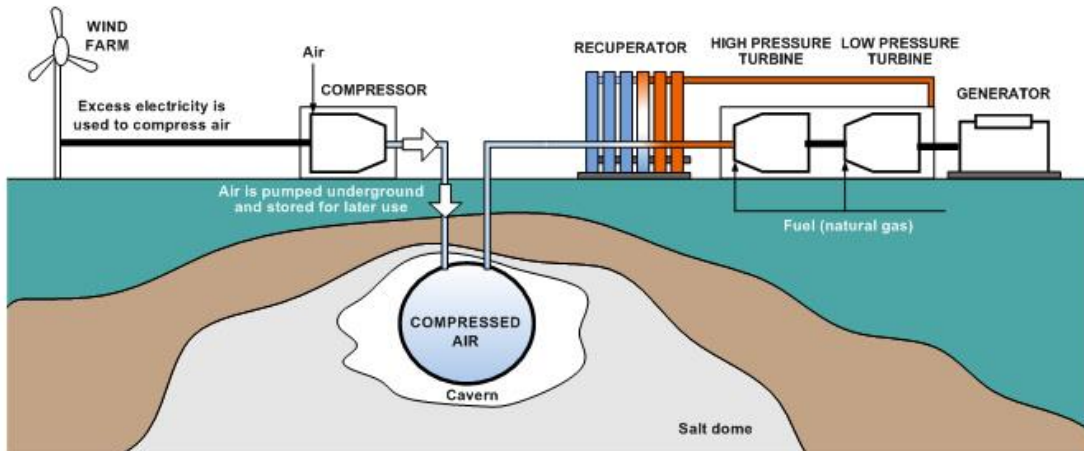


Figura 2.16. Esquema de funcionamiento de un sistema de almacenamiento de aire comprimido [39].

El sistema de almacenamiento de aire comprimido tiene madurez media, larga vida útil, alto costo por kilovatio hora y alto coste de instalación [8].

#### 2.5.4 Volantes de inercia.

Los volantes de inercia son sistemas de almacenamiento de energía cinética. Este sistema almacena energía acelerando un rotor de alta inercia y la devuelve desacelerando este rotor como consecuencia del principio de conservación de la energía. Los volantes tienen una respuesta muy rápida y pueden suministrar picos de alta potencia [40]. Su potencia viene determinada por la inercia o la velocidad que adquieren durante el funcionamiento. Dependiendo de la velocidad de rotación máxima, los volantes se clasifican en velocidad baja y alta. Estos sistemas de almacenamiento de energía pueden llegar a la velocidad máxima en cuestión de minutos, mucho más rápido que algunas otras formas de almacenamiento de energía, están compuestos por una serie de elementos como rodamientos, cojinetes magnéticos o una cámara de vacío, cuya función es la de minimizar el rozamiento aerodinámico (Figura 2.17). La eficiencia de estos dispositivos puede llegar al 90% [41], [42].



Figura 2.17. Sistema de almacenamiento con volante de inercia [40].

### 2.5.5 Supercondensadores

Los condensadores electroquímicos de doble capa o supercondensadores presentan características de condensadores y baterías (ver Figura 2.18), sin embargo, tienen la capacidad de almacenar más energía que los condensadores convencionales y también pueden suministrar mayor energía que las baterías. Su funcionamiento no depende de una reacción electroquímica por lo que la energía se almacena en forma de campo eléctrico debido a la diferencia de potencial entre el electrolito y las superficies de los electrodos, esto permite que la carga y descarga se realice en periodos de tiempo cortos, en el orden de los segundos o menos, siendo apropiados para responder ante interrupciones de suministro de poca duración [8], [39], [40].



*Figura 2.18. Supercondensadores comerciales (Maxwell Technologies) [8].*

### 2.5.6 Almacenamiento térmico

Los sistemas de almacenamiento térmicos acumulan energía en forma de calor variando la temperatura de una sustancia u ocasionando un cambio de fase, es decir, aprovechan la capacidad latente de algunos materiales para absorber energía. También usan la reversibilidad de las reacciones electroquímicas. Existen dos formas de almacenar energía térmica, mediante calor sensible y calor latente. Los sistemas basados en calor sensible se benefician del calor almacenado por sustancias como aceite sintético o sales fundidas para producir vapor de agua y accionar un generador. Mientras que los sistemas basados en calor latente hacen uso de la transición líquido-sólido de un material a temperatura constante, durante el mecanismo de almacenamiento la transición es de sólido a líquido y para el reintegro de la energía, su transición es de líquido a sólido.



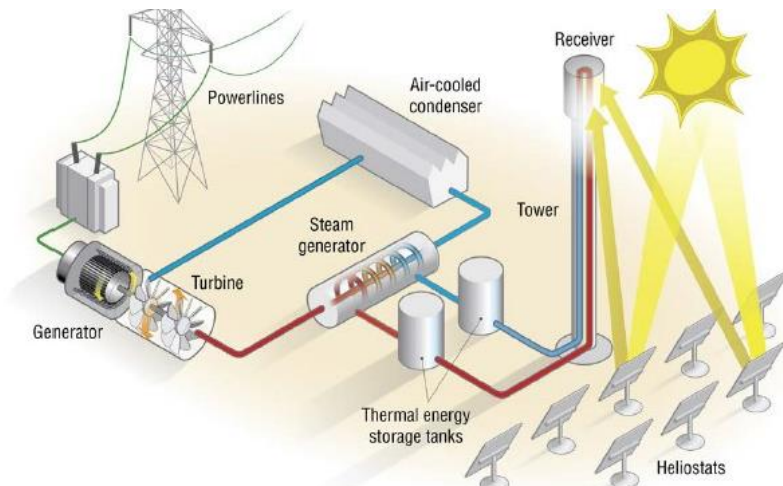


Figura 2.19. Esquema de funcionamiento de sistema térmico [38].

Las propuestas de diseño se centran en el uso de sal fundida como acumulador de calor, recolectado por una torre solar (Figura 2.19), y utilizado para generar electricidad con mal tiempo o de noche. Se esperan eficiencias térmicas sobre el 99% en un año [8].

### 2.5.7 Hidrógeno

El hidrógeno es un método prometedor de almacenamiento de energía debido a que su combustión no produce gases de efecto invernadero, es decir, su proceso de combustión es no contaminante, ya que durante la reacción del enlace H-H con el oxígeno se produce vapor de agua. La energía se almacena produciendo hidrógeno, a partir de diferentes precursores tales como gas natural, carbón, energías renovables o por electrólisis del agua, en horas valle. Puede almacenarse como gas a presión y como líquido o distribuirse mediante gaseoductos (Figura 2.20), su reintegración puede ser con diferentes tecnologías, pero entre las más utilizadas están las celdas de combustible [18].

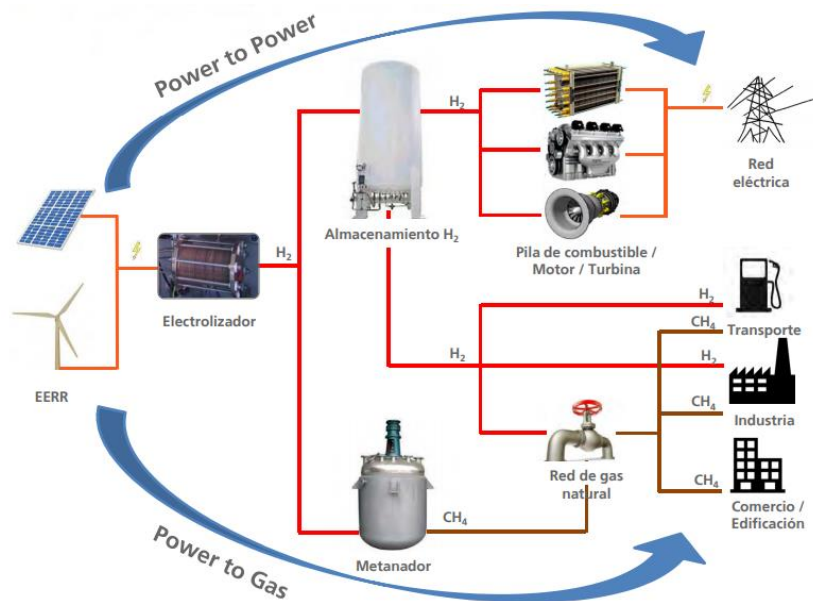


Figura 2.20. Esquema de aprovechamiento del hidrógeno [43].

## 2.6 Interconexión a la red de la GD

Diversos dispositivos de generación distribuida trabajan en paralelo con la red eléctrica convencional, por lo que deben estar correctamente conectados a la red. De manera similar, en algunos casos, la generación distribuida puede presentar conexiones aisladas.

El sistema de interconexión de generación distribuida consta de una serie de dispositivos (hardware y software) que permiten conectar físicamente generadores distribuidos y dispositivos de almacenamiento a la red y cargas locales (consumidores); conduciendo a una mayor fiabilidad y seguridad del sistema. La interconexión de las fuentes GD permiten que éstas operen como fuentes principales, o como fuentes auxiliares ante un presente fallo de la red [8], [9], [21]. Además, al estar conectado a la red general, se puede comprar energía cuando el balance entre generación y consumo de energía es negativo, en el caso opuesto, cuando hay exceso de energía, ésta se podrá vender [1].

En España, todos los centros de producción de renovables con una potencia instalada que sea superior a 10 MW deben ser controlados por un centro de control conectado directamente al Centro de Control de Energías Renovables (CECRE) [8].

## 2.7 Componentes del sistema de interconexión

El sistema de interconexión está conformado por una serie de equipos y dispositivos que permiten el control y monitorización de la instalación e integración y distribución de la energía generada.

### 2.7.1 Conexión a la red

Punto donde el sistema de generación se conecta a la red, normalmente de distribución o en media o en baja tensión, Figura 2.21.

La conexión a la red se realiza a través de un interruptor general manual, que es un interruptor magnetotérmico cuya intensidad de cortocircuito es mayor que la indicada por la empresa distribuidora de energía en el punto de conexión, protegiendo al sistema ante picos de corriente o cortocircuito. El punto de conexión del sistema tiene protecciones tanto para la parte de corriente alterna como la de corriente continua [8].

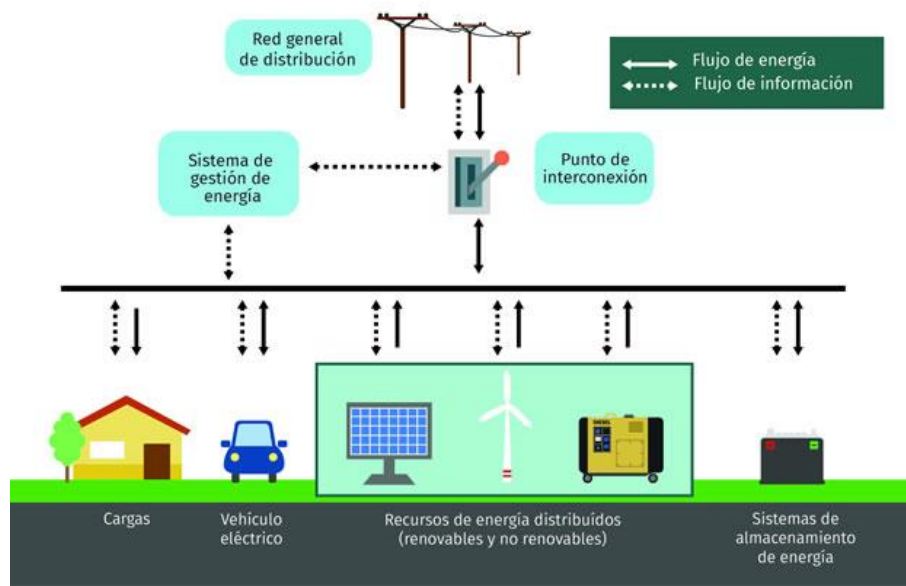


Figura 2.21. Esquema de conexión de un sistema de generación distribuida [44].

### 2.7.2 Equipos de medida

Son los dispositivos o equipos que miden y registra la energía generada, la suministrada a la red y la suministrada por la red. Pueden ser equipos de medida de entrada, salida o bidireccionales. Normalmente no es necesario su implementación en instalaciones aisladas [6], [8], [9], [18].

### 2.7.3 Red de distribución y transporte

La red de distribución es generalmente de baja o media tensión, y es la red de la compañía eléctrica a la cual se le conecta el sistema de generación distribuida. En cuanto a la red de transporte es la encargada de la alta tensión.

### 2.7.4 Equipos de comunicación

Dispositivos y equipos que interactúan con el sistema de GD para transmitir o recibir información, permitiendo una mejor gestión de la red, al llevar a cabo supervisiones de forma remota y facilitar el mantenimiento de las instalaciones.

### 2.7.5 Monitorización

Equipos que operan en conjunto con el sistema de comunicaciones para medir y transmitir diferentes funciones o parámetros del sistema de GD. El equipo proporciona una interfaz entre el operador y el sistema eléctrico, donde puede visualizar los datos capturados y ordenar alguna acción sobre el sistema.

### 2.7.6 Conversión de energía

Hay equipos que transforman la energía, con el fin de adaptarlas a las condiciones exigidas por la red eléctrica de la compañía eléctrica. Dentro de estos equipos, los principales son los inversores,

que transforman la energía de corriente continua a corriente alterna; se utiliza cuando la fuente de GD es una pila de combustible, un panel fotovoltaico o una microturbina. Y los transformadores, que se utilizan para transformar la energía generada de un nivel de tensión a otro y/o garantizar un aislamiento eléctrico; debe tener baja distorsión armónica, resistencia a potencias pico y posibilidad de conectarse en paralelo [6], [8], [9], [18].

### 2.7.7 Aparata de conexión

Dispositivo para conectar en paralelo y sincronizar la operación de las unidades de GD con la red de distribución (Figura 2.22). El objetivo es poder intercambiar entre ambos o utilizarlos a la vez [6,9,25].

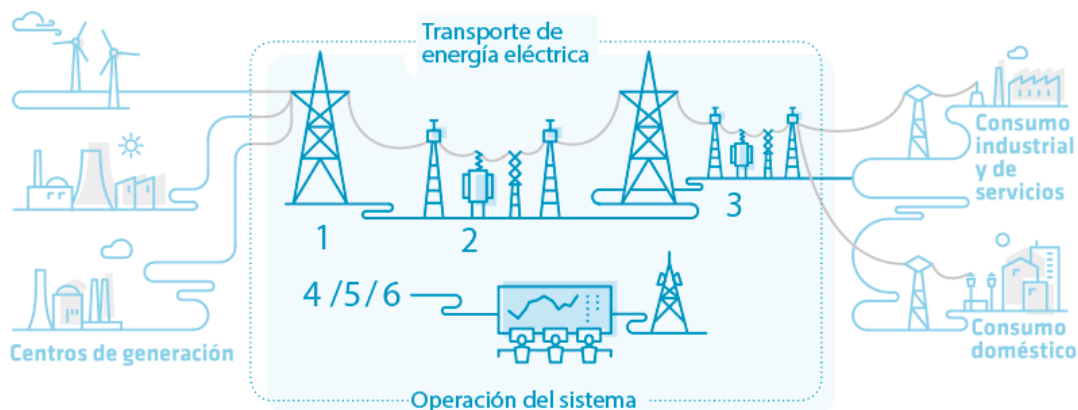


Figura 2.22. Esquema del sistema eléctrico con generación distribuido [45].

## 3 Diseño e implementación del prototipo a escala de un sistema de generación distribuida con almacenamiento

Como se describió en los fundamentos teóricos el sistema de generación distribuida está conformado por tres principales subsistemas: generación, almacenamiento e interconexión. En el diseño propuesto en este trabajo se adiciona otro subsistema, el sistema de caracterización.

En este capítulo se presenta las consideraciones técnicas y teóricas empleadas en el planteamiento del diseño e implementación del prototipo. Se parte por especificar las tecnologías seleccionadas como fuentes de generación, su mecanismo de operación, modelado y una descripción general de una instalación que las incluye. Posteriormente se tratará el sistema de almacenamiento, de interconexión y el sistema de caracterización, así como las características de sus componentes. Luego se exhibe la implementación del sistema y el planteamiento de la interfaz gráfica.

### 3.1 Consideraciones de diseño del prototipo

Implementar a escala un sistema de generación distribuida con almacenamiento para su posterior uso como equipo de ensayos, tal que permita el estudio de una fuente de energía, los elementos y componentes de producción, almacenamiento y parámetros eléctricos fundamentales de un generador de energía.

El prototipo a implementarse por tratarse de un equipo de laboratorio debe cumplir con las siguientes consideraciones:

- Incluir mínimo una fuente de energía de estudio.
- Permitir conocer todos los elementos que componen una instalación de generación distribuida.
- Permitir su uso en interiores y exteriores, portabilidad.
- Obtener los parámetros eléctricos del generador.
- Trazado de curvas características del generador.
- Ver la influencia de algunas variables climáticas en la producción de energía.
- Determinación del punto de máxima potencia del generador.
- Visualización y manipulación de los datos

#### 3.1.1 Consideraciones técnicas

- Fuente de energía renovable solar y/o eólica
- Potencia de generación no inferior a 20W
- Sistema aislado y/o conectado a la red.
- Sistema con conexión a carga DC y/o carga AC.

- Pequeñas dimensiones para facilitar su portabilidad.
- Regulador con funcionamiento a 12 o 24 V.
- Tarjeta de adquisición de datos.

### 3.2 Planteamiento del diseño del sistema de GD

Las fuentes renovables son de mayor interés debido a que potencia la generación sostenible y contribuye a una reducción de emisiones nocivas. Entre las diferentes fuentes de energía renovable usadas en sistemas descentralizados, la energía eólica y fotovoltaica son las más comúnmente empleadas, siendo éstas de principal interés en el desarrollo de este proyecto.

Los sistemas de generación eólico y solar permiten instalaciones de pequeña y gran escala. Las instalaciones de pequeña escala por lo general son sistemas de autoconsumo, éstos pueden ser aislados o conectados a la red. Por otro lado, los parques solares y eólicos proporcionan una alta producción conformando los sistemas de generación de gran escala.

Conforme lo mostrado en la sección 2.3, un sistema de generación distribuida está conformado por tres subsistemas principales: sistema de generación, sistema de almacenamiento y sistema de interconexión, posteriormente, estos subsistemas pueden estar conectados a una red de distribución o a un punto de consumo, adicionalmente el sistema GD cuenta con un sistema de caracterización, este bloque representa la aparatamenta necesaria para la obtención de los parámetros eléctricos y curvas características de los paneles, en la Figura 3.1 se puede ver, grosso modo, la topología del sistema de GD propuesta.

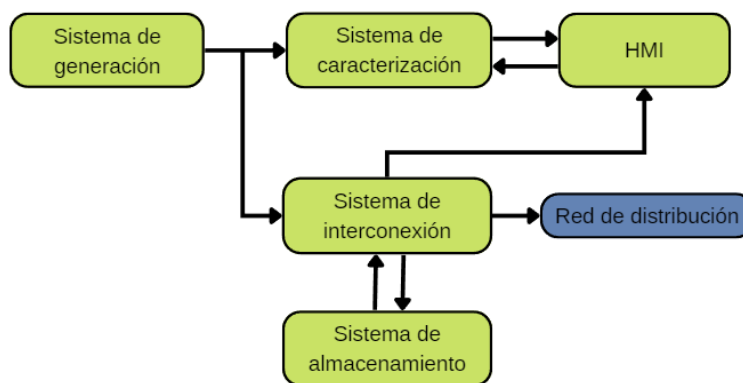


Figura 3.1. Diagrama básico de un sistema de generación distribuida.

De acuerdo con la imagen anterior (Figura 3.1), el sistema de GD propuesto estará conformado por cuatro subsistemas fundamentales: sistema de generación, almacenamiento, interconexión y caracterización y una interfaz de usuario. El bloque correspondiente a la red de distribución se muestra de otro color ya que según la clasificación del sistema distribuido puede incluirse o no, es decir, se puede omitir o incluir sí la instalación propuesta corresponde a un sistema aislado o conectado a la red, respectivamente.

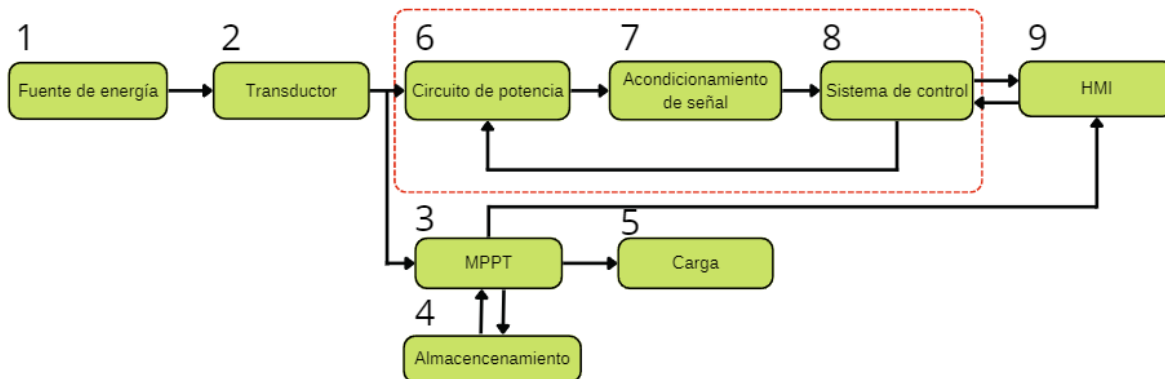


Figura 3.2. Diagrama de bloques general del prototipo de GD diseñado.

En la Figura 3.2 se presenta la arquitectura del prototipo a escala de generación distribuida planteado. Este diagrama incluye una descripción detallada de los bloques que conforman el sistema de GD a implementar:

- **Sistema de generación:** lo integra los bloques 1 y 2, correspondientes a la fuente de energía y al dispositivo encargado de la transformación de la energía de la fuente a energía eléctrica.
- **Sistema de interconexión:** bloque 3, regulador MPPT, encargado de gestionar la carga y el consumo de la energía almacenada.
- **Sistema de almacenamiento:** bloque 4, almacena la energía en exceso y proporciona la necesitada por la carga.
- **Sistema de distribución o punto de consumo:** bloque 5, al tratarse de un sistema aislado de la red, la red de distribución se reemplaza por un punto de consumo y la carga implementada será de corriente continua.
- **Sistema de caracterización:** recuadro punteado rojo, lo conforman los bloques 6, 7 y 8, permite el estudio y recolección de los parámetros eléctricos y curvas características de los paneles fotovoltaico.
- **HMI, Human Machine Interface:** Interfaz de usuario, permite visualizar y manipular los datos obtenidos del sistema de GD.

### 3.3 Turbina eólica como sistema de generación

La turbina eólica como tecnología de generación es analizado en esta sección, se parte por describir su funcionalidad, los componentes que la conforman, un modelado y una descripción general de una instalación eólica de pequeña escala convencional.

### 3.3.1 Funcionamiento de las turbinas eólicas

Las turbinas eólicas transforman la energía proveniente del viento en energía eléctrica, mediante la conversión de la fuerza del viento en un torque que actúa sobre las palas del rotor. Los aerogeneradores básicamente constan de tres partes: la hélice o aspas del rotor, las cuales están diseñadas para aprovechar al máximo la potencia posible del rotor; una caja de engranajes, que regula el número de revoluciones por minuto (RPM) a las que gira el rotor a un valor óptimo para la generación de eléctrica por parte del generador; y el tercero es un generador que convierte la energía mecánica en energía eléctrica. En la Figura 3.3, se puede ver un diagrama del funcionamiento de una turbina eólica con algunas de sus partes nombradas. Después de la parte de generación, las turbinas pueden tener un sistema convertidor de energía, el cual transforma la energía AC en DC o simplemente ajusta la energía AC para ser integrada a la red eléctrica.

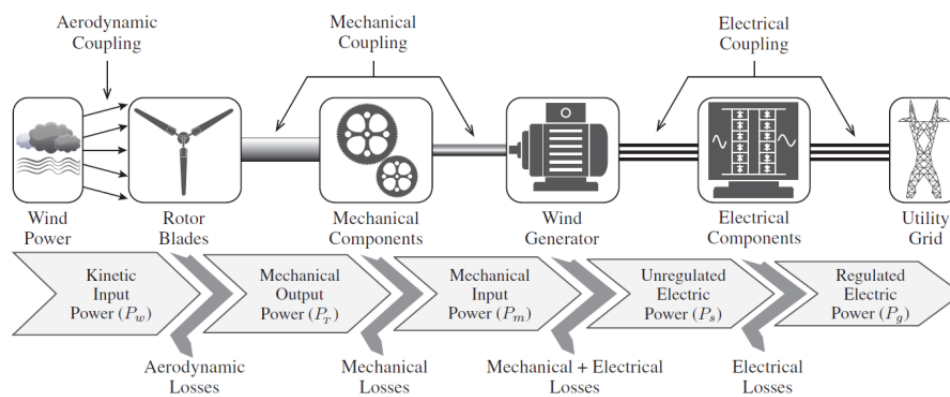


Figura 3.3. Topología de una turbina eólica [46].

### 3.3.2 Partes de la turbina eólica

En la Figura 3.4 se puede ver las partes que conforman el aerogenerador.

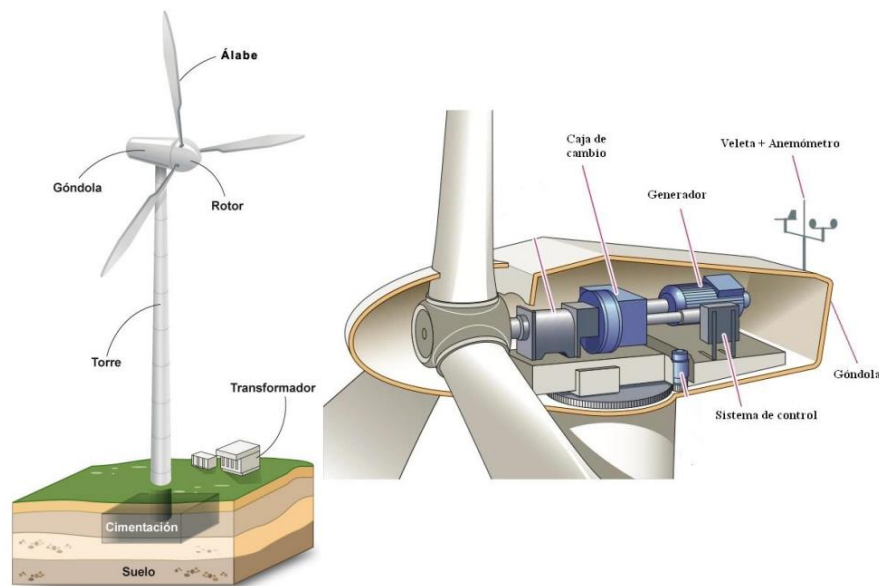


Figura 3.4. Partes de una turbina eólica (izquierda: [47], derecha: [48])



**Cimentación:** Cimentación subterránea de hormigón armado, pieza fundamental que le sirve al aerogenerador para anclarse en el suelo y soportar las cargas de viento y la vibración del aerogenerador. En función del tipo de suelo se podrá implementar diferentes técnicas para mejorar las condiciones del terreno.

**Torre:** es la parte de la estructura que soporta todo el peso del aerogenerador, góndola y palas. Hecha en acero tubular y/o hormigón armado. Esta estructura establece la altura necesaria para el aprovechamiento del viento y la potencia según los cálculos de producción.

**Góndola:** Es la parte de la torre usada como cubierta o chasis para proteger el conjunto de piezas que conforman el mecanismo principal, ya que en él se sitúan los principales componentes, la caja de cambios, el eje principal, los sistemas de control, el generador, los frenos y los mecanismos de giro de la góndola. Puede girar alrededor de la torre para posicionar la turbina frente al viento.

**Palas:** Las palas son las partes móviles del generador que captarán la fuerza del viento para transmitirlo al eje principal, su función es oponer resistencia al viento, permitiendo que la energía cinética sea transformada en energía mecánica. El número de palas, diseño y longitud se determinará en función del tipo y velocidad del viento, para mejorar el empuje y adaptarse a la curva de potencia del generador.

**Caja de cambios:** Su función es adaptar la velocidad de giro del eje principal a la de las aspas. En otras palabras, la caja de cambios conecta el eje de baja velocidad con el eje de alta velocidad y aumenta las velocidades de rotación a un valor óptimo para la generación eléctrica por parte del generador.

**Rotor:** es una parte de la turbina eólica que está conformado por las palas, el buje y mecanismo de cambio de paso de la pala, puede ser horizontal o vertical, siendo la de eje horizontal la de mayor uso. Generalmente la aplicación de un sistema de eje horizontal es frente al viento, es decir, provocado una resistencia al viento, pero también puede posicionarse a favor del viento.

**Generador:** Tiene la función de transformar la energía mecánica producida por el rotor en energía eléctrica. La conexión a la red puede ser de forma directa o indirecta. De forma directa, la velocidad del giro del generador está limitado por la propia red por lo que no aprovecha los picos de mayor energía el viento, por el contrario, en la conexión indirecta si se aprovecha los picos de mayor energía, pero la frecuencia producida es variable, por lo que se debe hacer uso de otros equipos para la adaptación de la energía.

**Sistema de frenado:** Sistema que permite la inmovilización de la turbina eólica como seguridad para situaciones de emergencia, averías o mantenimiento.

**Sistema de control:** El sistema de control tiene dos tareas fundamentales, el primero es la optimización de la producción o aprovechamiento máximo de la energía cinética del viento, gracias a la orientación del rotor mediante la información de la veleta y el anemómetro recibido por el ordenador de control. La segunda tarea es la de protección de la turbina ante fuertes velocidades del viento que pueden afectar el sistema.

**Transformador:** es el encargado de adaptar la energía del generador a un voltaje adecuado para poder integrar la energía a la red de distribución.

### 3.3.3 Modelos de aerogeneradores

Existen dos principales modelos de aerogeneradores clasificados según su eje: vertical u horizontal.

#### 3.3.3.1 Aerogeneradores de eje vertical

No necesita de un mecanismo de orientación debido a que estos aerogeneradores poseen un eje de rotación que es perpendicular al suelo y al viento, lo que permite un mejor aprovechamiento de vientos inestables. Debido a su diseño, las partes internas del aerogenerador se encuentran a nivel de suelo lo que permite que la fabricación e instalación de estos sistemas sean más fáciles y económicos comparados con los de eje horizontal, pero su producción de energía es menor.

A continuación, se destacan dos modelos de aerogeneradores de eje vertical (Figura 3.5):

- **Aerogenerador con rotor Savonius:** Modelo simple de rotor, formados por dos o más alabes de forma cilíndrica hueca cóncava las cuales trabajan en función de la fuerza de arrastre que produce el viento genera. Se caracteriza por trabajar con vientos de poca intensidad, pero son pocos utilizados debido a su alta resistencia al aire.
- **Aerogenerador con rotor Darrieus:** Modelo de aerogenerador de eje vertical más conocido. Consiste en un eje vertical sobre un rotor, con varias palas curvas finas, las cuales permite una mejor distribución del viento y proporcionan una mayor velocidad de trabajo, pero necesita de un sistema de arranque.

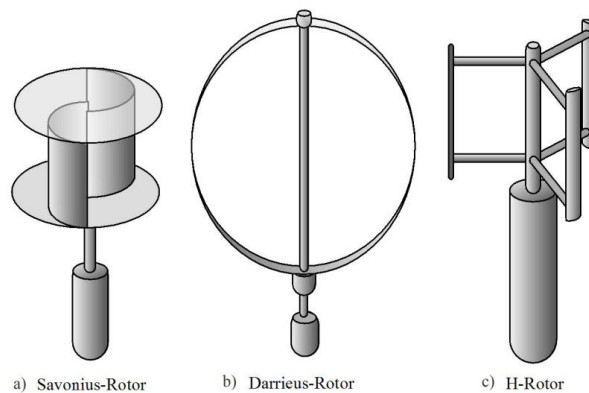


Figura 3.5. Modelos de turbinas eólicas verticales. a) Savonius, b) Darrieus y c) H- Darrieus. [49].

#### 3.3.3.2 Aerogeneradores de eje horizontal

Aerogeneradores cuyo eje de rotación es paralelo al suelo, el rotor puede estar posicionado a favor o contra del viento. Son más eficientes energéticamente a través de su capacidad para operar a velocidades de rotación más altas y la capacidad de aprovechar la velocidad del viento en altitudes más altas. En función de su dirección, distinguiremos entre los de a barlovento y a sotavento (Figura 3.6).

- **Barlovento:** El rotor se sitúa frente al sentido del viento produciendo resistencia al aire. De esta forma se produce un mejor aprovechamiento del viento al no haber turbulencias anteriores al momento de empujar las palas. Este sistema hace uso de la información

adquirida del manómetro y la veleta para orientarse y mejorar así la eficiencia de transformación de energía. Son los generadores más populares.

- **Sotavento:** El rotor se sitúa de espaldas al sentido del viento dominante, lo que hace que sea auto orientable, pero la estructura de la torre y la góndola hacen de efecto de sombra en consecuencia, no permiten una alta eficiencia de transformación de energía producto de las turbulencias en el aire que mueve las aspas.

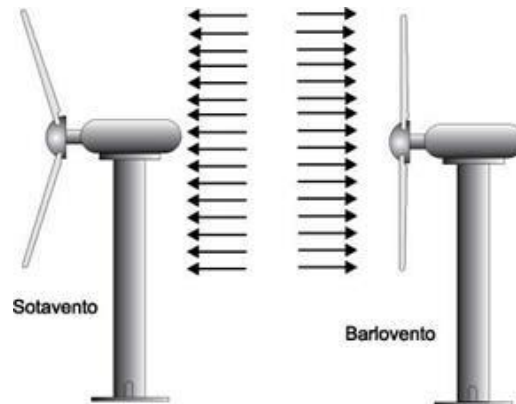


Figura 3.6. Modelos de aerogeneradores horizontales, a sotavento y a barlovento [50].

### 3.3.4 Modelado de la turbina eólica

La cantidad de energía del viento aprovechada por el rotor depende de la densidad del aire, el área del rotor y la velocidad del viento. En la Figura 3.7 se puede observar los principales parámetros necesarios para el modelado de un sistema de generación eólico.



Figura 3.7. Modelado del aprovechamiento energético de una turbina

#### 3.3.4.1 Potencia obtenida del viento

Para modelar la turbina eólica se parte del cálculo de la potencia disponible en el viento. La potencia eólica se calcula evaluando la energía cinética ( $E_c$ ) de la masa de aire ( $m$ ) con densidad ( $\rho$ ) que atraviesa, por unidad de tiempo, el tramo barrido por las palas ( $A$ ), se parte de la ecuación (3.1) para determinar la potencia (3.4) [50].

$$P = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} v^2 \quad (3.1)$$

$$\frac{dm}{dt} = \rho \frac{dVol}{dt} = \rho A \frac{dr}{dt} = \rho A v \quad (3.2)$$

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (3.3)$$

Reescribiendo (3.3) se tiene:

$$\therefore P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (3.4)$$

Sin embargo, según el principio de la conservación de la energía, no es posible obtener toda la energía sólo una parte de esta. El límite de Betz de 0,59 especifica el porcentaje máximo de energía que se puede extraer del viento cuando se usa turbinas eólicas.

### 3.3.4.2 Curva de potencia de una turbina eólica

La curva de potencia de un aerogenerador es un gráfico que define la potencia eléctrica disponible como función de la velocidad del viento. Para obtener la potencia de los aerogeneradores es necesario adquirir la distribución de velocidades del viento en la que se ha realizado el estudio, y la curva de potencia proporcionada por el fabricante del aerogenerador.

En la Figura 3.8 se muestra las características de las curvas de potencia y en la Figura 3.9 la curva de potencia de un aerogenerador comercial. La potencia es nula hasta una velocidad mínima o de arranque, por lo general, es de 3 m/s para turbinas más pequeñas y de 5 a 6 m/s para las más grandes. La velocidad del viento nominal se alcanza en torno a los 10 a 15 m/s, y empiezan a actuar los mecanismos de limitación y la potencia de salida se mantiene constantes hasta los 20 a 25 m/s. A partir de aquí se alcanza la velocidad de corte y representa el punto en donde la potencia de salida cae rápidamente o se anula el funcionamiento, pues comienzan a actuar los mecanismos de protección, frenando el rotor para evitar daños potenciales.

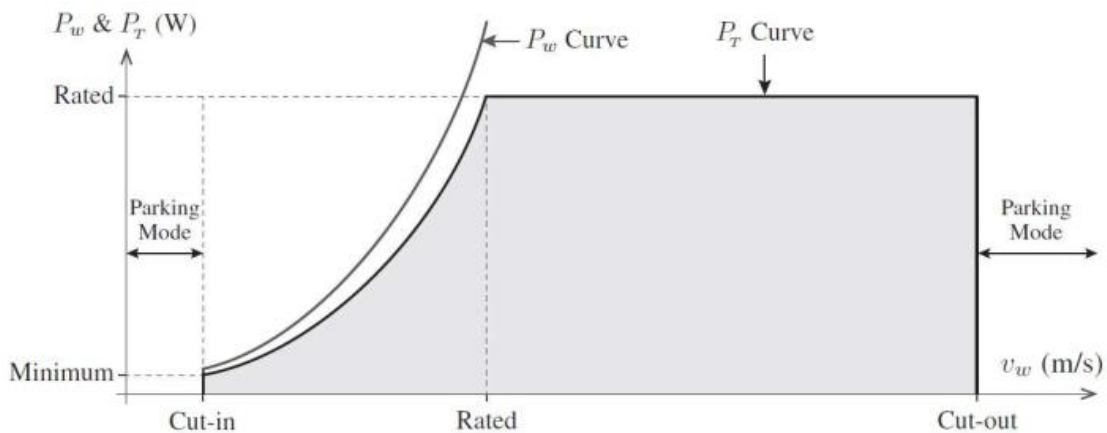


Figura 3.8. Características de una curva de potencia típica de una turbina eólica [51].

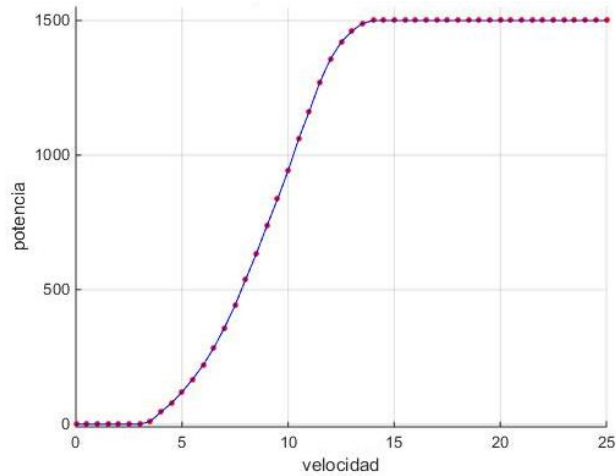


Figura 3.9. Curva de potencia de un aerogenerador AW 70-1500 Clase I [52].

### 3.3.4.3 Coeficiente de potencia

El coeficiente de potencia es un elemento muy importante dentro del modelo del aerogenerador, ya que es el factor que determina la porción de energía cinética que se puede extraer del viento. Esta porción de energía se puede definir como la relación entre la potencia transmitida a la turbina y la potencia del viento está definida por la siguiente ecuación (3.5):

$$C_p = \frac{P_t}{P_v} \quad (3.5)$$

Como se mencionó en la sección “Potencia obtenida del viento”, el límite de potencia que podrá extraer el aerogenerador será un máximo de 59.27% y se le conoce como límite de Betz.

### Cálculo de la energía generada

La energía promedio generado en un intervalo de tiempo  $t$ , se puede obtener haciendo uso de la siguiente expresión (3.6):

$$E = t * \int_{Cut-in}^{Cut-out} P(v)f(v)dv \quad (3.6)$$

Los límites de integración se obtienen de la curva de potencia característica del aerogenerador.

- Velocidad Cut-in: Velocidad de arranque del aerogenerador.
- Velocidad Cut-out: Velocidad de corte o parada del aerogenerador.
- $P(v)$ : Curva de potencia del aerogenerador.
- $f(v)$ : Distribución de probabilidad del viento.

### 3.3.5 Descripción general de una instalación de energía eólica

Una instalación de generación eólica conectada a la red dispone de un conjunto de equipos, aparataje y sistemas que permiten su conexión a la red y su correcto funcionamiento. Como se mencionó en la sección 2.4.5, sobre la energía eólica, existen desarrollos específicos para generación distribuida, llamados energía minieólica, estas miniturbinas abarcan rangos desde poco más de 1 kW, según su diseño o fabricante, la energía de estas turbinas puede ser en AC o DC.

Según el tipo de instalación, de forma muy general, se puede distinguir entre instalaciones eólicas conectadas a red e instalaciones eólicas aisladas de red (Figura 3.10). Las conectadas a red están formadas por un generador eólico y un sistema de acondicionamiento de potencia, encargado de transformar la energía en forma de corriente continua a corriente alterna, en caso de turbinas DC, para turbinas AC, adapta la energía a las características de la red de distribución. Los sistemas de acondicionamiento de potencia son el inversor y el transformador, que deben cumplir todos los requisitos de seguridad y garantizar que su operación no provoque alteración o reduzca la integridad de la red eléctrica, contando para ello con las funciones de protección correspondientes.

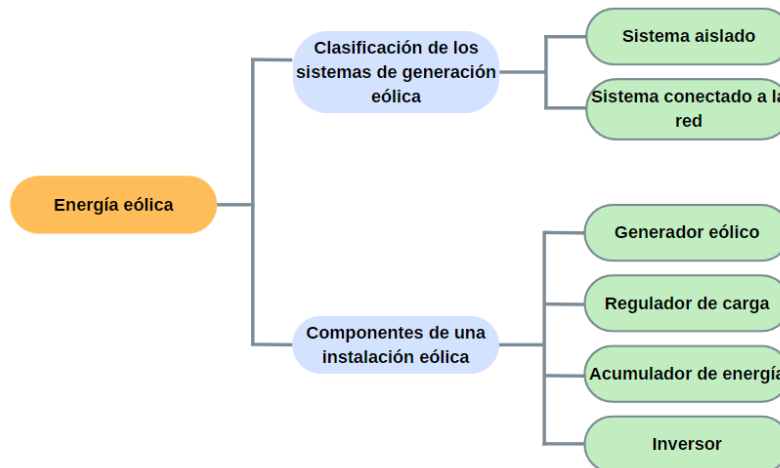


Figura 3.10. Clasificación y componentes de una instalación eólica.

En la Figura 3.11 se puede ver un esquema general de un sistema eólico de autoconsumo. Esta instalación cuenta con generador eólico, sistema de acumulación, sistema de regulación, sistema de conversión, éstos dos últimos integran principalmente el subsistema de interconexión, permite la gestión y distribución de la energía obtenida del generador eólico. Un sistema conectado a la red no necesariamente cuenta con un sistema de acumulación, solo es necesario los elementos de potencia que le permitan adaptar la energía a las especificaciones de la red de distribución.

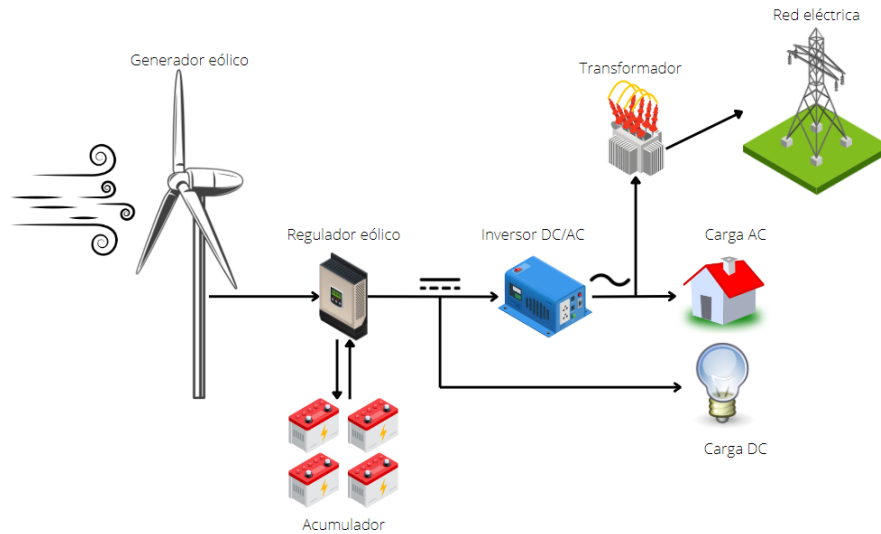


Figura 3.11. Esquema general de sistema eólico distribuido.

### 3.4 Panel fotovoltaico como sistema de generación

Para la implementación del panel fotovoltaico como mecanismo de generación de energía, se realiza un análisis de su principio de funcionamiento y un modelado del mismo.

#### 3.4.1 Funcionamiento del panel fotovoltaico

Los paneles fotovoltaicos son el medio o transductor por el cual se puede convertir la energía solar en energía eléctrica. Estos módulos fotovoltaicos están formados por un conjunto de células semiconductoras, las cuales, al captar la radiación solar la convierten en electricidad. El proceso por el cual se hace esta transformación es conocido como efecto fotovoltaico y consiste básicamente en el desprendimiento de electrones al incidir la energía lumínica (fotones) sobre el material semiconductor, estos electrones comienzan a circular libremente en el material, generando así energía electromotriz (voltaica), la tensión producida se puede medir por la diferencia de potencial en los extremos del material semiconductor. Cada celda tiene la capacidad de generar una corriente entre 2 a 4A y una tensión entre 0,46 y 0,48 V.

Las células de los paneles solares pueden estar elaboradas de silicio monocristalino, policristalino o amorfo con adición de impurezas de otros elementos químicos, siendo el monocristalino el que presenta un mejor rendimiento. Las celdas conforman un arreglo en serie y paralelo para aumentar la tensión (comúnmente 12 a 36 V) y la corriente hasta un valor de potencia deseado. El aprovechamiento de la energía transformada depende del diseño e instalación de los módulos, ya que de ello se basará en su orientación, inclinación, ubicación para captar mayor radiación solar.

#### 3.4.2 Partes del panel fotovoltaico

Un módulo o panel fotovoltaico es un grupo o arreglo de células conectadas tanto en serie como en paralelo para obtener valores específicos de tensión y corriente. A este arreglo de células se les agrega aislamiento, protección, rigidez y hermeticidad para protegerlos del clima exterior, que puede afectar el equipo cuando se instala al aire libre. Los módulos están formados por los componentes que se muestran en la Figura 3.12.

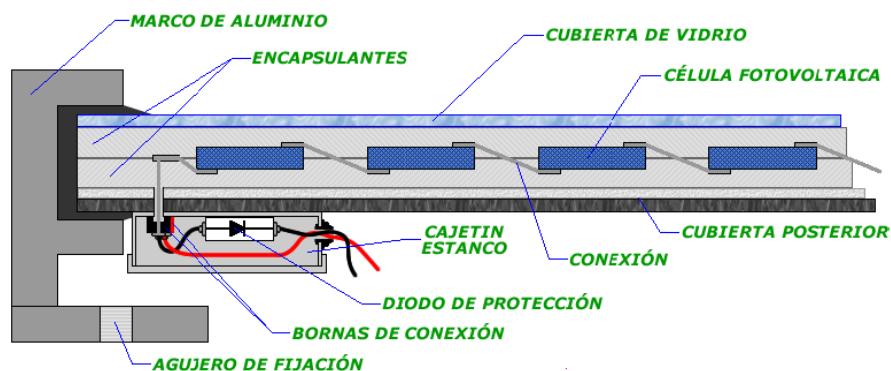


Figura 3.12. Componentes de los paneles fotovoltaicos [53].

**Cubierta:** la cubierta del panel puede ser de acrílico o vidrio templado y anti reflectante, lo cual permite que más del 90% de la luz lo atraviese, reduciendo el reflejo considerablemente para poder hacer una conversión de potencia mayor. La cubierta les proporciona protección a las células frente a los agentes externos como la lluvia, granizo, arena, entre otro.

**Marco metálico:** suelen estar fabricados en aluminio o acero inoxidable para dar rigidez y estanqueidad al panel, y contienen elementos de montaje con una estructura externa que soportan el panel y se encargan de fijar todos los componentes del panel, siendo capaz de soportar los esfuerzos generados por el viento principalmente.

**Encapsulado:** material en el que se encuentran las células, debe poder transmitir bien la luz solar y no degradarse por este motivo, es decir, debe presentar resistencia a la fatiga térmica.

**Células solares:** son los encargados de convertir la energía procedente de la radiación solar en energía eléctrica. Están conectados en serie-paralelo y generan una corriente a partir del efecto fotoeléctrico. Pueden romperse por estrés térmico o carga mecánica, afectando las conexiones eléctricas internas.

**Sellado:** suele ser un compuesto de polietileno, con el cual se garantiza la estanqueidad de los cuatro laterales del módulo.

**Cubierta posterior:** por lo general están fabricadas en polímero (de fluoruro de polivinilo), un material que aporta rigidez y protección frente a elementos externos, al igual que la cubierta frontal. Sin embargo, también hay modelos que utilizan este material con un vidriado diferente.

**Caja de terminales:** caja situada en la parte posterior del panel y a través de la cual se transmitirá la electricidad generada al resto de la instalación eléctrica, a través del cableado y las bornas de conexión.

**Diodos de protección:** elementos que protegen a las células fotovoltaicas de un cambio de la polaridad de la corriente, evitando su daño. Normalmente están incluidos en la caja de terminales.



### 3.4.3 Modelado y curvas características del panel fotovoltaico

La representación estándar de un dispositivo fotovoltaico es la curva característica de corriente-tensión (curva I-V) o una curva de potencia, Figura 3.13. La curva I-V representa los valores de tensión y corriente medidos experimentalmente, de un panel fotovoltaico sometido a unas condiciones ambientales determinadas de insolación y temperatura.

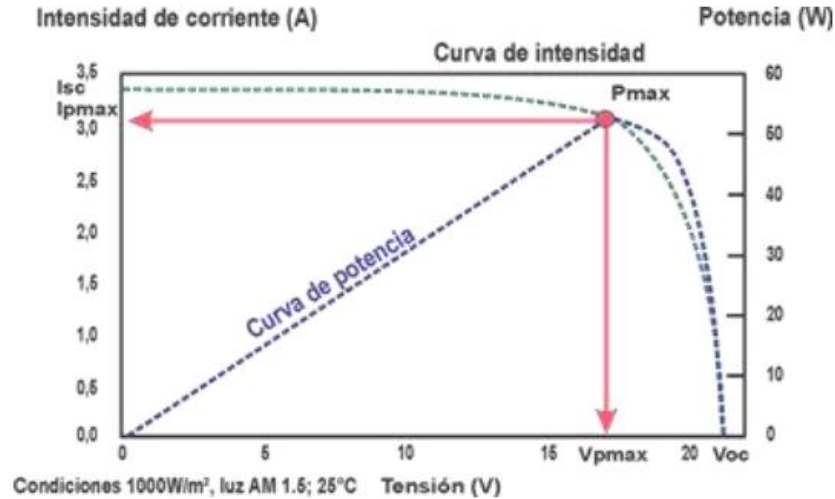


Figura 3.13. Curva características, con sus principales parámetros [54].

#### 3.4.3.1 Parámetros eléctricos

**I<sub>SC</sub>, "Short Circuit current"**: se define como la corriente de cortocircuito, es la intensidad máxima que puede ofrecer la célula fotovoltaica cuando la tensión entre los terminales es cero. Este punto corresponde al momento en el que la resistencia de la carga llega a un valor de 0 ohmios, o lo que es lo mismo, un cortocircuito entre sus terminales.

**V<sub>OC</sub>, "Open Circuit Voltage"**: se define como la tensión de circuito abierto, es el voltaje máximo que puede proporcionar la célula fotovoltaica cuando el panel no está conectado a ninguna carga externa o no circula corriente por él.

**P<sub>Max</sub>, "Maximum Power"**: también denominado MPP (*Maximum Power Point*), es el punto en el cual la célula fotovoltaica ofrece su máxima potencia, es decir, la potencia que se genera cuando la corriente y la tensión son I<sub>Pmax</sub> y V<sub>Pmax</sub>, ecuación (3.7) Este valor se corresponde con el pico de la curva de P-V.

$$P_{Max} = V_{Pmax} * I_{Pmax} \quad (3.7)$$

**I<sub>Pmax</sub>, "Maximum power current"**: también denominado I<sub>PMM</sub>, es la corriente que forma parte de las coordenadas del punto Pmax.

**V<sub>Pmax</sub>, "Maximum Power Voltage"**: también denominado V<sub>PMM</sub>, es la tensión correspondiente al punto de máxima potencia P<sub>max</sub>.

Aparte de los parámetros anteriores ya mencionados existen otros dos de importancia, el factor de forma y la eficiencia energética.

El factor de forma se define como la relación entre la potencia máxima teórica y la potencia real (ecuación (3.8)). Permite tener una idea de la calidad del dispositivo fotovoltaico, siendo este mejor cuánto más alto sea su factor de forma. Puede calcularse con la siguiente expresión:

$$FF = \frac{V_{Pmax} \cdot I_{Pmax}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (3.8)$$

En el caso de las células cristalinas su valor ronda entre el 0.70 y el 0.85, mientras que en las células amorfas su valor ronda entre 0.50 y 0.70, siendo su valor ideal la unidad.

En cuanto a la eficiencia energética o  $\eta$ , ecuación (3.9), se define como la relación entre la potencia máxima que el panel puede entregar y la potencia de la radiación solar incidente.

$$\eta = \frac{P_{Max}}{S * a} \quad (3.9)$$

Donde,

- **S** es la irradiancia incidente (W/m<sup>2</sup>)
- **a** es el área ocupada por los módulos (m<sup>2</sup>)

Estos parámetros eléctricos de un módulo FV, que deben ser especificados por el fabricante, son obtenidos sobre unas condiciones concretas de trabajo.

- Irradiancia incidente: 1000 W/m<sup>2</sup>;
- Temperatura de la célula: 25°C;
- Masa de aire: AM 1.5.

### 3.4.3.2 Efecto de la irradiancia

Además del tipo de célula, uno de los parámetros que hace que cambien las curvas características de los módulos fotovoltaicos es la radiación incidente sobre ellos, y cuanto mayor es el valor de la irradiancia, más energía se genera, sin embargo, el valor del  $I_{SC}$  también cambia notablemente como se observa en la Figura 3.14, mientras que el valor del voltaje de circuito abierto cambia ligeramente.

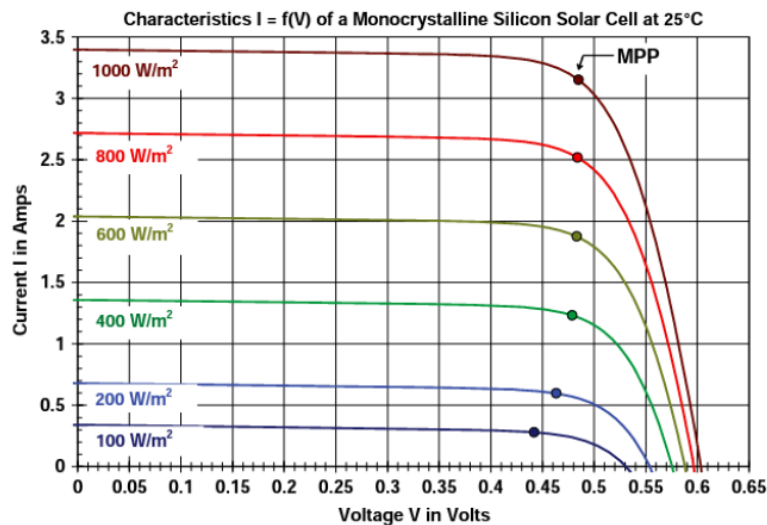


Figura 3.14. Curvas I-V para distintos valores de irradiancia [55].

### 3.4.3.3 Efecto de la temperatura

El cambio de temperatura afecta principalmente los valores de voltaje de la curva característica IV, especialmente al voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ), el punto de máxima potencia y la corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ), también los modifica, aunque este último en menor medida. En la Figura 3.15 se puede observar la variación de la curva característica I-V de un módulo fotovoltaico al variar la temperatura.

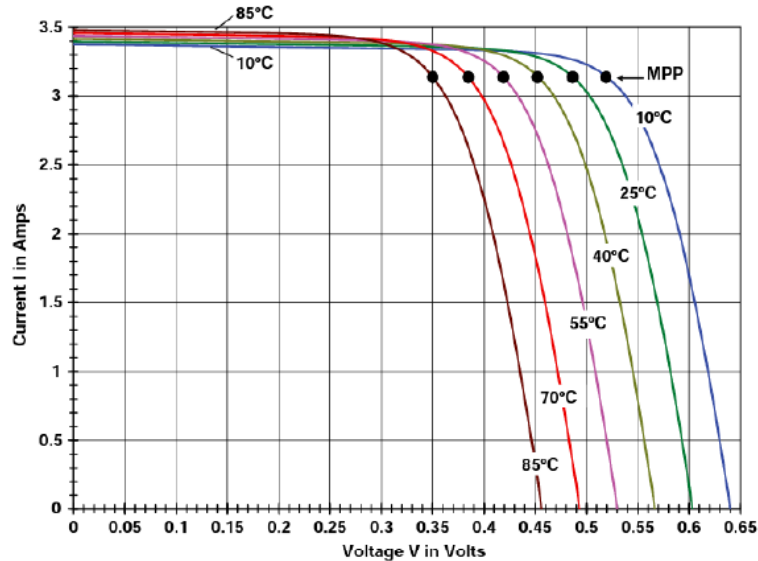


Figura 3.15. Curva I-V para distintas temperaturas [55].

### 3.4.3.4 Circuito equivalente de una celda solar

El circuito eléctrico equivalente de una celda solar es representado en la Figura 3.16, consta generalmente de una fuente de corriente foto generada por acción de la radiación solar ( $I_L$ ), un diodo (D) que representa la unión p-n del semiconductor, una resistencia en paralelo ( $R_p$ ) y una resistencia en serie ( $R_s$ ). El diodo invertido hace que se obtenga una curva exponencial negativa, sin embargo, la fuente de corriente desplaza la curva del diodo invertido hacia arriba, permitiendo así obtener la curva característica de I-V, tal como se observa en la Figura 3.17.

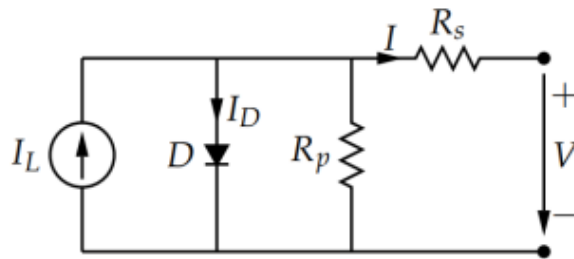


Figura 3.16. Representación eléctrica de una celda solar [56].

Los parámetros eléctricos de corriente, tensión y corriente de saturación del diodo son descritas respectivamente por las siguientes ecuaciones: (3.10), (3.11) y (3.12):

$$I = I_L - N_p * I_D * \left[ e^{\frac{V + I * R_s}{V_t}} - 1 \right] - \frac{V + I * R_s}{R_p} \quad (3.10)$$

$$V_t = m * N_s * k * \frac{T_1 + 273}{qe} \quad (3.11)$$

$$I_D = \frac{I_{SC} - \frac{V_{OC}}{R_p}}{e^{\frac{V_{OC}}{V_t}} - 1} \quad (3.12)$$

Donde,

- **N<sub>s</sub>**: es el número de celdas en serie del panel solar.
- **N<sub>p</sub>**: es el número de celdas en paralelo del panel solar.
- **k**: es la constante de Boltzman.
- **qe**: es la carga del electrón.
- **m**: es el factor de idealidad del diodo (1 < m < 2).
- **T<sub>1</sub>**: es la temperatura de trabajo del panel solar en °C.
- **R<sub>p</sub>**: es la resistencia en paralelo.
- **R<sub>s</sub>**: es la resistencia en serie.
- **I<sub>L</sub>**: es la corriente fotogenerada.
- **I<sub>sc</sub>**: es la corriente de cortocircuito.
- **I<sub>D</sub>**: es la corriente inversa de saturación del diodo.
- **V<sub>oc</sub>**: es la tensión de circuito abierto

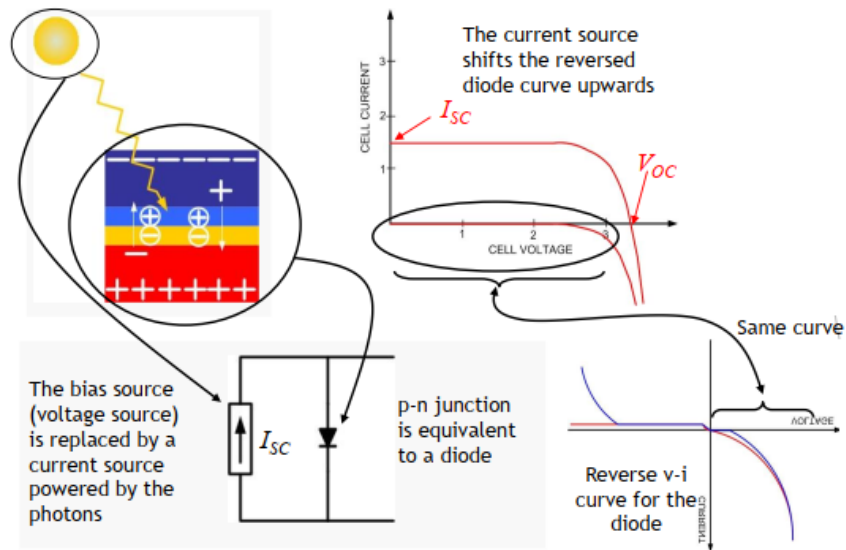


Figura 3.17. Física de la células solares [53].

#### 3.4.4 Descripción general de una instalación fotovoltaica

La Figura 3.18 muestra un diagrama sobre la clasificación de los sistemas fotovoltaicos y los componentes que se suelen usar comúnmente. Los componentes para el montaje de una instalación fotovoltaica pueden variar según la clasificación del sistema. Una instalación solar fotovoltaica se puede clasificar en dos tipos o sistemas de operación: sistema aislado y sistema conectado a la red.

Los componentes que conforman una instalación fotovoltaica principalmente son [9]:

**Sistema de generación:** consiste en paneles o módulos compuestos por células fotovoltaicas de material semiconductor conectadas entre sí, que captan la radiación solar y transforman la luz (fotones) en energía eléctrica (electrones).

**Sistema de regulación de carga:** Dispositivo adjunto al sistema de almacenamiento de energía, es el encargado de proteger la batería de sobrecargas y sobredescargas. Además, monitoreará constantemente el estado de carga de la batería y ajustará su intensidad para extender el tiempo de vida útil.

**Sistema de acumulación:** es un componente opcional para sistemas conectados a la red. El sistema que mejor se adapta a este tipo de generación es la batería de plomo-ácido. Ésta se encarga de proporcionar energía durante las horas de poca o ninguna luz solar, almacena el exceso de energía y satisface la demanda máxima instantánea.

**Sistema de interconexión** (inversor, protecciones y contador).

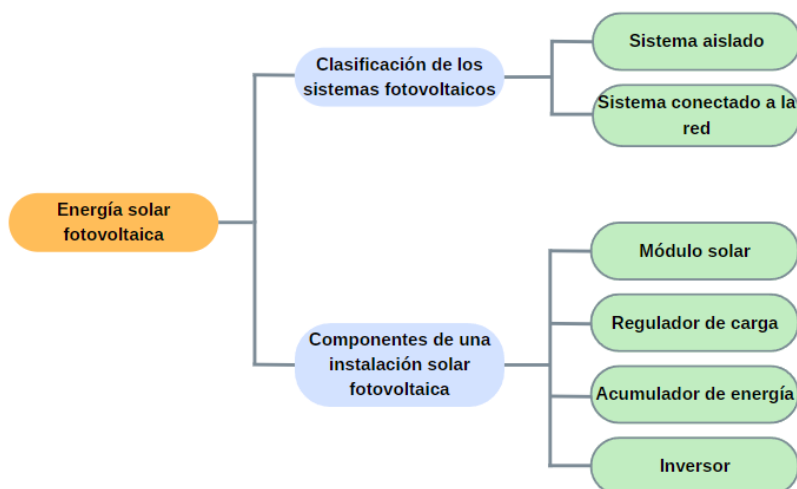


Figura 3.18. Clasificación y componentes de una instalación fotovoltaica.

Los sistemas aislados (Figura 3.19) se utilizan generalmente en lugares donde no se puede acceder a la red de distribución de energía eléctrica, estos sistemas requieren una serie de componentes que permitan la regulación y almacenamiento de la producción solar. El sistema acumulador son baterías, en un 90% corresponden a las estacionarias del tipo Plomo – Ácido, que con un mantenimiento adecuado se adaptan perfectamente a los sistemas de generación.

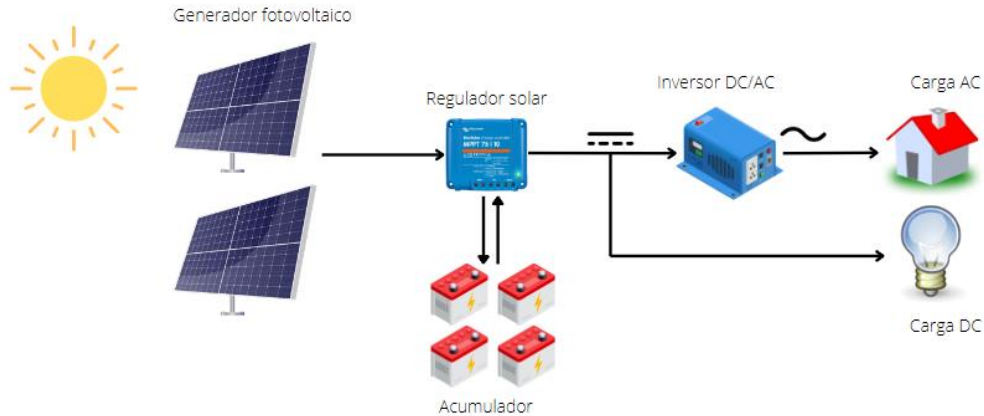


Figura 3.19. Esquema básico de conexión de una instalación fotovoltaica aislada.

Las instalaciones conectadas a red están formadas por un generador fotovoltaico y un sistema de acondicionamiento de potencia, encargado de transformar la energía en forma de corriente continua a corriente alterna, con las características de la red de distribución. Dentro los sistemas conectados a la red existen otras dos clases: **central fotovoltaica y generador con autoconsumo**.

- **Central fotovoltaica:** Generalmente de gran tamaño, como una granja solar, no necesita sistema de acumulación, son de bombeo directo, es decir, toda la energía producida por los paneles es vertida a la red eléctrica (Figura 3.20).

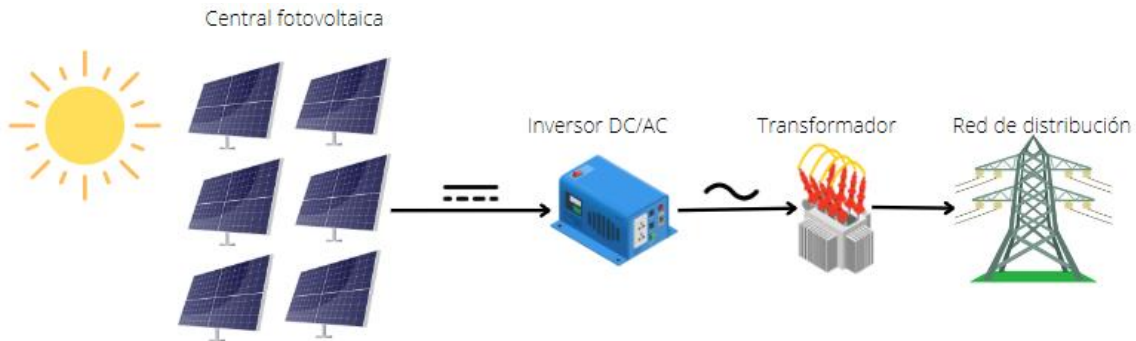


Figura 3.20. Representación de una central fotovoltaica.

- **Generador con autoconsumo:** parte de la electricidad producida es consumida por el propio productor (en una vivienda, por ejemplo) y el resto se vierte a la red. Al mismo tiempo, el productor hace de consumidor extrayendo de la red la energía necesaria para cubrir su demanda cuando la unidad no le suministra la suficiente, ver Figura 3.21. Este tipo de sistema requiere otros componentes adicionales como un medidor bidireccional para permitir el registro del consumo y vertido de energía a la red, y un sistema de interconexión para el correcto enlace y conmutación entre el sistema fotovoltaico y la red.

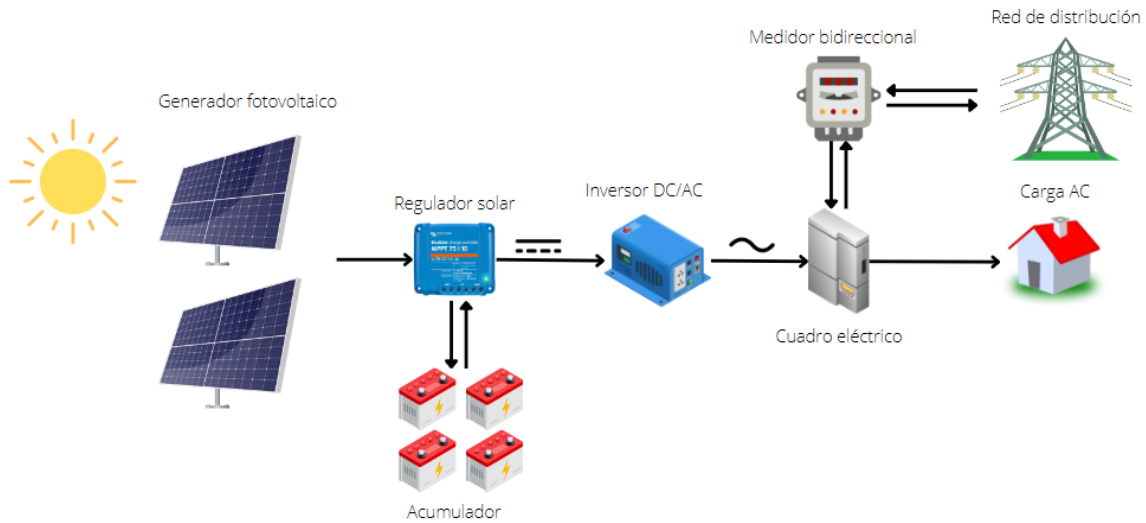


Figura 3.21. Sistema fotovoltaico conectado a la red con autoconsumo.

### 3.4.5 Módulo fotovoltaico adquirido

El módulo fotovoltaico seleccionado está formado por silicio monocristalino, debido a que las celdas fabricadas con este material presentan un mayor rendimiento, es decir, permite obtener un mejor aprovechamiento en la conversión de la energía solar a eléctrica.

En la Figura 3.22 se puede ver el módulo fotovoltaico adquirido, éste presenta un coeficiente de baja tensión-temperatura mejora el funcionamiento a altas temperaturas y buen rendimiento con baja luminosidad y alta sensibilidad a la luz en todo el espectro solar.

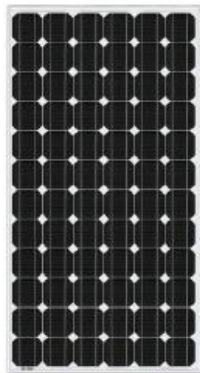


Figura 3.22. Módulo fotovoltaico Victron 30W-12V (Victron).

Teniendo en cuenta las condiciones de funcionamiento se selecciona dos paneles de 30W – 12V cada uno, esto permite obtener voltajes de regulación entre 12 y 24 V según su tipo de conexión (panel aislado, serie o paralelo). Además, las pequeñas dimensiones de estos paneles permiten cumplir con las condiciones de portabilidad para su uso en interiores (*indoor*) y exteriores (*outdoor*). En la tabla I se puede observar sus principales características.

Tabla 3.1. Especificaciones del módulo solar [57].

Descripción	Peso neto	Rendimiento eléctrico bajo STC				
		Potencia nominal	Tensión de potencia máx.	Corriente de potencia máx.	Tensión de circuito abierto	Corriente de cortocircuito
30W-12V Mono 560 x 350 x 25mm series 4a		$P_{MPP}$	$V_{MPP}$	$I_{MPP}$	Voc	Isc
	Kg	W	V	A	V	A
	2.2	30	18.7	1.61	22.87	1.76
Tipo de celda		Monocrystalina				
Número de celdas en serie		36				
Tensión máxima del sistema (V)		1000V				
Coeficiente de temperatura de MPP(%)		-0.45/°C				
Coeficiente de temperatura de Voc (%)		-0.35/°C				
Coeficiente de temperatura de Isc (%)		+0.04/°C				
Rango de temperatura		Entre -40°C y +85°C				
Capacidad de carga máxima en su superficie		200 kg/m <sup>2</sup>				
Resistencia máxima al impacto		23 m/s, 7.53 g				

### 3.5 Sistema de generación híbrida solar-eólica

La energía híbrida consiste en la combinación de diferentes fuentes de energía eléctrica, bajo una misma instalación, aprovechando las ventajas de cada una de ellas y complementándose entre sí, minimizando por lo tanto los inconvenientes o defectos que se pueden presentar en períodos de tiempo determinados en vista de las condiciones climáticas.

El principio de funcionamiento de los sistemas híbridos que combinan energía fotovoltaica con energía eólica es el mismo que una instalación solar o eólica independiente (tal como se describieron en las anteriores secciones 3.3 y 3.4), pero con la ventaja que optimizan las mejores condiciones del viento y el sol. De igual manera pueden ser instalaciones conectadas a la red o aisladas de esta. Los componentes principales del sistema híbrido son el aerogenerador, el generador fotovoltaico, el inversor, el regulador de carga y el sistema de acumulación, este último de gran utilidad si se quiere tener autonomía de la planta ante la posibilidad de no darse las condiciones atmosféricas adecuadas para la generación, o como sistema de apoyo ante averías o mantenimiento de la instalación.

#### 3.5.1 Descripción general de una instalación híbrida

Como se dijo anteriormente, una instalación híbrida solar y eólica combina la generación de estas dos fuentes de energía. De la misma manera este sistema se clasifica según su tipo de conexión: aislado o conectados a la red (Figura 3.23). Según sea el tipo de conexión los componentes que le conforman pueden variar: los sistemas aislados (o autoconsumo) normalmente están equipados con un sistema de acumulación. Los sistemas conectados a la red están equipados de dispositivos que permiten la integración de la energía de forma segura a la red.



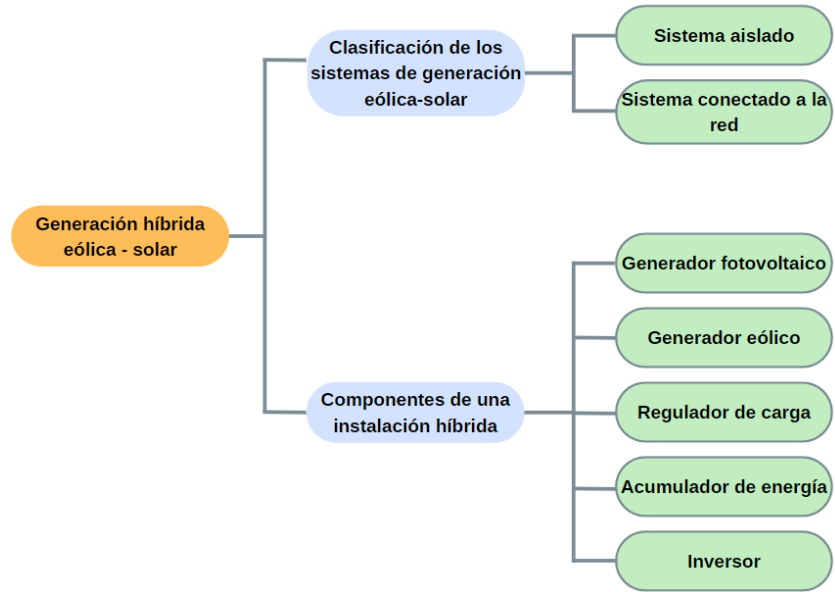


Figura 3.23. Clasificación y componentes de una instalación híbrida eólico - fotovoltaica.

En la Figura 3.24 se puede observar un esquema general de una instalación híbrida conectada a la red, el número y clase de dispositivos puede variar según el tipo configuración del sistema. El generador eólico puede ser de corriente continua o alterna y tendrá consigo un sistema de regulación que puede ser independiente o común al del generador fotovoltaico. El funcionamiento de cada uno de los componentes es el mismo que el descrito en las fuentes independiente de energía eólica y solar.

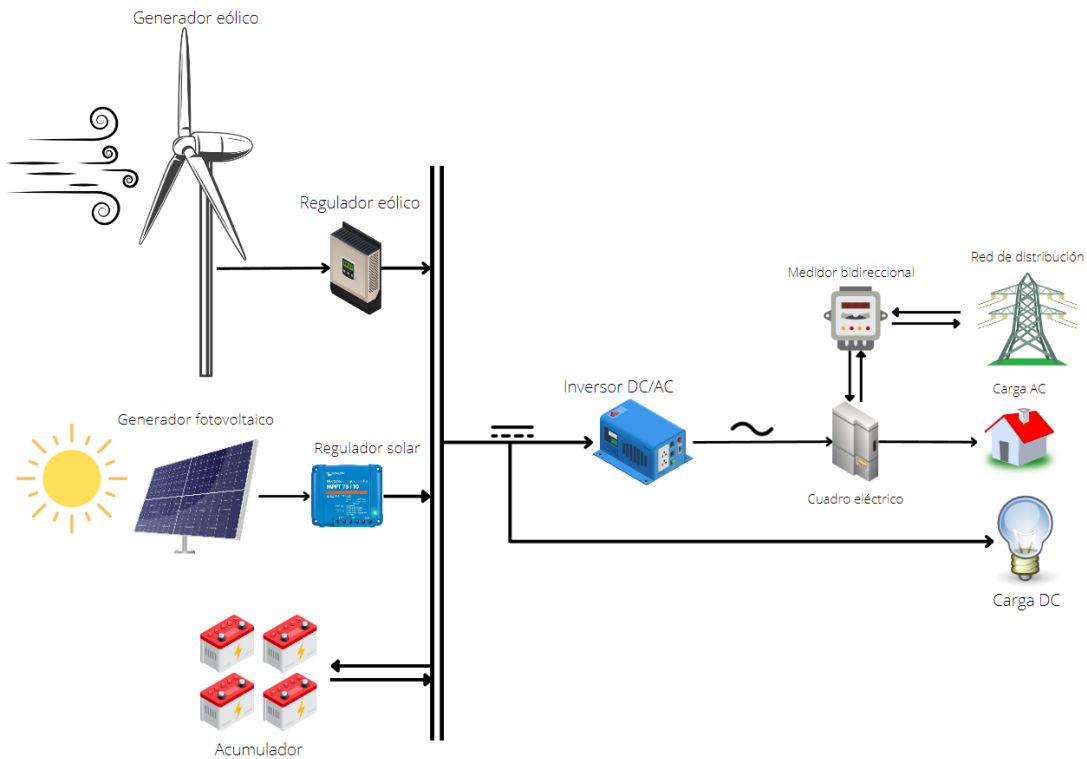


Figura 3.24. Esquema general de una instalación híbrida eólico-fotovoltaica.

## 3.6 Sistema de interconexión

El sistema de interconexión lo compone una serie de dispositivos encargados de permitir que las fuentes generadoras de energía y los dispositivos de almacenamiento estén correctamente conectados al punto de consumo y a la red eléctrica. Principalmente está conformado por un regulador de carga y un inversor. En el prototipo propuesto al tratarse de un sistema aislado de la red y de carga DC, no incluye el inversor DC/AC en el sistema de interconexión, sin embargo, se realiza la explicación de este y las consideraciones a tener en cuenta para su integración en un trabajo futuro.

### 3.6.1 Inversor

Es un convertidor de tensión y corriente continua en tensión y corriente alterna. Debe ser capaz transformar diferentes tensiones continuas dentro de un determinado rango, generalmente de 12 a 48V, a las características de la red o punto de consumo. Además, proporciona protección contra sobrecargas, cortocircuitos, inversión de polaridad y garantiza la calidad de energía suministrada, también proporciona aislamiento galvánico entre la parte de continua y alterna.

La potencia del inversor estará determinada en función de la potencia de consumo de la carga AC y del rendimiento del inversor, puede ser determinada con la siguiente expresión (3.13):

$$P_{INV} = \frac{P_{consumoAC}}{\eta_{INV}} \quad (3.13)$$

Donde,

- $P_{INV}$ : Potencia del inversor
- $P_{consumoAC}$ : Potencia de consumo de la carga en AC
- $\eta_{INV}$ : Rendimiento del inversor, dada por el fabricante

#### 3.6.1.1 Parámetros eléctricos del inversor

**Tensión nominal:** es la tensión máxima de trabajo que admite el inversor proveniente del regulador o del acumulador, según la arquitectura de conexión implementada.

**Potencia nominal:** es la potencia de operación que puede alcanzar el inversor.

**Capacidad de sobrecarga:** período durante el cual puede entregar potencia extra superior a la nominal, de utilidad ante potencias punta o picos de consumo de cargas más exigentes, por ejemplo: en el arranque de un motor.

**Rendimiento:** es la relación entre la potencia que proporciona el inversor para el consumo en corriente alterna y la potencia que necesita este inversor de entrada (sistema de almacenamiento).

**Forma de onda:** dependiendo del tipo de inversor utilizado, la corriente alterna a la salida del inversor tendrá una forma específica, generando una forma de onda que caracteriza su funcionamiento. Actualmente, los inversores deben presentar un formato tipo de corriente alterna normalizado con una onda sinusoidal pura.

### 3.6.2 Regulador de carga

Un controlador de carga es un dispositivo que controla y gestiona el voltaje y la corriente suministrada por los generadores al sistema de acumulación. El regulador tiene como objetivo proteger el sistema de almacenamiento frente a sobrecarga y sobredescargas, optimizando con esto el proceso de carga y la vida útil del dispositivo.

Los dos principales tipos de reguladores son los **PWM** y el **MPPT**, el primero realiza bien su función de protección del sistema de almacenamiento, efectúa desconexiones cuando la batería alcanza su valor máximo o mínimo permitido, evitando así la sobrecarga y sobredescarga del dispositivo acumulador, pero su principal desventaja es que no permite una optimización de estos procesos (carga/descarga), además trabaja con la misma tensión nominal entre el generador y las baterías, esto hace que no siempre se trabaje a la potencia máxima del generador causando un bajo rendimiento de la instalación. Por el contrario, el **MPPT**, además de una correcta protección de las baterías, optimiza el proceso de carga y descarga, ajustando el voltaje del generador al requerido por el acumulador de forma eficiente, de tal forma que este regulador trabaja siempre en el punto de máxima potencia de la instalación (solar/eólico).

#### 3.6.2.1 Parámetros de regulación

**Voltaje máximo de regulación:** es la máxima tensión que el regulador permite suministrarle a la batería.

**Intervalo de histéresis superior:** es la diferencia entre la tensión máxima regulada y la tensión a la que el controlador deja pasar toda la corriente generada por el generador.

**Voltaje de desconexión:** voltaje al que la carga del consumidor se corta automáticamente para evitar la sobrecarga de la batería.

**Intervalo de histéresis inferior:** es la diferencia entre el voltaje de desconexión y el voltaje al que se permite que la carga se vuelva a conectar a la batería.

#### 3.6.2.2 Valores de control del regulador

**Carga inicial:** durante la fase de carga inicial, el regulador proporciona la máxima corriente de carga para cargar rápidamente el acumulador. Durante esta etapa, el voltaje de la batería aumentará progresivamente. Una vez que el voltaje de la batería alcanza el voltaje de absorción especificado, la fase de carga inicial se detiene y comienza la fase de absorción.

**Carga de absorción:** en esta fase el regulador va reduciendo la corriente de carga progresivamente hasta que la batería esté completamente cargada.

**Carga de flotación:** durante la fase de flotación el sistema acumulador está plenamente cargado y el regulador opera a un voltaje bajo constante, proporcionando la corriente necesaria para compensar la autodescarga.

**Carga de ecualización:** tras un bajo estado de carga la batería recibe una ligera sobrecarga controlada para igualar el voltaje de las celdas que componen la batería.

### 3.6.2.3 Parámetros eléctricos del regulador

El regulador puede cargar una batería de tensión nominal inferior a partir de unas placas FV de tensión nominal superior. El regulador ajustará automáticamente a la tensión de la batería y la cargará con una corriente que llegue hasta su valor nominal.

**Intensidad máxima de carga:** corriente máxima de paso permitida por el regulador desde el generador fotovoltaico hasta el acumulador.

**Tensión nominal:** el valor de la tensión del sistema fotovoltaico para el que está diseñado el regulador. Hay reguladores que tienen la capacidad de establecer el rango de voltaje mencionado antes, generalmente de 12 a 48 voltios.

**Intensidad nominal:** corriente que proviene del sistema generador que puede ser controlada por el regulador fotovoltaico.

### 3.6.2.4 Regulador fotovoltaico adquirido

El dispositivo adquirido (Figura 3.25) es un regulador fotovoltaico con seguimiento de máxima potencia, regulador MPPT. Posee un protocolo de comunicación conocido como VE.Direct, que consiste, básicamente, en transmitir la información en formato de texto, también puede transmitir la información en formato hexadecimal, pero esto último lo hace como respuesta a un comando hexadecimal enviado por el usuario, si pasados unos segundos el regulador no ha vuelto a recibir ningún comando hexadecimal válido, automáticamente el regulador transmite de nuevo en formato tipo texto. La conexión del regulador con el ordenador o algún controlador de generación solar se puede hacer por medio de la interfaz VE.Direct a USB.

Este regulador es un cargador de tres fases: carga inicial, absorción y flotación, sus características eléctricas se pueden observar en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Características eléctricas del regulador fotovoltaico

Modelo de cargador solar	Tensión FV máxima	Corriente de carga de la batería máxima	Tensiones adecuadas de la batería
MPPT 75/10	75 V	10 A	12 y 24V
<b>Características eléctricas</b>			
Corriente de carga nominal		10A	
Potencia FV nominal, 12V 1a,b)		145W	
Potencia FV nominal, 24V 1a,b)		290W	
Máxima corriente de corto circuito FV 2)		13A	
Desconexión automática de la carga		Sí	
Eficiencia máxima		98%	
Autoconsumo		12V: 25 mA 24V: 15 mA	
Tensión de carga de "absorción"			
Tensión de carga de "flotación"		13,8V / 27,6V (ajustable)	
Puerto de comunicación de datos		VE.Direct	



Figura 3.25. Regulador MPPT 75|10 Victron (Victron)

El fabricante del regulador es el mismo que el del módulo fotovoltaico (Victron Energy). Entre las principales características de técnicas se destacan las siguiente:

- **Detección automática de la tensión de la batería:** detecta automáticamente una tensión del sistema de 12, 24 o 48 V en el primer encendido.
- **Algoritmo MPPT:** seguimiento ultrarrápido del punto de máxima potencia (MPPT), recoge un 30 % más de energía que con los cargadores solares con un controlador PWM y hasta un 10 % más que con los controladores MPPT más lentos. **Rendimiento solar óptimo**, en caso presentarse más de un punto de máxima potencia debido a condiciones climáticas desfavorables, el controlador siempre maximizará el punto la captación de energía fijándose al punto de máximo
- **Eficiencia de conversión:** la eficiencia máxima supera el 98 %. La corriente de salida máxima está garantizada hasta una temperatura ambiente de 40°C sin la necesidad de un sistema de refrigeración.
- **Amplia protección electrónica:** presenta protección frente a exceso de temperatura. La salida alcanza su valor nominal hasta una temperatura ambiente de 40 °C (104 °F). En caso de un aumento de la temperatura por encima de los 40°C la corriente de salida empieza a reducirse. Además, el regulador dispone de protección de la polaridad inversa FV y de la corriente inversa FV.
- **Aplicación VictronConnect:** La aplicación VictronConnect puede usarse para:
  - Monitorizar el cargador solar y ver datos en tiempo real del conjunto solar y de la batería.
  - Activar funciones del cargador solar.
  - Acceder a un historial de datos y errores de hasta 30 días.
  - Configurar los ajustes del cargador solar.
  - Actualizar el firmware.

### 3.7 Sistema de almacenamiento

El sistema de almacenamiento elegido es el elemento más común usados en instalaciones de autoconsumo, la batería. Este sistema es recargado por la energía generada en los paneles y almacenado a través de un regulador de carga y mediante el mismo regulador se proporciona la

energía para el consumo. El proceso de funcionamiento se resume en el diagrama de bloques de la Figura 3.26.

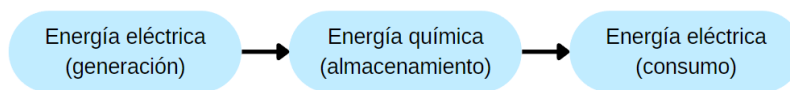


Figura 3.26. Proceso de funcionamiento de las baterías.

Las funciones del sistema de almacenamiento son:

- Almacenar energía cuando la generación es mayor a la demanda.
- Proporcionar energía eléctrica al sistema cuando los paneles no generan la electricidad necesaria.
- Proporcionar una potencia instantánea elevada.

### 3.7.1 Parámetros eléctricos del sistema de almacenamiento

**Capacidad:** es el valor del total de energía eléctrica que puede alcanzarse en una descarga completa del acumulador eléctrico cuando éste tiene un estado de carga total. Su unidad de medida es el Amperio-hora [Ah].

**Tensión:** diferencia de potencial entre los polos positivo y negativo del acumulador, parámetro fundamental que define si la batería cumplirá con el uso que se le dará. La tensión entregada puede ir desde los 2 hasta los 12 voltios y será suministrada en forma de corriente continua.

**Estado de carga (SOC):** Es la capacidad disponible de energía, se mide en porcentaje.

**Profundidad de descarga (DOD):** La profundidad de descarga es la cantidad de energía que se obtiene durante una descarga estando en carga total (%). Cuanto mayor sea la profundidad de esta descarga, menor será la vida útil de la batería. La descarga completa de la batería puede dañarla y perder parte de su capacidad de almacenamiento.

**Número de ciclos:** son el número de ciclos de carga – descarga del sistema de almacenamiento y determina el tiempo de vida de la batería.

**Autodescarga:** proceso mediante el cual la batería tiende a descargarse sin estar en uso, se mide en porcentaje la cantidad de carga disipada por unidad de tiempo.

### 3.7.2 Sistema acumulador adquirido

La batería adquirida (Figura 3.27) pasa ser usada como sistema de almacenamiento, es una batería AGM (*Absorbet Glass Mat*) son otro tipo de baterías de válvula de control cerrada (VRLA). Son una evolución de las baterías de plomo – ácido y no requiere mantenimiento. Las baterías AGM o baterías VRLA son muy útiles para las instalaciones solares que conllevan una elevada intensidad de descarga de las baterías. Las características de la batería AGM la definen como una batería de plomo-ácido sellada y recargable que no requiere mantenimiento ni ventilación, lo que convierte a la batería VRLA en una excelente opción para los sectores fotovoltaico, industrial, comercial y de uso doméstico.



Figura 3.27. Batería AGM Super Cycle 12V - Victron Energy.

La pasta de las placas positivas de esta batería es menos sensible al reblandecimiento, incluso en caso de repetidas descargas completas de la batería, y la composición de su electrolito reduce la sulfatación en caso de descarga profunda. La batería *AGM Super Cycle* posee una baja resistencia interna incluso ligeramente inferior a otras baterías AGM. Las características del sistema de almacenamiento se pueden ver en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Características del acumulador.

Tensiones de carga recomendadas							
		Float Service	Cycle service Normal			Cycle service Fast recharge	
<b>Absorción</b>			14,2 – 14,6 V			14,2 – 14,6 V	
<b>Flotación</b>		13,5 – 13,8 V	13,5 – 13,8 V			13,5 – 13,8 V	
<b>Almacenamiento</b>		13,2 – 13,5 V	13,2 – 13,5 V			13,2 – 13,5 V	
Especificaciones							
Nº de artículo	V	Ah C5 (10,8V)	Ah C10 (10,8V)	Ah C20 (10,8V)	L x A x Al mm	Peso kg	Terminales
BAT412025081	12	22	24	25	181 x 77 x 175	6,5	Inserto M5
Profundidad de descarga DOD							
Profundidad de descarga %				Número de ciclos			
100				≥300			
60				≥700			
40				≥1000			

### 3.8 Sistema de caracterización

Se sabe que, en todos los sistemas fotovoltaicos, es muy importante considerar las variables que intervienen y el rendimiento que la instalación tendrá. Considerando lo anterior es fundamental la representación estándar de sus parámetros. El sistema de caracterización (Figura 3.28) será el sistema de medida que permitirá obtener los parámetros eléctricos y las curvas características de los módulos solares, así como también estudiar y analizar la influencia de las principales variables climáticas que influyen sobre la generación de energía de estos módulos fotovoltaicos.

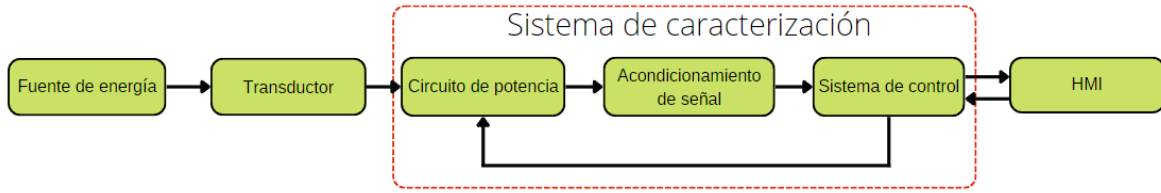


Figura 3.28. Diagrama de bloques del sistema de caracterización.

El sistema de caracterización funciona de modo general de la siguiente manera: el circuito de potencia provee el medio para la captación de las señales de interés (tensión y corriente), posteriormente se realiza un acondicionamiento de la señal para garantizar que los valores medidos por los sensores sean los mismos que le llegan al sistema de control, este último sistema se encarga del tratamiento y registro de los datos así como su transmisión a la interfaz gráfica, también envía la orden al circuito de potencia para la captación de nuevos datos.

### 3.8.1 Circuito de potencia

El circuito de potencia tiene como función recibir la energía eléctrica proveniente del generador fotovoltaico y proporcionar las condiciones necesarias para la captura de los valores de tensión y corriente y poder realizar con éstos el trazado de las curvas características I-V y P-V de los paneles.

Para poder registrar los valores de tensión y corriente necesarios para el trazado de las curvas se requiere tener diferentes valores de cargas para provocar un cambio en la corriente entregada y el voltaje generado por el panel. Como se describió en la sección 3.4.3.4 el circuito equivalente de una celda solar corresponde a una fuente de corriente continua, aprovechando esta naturaleza se puede usar como carga elementos resistivos (resistencia variable), capacitivo o inductivos, cualquiera de estos elementos permite simular una carga variable y con ello sensar las señales de interés.

El elemento elegido como carga es el capacitor, se selecciona la carga capacitiva porque permite obtener con facilidad parámetros característicos del módulo fotovoltaico como lo son el voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) y la corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ). Esto se logra gracias a la cualidad que tiene los capacitores de funcionar como un cortocircuito cuando está descargado y como circuito abierto cuando está completamente cargado.

Al iniciar el proceso de carga el voltaje inicial del capacitor es igual a 0 y la corriente es máxima, ya con esto se puede determinar la corriente de cortocircuito  $I_{sc}$ , es decir,  $V=0$  e  $I=I_{sc}$ . Durante el proceso de carga el capacitor se comporta como una resistencia variable provocando variaciones de tensión en el módulo fotovoltaico hasta completar su carga, en este punto el voltaje será máximo y la corriente será igual a 0, determinando así el voltaje de circuito abierto  $V_{oc}$ , es decir,  $V=V_{oc}$  e  $I=0$ .

Las ecuaciones características (3.14) y (3.16) describen el proceso de carga del capacitor y la descarga es descrita por (3.15) y (3.17):

$$\text{Carga, } V(t) = V_f \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (3.14)$$

$$I(t) = \frac{V_f}{R} \left( e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (3.16)$$

$$\text{Descarga, } V(t) = V_i \left( e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (3.15)$$

$$I(t) = -\frac{V_i}{R} \left( e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (3.17)$$



Donde,

- $V(t)$ : es la tensión en el condensador.
- $V_i$ : es la tensión o diferencia de potencial eléctrico inicial ( $t=0$ ) entre las placas del condensador.
- $V_f$ : es la tensión o diferencia de potencial eléctrico final (a régimen estacionario  $t \geq 4RC$ ) entre las placas del condensador.
- $I(t)$ : la intensidad de corriente que circula por el circuito.
- $RC$ : constante de tiempo, es la capacidad del condensador en faradios multiplicada por la resistencia del circuito en ohmios.

La ecuación característica que describe el comportamiento ideal del capacitor es (3.18):

$$i(t) = C \frac{dV(t)}{dt} \quad (3.18)$$

Donde,

- $C$ : capacitancia.
- $V(t)$ : diferencia de potencial entre sus terminales.
- $i(t)$ : corriente resultante que circula, corriente de carga.

De la ecuación anterior (3.18), se puede determinar el valor de la capacitancia en función de los parámetros característicos del panel fotovoltaico, obtenido de la hoja de datos del fabricante del módulo:

Considerando la corriente constante se obtiene la expresión (3.19):

$$\int I_C dt = \int C dV \quad (3.19)$$

Integrando,  $I_C * T = C * V \quad (3.20)$

Despejando  $C$  de (3.20) se obtiene,

$$C = \frac{I_C * T}{V} \quad (3.21)$$

Donde,

- $V$ : tensión del módulo fotovoltaico a circuito abierto
- $T$ : tiempo de carga del condensador
- $C$ : capacitancia
- $I_C$ : Corriente de carga

Reescribiendo la ecuación anterior (3.21) por los parámetros del módulo solar se obtiene (3.22):

$$C = \frac{I_{sc} T_m}{V_{oc}} \quad (3.22)$$

Donde,

- $V_{oc}$ : voltaje a circuito abierto del panel fotovoltaico.
- $T_m$ : tiempo de carga del condensador (tiempo para realizar la medición).
- C: capacitancia.
- $I_{sc}$ : Corriente de corto circuito del panel FV.

El valor de capacitancia necesario para un tiempo de carga de 50 ms y dos paneles conectados en serie seria:

$$C = \frac{1.76A * 50ms}{22.87 * 2} \approx 1.92 \text{ mF}$$

### 3.8.1.1 Implementación del circuito de potencia

Se usa como referencia de diseño el circuito propuesto en [58] con algunas modificaciones en el valor de los componentes para que se adapte a nuestras necesidades. En [58] la carga capacitiva tiene un valor de 2.2mF, a partir de este valor se calcula el tiempo que tardaría en cargarse el condensador teniendo en cuenta los parámetros de los paneles adquiridos. Despejando  $T_m$  de la ecuación (3.22) se obtiene que el tiempo de carga es de aproximadamente de 57 ms, al ser cercano al propuesto de 50 ms, se decide trabajar con éste. Adicionalmente, se hace una simulación en Matlab (Figura 3.29) para observar las curvas características (Figura 3.30) con los valores de  $V_{oc}$  e  $I_{sc}$  del módulo fotovoltaico adquirido y con el valor de capacitancia de 2.2mF.

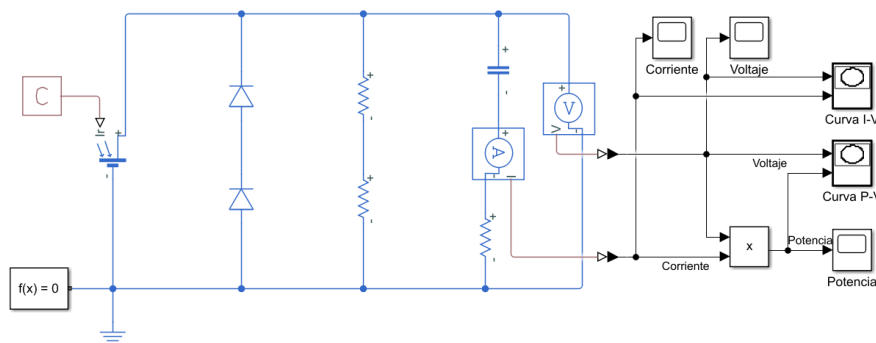


Figura 3.29. Esquema circuito de potencia – simulación.

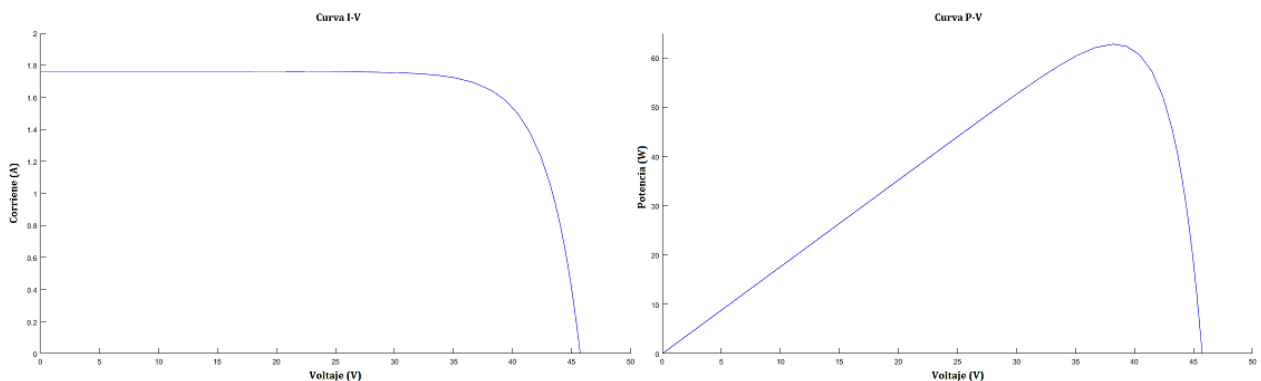


Figura 3.30. Simulación de curvas características, 2 paneles conectados en serie, carga capacitiva de 2.2mF.

El circuito implementado se puede ver en la Figura 3.31, este esquema corresponde al bloque “Circuito de Control” del sistema de caracterización. La conexión de los paneles fotovoltaicos al

circuito se puede realizar a través del conector J2 (Conn\_PV) en cualquier configuración: panel aislado, serie o paralelo. Los diodos Schottky DS1 y DS2 proporcionan protección frente a polarización inversa de los módulos. R1 – R2 y R3 – R4 son divisores de tensión que adaptan la tensión a un rango permitido por el ADC, estos dos pares de resistencias son los puntos de sensado de tensión y corriente respectivamente. El sensor de corriente (conectores J6 y J5) da su valor en función del voltaje, por ello también se le implementa el divisor de tensión.

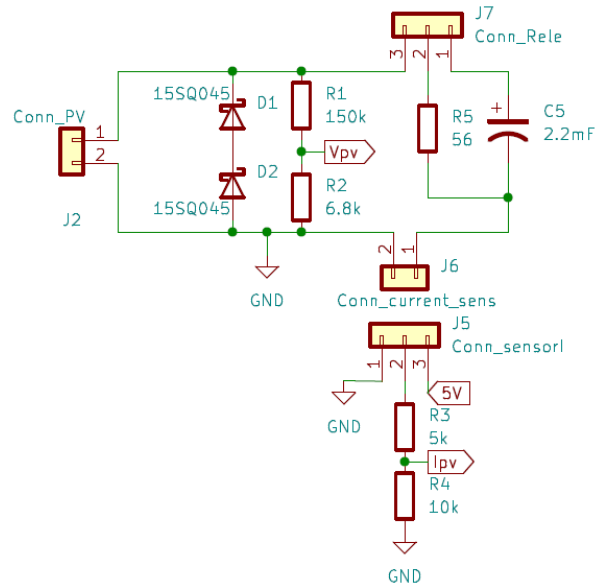


Figura 3.31. Esquema circuito de potencia implementado.

En cuanto a la carga capacitiva (C5) desempeña su función en conjunto con el relé (J7 Conn\_Rele). Los terminales 1, 2 y 3 de J7 respectivamente son los terminales: común, normalmente cerrado y normalmente abierto. Su modo de operación es el siguiente:

1. **Estado de reposo:** el interruptor se encuentra en estado abierto, terminales 2 y 3 en contacto, por lo tanto, no hay tensión en el capacitor y no hay lecturas del ADC.
2. **Carga del condensador:** se cierra el interruptor, terminales 1 y 3 en contacto, como respuesta a la señal enviada por el microcontrolador. El ADC realiza las lecturas de corriente y tensión.
3. **Descarga del condensador:** terminales 2 y 3 vuelven a estar en contacto una vez terminada las lecturas de datos, el condensador se descarga a través de la resistencia R5. Vuelve al estado inicial y listo para la siguiente medición.

### 3.8.2 Acondicionamiento de la señal e implementación

El acondicionamiento de la señal es la etapa intermedia entre el circuito de potencia y el sistema de control y adquisición de datos, la interconexión entre estos dos sistemas es necesaria para adaptar la señal a las especificaciones del microcontrolador.

Las señales por tratar son tres: voltaje, corriente y temperatura del módulo solar. Se busca con el acondicionamiento garantizar un nivel adecuado de la señal y con esto proporcionar protección al ADC, ya que éste solo permite una tensión máxima de entrada de 3V. Lo anterior se logra

repartiendo la tensión medida entre dos impedancias, es decir, implementado divisores de tensión, su esquema se puede ver en la Figura 3.32 y la ecuación que la describe (3.23). En la Tabla 3.4 se puede ver los valores máximos de tensión de entrada y salida de las señales a sensor.

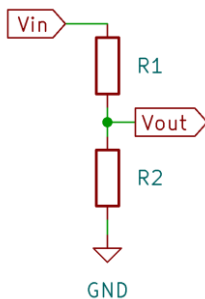


Figura 3.32. Esquema de un divisor de tensión y ecuación característica.

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.23)$$

Teniendo en cuenta las especificaciones del regulador adquirido, el cual solo permite tener un voltaje máximo de entrada de 75V, lo que equivaldrían a un máximo de tres módulos de 12V conectados en serie, es decir, 3 paneles conectados en serie producirían un voltaje de circuito abierto de  $V_{oc}=68.61$  V, se dimensiona a 70V y se calcula los valores de resistencia dejando fijo  $R_1=150$  k $\Omega$  y obteniendo un  $R_2= 6.72$  k $\Omega$ , se elige el valor de  $R_2=6.8$  k $\Omega$  por ser su valor comercial más próximo (Figura 3.33, izquierda).

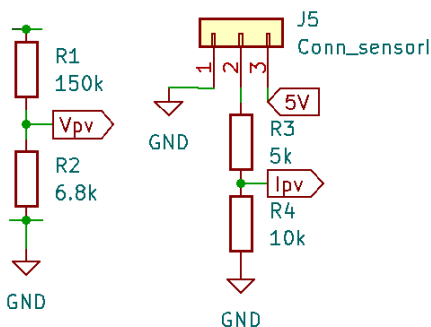


Figura 3.33. Divisores de tensión: izquierda módulos FV, derecha sensor de corriente.

El sensor de corriente utilizado es de efecto hall y da el valor de la corriente en función del voltaje. Este sensor entrega un valor de tensión máximo de 4.5 V para un valor de corriente máxima de 5A. Para adaptar los 4.5 V se implementa el divisor de la Figura 3.33, derecha.

El sensor de temperatura es un tipo de termistor con coeficiente de temperatura negativo (NTC), es decir, su resistencia disminuye a medida que aumenta la temperatura. El valor de resistencia del sensor NTC usado es 10 k $\Omega$ .

Tabla 3.4. Valores de tensión de entrada y salida de los sensores.

	Voltaje máximo entregado (V)	Voltaje máximo de salida (V)
Tensión FV, Vpv	68.61	Vpv =2.97
Sensor de corriente, Ipv	4.5	Ipv = 3
Sensor de Temperatura	3	3

Posteriormente, para continuar con el acondicionamiento de las tres señales sensadas, se implementa amplificadores operaciones en configuración de seguidor de tensión con la intención de eliminar y/o reducir ruidos y perturbaciones, además de garantizar que el valor de los datos sensados sean del mismo valor que el registrado por el ADC. En la Figura 3.34 se puede ver la implementación de los seguidores para el voltaje y la corriente (en función del voltaje) de los módulos fotovoltaicos, sus salidas son PA1 y PA2 respectivamente. La salida de estos seguidores son la entrada a los terminales del ADC. De la misma manera se implementa un seguidor para el sensor de temperatura (Figura 3.35), la salida de este seguidor irá conectado al terminal 3 del ADC (PA3).

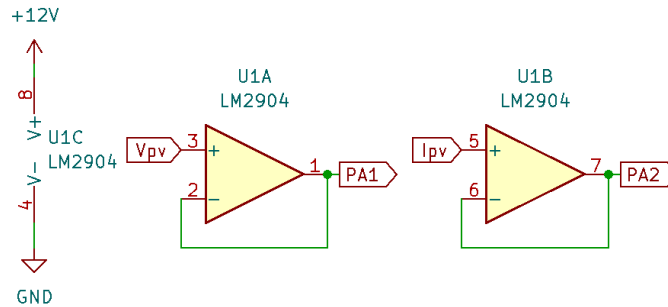


Figura 3.34. Acondicionamiento del voltaje y corriente de panel fotovoltaico.

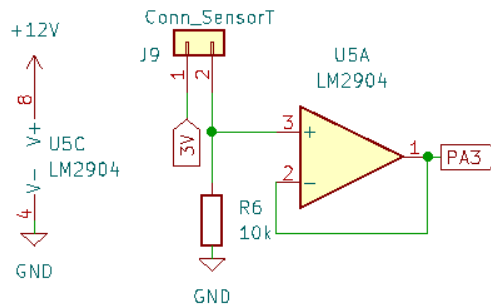


Figura 3.35. Acondicionamiento del sensor de temperatura NTC.

### 3.8.3 Sistema de control

El sistema de control es el último bloque del sistema de caracterización (Figura 3.28), su función es de control, adquisición y transmisión de las medidas. Para esto se ha empleado un microcontrolador de la familia STM32 basado en el procesador Arm<sup>®</sup> Cortex<sup>®</sup>-M, dicho microcontrolador es el STM32F411, posee una variedad de interfaces de comunicación útil para la conexión con la interfaz de usuario, y ofrece un alto rendimiento de procesamiento.

Para realizar sus funciones el microcontrolador toma las señales de los sensores, previamente acondicionadas, y lleva a cabo una digitalización de estas señales analógicas. La digitalización de los datos es necesaria para el procesamiento de la información, almacenado y su posterior transmisión al sistema HMI.

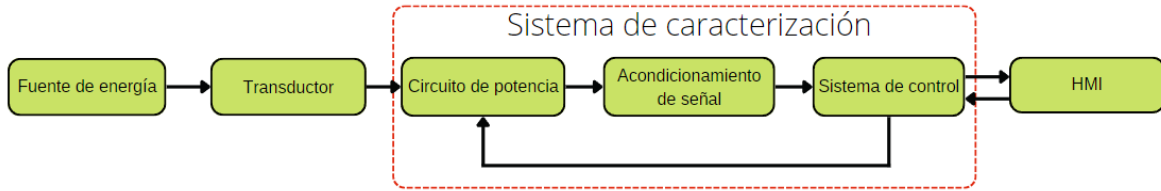


Figura 3.28. Diagrama de bloques del sistema de caracterización

### 3.8.3.1 Implementación del software

Para la implementación del software se parte por especificar cuáles son las variables para medir y las acciones a ejecutar. Como el sistema de caracterización se encarga de obtener los parámetros característicos de los módulos solares y ver la influencia de variables climáticas en la producción de energía, se toma en cuenta las siguientes mediciones y elemento a controlar:

- Medición voltaje.
- Medición corriente.
- Medición temperatura.
- Accionamiento de 1 interruptor.
- Comunicación sistema de caracterización – ordenador.

Definidas las acciones por realizar la tarjeta STM32F411, se procede a preparar el entorno de desarrollo del software. Las herramientas usadas son las ofrecidas por el fabricante de la tarjeta (*ST Microelectronics*). El conjunto de herramientas a usar es: STM32CubeMX y STM32CubeIDE. El primero es una herramienta gráfica para la configuración e inicialización del microcontrolador, el segundo es el entorno de desarrollo integrado. Este conjunto de herramientas permite un flujo de trabajo más eficiente, gracias a la facilidad de configuración de periféricos y generación de código.

En la Figura 3.36 se puede observar en el entorno de desarrollo STM32CubeIDE la aplicación gráfica STM32CubeMX la cual permite la configuración e inicialización de los recursos a usar, como lo son: ADC, puertos de comunicación y acceso a memoria (DMA). Son necesarios 3 pines para el sensado, uno por cada variable (voltaje, corriente y temperatura), 2 pines para la comunicación serial y 1 pin digital para la conmutación. En la Tabla 3.5 se puede ver la selección de pines y activación de periféricos para las ejecuciones del sistema de control.

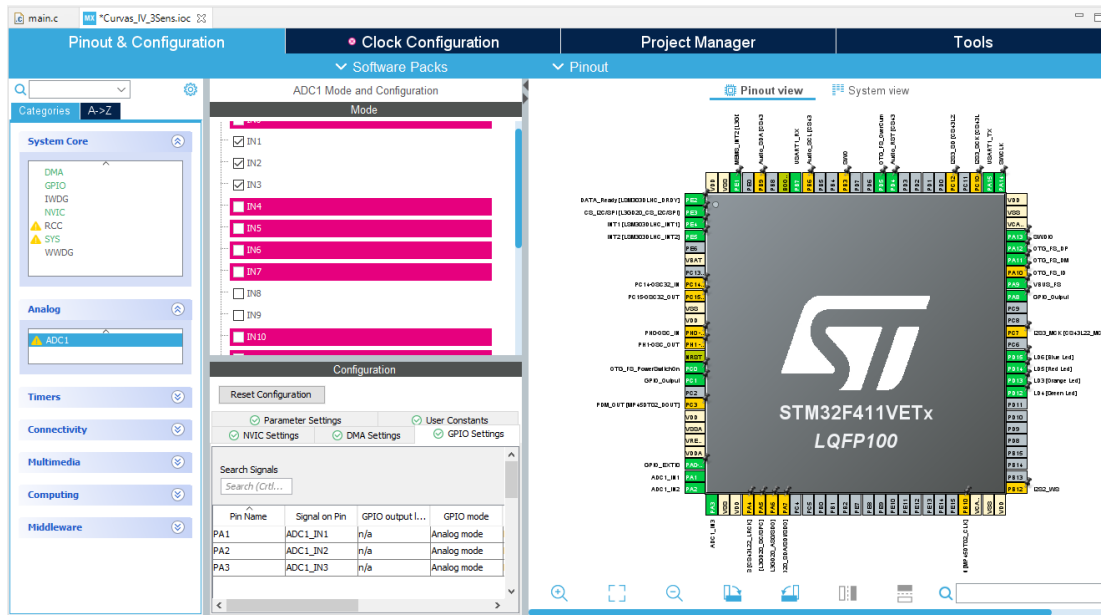


Figura 3.36. Representación gráfica de configuración del microcontrolador.

Tabla 3.5. Configuración de pines y periféricos de la tarjeta STM32F411.

Variables	Pin
Voltaje	PA1
Corriente	PA2
Temperatura	PA3
Accionamiento relé	PC1
Transmisión de datos TX	PA15
Recepción de datos RX	PB7
Periféricos	
Timer de muestreo	1ms
UART	
DMA	

En el entorno de desarrollo STM32CubeIDE se definen las variables, el número de puntos a muestrear (1000) y el conjunto de instrucciones a través del cual el microcontrolador procesará la información e interactuará con el usuario. Las instrucciones codificadas son las siguientes: comprobar si ha recibido una orden mediante UART, enviar señal de conmutación, esperar tiempo de respuesta del relé, iniciar DMA, iniciar *timer* de muestreo, almacenar lecturas de los sensores, comprobar datos válidos, transmitir información. A continuación, se muestra gráficamente la secuencia del algoritmo (Figura 3.37).

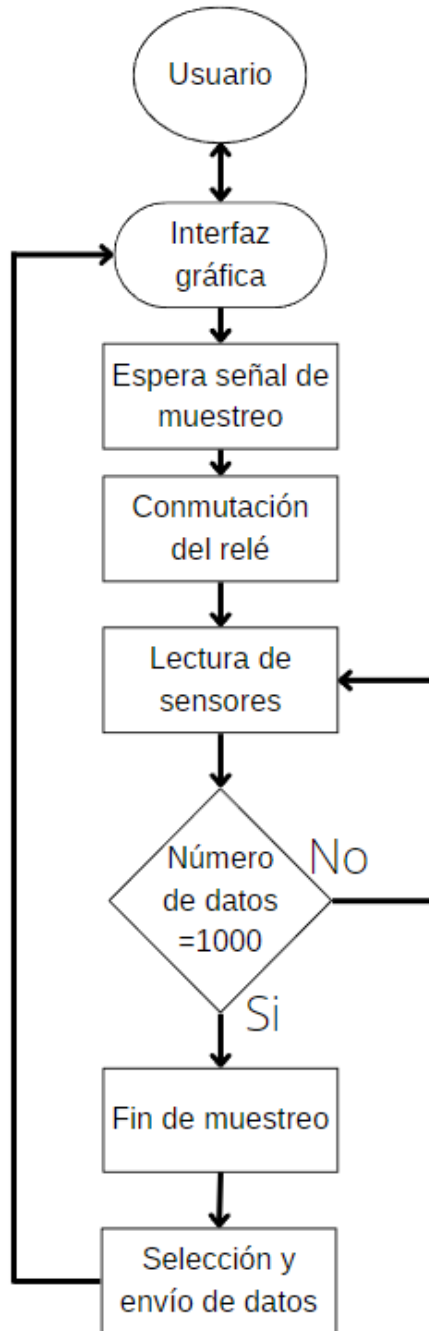


Figura 3.37. Algoritmo de operación del sistema de control.

### 3.8.3.2 Implementación del sistema de control

El circuito implementado para la gestión de la información es el correspondiente a la Figura 3.38. La descripción de su funcionamiento es el siguiente: el sistema de control tiene una comunicación bidireccional con la interfaz de usuario, el tipo de comunicación es serial, por medio de un receptor/transmisor síncrono/asíncrono, USART. El microcontrolador permanece en reposo hasta recibir la orden de graficar, orden emitida por un usuario, esta consigna es recibida por el pin RX PB7, como respuesta el microcontrolador envía una señal digital a través del pin PC1 hacia el relé,



éste realiza la conmutación pasando del estado normalmente cerrado (circuito abierto) al estado normalmente abierto (carga del condensador), esta conmutación se realiza en un tiempo aproximado de 4,5 ms. A su vez, el microcontrolador habilita el ADC para las lecturas de los sensores. El ADC realiza la lectura a través de los pines PA1, PA2 y PA3, estas lecturas tienen acceso directo a memoria (DMA). Terminada la lectura de datos, el microcontrolador procesa y transmite la información a la interfaz de usuario mediante el pin TX PA15, terminada la transmisión el microcontrolador vuelve a su estado inicial y a la espera de una nueva orden de lectura.

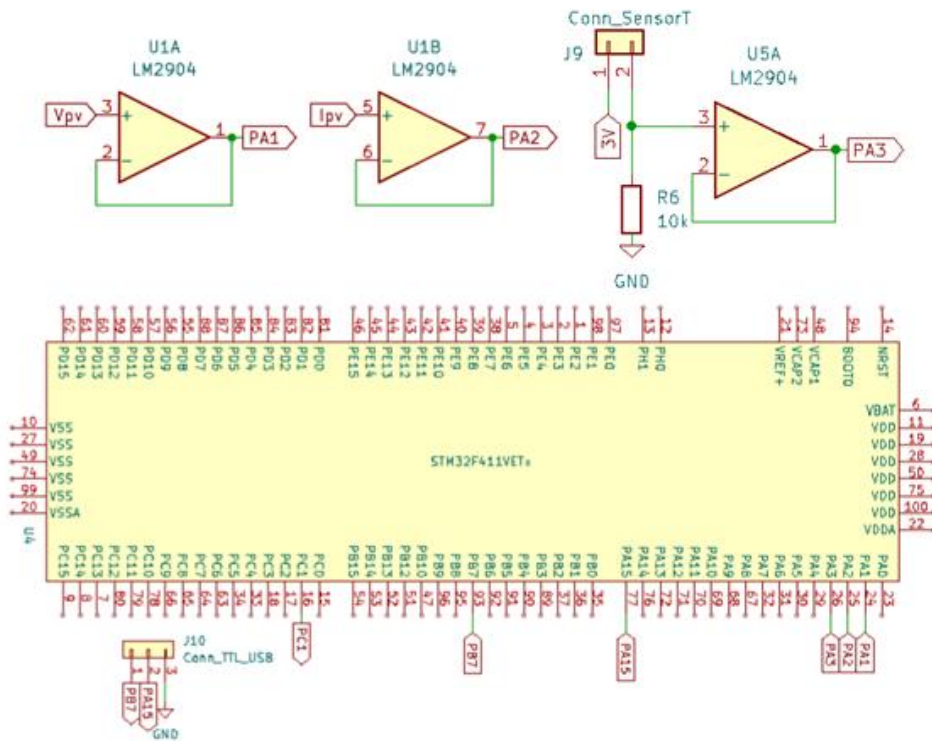

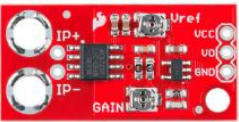
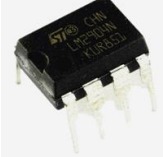




Figura 3.38. Circuito de control y de adquisición de datos.

### 3.8.4 Componentes electrónicos empleados en el sistema de caracterización

En la Tabla 3.6 se muestran los principales componentes electrónicos utilizados en la implementación del sistema de caracterización. Solo se incluye los elementos involucrados en la medición de las variables de interés.

Tabla 3.6. Componentes electrónicos del sistema de caracterización.

Componentes	Descripción	Presentación	Datasheet
STM32F411	<b>Microcontrolador.</b> Encargado de la adquisición y transmisión de los datos sensados.		[59]
ACS723	<b>Sensor de corriente.</b> Mide la corriente que circula por la carga capacitiva		[60]
LM2904	<b>Seguidor de tensión.</b> Acondiciona las señales de: tensión, corriente y temperatura.		[61]
NTC 10K $\Omega$	<b>Sensor de temperatura.</b> Mide la temperatura de los módulos fotovoltaicos		[62]
Relé G5LE	<b>Módulo de conmutación.</b> Permite la carga y descarga del condensador.		[63]

### 3.9 Diseño prototipado electrónico

El prototipado electrónico solo se diseña para la etapa de caracterización ya que en la etapa de generación no es necesario ninguna electrónica para su conexión.

En este epígrafe se integra en un esquema electrónico completo cada una de las etapas del sistema de caracterización descritos a lo largo de la sección 3.8, el esquema electrónico desarrollado se puede ver en la Figura 3.39. El sistema de adquisición y control puede ser alimentado mediante conexión USB a través de ordenador, sin embargo, para disminuir el número de elementos que se conectan a éste se implementa una etapa de alimentación del circuito. La etapa de alimentación

con entrada máxima de 12V, proporciona los siguientes valores de tensión: 12V para la etapa de acondicionamiento, 5V para alimentar el microcontrolador STM32F411 y el sensor de corriente, por último, entrega 3V para alimentar el módulo de conmutación y el sensor de temperatura. La etapa de acondicionamiento está conformada por amplificadores operacionales de referencia LM2904, estos tienen la ventaja de que no es necesario polarizarlos con una fuente de alimentación bipolar, es decir, es suficiente con alimentar el terminal positivo del amplificador para que éste entre en operación. También se integra una sección para la conexión del módulo TTL a USB.

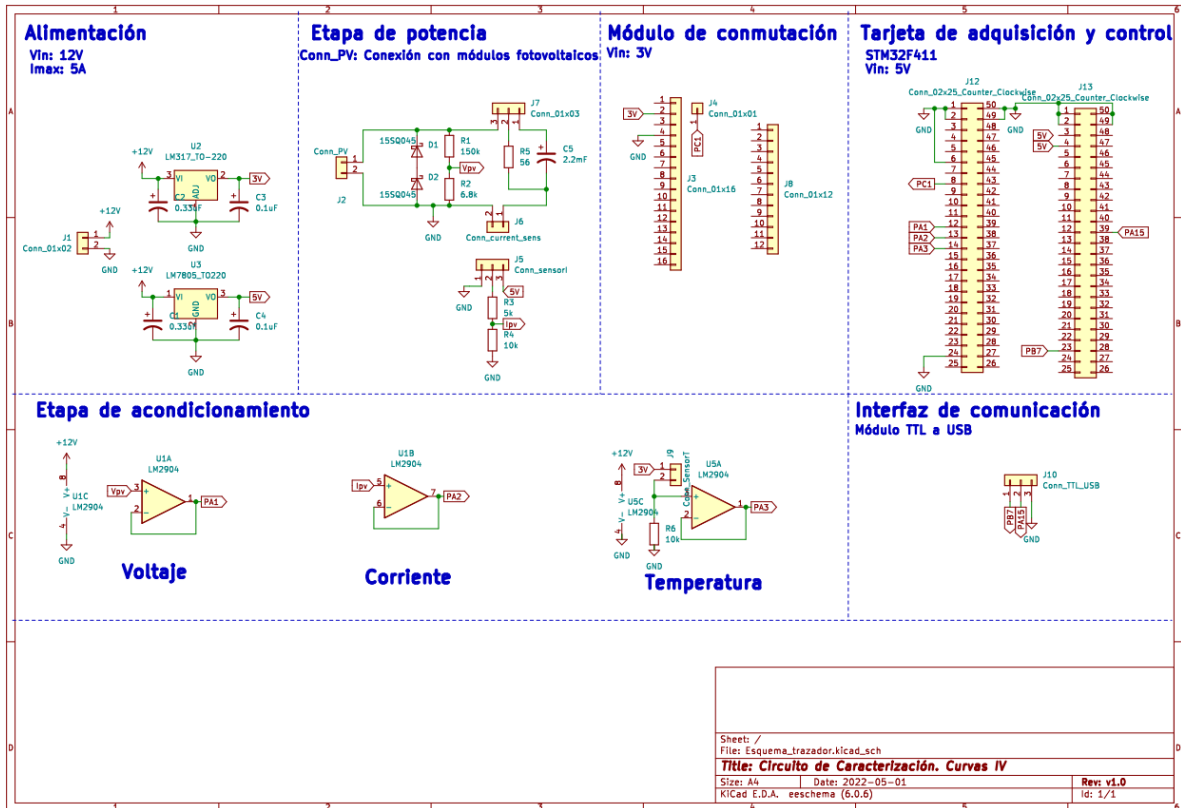


Figura 3.39. Esquema electrónico del circuito de caracterización.

### 3.10 Implementación del prototipo

Teniendo ya los esquemas y funciones de cada una de las etapas del sistema, se procede con la integración y ensamblaje de cada componente para su posterior puesta en funcionamiento y evaluación del sistema diseñado.

El sistema de generación distribuida está compuesto por el arreglo fotovoltaico, regulador de carga, interfaz de comunicación, batería y carga resistiva tal como se muestra en la Figura 3.40.



*Figura 3.40. Prototipo del sistema de generación y gestión de energía.*

El sistema de caracterización está formado por el arreglo fotovoltaico y el circuito de caracterización (Figura 3.41), este último lo conforma las etapas de potencia, acondicionamiento, adquisición y control, por último, el módulo de comunicación para la conexión con la interfaz gráfica como se observa en la Figura 3.42.



*Figura 3.41. Montaje - prototipo del sistema de caracterización.*

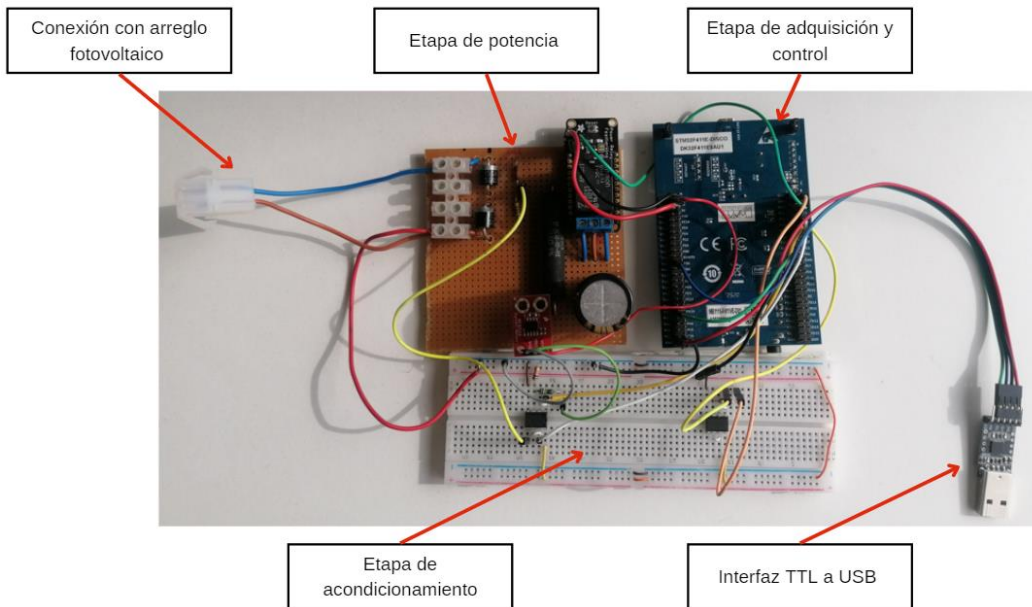


Figura 3.42. Prototipo electrónico del sistema de caracterización.

### 3.11 Interfaz de usuario

La interfaz de usuario consiste en una aplicación software de instrumentación virtual desarrollada en LabVIEW que permita el tratamiento y visualización de los parámetros y curvas características de los módulos solares, así como también los datos de la producción de energía del sistema de generación.

Para la transmisión de la información es necesario enlazar el sistema de interconexión (regulador MPPT) y el sistema de control al ordenador. El regulador fotovoltaico permite una conexión serial a través de la interfaz VE.Direct a USB, Figura 3.43 izquierda. La conexión del microcontrolador STM32F411 se hace por medio del módulo TTL a USB, Figura 3.43 derecha.



Figura 3.43. Izquierda: Interfaz VE.Direct a USB. Derecha: módulo TTL a USB.

El proceso de funcionamiento o comunicación de los sistemas de generación y caracterización, se describen mediante los siguientes diagramas: sistema de generación Figura 3.44, sistema de caracterización Figura 3.45.

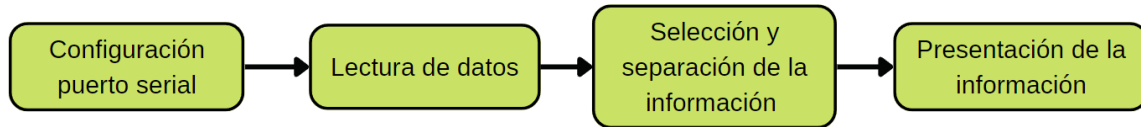


Figura 3.44. Proceso de funcionamiento de la interfaz del sistema de generación.

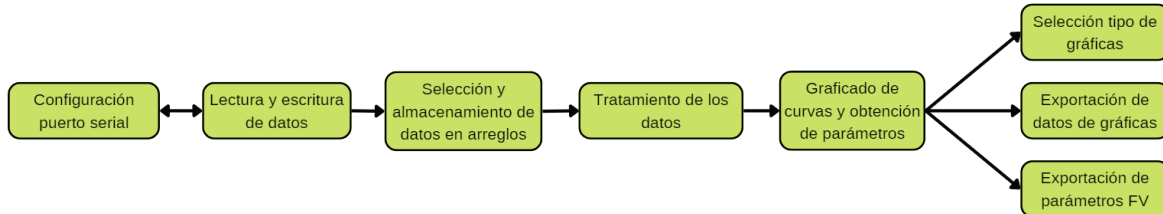


Figura 3.45. Proceso de funcionamiento de la interfaz del sistema de caracterización.

A continuación, se hace una descripción de la programación desarrollada para el tratamiento de la información y funcionamiento de la interfaz gráfica. La explicación en detalle del funcionamiento de la interfaz de usuario se describirá en el apartado de resultados.

### 3.11.1 Configuración puerto serial

Para realizar la comunicación entre regulador – ordenador y microcontrolador – ordenador es necesario configurar los puertos seriales a los que operan estos dispositivos. Este proceso es común para ambos dispositivos (regulador, microcontrolador). De la hoja de especificaciones se obtiene los siguientes parámetros de configuración, Tabla 3.7. Para el regulador estos valores son fijos, en cambio, para el microcontrolador estos indicadores pueden ser modificados en el entorno de desarrollo de la tarjeta.

Tabla 3.7. Configuración del puerto serie para el regulador MPPT y la tarjeta STM32F411.

	Regulador MPPT	STM32F411
<b>Tasa de baudios</b>	19200	115200
<b>Bits de datos</b>	8	8
<b>Paridad</b>	Ninguna	Ninguna
<b>Bits de parada</b>	1	1
<b>Control de flujo</b>	Ninguna	Ninguna

En la Figura 3.46 se puede observar los bloques que psibilitan la comunicación entre los dispositivos y LabVIEW. También se puede ver los bloques que permiten transmitir y recibir información, para el regulador MPPT no se incluye el bloque de escritura, ya que solo se reciben la información que éste envía. El microcontrolador si posee una comunicación bidireccional, escritura – lectura. El microcontrolador recibe la orden de graficar y este en repuesta envía los datos de las variables medidas.

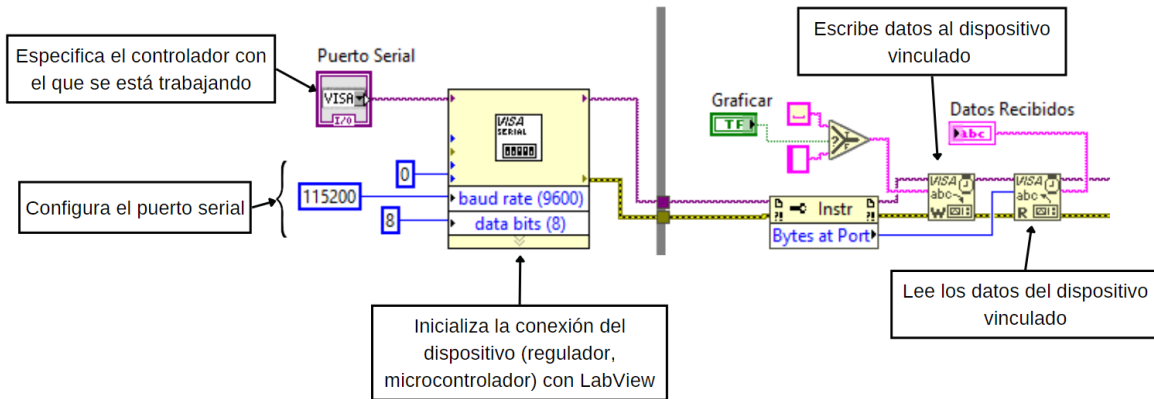


Figura 3.46. Bloques para la configuración de comunicación serial, y escritura y/o lectura de datos.

### 3.11.2 Selección y almacenamiento de datos

En esta sección se exponen las consideraciones tenidas en cuenta para la identificación y selección de los datos transmitidos tanto del sistema de interconexión como del sistema de caracterización.

#### 3.11.2.1 Selección y separación de datos del sistema de generación

El regulador MPPT transmite bloques de datos en intervalos de 1 segundo. Cada bloque transmitido posee 19 campos, cada campo enviado utiliza el siguiente formato [64]:

- <Nueva línea><Etiqueta de campo><Tab><Valor de campo>

Los identificadores se definen de la siguiente manera, Tabla 3.8:

Tabla 3.8. Identificadores de los parámetros transmitidos.

Identificador	Significado
<Nueva línea>	Un retorno de carro seguido de un avance de línea (0x0D, 0x0A)
<Etiqueta de campo>	Una etiqueta de longitud arbitraria que identifica el campo
<Tab>	Una pestaña horizontal (0x09)
<Valor de campo>	Valor en formato ASCII. El número de caracteres transmitidos depende de la magnitud y el signo del valor

Teniendo en cuenta el formato en que se transmite la información se implementa los siguientes bloques de código para la selección y separación de los parámetros de interés (Figura 3.47). Este código permite separar cada etiqueta de campo (parámetro) del bloque de datos enviado. Su proceso es el siguiente: el buffer recibe el paquete de datos conformado por 19 líneas de campo, el bloque *Match partten*, identifica la expresión coincidente con la etiqueta de campo, al confirmarse la identificación se envía como dato válido y se almacena en un arreglo, posteriormente se presenta su valor de campo. El proceso anterior se muestra en la Figura 3.47 (a) y (b), este último es un subVI, es la representación simplificada y estética del proceso antes descrito.

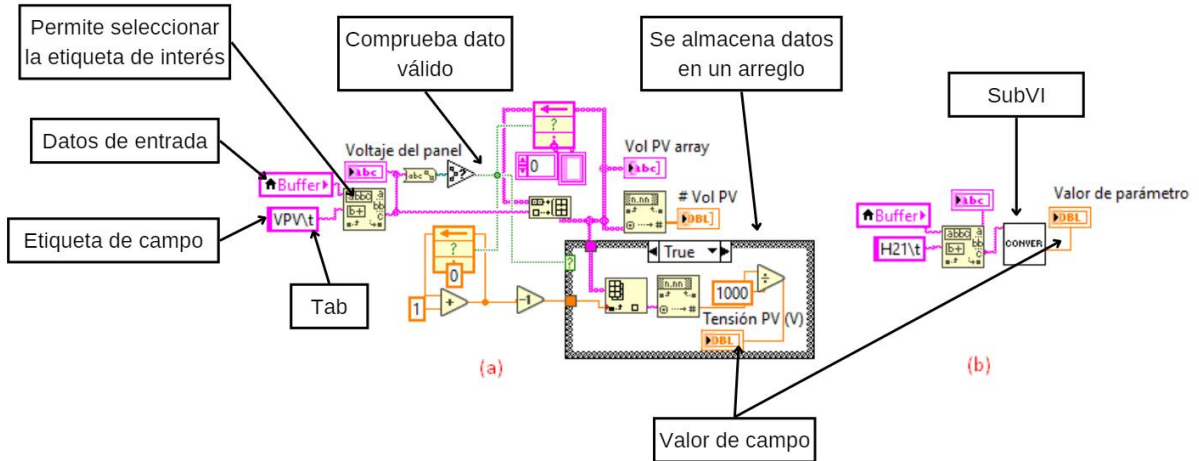


Figura 3.47. Selección de datos y almacenado en arreglo.

### 3.11.2.2 Selección y almacenamiento de datos del sistema de caracterización

El proceso de selección y almacenamiento es similar que el sistema de generación, pero el formato y el intervalo de transmisión son diferentes. En el caso anterior el regulador transmite de forma continua un bloque de datos cada segundo.

El sistema de caracterización no transmite información hasta que el usuario no haya dado la orden de graficar, recibida la orden el microcontrolador mide y procesa la información posteriormente LabVIEW recibe los datos en intervalos de 1 ms. El formato de transmisión que sigue el microcontrolador es el siguiente:

- <sensor\_1><sensor\_2><sensor\_3><Nueva línea> y entre cada sensor lleva la siguiente expresión : <Etiqueta de campo><:><Valor de campo>

La Figura 3.48 muestra los bloques implementados para la separación de los datos, teniendo en cuenta el formato antes descrito.

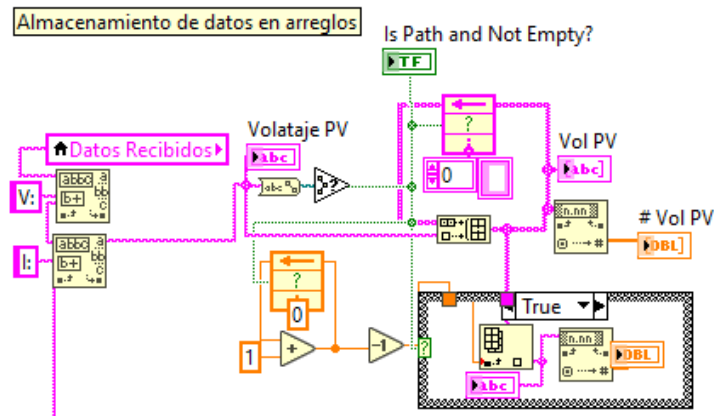


Figura 3.48. Selección de datos del sistema de caracterización y almacenado en arreglos.



### 3.11.3 Tratamiento de los datos del sistema de caracterización

El tratamiento de los datos consiste en tomar los valores recibidos en código del ADC y convertirlos a las magnitudes de voltaje, corriente, potencia y temperatura, para esto se hace uso del bloque *formula node* (Figura 3.49) y en él se plasma las ecuaciones que describen el comportamiento de los sensores. Por tratarse de un ADC de 12 bits, el rango de valores de código transmitido irá de 0 a 4096.

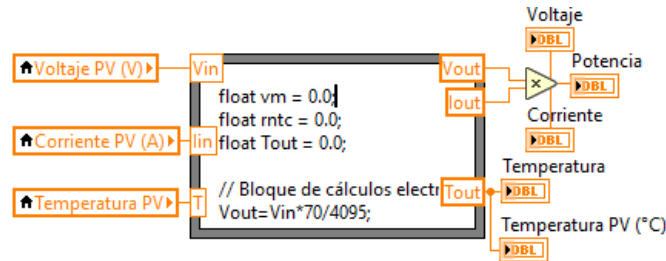


Figura 3.49. Conversión valores de datos del ADC a magnitudes físicas.

### 3.11.4 Graficado de curvas y obtención de parámetros

En este punto se toma los datos convertidos de código digital a magnitudes físicas y se realiza el trazado de las curvas de I-V y P-V, de estos datos se extraen los parámetros  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$  y  $P_{max}$ . Posteriormente se le realiza un filtrado de los datos para disminuir las variaciones de los múltiples puntos sucesivos muestreados y se vuelve a extraer los parámetros fundamentales ya mencionados. El filtrado aplicado corresponde a una media móvil. En la Figura 3.50 se puede ver el conjunto de bloques que realizan la función antes descrita.

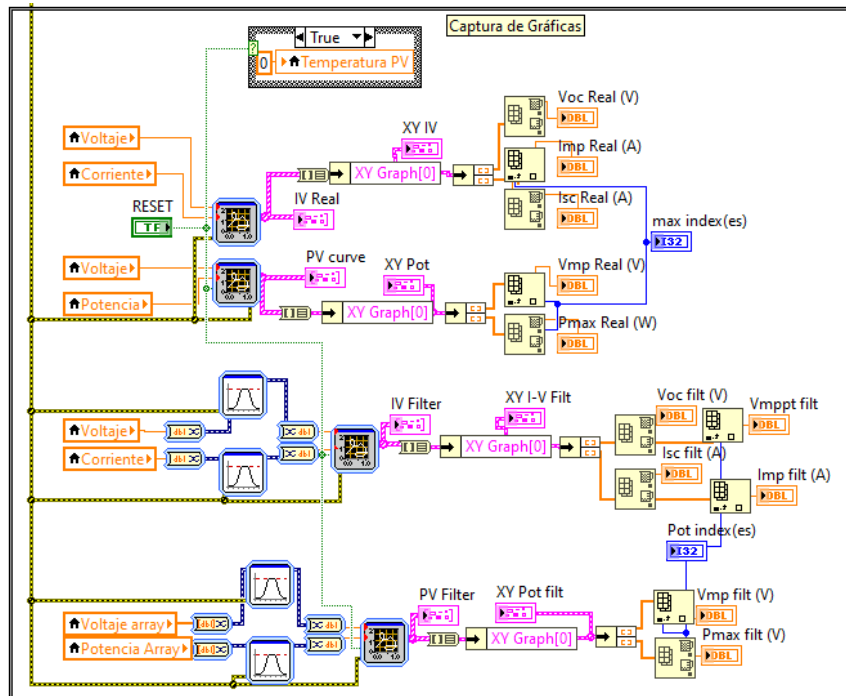


Figura 3.50. Obtención de curvas y parámetros característicos de los módulos solares.

El siguiente paso es mostrar los resultados, pero esto ya se hace en la interfaz de usuario y será presentada y descrita en la sección de resultados.

## 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Una vez termina toda la parte de diseño e implementación del sistema, se lleva a cabo una serie de pruebas para confirmar que el prototipo de generación distribuida funciona de manera correcta. Se parte por presentar una guía de conexión de los sistemas del prototipo seguido de la explicación de utilización de la interfaz gráfica. Posteriormente se muestran los resultados obtenidos de cada una de las pruebas a las que fue sometido el sistema y se incluye un apartado de simulación del funcionamiento de los módulos fotovoltaicos, simulación que sirven como modelo para validar el funcionamiento del sistema de caracterización. Por último, se presenta las características del equipo y las practicas realizables.


### 4.1 Instrucciones de conexionado

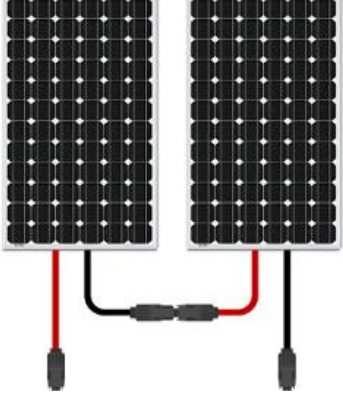
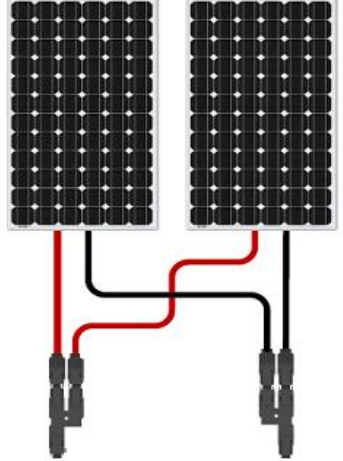
El prototipo a escala de un sistema de generación distribuida diseñado está constituido por dos sistemas fundamentales, uno es el sistema propio de generación, el cual es el encargado de la producción y gestión de energía y el otro sistema es el de caracterización, responsable de obtener los parámetros característicos de los módulos fotovoltaicos. El diagrama de bloques del prototipo se puede ver en la Figura 3.1.

#### 4.1.1 Conexión de los módulos fotovoltaicos

Son tres las configuraciones a implementar de los paneles fotovoltaicos: panel unitario, paneles conectados en serie y, por último, paneles conectados en paralelo, en la tabla siguiente se puede ver las conexiones de los módulos.

Tabla 4.1. Conexión de los módulos fotovoltaicos.

Tipo de conexión de los paneles	Configuración Visual
<p><b>Panel aislado</b></p> <p>La conexión de un panel está formada por dos terminales de distinta polaridad. El terminal positivo es representado por el cable rojo y el terminal negativo es simbolizado por el cable negro.</p>	 El diagrama muestra un panel rectangular con una cuadrícula de células solares. Desde la parte inferior del panel, se extienden dos cables: uno rojo y uno negro, cada uno con un conector gris.

<p><b>Arreglo en Serie</b></p> <p>La conexión en serie consiste en tomar uno de los terminales, positivo o negativo, de uno de los módulos y conectarlo en el terminal opuesto del otro módulo. En la imagen de la derecha se puede ver que el panel de la izquierda tiene su terminal negativo conectado al terminal positivo del panel de la derecha, los cables libres (terminales de los extremos) forman los terminales positivo y negativo del arreglo de paneles en serie.</p>	
<p><b>Arreglo en Paralelo</b></p> <p>La conexión en paralelo consiste en tomar cada uno de los terminales, positivo y negativo, de uno de los módulos y conectarlos en los terminales de la misma polaridad (color) del otro módulo. En la imagen de la derecha se puede ver que el panel de la izquierda tiene su terminal negativo y positivo conectado al terminal negativo y positivo del panel de la derecha. El nodo formado por la conexión forma los terminales positivo y negativo del arreglo de paneles en paralelo.</p>	

#### 4.1.2 Conexión de los equipos según sistema

El sistema de generación (conjunto de módulos solares), puede ir conectado al sistema de caracterización o al sistema de interconexión formando así con este último el sistema de generación distribuida (recuerde el diagrama del sistema, figura siguiente).

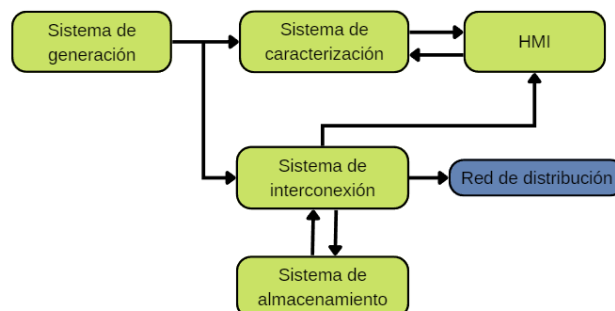


Figura 3.1. Diagrama básico de un sistema de generación distribuida.

#### 4.1.2.1 Conexión sistema de generación distribuida

Si desea analizar y/o estudiar el proceso de generación de energía de una instalación fotovoltaica y los modos de operación del seguimiento de máxima potencia, realice la conexión del sistema de generación tal como se indica en la Figura 4.1. Conecte primero el sistema de acumulación, seguido de la interfaz VE.Direct a USB al ordenador, en este punto el regulador detecta el voltaje de la batería en la primera conexión y podrá transmitir información de su nivel de carga. Posteriormente puede conectar el arreglo fotovoltaico según el tipo de configuración deseado (conexión de arreglos visto en 4.1.1) y/o las cargas DC. Lo anterior es la instalación general y completa del sistema de generación, a continuación, podrá hacer el seguimiento de cada uno de los modos de operación de este sistema variando la conexión uno por uno de los elementos.

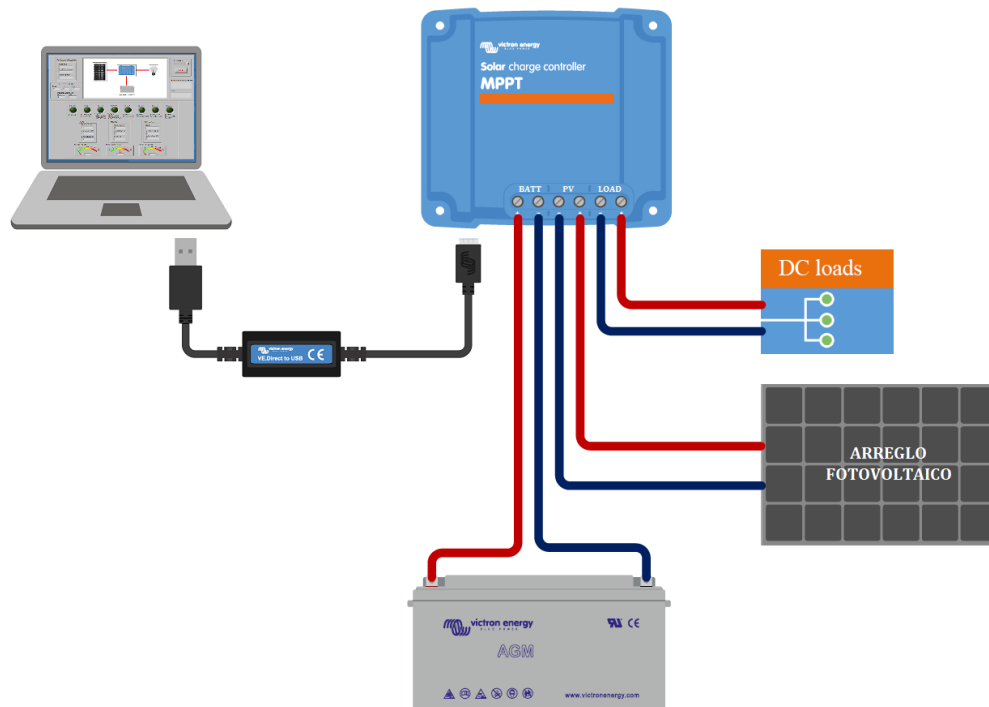


Figura 4.1. Conexión del sistema de generación distribuida (tomado y editado de [65]).

#### 4.1.2.2 Conexión del sistema de caracterización

Si desea estudiar el comportamiento de los módulos fotovoltaicos ante variaciones de irradiancia y temperatura, obtener las curvas características y los parámetros eléctricos fundamentales de los paneles solares, realice la conexión de sistema como se muestra en la Figura 4.2. Como se puede observar en la figura, para el uso del sistema de caracterización solo es necesario conectar dos elementos a éste, el arreglo de paneles fotovoltaicos y la interfaz TTL a USB al ordenador. La fuente de alimentación solo es usada para alimentar los amplificadores operacionales y el microcontrolador.

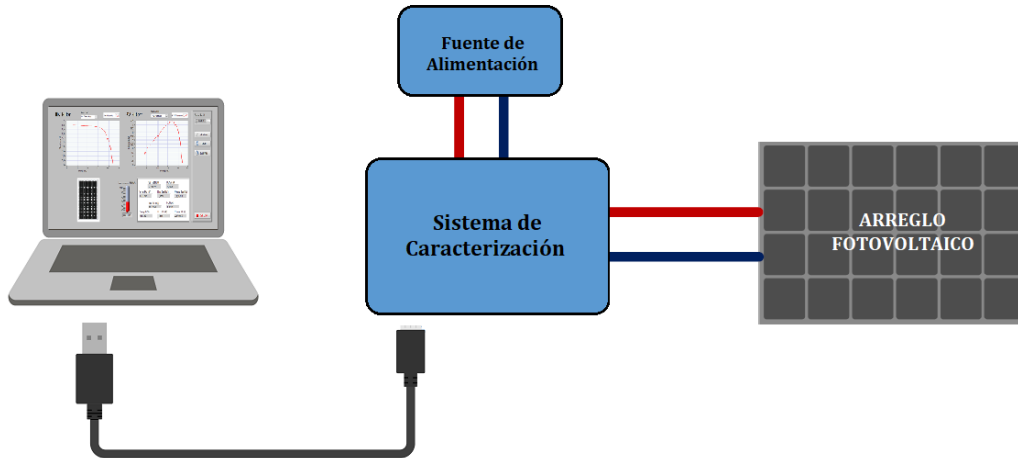


Figura 4.2. Conexión del sistema de caracterización.

Realizadas las conexiones respectivas se puede proceder a relajar los ensayos y evaluaciones del sistema a través de la interfaz gráfica, ésta se explica en la sección siguiente.

## 4.2 Interfaz gráfica

A través de esta interfaz gráfica el usuario puede interactuar con el prototipo a escala de generación distribuida desarrollado. La interfaz ha sido creada en el entorno de programación gráfico de LabVIEW. Para ejecutar la aplicación en un ordenador es necesario que los tres archivos de la Ilustración 1 estén guardados en el ordenador en cuestión.



Ilustración 1. Archivos para la ejecución de la interfaz gráfica

### 4.2.1 Funcionamiento de la aplicación

Para una primera versión del sistema se ha implementado 3 subprogramas útiles para realizar distintas prácticas de laboratorio, estos son: sistema de caracterización de un solo panel, sistema de caracterización de múltiples paneles; usado en la caracterización de arreglos en serie y paralelo, y por último está el sistema de generación en donde se podrá analizar el modo de operación y seguimiento de máxima potencia del sistema. En la Figura 4.3 se puede ver el menú de opciones de la interfaz gráfica.

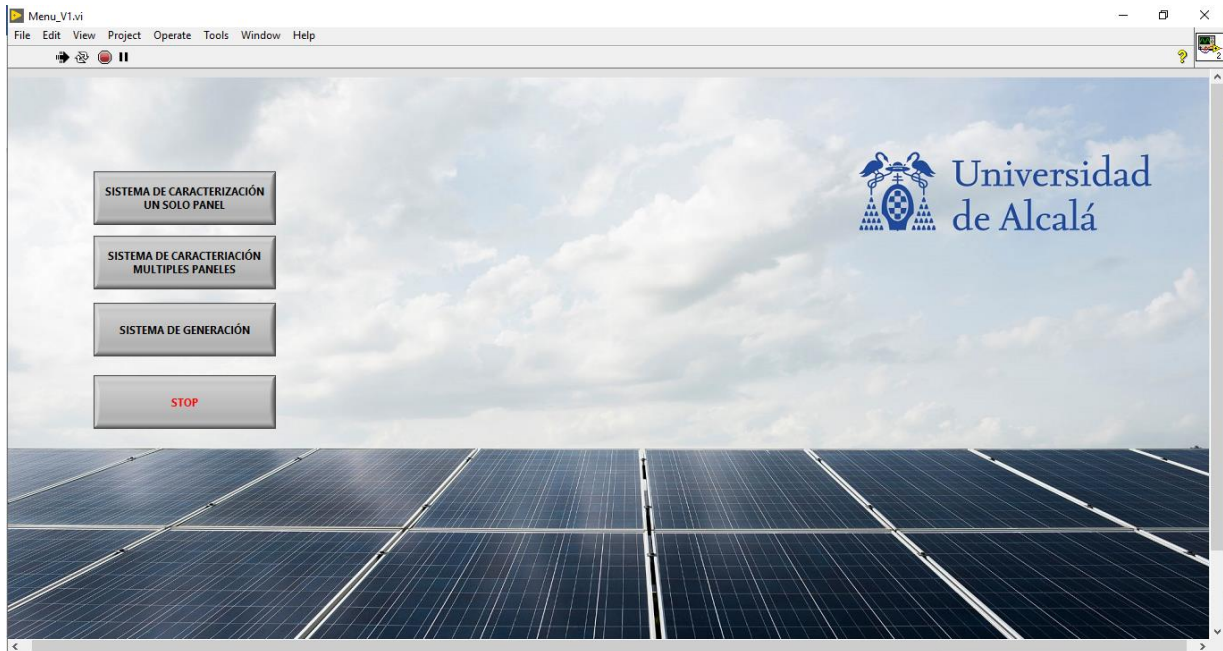


Figura 4.3. Menú de opciones de la interfaz gráfica.

Al oprimir la primera opción se desplegará la siguiente interfaz, Figura 4.4. El primer paso es establecer la comunicación con el sistema de adquisición y control eligiendo el puerto serial correspondiente, el segundo paso es oprimir el botón de graficar el cual da paso al trazado de las curvas. El tercer paso es la exportación de los datos, aquí se incluye la información de los parámetros eléctricos y los valores de tensión, corriente y potencia de las curvas características. Lo descrito anteriormente son los 3 pasos más importantes en la obtención de los datos. Además la interfaz permite visualizar diferentes curvas, correspondientes a los datos reales medidos, los datos filtrados y la combinación de ambos. Posteriormente puede limpiar la pantalla mediante el pulsador *Reset* y continuar con un nuevo trazado, sin embargo, si desea capturar varias curvas no se debe oprimir este botón pues eliminará los datos anteriores.

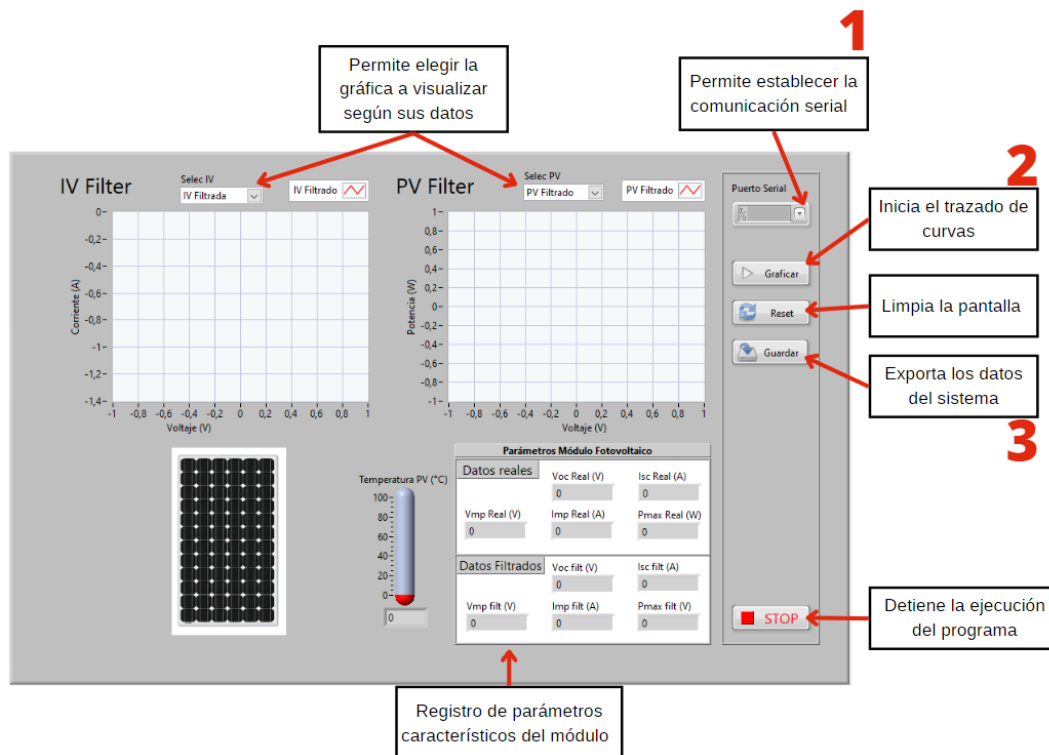


Figura 4.4. Interfaz para sistema de caracterización de un solo panel.

Para el estudio múltiples paneles se desplegará la interfaz mostrada en la Figura 4.5. El principio de funcionamiento es el mismo que el anterior, pero adicionalmente debe elegir entre el tipo de arreglo a analizar (serie o paralelo), si no se elige el tipo de conexión no se ejecutará el trazado de las curvas.

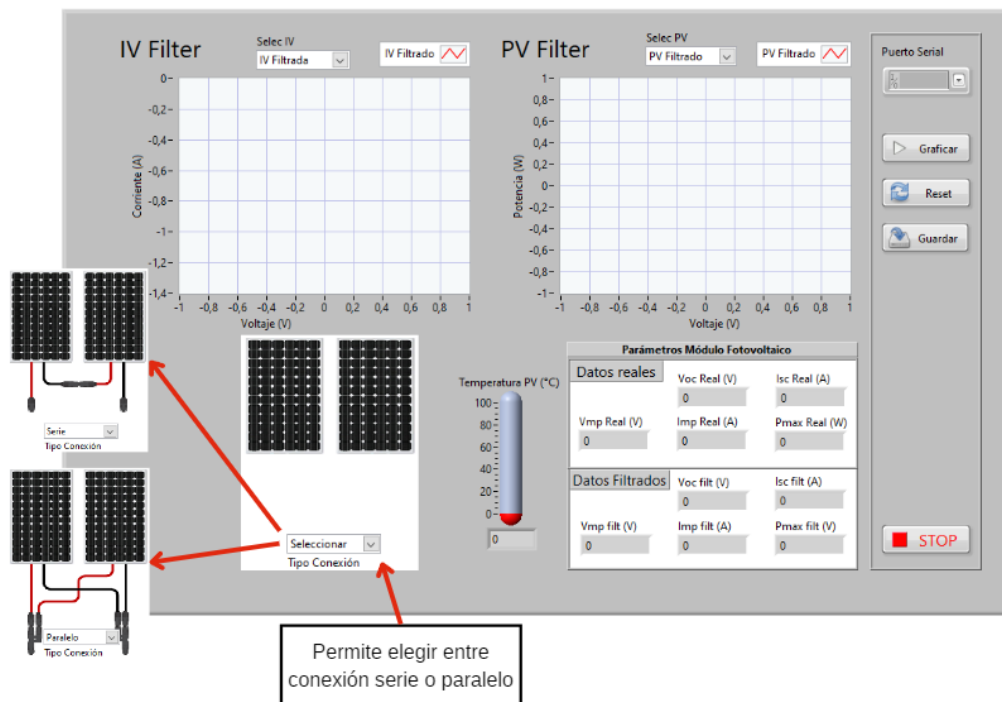


Figura 4.5. Interfaz para sistema de caracterización de múltiples paneles.

La interfaz para la interacción con el sistema de generación se muestra en la Figura 4.6. Esta interfaz es más de visualización, aquí solo se debe establecer la comunicación con el regulador a través del puerto serial correspondiente, la interacción es mayormente con el sistema físico. Para ver los modos de funcionamiento del sistema se debe varias las conexiones de los componentes y las cargas empleadas.

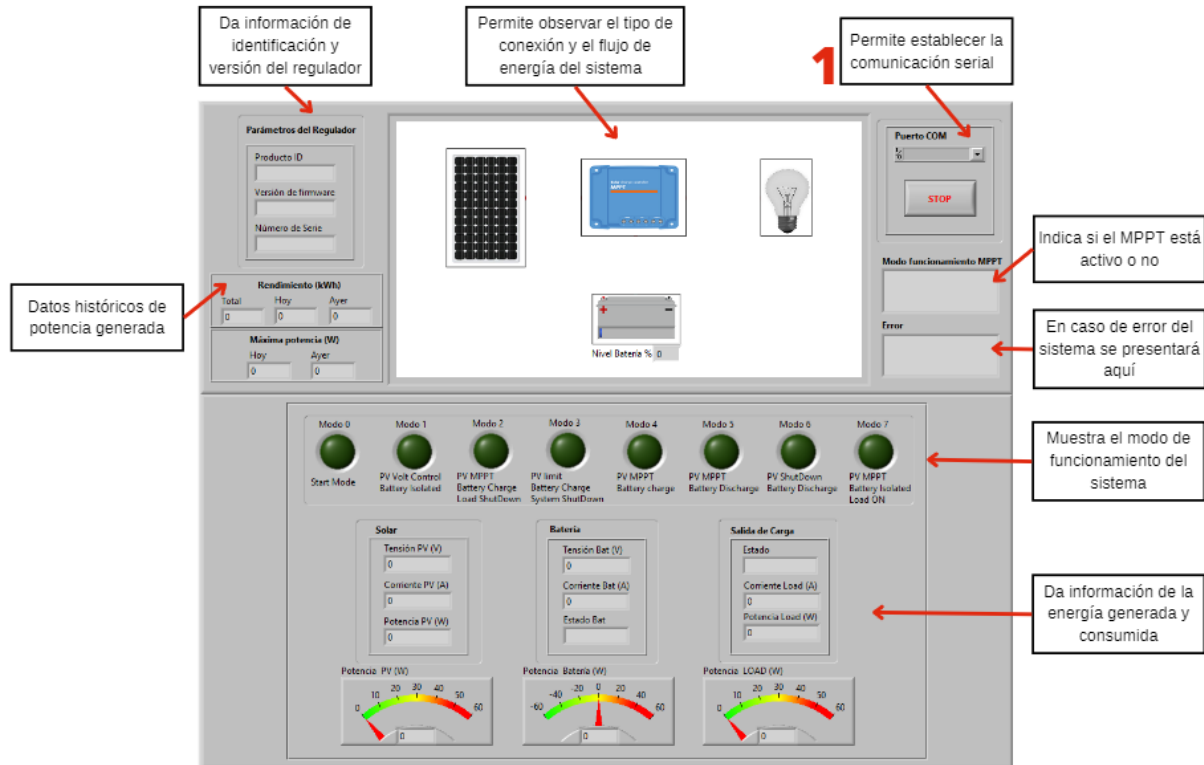


Figura 4.6. Interfaz del sistema de generación.

#### 4.2.2 Generación de archivos de datos

Exportar los datos medidos es solo permitido en el sistema de caracterización, tanto para un panel como para múltiples. Al oprimirse el botón de guardar se genera tres archivos en Excel (Figura 4.7), dos archivos con los datos de las curvas características de IV y PV, y el tercer archivo muestra la información de los parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico. En los tres archivos se incluye los datos reales medidos y los datos filtrados mediante media móvil.

En cada uno de los archivos se debe establecer la ruta deseada para el almacenamiento de los documentos y si lo prefiere también el formato de los datos.



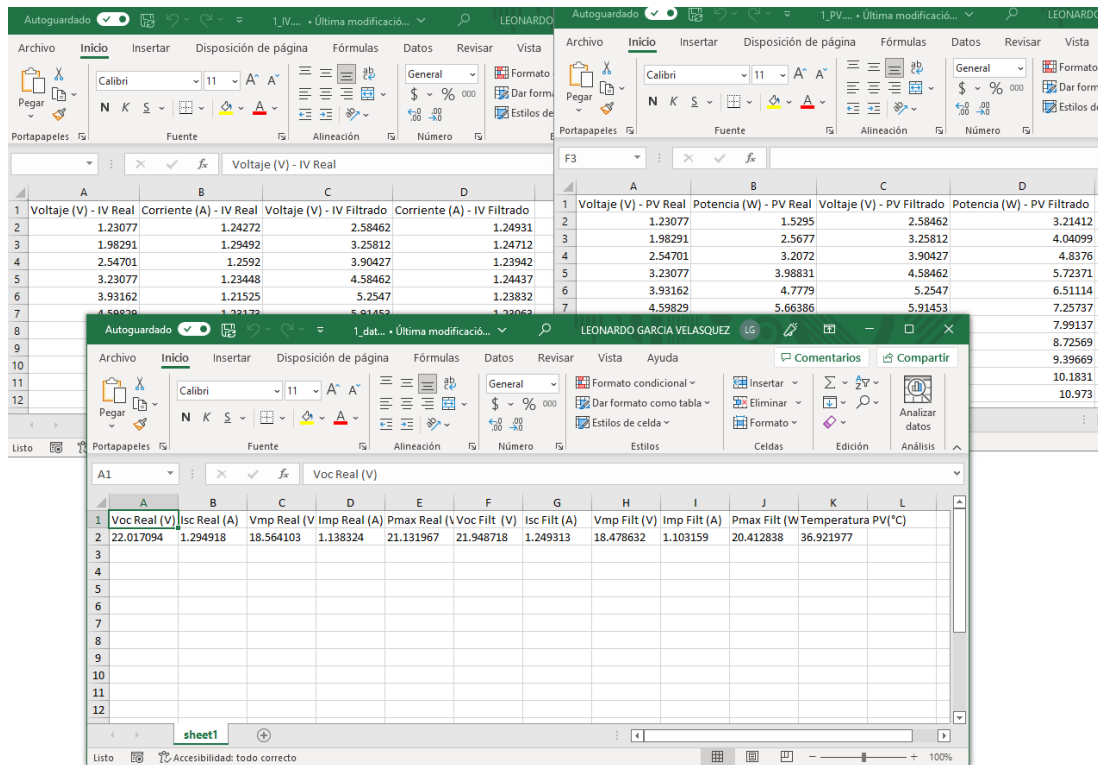


Figura 4.7. visualización de archivos generados.

### 4.3 Sistema de generación

El prototipo de generación distribuida adoptado permite reproducir una instalación fotovoltaica autónoma a pequeña escala. Su conjunto de dispositivos, su fácil conexión y la herramienta de visualización desarrollada, hacen de este sistema un entorno de aprendizaje didáctico.

En el sistema de generación implementado uno de sus principales dispositivos es el regulador, ya que todos los demás sistemas van conectados a éste y es el encargado de la gestión de energía, en otras palabras, el regulador representa el punto de interconexión entre el generador, sistema de almacenamiento y cargas.

Para comprobar su buen funcionamiento se hace una serie de pruebas que posibilite observar la gestión de la energía producida.

#### 4.3.1 Información obtenida del regulador

Los datos que se pueden obtener del regulador en formato tipo texto por medio del protocolo de comunicación VE.Direct se muestran en la Tabla 4.2. Esta información es la que gestiona la interfaz de gráfica y se presenta al usuario. La información se ha dividido en tres grupos:

**Especificaciones del dispositivo:** son los datos específicos de fabricación de cada regulador, así como la versión del software que usa actualmente.

**Parámetros de producción y estado de operación:** proporciona información sobre la producción de energía del sistema fotovoltaico y gestión de esta. También define su modo de operación, como lo es en seguimiento de máxima potencia o no y errores que se puedan presentar.

**Datos históricos de rendimiento y potencia generada:** prevé información del rendimiento del sistema y potencia de generación del momento y del último día de uso del sistema.

Los tres grupos anteriores representan 18 parámetros del bloque de datos transmitidos por el regulador, el dato número 19 y último (*Checksum*), simboliza el fin del bloque de información y no es necesariamente un carácter ASCII imprescindible por lo que se excluye de la información presentada al usuario.

Tabla 4.2. Datos obtenidos del regulador.

Etiqueta de campo	Unidades	Definición
<b>Especificaciones del dispositivo</b>		
PID		Identificación del producto
FW		Versión de firmware del dispositivo
SER#		Número de Serie
<b>Parámetros de producción y estado de operación</b>		
V		Tensión de la batería
I	mA	Corriente de la batería
VPV	mV	Voltaje del panel
PPV	W	Potencia del panel
CS		Estado de funcionamiento
MPPT		Modo de funcionamiento del seguidor
ERR		Código de Error
LOAD		Estado de carga (ON/OFF)
IL	mA	Corriente de la carga
<b>Datos históricos de rendimiento y potencia generada</b>		
H19	0.01 kWh	Rendimiento total (contador reiniciable por el usuario)
H20	0.01 kWh	Rendimiento hoy
H21	W	Máxima potencia hoy
H22	0.01 kWh	Rendimiento ayer
H23	W	Máxima potencia ayer
HSDS		Número de secuencia de días (0..364)
<b>Fin de la transmisión del bloque de datos</b>		
Checksum		

#### 4.3.2 Modos de funcionamiento del sistema de generación

El prototipo fotovoltaico de generación distribuida ofrece diversos modos de operación, ya sea alimentando cargas o solo acumulando la energía producida. A continuación, se muestra los resultados de los modos de operación del sistema. Aquí se puede ver, la conexión del sistema en los diferentes modos de operación, así como también la dirección del flujo de energía.

##### 4.3.2.1 Estado inicial del sistema

Se muestra la conexión típica de una instalación fotovoltaica (Figura 4.8), se puede observar al abrir por primera vez la sección de generación distribuida en la interfaz gráfica.

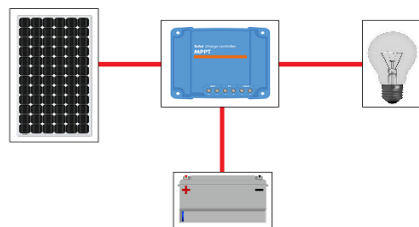


Figura 4.8. Conexión sistema generación implementado.

#### 4.3.2.2 Modo 0 – Detección automática tensión batería

**Descripción:** módulos fotovoltaicos desconectados, batería conectada, carga desconectada.

La primera conexión del sistema consiste en enlazar la batería al regulador, esto hace que el regulador detecte automáticamente por primera vez la tensión de trabajo de la batería (12, 24 o 28V). Al no haber cargas conectadas ni un generador, el regulador no realiza ninguna función de gestión. El flujo de energía es del acumulador al regulador (ver Figura 4.9), éste consume una corriente muy baja, suficiente para poner en funcionamiento el regulador y transmitir datos.

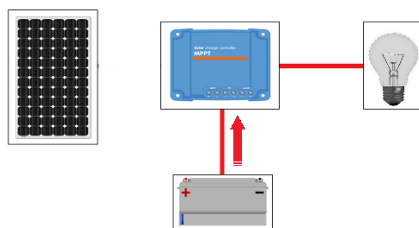


Figura 4.9. Modo 0: detección automática de tensión de batería.

#### 4.3.2.3 Modo 1 – Voltaje de control

**Descripción:** módulos fotovoltaicos conectados, batería y cargas desconectadas.

Esta conexión, al igual que el modo anterior, permite el funcionamiento del regulador y obtener los parámetros del regulador. En este caso el flujo de energía es del sistema de generación al regulador, como se muestra en Figura 4.10.

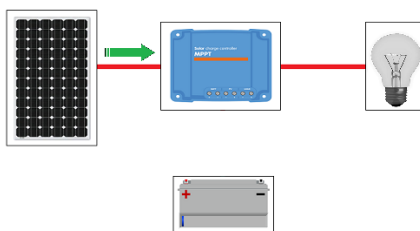


Figura 4.10. Modo 1: voltaje de control fotovoltaico.

#### 4.3.2.4 Modo 2 y 3 – Con y sin seguimiento de máxima potencia

**Descripción:** módulos fotovoltaicos conectados, sistema de almacenamiento conectado, cargas desconectadas.

En este tipo de conexión el arreglo fotovoltaico carga la batería. El regulador gestiona la energía generada y la almacena (ver Figura 4.11). Puede realizar esta operación con o sin seguimiento de máxima potencia (modo 2 y 3 respectivamente). Para operar en el punto de máxima potencia el nivel de la batería no debe estar con carga completa o casi completa, en otras palabras, la batería debe tener un voltaje lo suficientemente bajo para estar en la fase de carga inicial. En este punto

el regulador suministra tanta corriente de carga como le es posible para recargar la batería rápidamente y esto se logra activando el seguidor de máxima potencia.

Con este tipo de conexión se puede presentar el caso en que no se realice el seguimiento de máxima potencia (modo 3), esto ocurre cuando la batería posee un nivel de carga alto. En este modo la batería puede encontrar en fase de carga de absorción o flotación, donde la corriente suministrada por el regulador no es muy alta. El regulador solo extrae un valor pequeño de corriente de los paneles para controlar la carga y mantener la tensión en la batería.

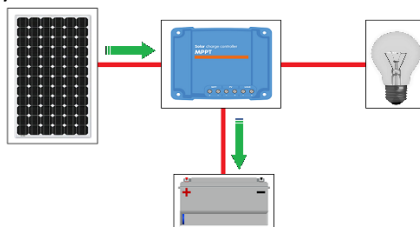


Figura 4.11. Modo 2 y 3: Carga de batería con o sin MPPT.

#### 4.3.2.5 Modo 4 – Seguimiento de máxima potencia

**Descripción:** módulos fotovoltaicos, batería y cargas conectados.

Aquí los paneles fotovoltaicos alimentan la carga, su generación es lo suficientemente alta para suplir la demanda de la carga y el excedente de energía no consumida es regulada y almacena en el acumulador, el flujo de energía se puede ver en la Figura 4.12.

La batería según su voltaje puede estar en los siguientes estados de carga: carga inicial, absorción o flotación.

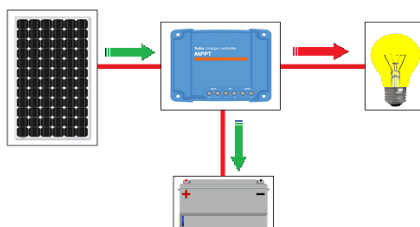


Figura 4.12. Modo 4: seguimiento de máxima potencia con almacenamiento de energía.

#### 4.3.2.6 Modo 5 – Seguimiento de máxima potencia

**Descripción:** módulos fotovoltaicos, batería y cargas conectados.

El tipo de conexión es el mismo que en el caso anterior pero su modo de operación diferente. En este modo el sistema de generación no produce la suficiente energía para cumplir con la demanda de la carga por lo que el regulador, en su gestión, extrae la máxima energía posible de los paneles y le brinda apoyo tomando energía del sistema de acumulación y proporcionándosela a la carga (Figura 4.13).

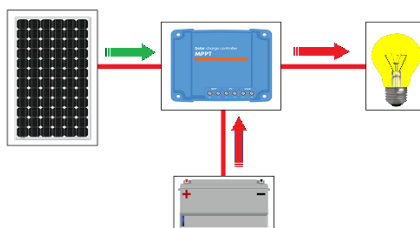


Figura 4.13. Modo 5: seguimiento de máxima potencia con descarga de batería.

#### 4.3.2.7 Modo 6 – Paneles desconectados

**Descripción:** módulos fotovoltaicos desconectados, batería y cargas conectadas.

En este modo al no tener conectado el sistema de generación no hay suministro de energía solar y no hay seguimiento de máxima potencia. En este modo de operación el sistema de almacenamiento es el encargado de suministrar la energía necesaria para alimentar la carga (Figura 4.14), esto se hace hasta que el voltaje de la batería alcance un nivel bajo. Alcanzado un nivel de descarga el regulador hace la desconexión automáticamente de la carga para evitar daños en el sistema de acumulación.

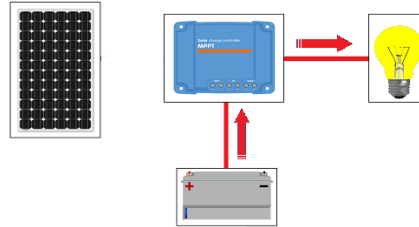


Figura 4.14. Modo 6: batería alimenta carga.

#### 4.3.2.8 Modo 7 – Batería desconectada

**Descripción:** módulos fotovoltaicos conectados, batería desconectada, carga conecta.

En el modo 7, se trabaja en el punto de máxima potencia y el flujo de energía es del sistema de generación a la carga (Figura 4.15). En su gestión, se puede observar los siguientes casos de operación: si la producción de energía es alta, los módulos fotovoltaicos proveen toda la energía exigida por las cargas. Si la demanda de energía excede a la producida el regulador limita la energía que le suministra a la carga. También puede realizar desconexión automática como protección.

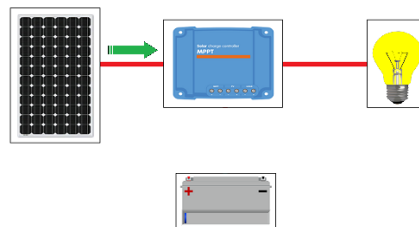


Figura 4.15. Modo 7: modo mppt sin batería.

### 4.3.3 Pruebas experimentales sistema de generación

El sistema de generación replica una instalación fotovoltaica real a pequeña escala y suministra información referente a la producción y gestión de la energía solar fotovoltaica, tal como se haría en una instalación de gran tamaño.

Para el estudio y análisis de este sistema se realiza diferentes pruebas para exigir al sistema a operar en cada uno de los modos de funcionamiento, esto se hace para diferentes arreglos de los módulos fotovoltaicos: mono panel, paneles en serie y paralelo. Las pruebas residen básicamente en la manipulación de los elementos del sistema de generación distribuida, es decir, consiste en establecer diferentes configuraciones relativas a la conexión y desconexión de los dispositivos y de las cargas.

En la Tabla 4.3, se puede ver los resultados de los modos de operación en donde el sistema de generación de energía está en desconexión. Se presentan estos resultados de forma independiente del tipo de conexión de los módulos solares, ya que al estar estos desconectados los resultados son comunes. Para el modo 6 en donde la batería suministra energía a la carga, se realiza pruebas con resistencia de potencia que simulan las cargas. Entre las pruebas realizadas se encuentra conexión de una sola carga y conexión de cargas en paralelo.

Tabla 4.3. Modos de operación con módulos fotovoltaicos desconectados.

Tipo de conexión	Modo	MPPT		Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Estado
Panel OFF, Batería ON, Carga OFF	0	Apagado	Solar	0	0	0	
			Batería	13.52	0	0	Apagado
			Carga	0	0	0	
Panel OFF, Batería ON, Carga ON	6	Apagado	Solar	0	0	0	
			Batería	12.4	-2.31	-28.644	Apagado
			Carga		2.3	28.644	5Ω
Panel OFF, Batería ON, Carga ON	6	Apagado	Solar	0	0	0	
			Batería	11.87	-4.42	-52.4654	Apagado
			Carga		4.4	52.4654	5Ω    5Ω

A continuación, se muestran los resultados según los modos de funcionamiento y configuración de conexión de los módulos fotovoltaicos.

#### 4.3.3.1 Sistema de generación mono panel

En esta configuración se usa un solo módulo fotovoltaico de 30W como fuente de generación. En la Tabla 4.4 se puede ver los resultados para diferentes tipos de conexiones y se indica el modo de funcionamiento del sistema, además señala si realiza o no seguimiento de máxima potencia, así como también los parámetros de generación y gestión de la energía generada.

Tabla 4.4. Resultados para el sistema de generación de un solo panel.

Tipo de conexión	Modo	MPPT		Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Estado
Panel ON, Batería OFF, Carga OFF	1	Apagado	Solar	21.31	0	0	
			Batería	0	0	0	Apagado
			Carga		0	0	
Panel ON, Batería ON, Carga OFF	2	Activo	Solar	17.17	0.640652	11	
			Batería	13.49	0.81	10.9269	Absorción
			Carga		0	0	
Panel ON, Batería ON, Carga OFF	3	Limitado	Solar	20.24	0.444664	9	
			Batería	13.78	0.68	9.3704	Flotación
			Carga	0	0	0	

Panel ON, Batería ON, Carga ON	5 descarga	Activo	<b>Solar</b>	15.55	1.35048	21	
			<b>Batería</b>	13.13	-0.94	-12.3422	Flotación
			<b>Carga</b>	13.33	2.5	33.3422	5Ω
Panel ON, Batería ON, Carga ON	5 descarga	Activo	<b>Solar</b>	15.88	1.32242	21	
			<b>Batería</b>	12.58	-3.12	-39.2496	Flotación
			<b>Carga</b>		4.7	60.2496	5Ω    5Ω
Panel ON, Batería OFF, Carga ON	7	Activo	<b>Solar</b>	17.42	0.574053	10	
			<b>Batería</b>	7.69	0	0	Absorción
			<b>Carga</b>		1.4	10	5Ω
Panel ON, Batería OFF, Carga ON	7	Activo	<b>Solar</b>	15.67	0.650618	10	
			<b>Batería</b>	5.23	-0.05	-0.2615	Absorción
			<b>Carga</b>		2	10.2615	5Ω    5Ω

En estas pruebas realizadas (tabla anterior), se obtuvo una potencia máxima de producción solar de 21W y una potencia de consumo entre 30 y 60W aproximadamente, para una carga de 5Ω y 2.5Ω (cargas de 5Ω en paralelo) respectivamente, la potencia faltante es suministrada por la batería.

En el modo 7, donde el sistema de almacenamiento está desconectado, se puede observar que la energía producida por un solo módulo fotovoltaico es suficiente para alimentar las cargas, tanto sola como en paralelo y esto se debe a que el regulador limita el voltaje que le proporciona a la carga, siendo aproximadamente el voltaje de batería. Aunque la batería está ausente el regulador envía información de voltaje de batería, pero esta energía no es almacenada, simplemente es la tensión presente en los bornes del regulador (bornes de conexión de la batería).

El modo 4, el cual tiene como función alimentar una carga y almacenar el excedente de energía producida no se activó, dado que en estas pruebas un solo módulo no es suficiente para sustentar la carga de 5Ω, como compensación el regulador extrae la energía faltante de la batería para satisfacer la demanda activando consigo el modo 5 de operación.

#### 4.3.3.2 Paneles en serie

En esta configuración se usa dos módulos fotovoltaicos de 30W conectados en serie como fuente de generación. En la Tabla 4.5 al igual que en el caso anterior se puede ver los resultados para diferentes tipos de conexiones y se indica el modo de funcionamiento del sistema, además señala si realiza o no seguimiento de máxima potencia, así como también los parámetros de generación y gestión de la energía generada.

Tabla 4.5. Resultados para el sistema de generación de paneles en serie.

Tipo de conexión	Modo	MPPT		Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Estado
Panel ON, Batería OFF, Carga OFF	1	Apagado	<b>Solar</b>	42.5	0	0	
			<b>Batería</b>	0	0	0	Apagado
			<b>Carga</b>	0	0	0	

Panel ON, Batería ON, Carga OFF	2	Activo	<b>Solar</b>	29.66	0.775455	23	Despejado
			<b>Batería</b>	13.73	1.63	22.3799	Carga Inicial
			<b>Carga</b>	0	0	0	
Panel ON, Batería ON, Carga OFF	3	Limitado	<b>Solar</b>	38.09	0.525072	20	
			<b>Batería</b>	14.39	1.32	18.9948	Absorción
			<b>Carga</b>	0	0	0	
Panel ON, Batería ON, Carga ON	4 carga	Activo	<b>Solar</b>	34.3	1.39942	48	Despejado
			<b>Batería</b>	13.76	0.71	9.7696	Absorción
			<b>Carga</b>		2.7	38.2304	5Ω
Panel ON, Batería ON, Carga ON	5 descarga	Activo	<b>Solar</b>	31.71	0.536108	17	Nubes
			<b>Batería</b>	12.63	-3.49	-44.0787	Absorción
			<b>Carga</b>		4.7	61.0787	5Ω   5Ω
Panel ON, Batería OFF, Carga ON	7	Activo	<b>Solar</b>	34.95	0.486409	17	Nubes
			<b>Batería</b>	9.55	-0.05	-0.4775	Absorción
			<b>Carga</b>		1.8	17.4775	5Ω
Panel ON, Batería OFF, Carga ON	7	Activo	<b>Solar</b>	34.36	0.582072	20	Nubes
			<b>Batería</b>	7.59	-0.09	-0.6831	Carga Inicial
			<b>Carga</b>		2.9	20.6831	5Ω   5Ω

Con la conexión en serie de los paneles solares se obtuvo una potencia máxima de 48W aproximadamente (Tabla 4.5). Las pruebas realizadas se hicieron bajo condiciones de nubosidad y cielo despejado. En la configuración en serie se pudo observar cada uno de los modos de operación del sistema. La potencia máxima de consumo fue de 61W para dos cargas de 5Ω en paralelo.

Al igual que el caso anterior, en el modo 7 se limita el voltaje de suministro a la carga como mecanismo de protección, sin embargo, con la conexión en serie se le proporciona una mayor potencia, esto se debe a que el voltaje de la conexión en serie es del doble que la producida por un solo módulo, si se compara con los resultados de la sección anterior se puede notar que la corriente de los paneles son similares, pero lo que hace la diferencia es al mayor nivel de tensión de la conexión en serie.

#### 4.3.3.3 Paneles en paralelo

En esta configuración se usa dos módulos fotovoltaicos de 30W conectados en paralelo como fuente de generación. Los datos reflejados en la Tabla 4.6 se obtuvieron de las pruebas realizadas principalmente bajo condiciones de alta nubosidad. Aquí se puede observar que el sistema opera en cada uno de sus modos correspondientes al tipo de conexión.

El voltaje que proporciona los módulos fotovoltaicos en esta sección es similar al del sistema de un solo panel, pero la corriente es el doble. Gracias a su mayor corriente se puede obtener potencias



similares a la del sistema con conexión en serie. En estos ensayos la máxima potencia registrada fue de 40W.

Tabla 4.6. Resultados para el sistema de generación de paneles en paralelo.

Tipo de conexión	Modo	MPPT		Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Estado
Panel ON, Batería OFF, Carga OFF	1	Apagado	Solar	21.48	0	0	
			Batería	13.79	0	0	Flotación
			Carga	0	0	0	
Panel ON, Batería ON, Carga OFF	2	Activo	Solar	15.35	0.19544	3	Nubes
			Batería	12.97	0.25	3.2425	Carga Inicial
			Carga	0	0	0	
Panel ON, Batería ON, Carga OFF	3	Limitado	Solar	17.92	1.51007	27	Nubes
			Batería	13.8	1.89	26.082	Flotación
			Carga	0	0	0	
Panel ON, Batería ON, Carga ON	4 carga	Activo	Solar	15.87	2.52048	40	Despejado
			Batería	13.51	0.33	4.4583	Absorción
			Carga		2.6	35.5417	5Ω
Panel ON, Batería ON, Carga ON	5 descarga	Activo	Solar	16.78	1.37068	23	Nubes
			Batería	12.53	-2.9	-36.337	Flotación
			Carga		4.7	59.337	5Ω    5Ω
Panel ON, Batería OFF, Carga ON	7	Activo	Solar	17.15	1.63265	28	
			Batería	12	0	0	Flotación
			Carga		2.3	28	5Ω
Panel ON, Batería OFF, Carga ON	7	Activo	Solar	18.19	1.31941	24	
			Batería	11.54	-0.07	-0.8078	Flotación
			Carga		2.2	24.8078	5Ω    5Ω

#### 4.4 Sistema de caracterización

El sistema de caracterización permite obtener los parámetros eléctricos fundamentales de los módulos fotovoltaicos. Estos valores describen el comportamiento de los paneles en condiciones ambientales normales.

Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema de caracterización, se somete a distintas pruebas experimentales bajo diversas condiciones ambientales de radiación y temperatura, utilizando los paneles en distintas configuraciones (panel aislado, serie y paralelo). También se comprueba y se analiza su uso tanto en exteriores como en interiores. De todas estas pruebas se obtiene las curvas características I-V y P-V.

#### 4.4.1 Circuito de potencia

El circuito de potencia implementado es un circuito base de configuración simple, que al someterse a diferentes pruebas cumple con la función de proveer un medio adecuado para la obtención de las medidas de tensión y corriente de los módulos fotovoltaicos. Este circuito se compone principalmente de su conexión al módulo o panel fotovoltaico a caracterizar y la sección de carga, siendo esta última la que provee las condiciones para realizar las mediciones mediante la carga del condensador.

El tiempo de carga del condensador usado en el diseño del circuito de potencia está en torno de los 57ms, pero esto solo se cumple bajo los parámetros de los módulos proporcionados por el fabricante. Además, el tiempo de carga es dependiente de la producción de energía y ésta a su vez dependiente de las condiciones ambientales de irradiancia y temperatura, por lo tanto, por cada adquisición de las curvas características se tendrá un tiempo de carga diferente. De la ecuación (3.22) se puede despejar el tiempo de carga del capacitor en función de los parámetros obtenidos en el trazado de las curvas de IV, obteniendo la siguiente ecuación (4.1):

$$T_m = C \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad (4.1)$$

#### 4.4.2 Sistema de adquisición de datos

El microcontrolador STM32F411 usado para el sistema de adquisición de datos realiza de forma adecuada la lectura de los sensor y transmisión de los datos. Este dispositivo fue configurado para una frecuencia de muestreo de 1KHz y un tiempo de muestro de 1s. Se define como margen la lectura de 1000 puntos para proporcionar un tiempo adecuado para la carga del condensador, pues en condiciones de baja irradiancia se ha registrado tiempo de carga superiores a 400ms. Aun cuando este sistema realiza la captura de 1000 puntos solo transmite la cantidad necesitada para la carga del condensador, es decir, si al condensador le ha tomado 70 ms para cargarse el microcontrolador transmitirá 70 puntos, esto se logra analizando la lectura de la corriente, cuanto ésta llega a cero es porque el condensador a alcanzado su carga máxima y se comporta como un circuito abierto, por lo tanto, no se presenta circulación de corriente por el circuito.

#### 4.4.3 Parámetros que afectan la producción de energía – simulación

Para ver la influencia de las variables ambientales de irradiancia y temperatura en la producción de energía solar en los módulos fotovoltaicos adquiridos, se hace primero un análisis de su comportamiento mediante una simulación de MATLAB. El entorno de programación *Simulink* de MATLAB aporta las herramientas necesarias para hacer los ensayos correspondientes. La Figura 4.16 muestra el bloque necesario para la configuración de los parámetros característicos de un módulo solar.

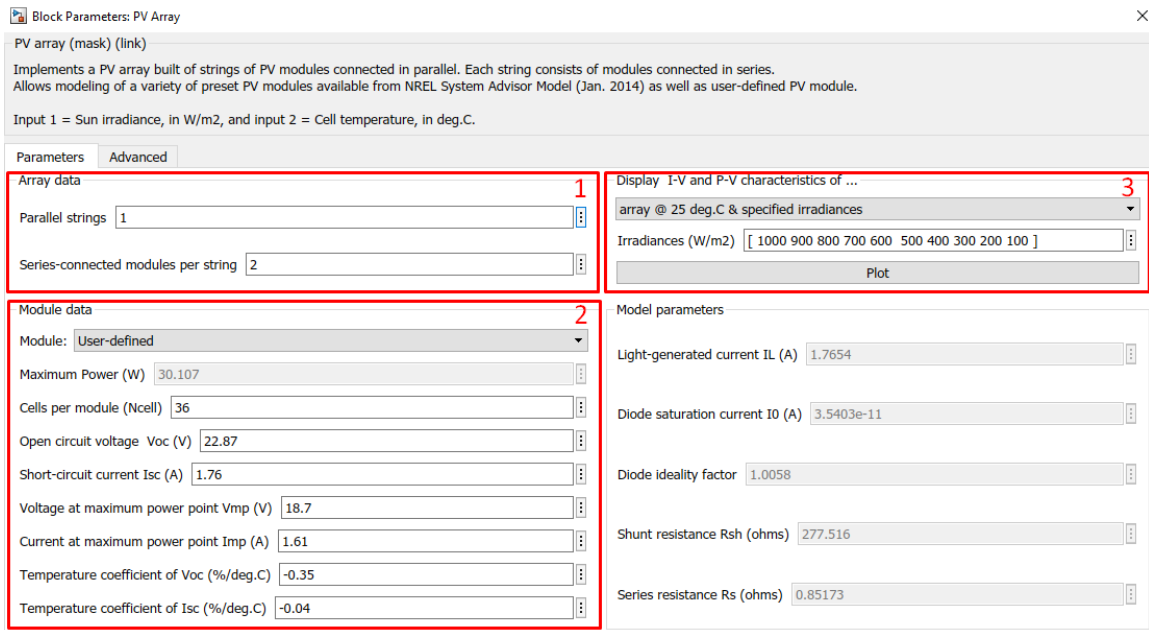


Figura 4.16. Bloque de configuración de los parámetros de un arreglo fotovoltaico en MATLAB.

El bloque de configuración (Figura 4.16) se ha dividido en tres secciones. La figura muestra una primera etapa de configuración del arreglo de paneles y su conexión, ya sea serie o paralelo. En el caso de este proyecto, se tienen dos paneles y se realizan pruebas en ambas configuraciones. De la misma manera, se realizó la simulación de un solo panel, como se muestra a continuación.

En un segundo bloque se selecciona la opción módulo definido por el usuario, donde se insertan los valores que caracterizan el panel, que son ofrecidos por la hoja de datos del fabricante (Tabla 3.1. Especificaciones del módulo solar).

El tercer recuadro, resalta el panel de obtención de las gráficas que caracterizan el comportamiento de la respuesta de los paneles según variaciones de temperatura e irradiancia. En este se insertan los valores de entrada como un arreglo de datos y se consiguen las curvas de dependencia de estas variables.

#### 4.4.3.1 Respuesta de un panel ante variaciones de temperatura e irradiancia

La Figura 4.17 muestra las gráficas de corriente versus voltaje (arriba) y potencia contra voltaje (abajo) según variaciones de temperatura y para una irradiancia fija de  $1\text{KW}/\text{m}^2$ . Se observa que la potencia máxima que puede entregar el panel tiene una dependencia inversa con la temperatura. En este caso, un solo panel genera  $32.37\text{ W}$  a una temperatura de  $10\text{ }^\circ\text{C}$ .

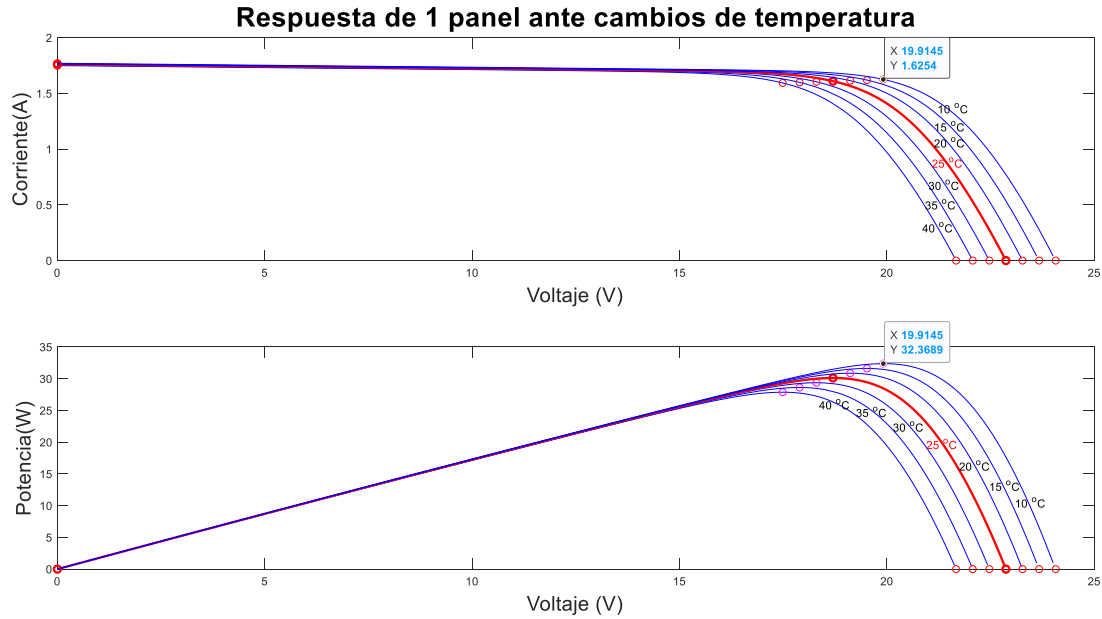


Figura 4.17. Curvas características de IV y PV para un panel de 30W en función de la temperatura.

La Figura 4.18 muestra las gráficas de corriente versus voltaje (arriba) y potencia contra voltaje (abajo) según variaciones de irradiancia para una temperatura de 25 °C. Se observa que la potencia máxima que puede entregar el panel tiene una dependencia directa con la irradiancia. En este caso, un solo panel genera 30.1 W a una irradiancia de 1kW/m<sup>2</sup>.

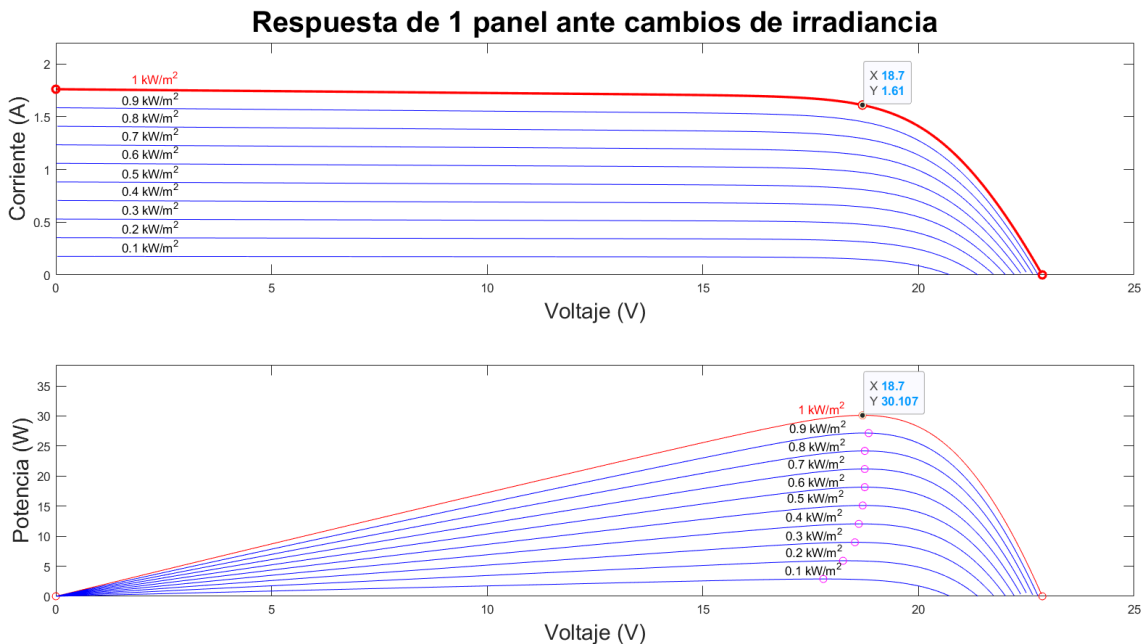


Figura 4.18. Curvas características de IV y PV para un panel de 30W en función de la irradiancia.

#### 4.4.3.2 Respuesta de dos paneles distribuidos en paralelo ante variaciones de temperatura e irradiancia

La Figura 4.19 muestra las gráficas de corriente en dependencia con el voltaje (arriba) y potencia contra voltaje (abajo) según variaciones de temperatura y para una irradiancia fija de  $1\text{kW/m}^2$ . Se observa que la potencia máxima que puede entregar el panel tiene una dependencia inversa con la temperatura. En este caso, un solo arreglo de dos paneles en paralelo genera  $64.74\text{ W}$  a una temperatura de  $10\text{ }^\circ\text{C}$ , se duplica la potencia entregada que en el caso de la existencia de un solo panel.

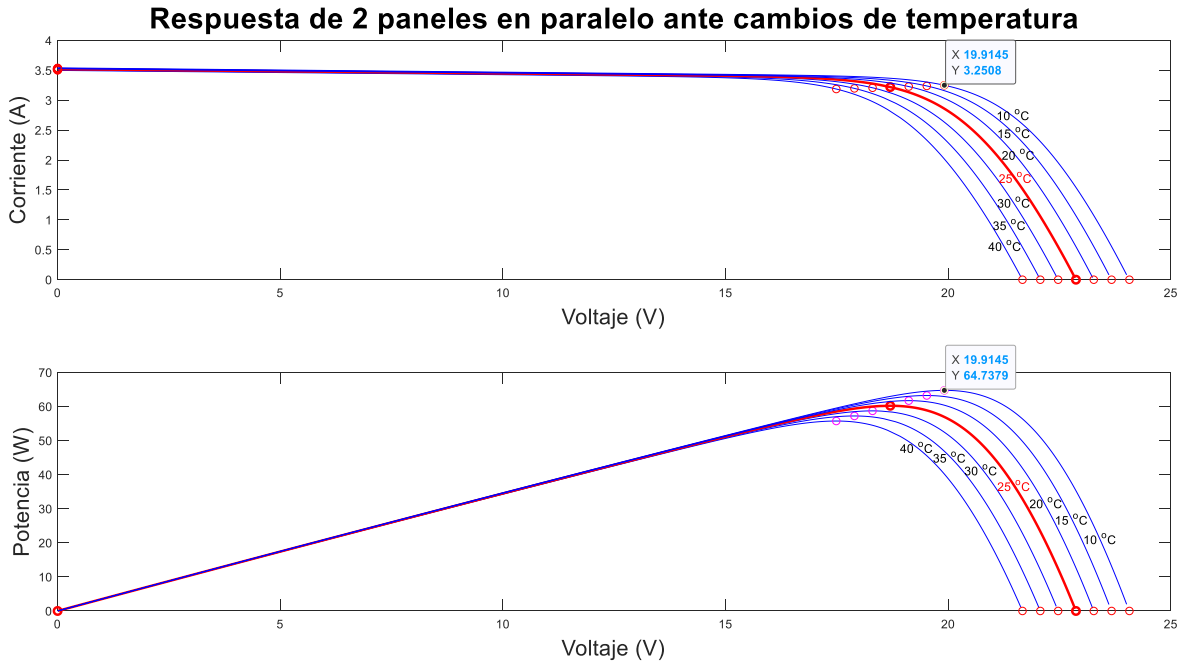


Figura 4.19. Curvas características de IV y PV para un arreglo de dos paneles de  $30\text{ W}$  en paralelo en función de la temperatura.

La Figura 4.20 muestra las gráficas de corriente en dependencia con el voltaje (arriba) y potencia contra voltaje (abajo) según variaciones de irradiancia para una temperatura de  $25\text{ }^\circ\text{C}$ . Se observa que la potencia máxima que puede entregar el panel tiene una dependencia directa con la irradiancia. En este caso, un solo arreglo de dos paneles en paralelo genera  $60.21\text{ W}$  a una irradiancia de  $1\text{kW/m}^2$ . De la misma manera que en el caso anterior, se duplica la potencia máxima que puede entregar el panel.

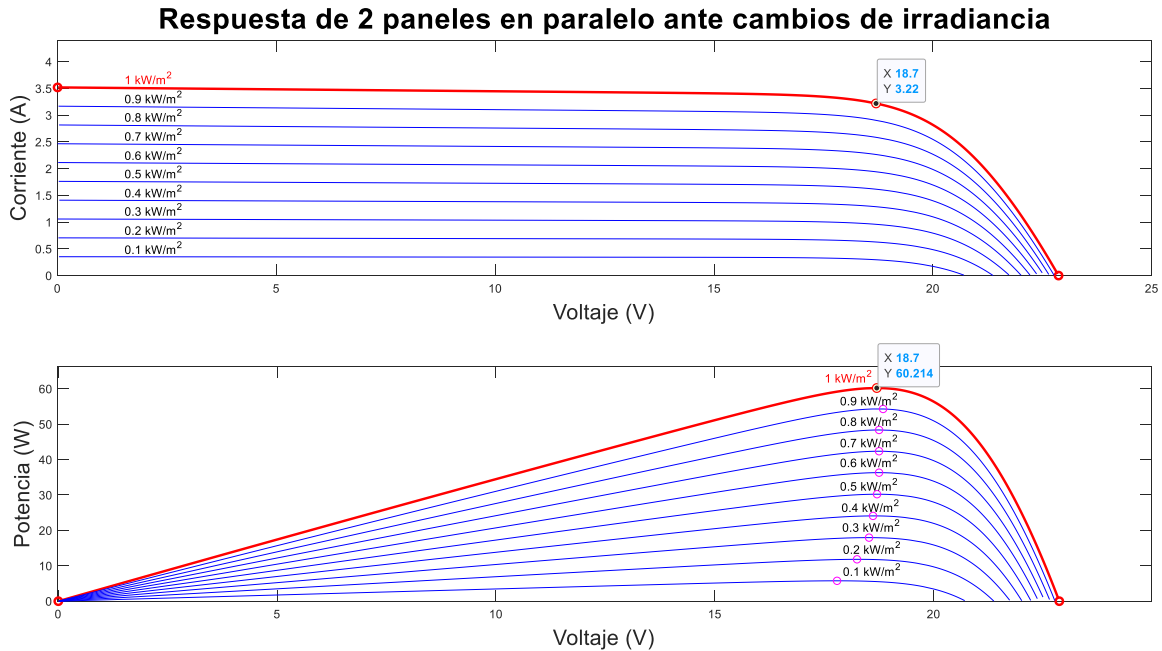


Figura 4.20. Curvas características de IV y PV para un arreglo de dos paneles de 30W en paralelo en función de la irradiancia.

#### 4.4.3.3 Respuesta de dos paneles distribuidos en serie ante variaciones de temperatura e irradiancia

La Figura 4.21 muestra las gráficas de corriente en dependencia con el voltaje (arriba) y potencia contra voltaje (abajo) según variaciones de temperatura y para una irradiancia fija de  $1\text{ kW/m}^2$ . Se observa que la potencia máxima que puede entregar el panel tiene una dependencia inversa con la temperatura. En este caso, un solo arreglo de dos paneles en serie genera  $64.74\text{ W}$  a una temperatura de  $10\text{ }^\circ\text{C}$ , se duplica la potencia entregada que en el caso de la existencia de un solo panel al igual que en el caso de los dos paneles distribuidos en paralelo.

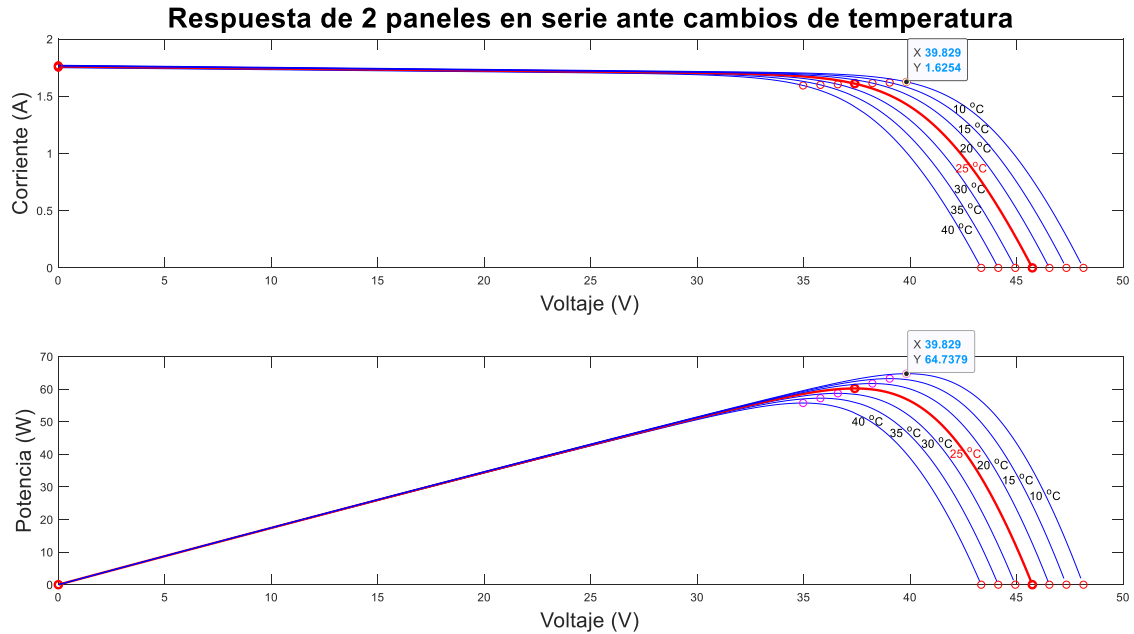


Figura 4.21. Curvas características de IV y PV para un arreglo de dos paneles de 30W en serie en función de la temperatura.

La Figura 4.22 muestra las gráficas de corriente en dependencia con el voltaje (arriba) y potencia contra voltaje (abajo) según variaciones de irradiancia para una temperatura de 25 °C. Se observa que la potencia máxima que puede entregar el panel tiene una dependencia directa con la irradiancia. En este caso, un solo arreglo de dos paneles en serie genera 60.21 W a una irradiancia de 1kW/m<sup>2</sup> al igual que en caso de la conexión en paralelo. De la misma manera que en el caso anterior, se duplica la potencia máxima que puede entregar un solo panel.

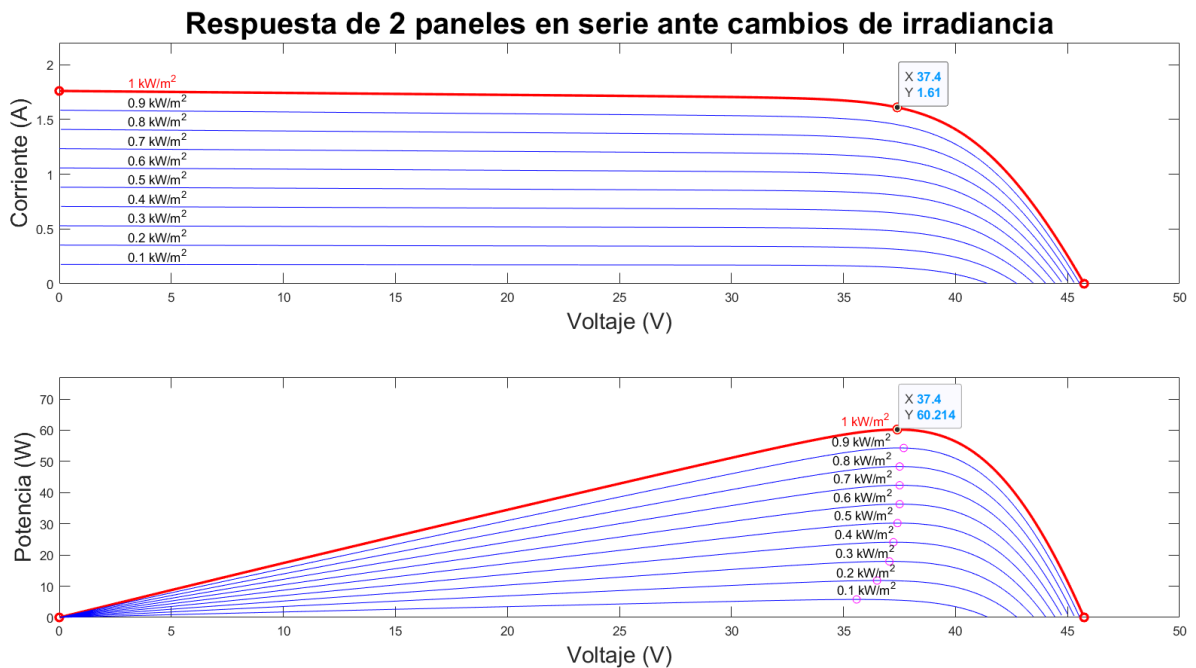


Figura 4.22. Curvas características de IV y PV para un arreglo de dos paneles de 30W en serie en función de la irradiancia.

Sin importar la configuración del arreglo de paneles que se implemente, las variables de temperatura e irradiancia afectan la producción de energía de manera inversa y directamente proporcional, respectivamente.

Tanto en la distribución serie como en paralelo, la potencia es la misma, solo se diferencia en el valor de la tensión y corriente generada. Cuando los dos paneles se encuentran en paralelo la tensión alusiva a un solo módulo fotovoltaico se mantiene y las corrientes se suman siendo el doble del valor en comparación a un solo panel, siempre y cuando los dos módulos se encuentren operando bajo las mismas condiciones. Por otro lado, en la distribución de los paneles en serie, la tensión es el doble y la corriente es la referente a un solo panel, manteniendo en ambos casos la potencia entregada.

#### 4.4.4 Pruebas experimentales en exteriores

Las pruebas realizadas para verificar el funcionamiento del sistema en exteriores consisten en disponer los módulos fotovoltaicos en conexiones en serie, paralelo y de un solo panel (panel aislado) y obtener de cada configuración las curvas características que definen el comportamiento del módulo solar y los parámetros fundamentales que describen su rendimiento eléctrico ( $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  y  $P_{max}$ ).

Para ver la influencia de la irradiancia se varía el ángulo de inclinación de los módulos solares, con esto se consigue alterar el ángulo de incidencia de la luz solar sobre el módulo y con ello la irradiancia. También se estudia el efecto de la sombra en la producción de energía fotovoltaica.

##### 4.4.4.1 Panel aislado

Los siguientes resultados fueron obtenidos realizando las pruebas bajo las siguientes condiciones ambientales: irradiancia entre 258.15 y 476.07  $W/m^2$  [66], y una temperatura entre 34-36°C.

##### 4.4.4.1.1 Máxima irradiancia

En la Figura 4.23 y Figura 4.24 se puede ver las curvas características de IV y PV respectivamente, de un módulo solar, como respuesta a las condiciones de temperatura de 35°C y un ángulo de inclinación de 45°, este ángulo representa el punto de mayor incidencia de la luz solar. La luz incidente forma un ángulo de 90° respecto a la superficie del módulo. En la Tabla 4.7 se puede observar los valores de tensión, corriente y potencia obtenidos.



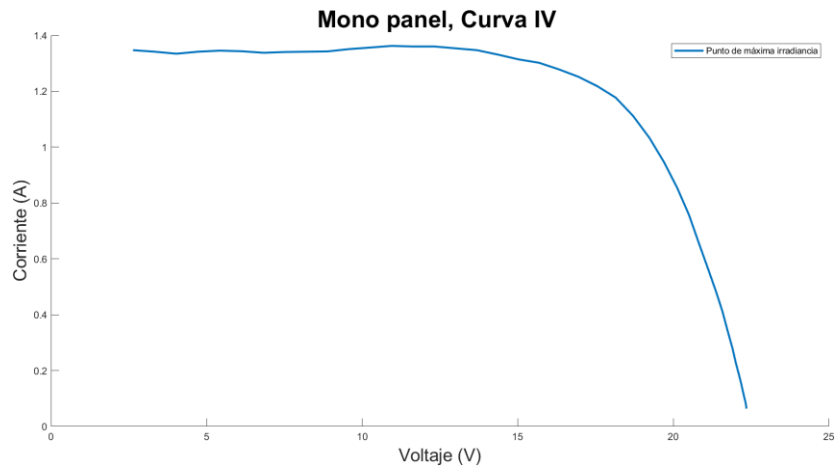


Figura 4.23. Curva I-V para un solo panel en posición de máxima irradiancia.

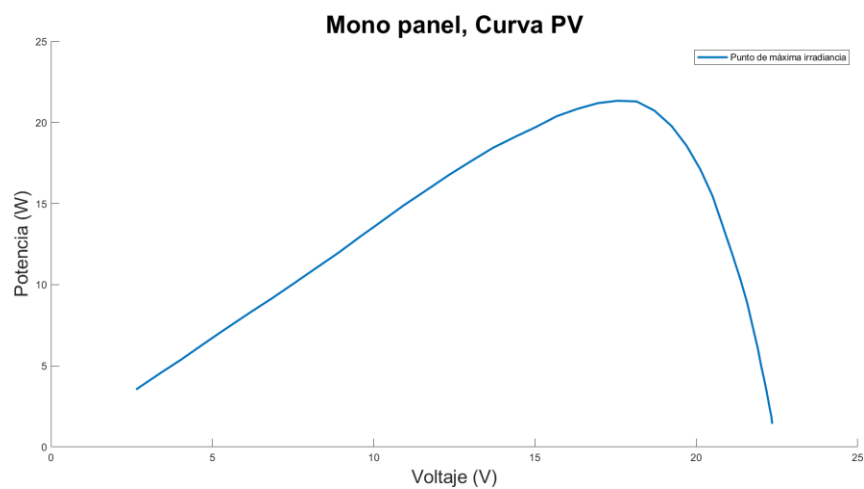


Figura 4.24. Curva P-V para un solo panel en posición de máxima irradiancia.

Tabla 4.7. Parámetros característicos experimentales: panel aislado en posición de máxima irradiancia

Inclinación (°)	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)	Pmax (W)	Temperatura PV(°C)
45	22.352137	1.3625	18.147009	1.177335	21.339212	35.365423

#### 4.4.4.1.2 Influencia de la sombra

Bajo las mismas condiciones anteriores se analiza la reacción del módulo en presencia de sombra. Las curvas de IV y PV se pueden ver en la Figura 4.25 y Figura 4.26 respectivamente. Las curvas naranja y azul son la respuesta del panel ante una mayor o menor cantidad de sección cubierta por la sombra. La sombra parcial 1 (curva azul) es menor que la sombra parcial 2 (curva naranja).

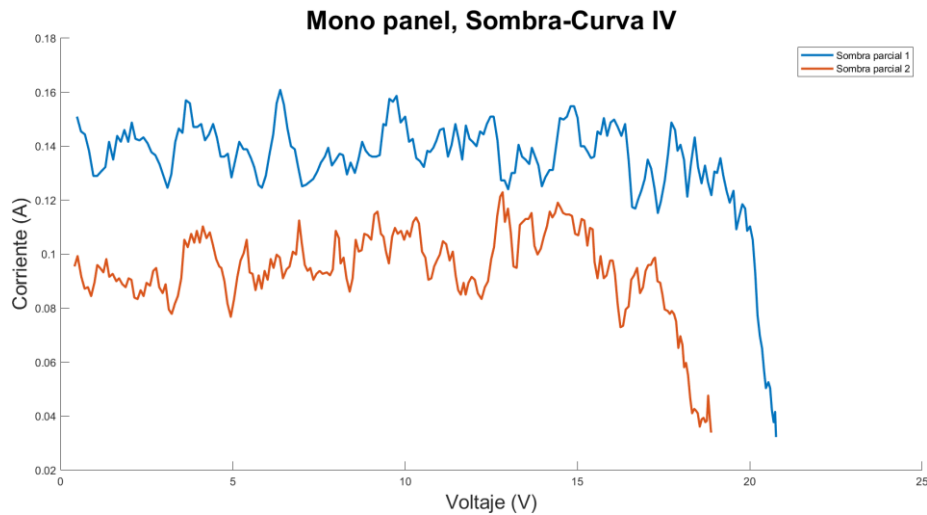


Figura 4.25. Curvas I-V: influencia de la sombra en un solo panel.

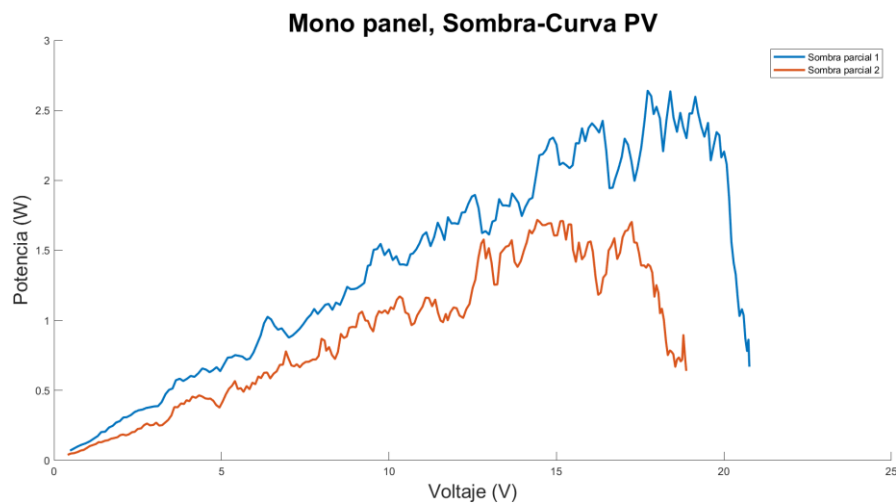


Figura 4.26. Curvas P-V: influencia de la sombra en un solo panel.

Tabla 4.8. Parámetros característicos experimentales: panel aislado bajo sombra

Sombra parcial (55°)	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)	Pmax (W)	Temperatura PV(°C)
1	20.758974	0.160852	17.82906	0.146016	2.64025	36.429741
2	18.875214	0.12294	14.499145	0.117445	1.718268	36.709344

Se puede notar que en presencia de sombra la capacidad de producir energía del módulo se ve fuertemente afectada, siendo mayor el efecto cuanto más área del panel sea cubierta por la sombra. En el punto de máxima irradiancia en ausencia de sombra (Tabla 4.7), se tiene una potencia máxima de aproximadamente 21W, mientras que en presencia de sombra la potencia está entorno a los 1.7 y 2.6W (Tabla 4.8).

#### 4.4.4.1.3 Variación del ángulo de inclinación

Para ver el efecto de la irradiancia sobre la generación del módulo solar, se varía ésta de forma indirecta, alterando el ángulo de incidencia de la luz solar sobre los paneles. Se realiza un trazado de curvas a 0, 20, 35, 45 y 55 grados de inclinación del módulo, el resultado se puede ver en las Figura 4.27 ,Figura 4.28 y en la Tabla 4.9.

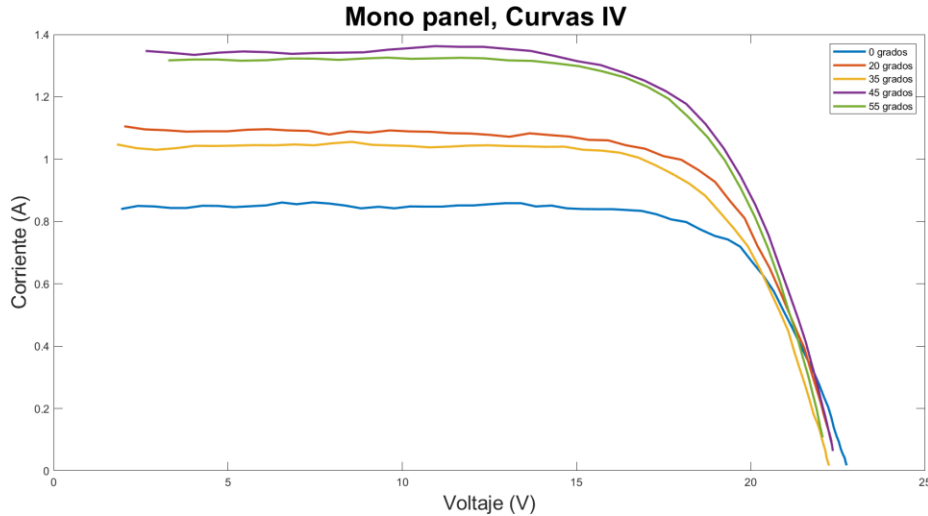


Figura 4.27. Curvas I-V: un solo panel a diferentes ángulos de inclinación.

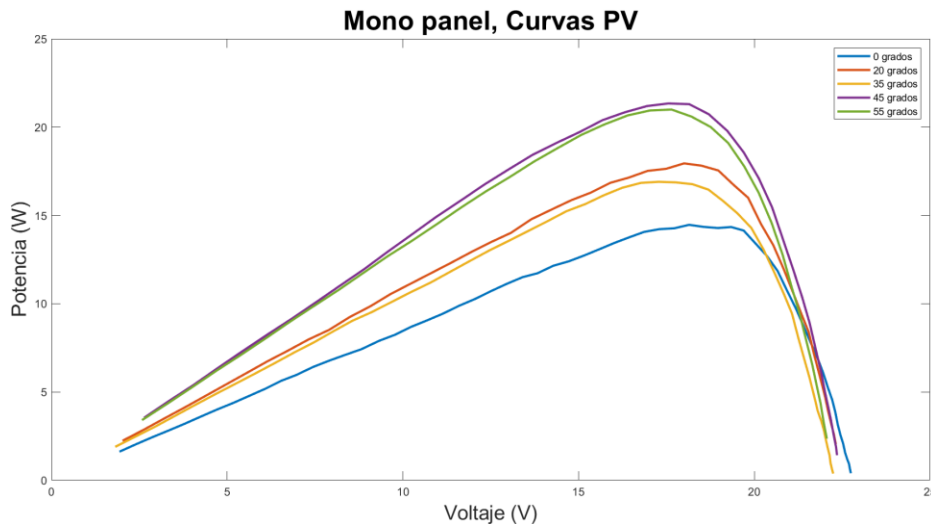


Figura 4.28. Curvas P-V: un solo panel a diferentes ángulos de inclinación.

Tabla 4.9. Parámetros característicos experimentales: panel aislado a diferentes ángulos de inclinación

Inclinación (°)	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)	Pmax (W)	Temperatura PV(°C)
0	22.745299	0.861401	18.557265	0.774038	14.466107	34.886321
20	22.317949	1.105357	18.492308	0.965247	17.945851	35.023654
35	22.242735	1.055357	17.767521	0.951511	16.901464	35.025469
45	22.352137	1.3625	18.147009	1.177335	21.339212	35.365423
55	22.061538	1.325687	18.211966	1.134478	20.99465	36.765796

En las figuras anteriores se puede ver claramente la capacidad de generación del módulo es directamente proporcional a la irradiancia incidente. La potencia máxima obtenida es de 21.34W para el ángulo de 45°, este ángulo no corresponde al punto de máxima incidencia, es decir, no corresponde al punto en donde los rayos solares inciden perpendicularmente sobre el módulo, el ángulo correspondiente es el de 55°, pero se nota que la potencia en esta posición es ligeramente menor (20.99W), se le atribuye esta diferencia a la temperatura (ver Tabla 4.9), pues ésta afecta de manera inversa a la generación de energía.

#### 4.4.4.2 Paneles en serie

Los siguientes resultados fueron obtenidos realizando las pruebas bajo las siguientes condiciones ambientales: irradiancia entre 258.15 y 476.07 W/m<sup>2</sup> [66], y una temperatura entre 34-36°C.

##### 4.4.4.2.1 Máxima irradiancia

El punto de máxima irradiancia en este ensayo se alcanza en el ángulo de 65° de inclinación de los paneles. Las curvas de IV y PV que describen su comportamiento se pueden observar en las Figura 4.29 y Figura 4.30. En la Tabla 4.10 están los datos característicos recopilados de las curvas características. Aquí se puede observar que la potencia máxima que se puede alcanzar, bajo las condiciones del ensayo, es de aproximadamente 41W. También se puede ver que la corriente máxima (I<sub>mp</sub>) es similar a la del panel aislado, pero su voltaje es del doble tal como se observó en las simulaciones de la sección 4.4.3.

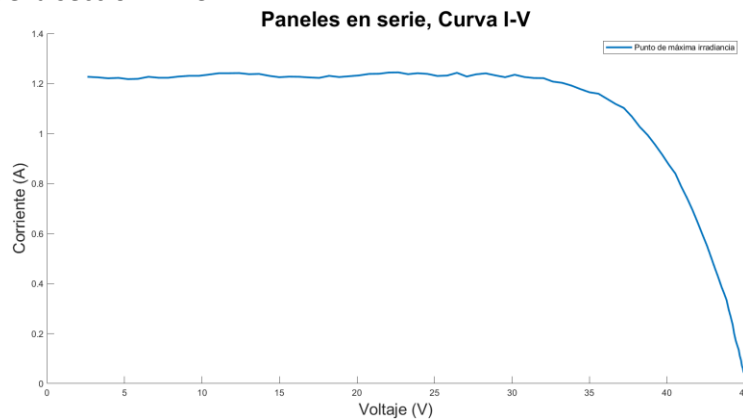


Figura 4.29. Curva I-V paneles en serie, posición de máxima irradiancia.

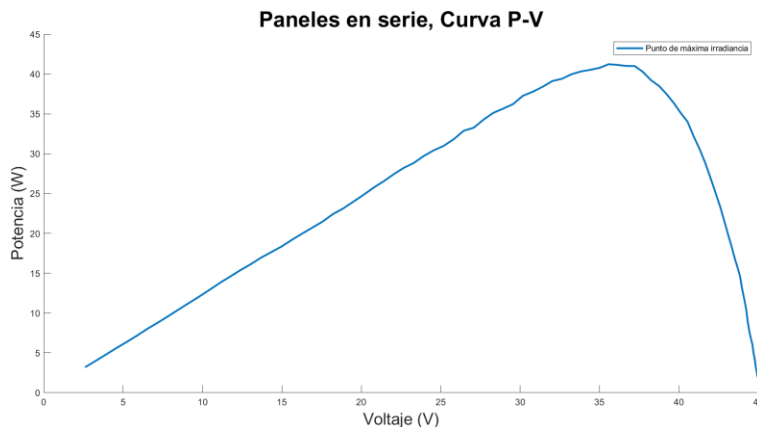


Figura 4.30. Curva P-V paneles en serie, posición de máxima irradiancia.

Tabla 4.10. Parámetros característicos experimentales: paneles en serie, posición de máxima irradiancia

Inclinación (°)	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)	Pmax (W)	Temperatura PV(°C)
65	44.981197	1.244918	36.123077	1.139423	41.233819	34.270109

#### 4.4.4.2.2 Influencia de la sombra

En las siguientes figuras (Figura 4.31 y Figura 4.32), se hace una comparación de la respuesta del arreglo de paneles en serie, en presencia de sombra y en ausencia de esta, en la Tabla 4.11 se registra los valores de los parámetros eléctricos.

En un arreglo de dos paneles en serie la corriente es la misma que en un arreglo de un solo panel, sin embargo, la tensión es el doble, en la Figura 4.31 se puede ver este efecto: a pesar de ser un arreglo de dos módulos en serie, al estar uno de ellos bajo sombra la potencia generada es producto de un solo módulo, la corriente es la misma pero la tensión es la mitad.

La curva naranja describe una corriente similar a la curva azul, normal en una conexión en serie, pero esta corriente es producida por el módulo sin sombra, presenta este valor próximo a la curva azul hasta llegar a la tensión aproximada de 22V, a partir de ese valor la corriente cae abruptamente debido a que el segundo panel apenas genera energía.

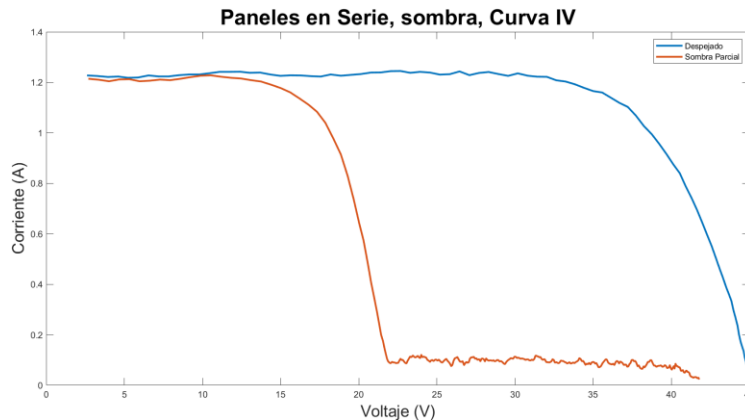


Figura 4.31. Curvas I-V paneles en serie, comparación paneles con sombra y despejado.

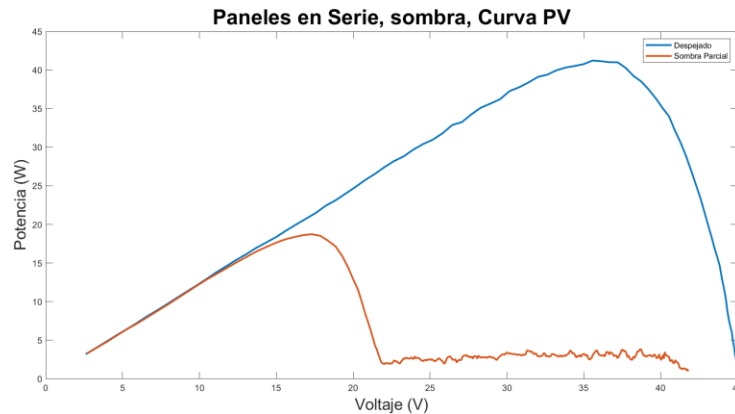


Figura 4.32. Curvas P-V paneles en serie, comparación paneles con sombra y despejado.

Tabla 4.11. Parámetros característicos experimentales: paneles en serie, comparación respuesta de panel bajo sombra y despejado

Inclinación (°)	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)	Pmax (W)	Temperatura PV(°C)
65	44.981197	1.244918	36.123077	1.139423	41.233819	34.270109
65 (sombra)	41.788034	1.227885	17.863248	1.039423	18.730464	34.357054

Según el área de la superficie del panel que es cubierta por la sombra afectará en mayor o menor proporción a la producción solar. Las curvas de IV (Figura 4.33) y PV (Figura 4.34), muestran cómo es el impacto del área sombreada de un panel en el arreglo, la curva azul representa un cubrimiento total de la superficie de uno de los dos módulos, la sombra naranja una sombra parcial y la amarilla una sombra parcial, pero de menor área que la anterior. Las curvas variarán según el número de celdas que estén sombradas, a mayor número de celdas menor será la producción de energía del módulo.

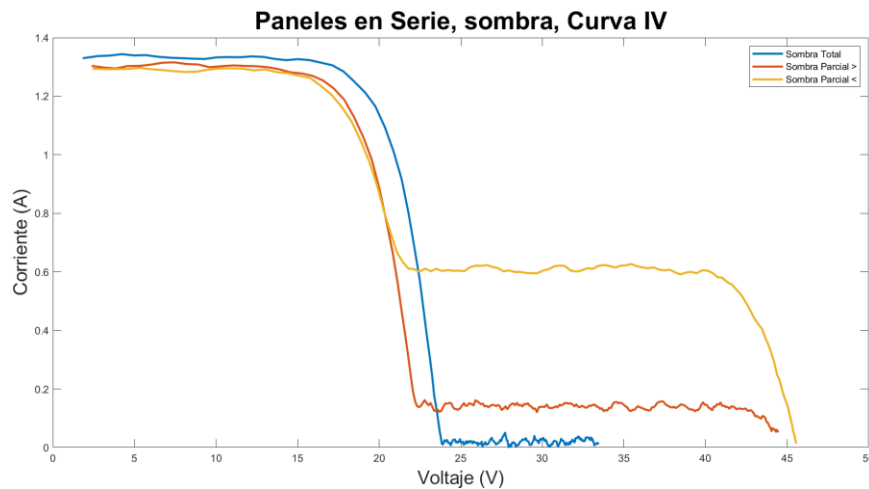


Figura 4.33. Curvas I-V paneles en serie, influencia de la sombra.

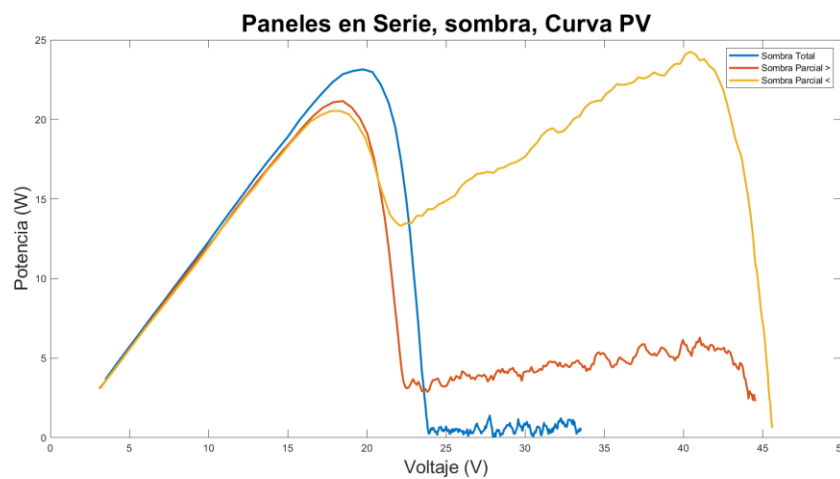


Figura 4.34. Curvas P-V paneles en serie, influencia de la sombra.

#### 4.4.4.2.3 Variación del ángulo de inclinación

Para ver el efecto de la irradiancia sobre la generación de los módulos solares, se varía ésta de forma indirecta, alterando el ángulo de incidencia de la luz solar sobre los paneles. Se realiza un trazado de curvas a 0, 20, 35, 45 y 65 grados de inclinación del arreglo en serie, los resultados se pueden ver en las Figura 4.27, Figura 4.28 y en la Tabla 4.9.

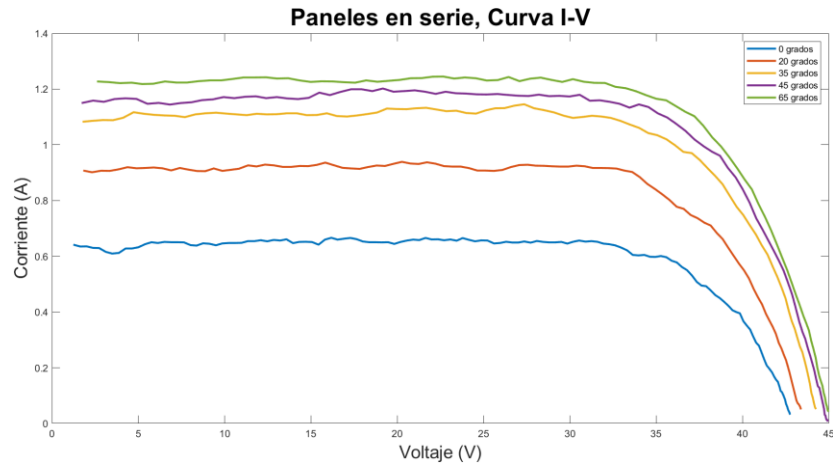


Figura 4.35. Curvas I-V: paneles en serie a diferentes ángulos de inclinación.

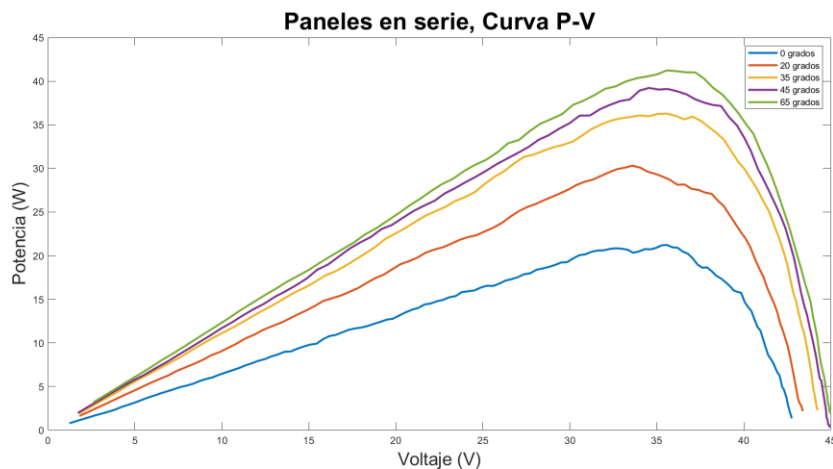


Figura 4.36. Curvas P-V: paneles en serie a diferentes ángulos de inclinación.

Tabla 4.12. Parámetros característicos experimentales: paneles en serie a diferentes ángulos de inclinación

Inclinación (°)	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)	Pmax (W)	Temperatura PV(°C)
0	42.752137	0.666346	35.897436	0.583929	21.230652	35.923611
20	43.384615	0.938874	34.037607	0.884478	30.320843	36.360516
35	44.25641	1.145467	36.082051	0.998764	36.281257	34.835653
45	44.940171	1.20206	35.087179	1.113049	39.226046	34.344611
65	44.981197	1.244918	36.123077	1.139423	41.233819	34.270109

En los resultados anteriores se puede ver claramente la capacidad de generación del módulo es directamente proporcional a la irradiancia incidente. La potencia máxima obtenida es de 41.23W y se alcanza en una inclinación de los módulos a un ángulo de 65°, este ángulo representa la incidencia perpendicular de los rayos solares en la superficie de los paneles, es decir, el punto de máxima irradiancia. A medida que la irradiancia aumenta la energía producida es mayor, tal como se estudió en la simulación de la sección 4.4.3.3 (Respuesta de dos paneles distribuidos en serie ante variaciones de temperatura e irradiancia), la corriente generada es directamente proporcional a la irradiancia, la corriente se ve fuertemente afectada ante las variaciones de irradiancia, mientras que el voltaje apenas varía.

#### 4.4.4.3 Paneles en paralelo

Las que se muestran a continuación se realizaron bajo dos estados atmosféricos; cielo despejado y cielo nublado. Con el cielo despejado se analiza la máxima potencia generada por el arreglo de paneles en paralelo y el efecto de la sombra, bajo la condición de cielo nublado se estudia la generación de energía a diferentes ángulos de inclinación del arreglo fotovoltaico.

##### 4.4.4.3.1 Máxima irradiancia

La máxima potencia obtenida del arreglo en paralelo en condiciones de temperatura 37°C, ángulo de inclinación 35° y una irradiancia igual a los arreglos antes analizados, es de 35.78W. Se puede ver en la tabla de los parámetros eléctricos (Tabla 4.13) y en las curvas de IV (Figura 4.37) y PV (Figura 4.38) que la conexión en paralelo de los paneles proporciona un voltaje igual a la de un solo panel, sin embargo, la corriente es del doble.

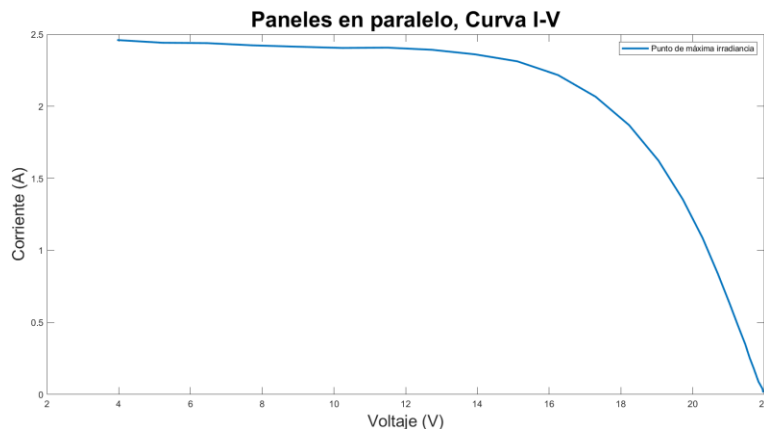


Figura 4.37. Curva I-V paneles en paralelo, posición de máxima irradiancia.



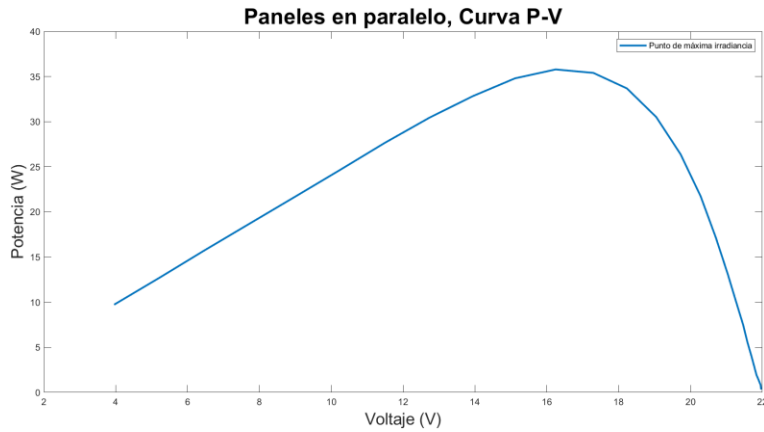


Figura 4.38. Curva P-V paneles en paralelo, posición de máxima irradiancia.

Tabla 4.13. Parámetros característicos experimentales: panel aislado en posición de máxima irradiancia

Inclinación (°)	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)	Pmax (W)	Temperatura PV(°C)
35	22.034188	2.460302	17.295726	2.066896	35.784138	37.108367

#### 4.4.4.3.2 Influencia de la sombra

En las siguientes figuras (Figura 4.39 y Figura 4.40), se hace una comparación de la respuesta del arreglo de paneles en paralelo, en presencia de sombra y en ausencia de esta, en la Tabla 4.14 se registra los valores de los parámetros característicos de corriente, voltaje y potencia de los módulos solares.

En un arreglo de dos paneles en paralelo el voltaje es igual que en un arreglo de un solo panel, sin embargo, la corriente es el doble, en la Figura 4.39 se puede ver este efecto: a pesar de ser un arreglo de dos módulos en paralelo, al estar uno de ellos bajo sombra la potencia generada es producto de un solo módulo, la tensión es la misma pero la corriente es la mitad.

La curva naranja muestra un voltaje similar a la curva azul, normal en una conexión en paralelo, pero la corriente registrada es de la mitad, ya que en este ensayo la sombra cubre toda la superficie del panel, por la tanto la corriente producida es debida solamente al módulo libre de sombra.

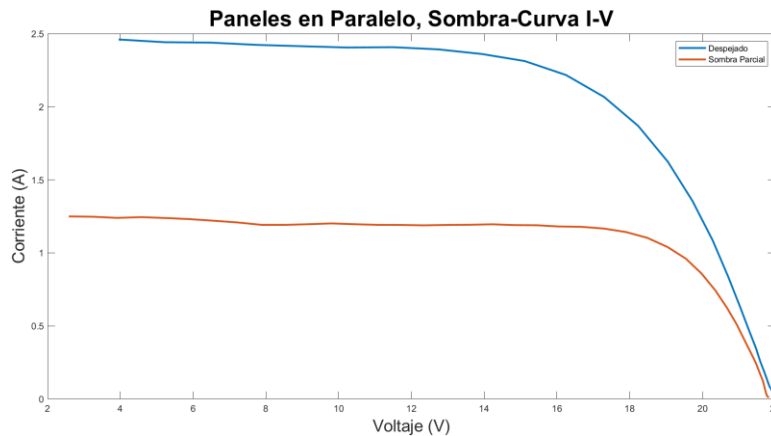


Figura 4.39. Curvas I-V paneles en paralelo, comparación paneles con sombra y despejado.

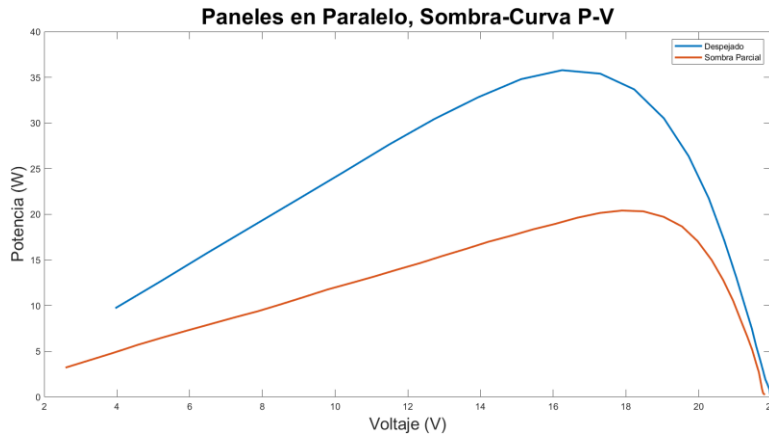


Figura 4.40. Curvas P-V paneles en paralelo, comparación paneles con sombra y despejado.

Tabla 4.14. Parámetros característicos experimentales: paneles en paralelo, comparación respuesta de panel bajo sombra y despejado.

Inclinación (35°)	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)	Pmax (W)	Temperatura PV(°C)
Despejado	22.034188	2.460302	17.295726	2.066896	35.784138	37.108367
Sombra	21.948718	1.249313	18.478632	1.103159	20.412838	36.921977

#### 4.4.4.3.3 Variación del ángulo de inclinación

Los resultados que se muestran a continuación fueron obtenidos en condiciones de cielo nublado. Al igual que en los arreglos de panel aislado y en serie se hace una variación en la inclinación de los módulos. Se realiza un trazado de curvas a 0, 20, 35, 45 y 55 grados de inclinación del arreglo en paralelo, los resultados se pueden ver en las Figura 4.41, Figura 4.42 y en la Tabla 4.15.

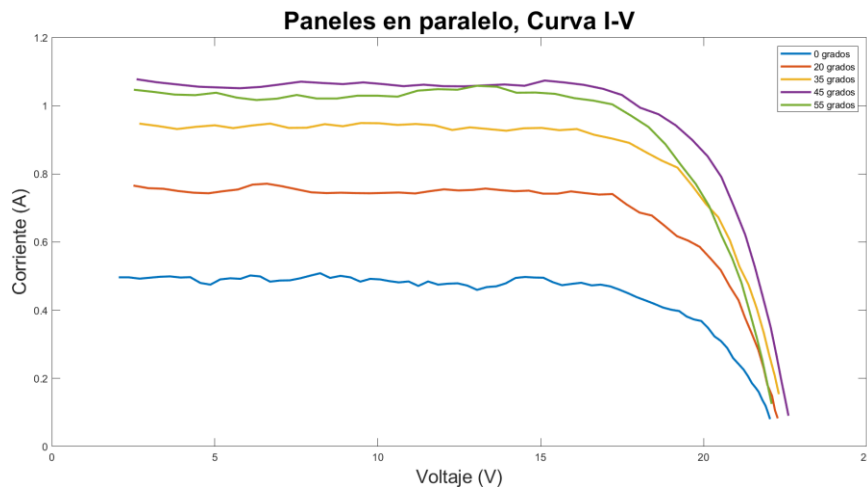


Figura 4.41. Curvas I-V: paneles en paralelo a diferentes ángulos de inclinación.

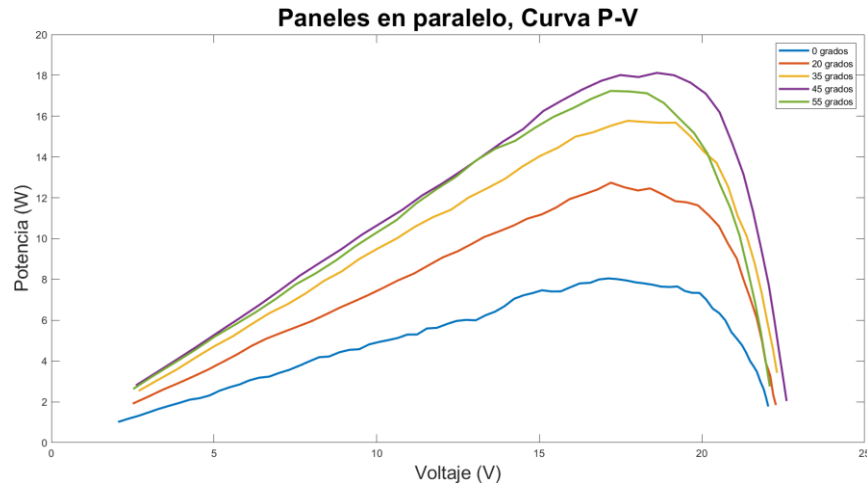


Figura 4.42. Curvas P-V: paneles en paralelo a diferentes ángulos de inclinación.

Tabla 4.15. Parámetros característicos experimentales: paneles en paralelo a diferentes ángulos de inclinación.

Inclinación (°)	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)	Pmax (W)	Temperatura PV(°C)
0	22.037607	0.508654	17.401709	0.460852	8.049418	30.422536
20	22.273504	0.771291	17.620513	0.711401	12.741137	30.677538
35	22.307692	0.949313	18.232479	0.863599	15.774619	31.021065
45	22.601709	1.077885	19.14188	0.94272	18.122661	31.423624
55	22.08547	1.058654	17.774359	0.970742	17.237402	32.03358

En los resultados anteriores se puede ver abiertamente que la capacidad de generación del arreglo en paralelo es directamente proporcional a la irradiancia incidente. La potencia máxima obtenida bajo condiciones de nubosidad es de 18.12W y se alcanza en una inclinación de los módulos a un ángulo de 45°, este ángulo no representa la incidencia perpendicular de los rayos solares en la superficie de los paneles, es decir, el punto de máxima irradiancia. El ángulo correspondiente a la máxima irradiancia es de 55°, pero en esta posición no se obtiene la mayor potencia posible en las condiciones del ensayo, se atribuye este efecto a la temperatura pues los módulos presentan una diferencia en la temperatura en las dos pruebas.

#### 4.4.5 Pruebas experimentales en interiores

Las pruebas realizadas para verificar el funcionamiento del sistema en interiores consisten en disponer los módulos fotovoltaicos en conexiones en serie, paralelo y de un solo panel (panel aislado) y obtener de cada configuración las curvas características que definen el comportamiento del módulo solar y los parámetros fundamentales que describen su rendimiento eléctrico (Isc, Voc y Pmax).

Para simular la luz solar en el laboratorio se usa dos focos halógenos de 400W. A fin de ver la influencia de la irradiancia en la generación de energía fotovoltaica, la distancia entre de la fuente de luz y los módulos se varía, con esto se consigue alterar la intensidad de la luz incidente sobre el

módulo y con ello la irradiancia. En estas pruebas no se realiza cambios el ángulo de inclinación de los paneles. Cabe mencionar que no se realiza mediciones de la irradiancia incidente.

#### 4.4.5.1 Panel aislado

Para el estudio del panel aislado en pruebas en interiores, se analiza la respuesta de dos módulos de potencia diferente (30 y 40W). Se sitúa la fuente de luz a una distancia aproximada de 30 cm del panel y se varía la distancia en intervalos de 10 cm.

##### 4.4.5.1.1 Influencia de la irradiancia, panel de 30W

Se puede observar en las curvas características IV (Figura 4.43) y PV (Figura 4.44) que en el punto 1, el más cercano al panel, la energía producida es mayor que en las distancias siguientes. A medida que se aleja la fuente de luz, la corriente producida por el panel disminuye producto de la disminución de la irradiancia. Los valores de corriente, voltaje y potencia se pueden ver en la Tabla 4.16. Es estas pruebas se puede ver el efecto de la irradiancia, al igual como se observó en las pruebas en exteriores y en las simulaciones.

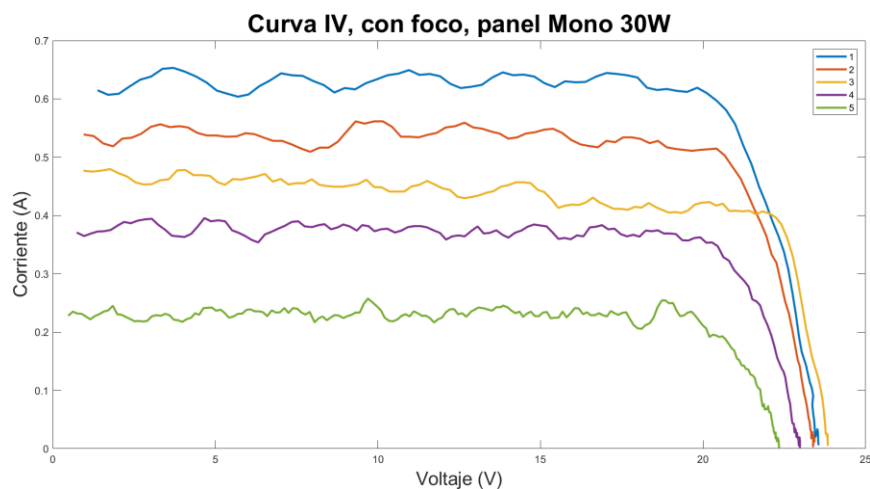


Figura 4.43. Curvas I-V: un solo panel de 30W a diferentes distancias de la fuente de luz.

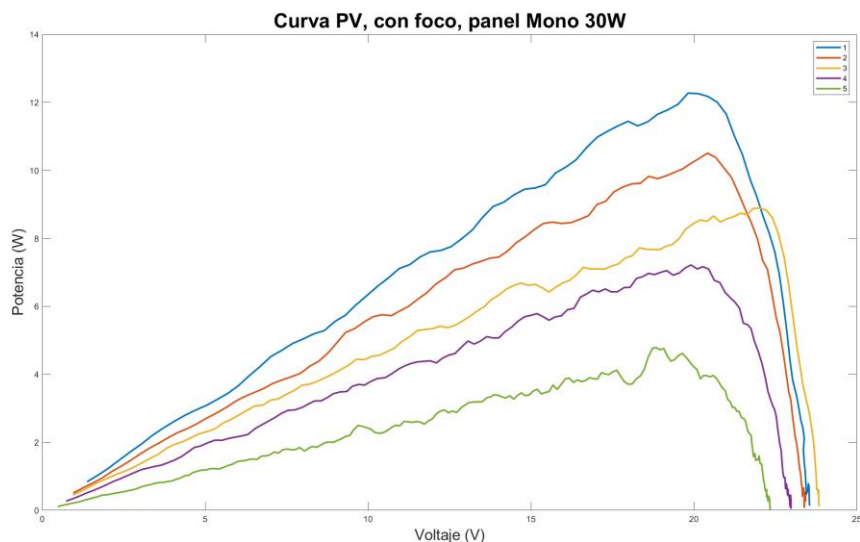


Figura 4.44. Curvas P-V: un solo panel de 30W a diferentes distancias de la fuente de luz.

Tabla 4.16. Parámetros característicos experimentales: panel aislado de 30W a diferentes distancias de la fuente de luz.

Curvas	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)	Pmax (W)	Temperatura PV(°C)
1	23.811966	0.643819	20.936752	0.59217	12.453051	25.56489
2	23.470085	0.561401	20.670085	0.50261	10.506877	25.89621
3	23.897436	0.479533	22.22906	0.397115	8.892092	26.21563
4	23.090598	0.395467	20.102564	0.353159	7.217843	26.320411
5	22.451282	0.257555	18.957265	0.249313	4.792907	26.270192

#### 4.4.5.1.2 Influencia de la temperatura panel 30W

Al dejar expuestos los paneles a la fuente de luz, ésta empieza a aumentar la temperatura del módulo. Como resultado a este cambio de temperatura se obtiene las siguientes figuras. Al comparar estos resultados con las simulaciones de la sección 4.4.3.1 se comprueba que la temperatura afecta de forma inversa la producción de energía, en las Figura 4.45 y Figura 4.46 se nota que a mayor temperatura hay una disminución en el voltaje entregado por el panel. Los valores de los parámetros característicos son registrados en la Tabla 4.17.

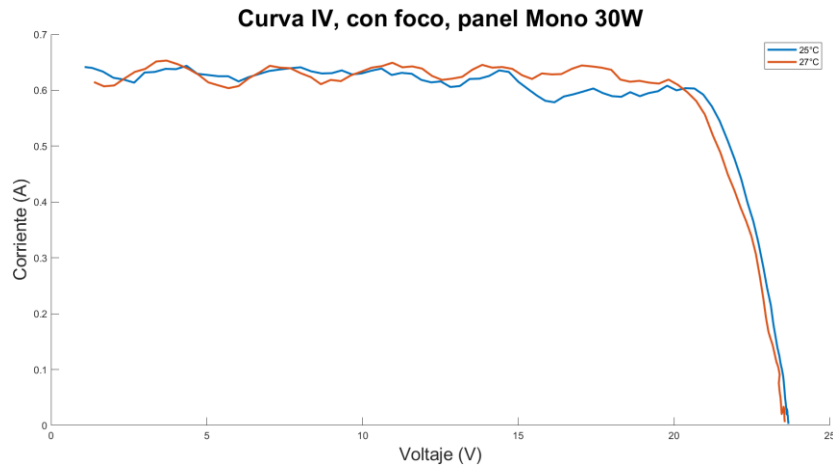


Figura 4.45. Curvas I-V: un solo panel de 30W, influencia de la temperatura.

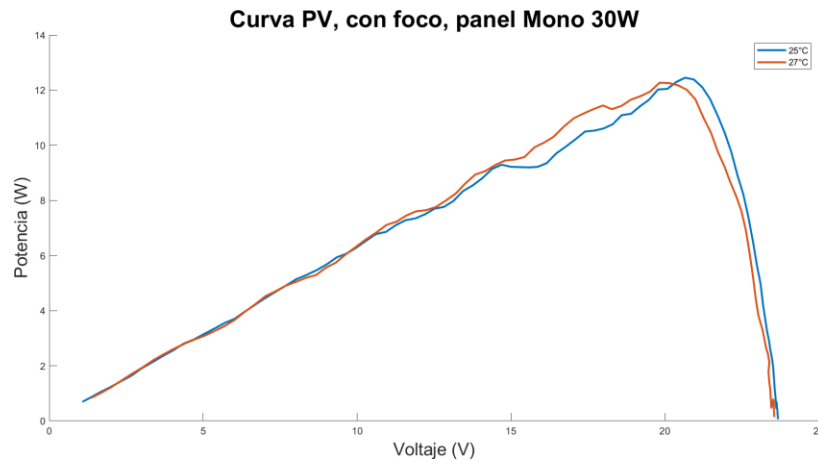


Figura 4.46. Curvas P-V: un solo panel de 30W, influencia de la temperatura.

Tabla 4.17. Parámetros característicos experimentales: panel aislado de 30W, influencia de la temperatura.

Curvas	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)	Pmax (W)	Temperatura PV(°C)
1	23.811966	0.643819	20.936752	0.59217	12.453051	25.56489
2	23.596581	0.653159	20.119658	0.609753	12.271206	27.13243

#### 4.4.5.1.3 Influencia de la irradiancia, panel de 40W

Se analiza la producción solar en un módulo del laboratorio de mayor potencia (40W). Al igual que las pruebas de previas del panel de 30W se varía la distancia de la fuente de luz, y se registran los datos de los parámetros eléctricos en la tabla correspondiente (Tabla 4.18). En las curvas características siguientes se puede observar cómo disminuye la corriente conforme aumenta la distancia entre los focos y el panel.

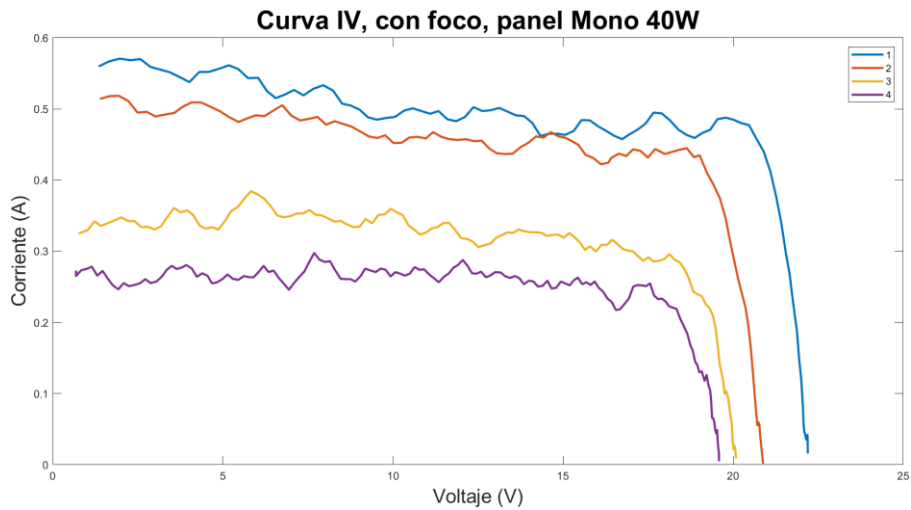


Figura 4.47. Curvas I-V: un solo panel de 40W a diferentes distancias de la fuente de luz.

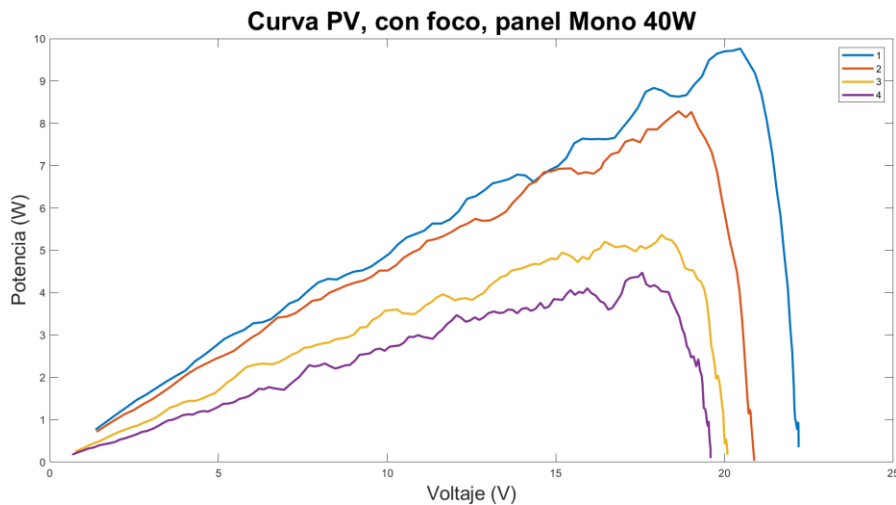


Figura 4.48. Curvas P-V: un solo panel de 40W a diferentes distancias de la fuente de luz.

Tabla 4.18. Parámetros característicos experimentales: panel aislado de 40W a diferentes distancias de la fuente de luz.

Curvas	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)	Pmax (W)	Temperatura PV(°C)
1	22.246154	0.570742	20.690598	0.457555	9.765062	25.42341
2	20.950427	0.518544	18.847863	0.43228	8.285657	25.62472
3	20.17094	0.384478	18.276923	0.288324	5.366175	25.68424
4	19.729915	0.297665	17.675214	0.237775	4.472449	25.98421

#### 4.4.5.1.4 Influencia de la temperatura, panel 40W

En las curvas de IV (Figura 4.49) y PV (Figura 4.50) se puede apreciar el desplazamiento hacia la izquierda del voltaje entregado por el panel, esta disminución en el valor de tensión es debido al aumento de la temperatura en el módulo fotovoltaico, en cuanto a la corriente máxima producida son similares para ambas curvas. En la Tabla 4.19 se puede ver los demás parámetros eléctricos.

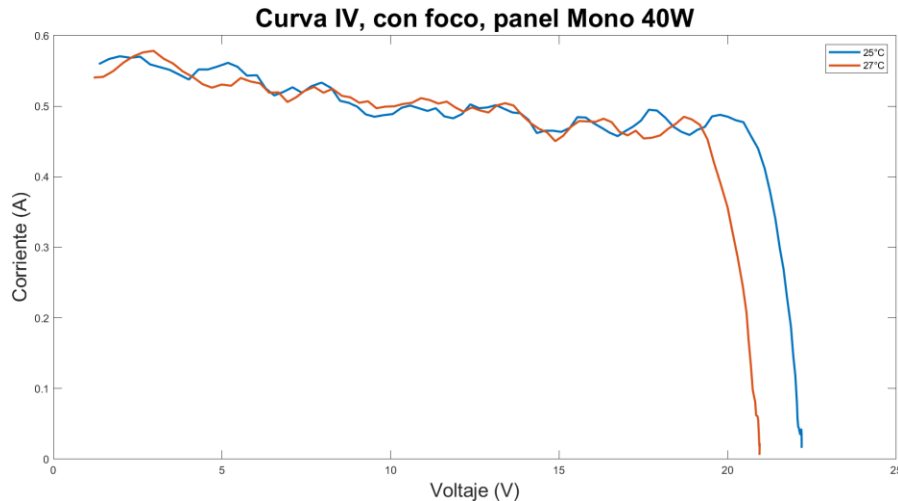


Figura 4.49. Curvas I-V: un solo panel de 40W, influencia de la temperatura.

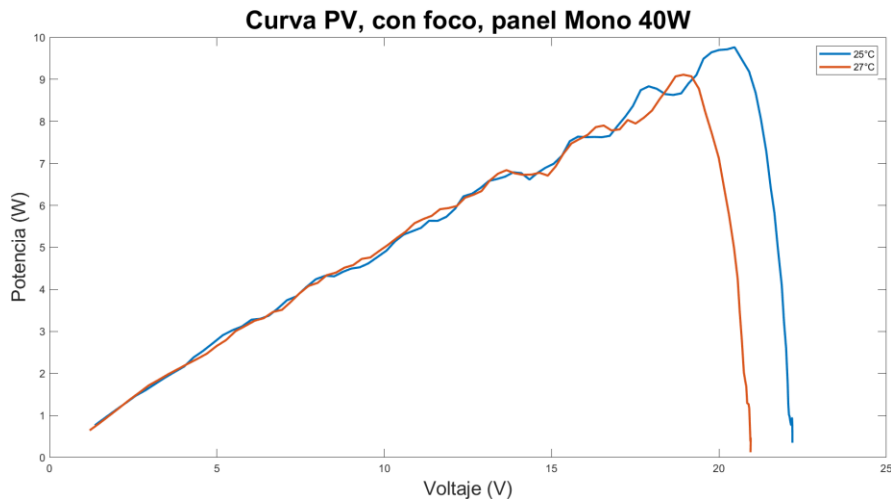


Figura 4.50. Curvas P-V: un solo panel de 40W, influencia de la temperatura.

Tabla 4.19. Parámetros característicos experimentales: panel aislado de 40W, influencia de la temperatura.

Curvas	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)	Pmax (W)	Temperatura PV(°C)
1	22.246154	0.570742	20.690598	0.457555	9.765062	25.42341
2	21.011966	0.578434	19.176068	0.473489	9.111371	27.02562

#### 4.4.5.2 Paneles en serie

Siguiendo la misma línea de análisis de la influencia de la irradiancia en la producción de energía, al someter el arreglo de paneles en serie a prueba se registran las siguientes curvas características: curva IV (Figura 4.51), curva PV (Figura 4.52). En la Tabla 4.20, se puede ver la diferencia de los parámetros de las diferentes curvas.

A pesar de tener una conexión en serie la potencia máxima alcanzada no supera a la producida por el arreglo de un solo panel (ver Tabla 4.16), si bien cumple con generar un voltaje del doble de valor, la corriente entregada es menor, casi en un 50%. Más adelante se explicará el porqué del resultado aquí mencionado.

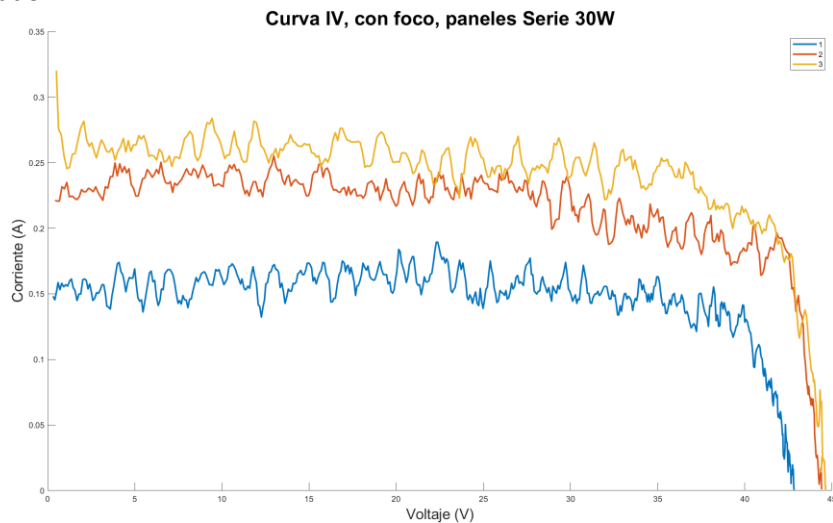


Figura 4.51. Curvas I-V: paneles en serie a diferentes distancias de la fuente de luz.

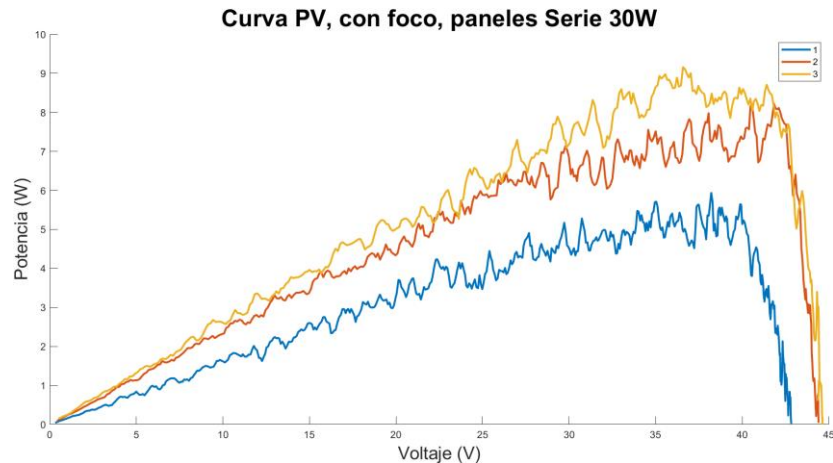


Figura 4.52. Curvas P-V: paneles en serie a diferentes distancias de la fuente de luz.



Tabla 4.20. Parámetros característicos experimentales: paneles de 30W en serie a diferentes distancias de la fuente de luz.

Curvas	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)	Pmax (W)	Temperatura PV(°C)
1	43.135043	0.189423	38.280342	0.149313	5.935825	25.02364
2	44.608547	0.255357	41.921368	0.193269	8.222196	25.05642
3	44.841026	0.320192	36.687179	0.248214	9.160915	25.236541

#### 4.4.5.3 Paneles en paralelo

Del mismo modo que en los casos de estudio anteriores, la corriente entregada por los paneles es directamente proporcional a la irradiancia. La Figura 4.53 y Figura 4.54 representan las curvas características de IV y PV respectivamente, y en la Tabla 4.21 se divisa los parámetros característicos del arreglo en paralelo.

Al igual que en el arreglo en serie, se esperaría obtener el doble de potencia comparado con la potencia generada por un solo módulo fotovoltaico, sin embargo, en este caso tampoco se alcanza. Si bien el voltaje generado es característico de los paneles en paralelo, la corriente entregada es de muy baja intensidad.

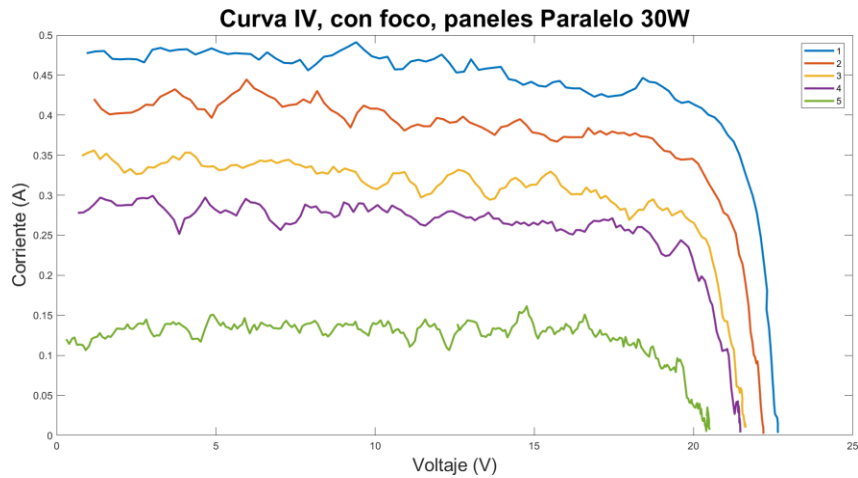


Figura 4.53. Curvas I-V: paneles en paralelo a diferentes distancias de la fuente de luz.

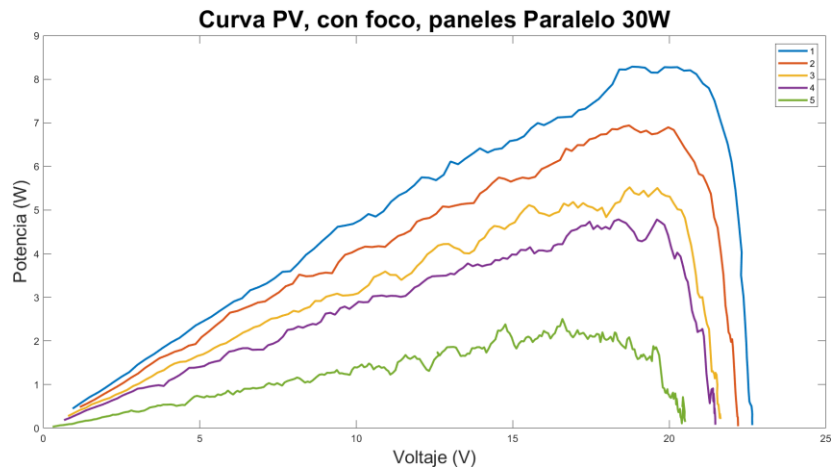


Figura 4.54. Curvas P-V: paneles en serie a diferentes distancias de la fuente de luz.

Tabla 4.21. Parámetros característicos experimentales: paneles de 30W en paralelo a diferentes distancias de la fuente de luz.

Curvas	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)	Pmax (W)	Temperatura PV(°C)
1	22.711111	0.491071	19.018803	0.435577	8.285668	26.66482
2	22.276923	0.444368	18.899145	0.3625	6.938216	25.89621
3	21.702564	0.355907	18.878632	0.285577	5.521533	25.21373
4	21.582906	0.299313	18.492308	0.256456	4.78582	25.20142
5	20.652991	0.161401	16.652991	0.143269	2.502807	25.18863

## 4.5 Características del prototipo de GD

Este sistema permite conocer cada uno de los componentes que conforman una instalación de energía fotovoltaica y estudiar la influencia de distintas variables en la generación de energía. A continuación, se presenta los datos técnicos del prototipo implementado y las posibles prácticas realizables.

### 4.5.1 Datos técnicos

- Paneles: 2 paneles fotovoltaicos de 30W.
- Regulador de carga: 1 regulador con capacidad de baterías de 12 y 24V DC, tensión máxima de 75V y corriente máxima de 10A, incluye seguimiento de máxima potencia (MPPT).
- Batería: 1 batería de 12V 25Ah
- Módulo emulador del sol: 2 focos de 400W, incluye un trípode y permite graduar la altura de los focos.
- Soporte de paneles: 1 soporte que permite variar el ángulo de inclinación de 0 a 90 grados.
- Sistema caracterizador: permite obtener las curvas características y los parámetros eléctricos de los paneles.
- Aplicación de instrumentación virtual LabVIEW para interacción del usuario.

### 4.5.2 Prácticas realizables

Para el estudio y análisis de un sistema fotovoltaico de generación distribuida, en el estado actual del equipo implementado, se podría desarrollar las siguientes prácticas:

#### Estudio del funcionamiento de una instalación solar fotovoltaica aislada.

- Mono panel.
- Paneles en serie.
- Paneles en paralelo.
- Paneles conectados a baterías.

- Funcionamiento con diferentes tipos de cargas en continua.
- Rendimientos de la instalación.

#### **Determinación de los parámetros característicos de los paneles solares.**

- Curva Intensidad – Voltaje.
  - Intensidad de cortocircuito.
  - Tensión de circuito abierto.
  - Curva Potencia – Voltaje.
  - Tensión máxima generada.
  - Corriente máxima generada.
  - Potencia máxima generada.
  - Factor de forma.
  - Rendimiento.
- Influencia del ángulo de inclinación y de la irradiancia en la producción de energía.
  - Determinación de las características de los paneles conectados en serie.
  - Determinación de las características de los paneles conectados en paralelo.

#### **Estudio del comportamiento de los paneles solares y del seguidor MPPT en diversas condiciones de funcionamiento.**

##### Mono panel

- Conectado con cargas diferentes.
- Conectado a batería
- Conectado a batería con cargas diferentes

##### Paneles en serie

- Conectados a cargas diferentes.
- Conectados a batería.
- Conectado a batería con cargas diferentes.

##### Paneles en paralelo

- Conectados a cargas diferentes.
- Conectados a batería.
- Conectado a batería con cargas diferentes.

## 5 Conclusiones y trabajos futuros

### 5.1 Conclusiones

En este proyecto se diseñó e implementó un prototipo de un sistema de generación distribuida, que se utiliza en una instalación fotovoltaica aislada de la red y de baja producción. Para lograrlo, se ha realizado un análisis teórico de las distintas fuentes, sus componentes eléctricos y los sistemas de almacenamiento que conforman una instalación de generación distribuida. Con los resultados obtenidos se evidencia el cumplimiento del objetivo principal de este proyecto.

Para comprender el diseño y el desarrollo del equipo, se ha dado una descripción general de una instalación de generación distribuida y las fuentes renovables más comúnmente utilizadas, que a su vez pueden operar de forma simultánea en los sistemas de generación híbridos.

Se desarrolló un sistema de generación distribuida teniendo en cuenta el principio de funcionamiento básico de una instalación de este tipo, capaz de optimizar la producción de energía, almacenarla y gestionar su distribución. Está conformado por un sistema de generación basado en paneles fotovoltaicos, un sistema de almacenamiento y un sistema de interconexión.

Se diseñó un sistema de caracterización para paneles, conformado por las etapas de potencia, acondicionamiento, adquisición y control. Estas etapas proporcionan el medio adecuado para el estudio y determinación de las variables eléctricas y ambientales que impactan en la producción de energía. El control y la adquisición de los datos se hace a través de una tarjeta de desarrollo ampliamente utilizada en el diseño e implementación de sistemas de tiempo real. A través de esta se establece la comunicación serial con LabVIEW para el tratamiento y presentación de los datos.

El prototipo obtenido permite el estudio y análisis de forma didáctica de los principales elementos y componentes de producción, almacenamiento y gestión de la energía; por otro lado, posibilita el análisis de los datos característicos de los paneles solares y la influencia de las variables atmosféricas que afectan la producción de energía.

Se implementó una interfaz gráfica en LabVIEW que permite la comunicación con los sistemas de generación y caracterización. Cuenta con un menú que le permite al usuario elegir entre los sistemas antes mencionados. Desde la interfaz el usuario puede ordenar y observar el trazado de las curvas características I-V y P-V, y los parámetros eléctricos de corriente y voltaje máximo, corriente de cortocircuito, voltaje de circuito abierto y potencia máxima de los módulos fotovoltaicos.

Se desarrolló una guía de conexión del sistema donde se detallan las configuraciones de los paneles que se pueden realizar y cómo operar el sistema a través de la interfaz de usuario y la exportación de los datos obtenidos.

Se explicaron y describieron los modos de operación del sistema de generación, y se validó su desempeño por medio de una serie de pruebas que consistieron en modificar la conexión de las fuentes energía (paneles y batería) y el análisis de su comportamiento según la demanda de distintas cargas resistivas.

Las simulaciones realizadas en la herramienta Simulink de Matlab de los módulos fotovoltaicos, con los datos del fabricante, permitieron obtener una visión general del comportamiento de los paneles

ante la influencia de las variables atmosféricas de irradiancia y temperatura. Es conveniente mencionar que cualquier análisis que se realice a un sistema fotovoltaico se debe comenzar con la obtención de las curvas características I-V y P-V ya que indican los puntos de operación del módulo fotovoltaico.

Las pruebas realizadas demostraron que para las tres configuraciones de la fuente de generación (panel aislado, serie y paralelo), el sistema implementado gestiona de forma adecuada la energía, abastece a la carga y al sistema de acumulación y les brinda protección a dichos sistemas.

Existen diferencias en la producción de energía de cada arreglo fotovoltaico implementado, sin embargo, el seguimiento de máxima potencia proporcionado por el regulador facilita el aprovechamiento de los recursos de cada configuración. Para cada arreglo, ante una limitada producción de energía o un consumo excesivo de la carga, el sistema implementado suplente la demanda apoyando al sistema de generación con el sistema de almacenamiento.

Las curvas características de I-V y P-V junto con los parámetros eléctricos obtenidos en las diferentes pruebas, confirman el buen funcionamiento del sistema de caracterización. Se obtiene que:

- El sistema permite analizar la influencia de las variables de irradiancia y temperatura que afectan la producción de energía. Tanto para los arreglos de un solo panel, paneles en serie y paralelo, se demuestra la dependencia proporcional con la irradiancia y la dependencia inversa con la temperatura. Según las curvas obtenidas se muestra una correspondencia del comportamiento de los módulos reales con la respuesta teórica de las simulaciones obtenidas en Matlab.
- Los arreglos en serie y paralelo proporcionan una mayor potencia comparado con un solo panel. En serie, lo hace gracias al aumento del voltaje, pues es el correspondiente al doble del valor de un solo módulo, mientras la corriente permanece igual. En paralelo, se logra por medio del aumento de la corriente, pues es el doble que en el caso de un solo módulo, mientras que el voltaje es el mismo.
- Con el sistema emulador de la luz solar (focos halógenos) implementado en interiores, la potencia máxima generada fue mayor en el arreglo de un solo panel, debido a que la luz de los focos se concentra en un área pequeña, alrededor de la superficie de un solo panel. Al implementar arreglos de más de un panel, la luz incidente estará más dispersa provocando una reducción en la uniformidad de la irradiancia que incide sobre los módulos. Para notar una diferencia entre las distintas configuraciones es necesario aumentar el número de fuentes o implementar fuentes de un mayor tamaño.
- El tiempo de carga del condensador será menor cuanto más alta sea la irradiancia incidente en los paneles, debido a que, la irradiancia es proporcional a la corriente que se genera en las celdas. Esto se refleja en la generación de curvas más suaves, a través de la interfaz desarrollada.
- Ante una baja irradiancia las curvas presentan cambios más abruptos, producto del mayor número de puntos usados en el trazado. Ante esta condición, el arreglo de paneles en paralelo proporciona la mejor prestación para el trazado de curvas debido a que en esta configuración se genera más corriente por el mismo valor de voltaje que en el caso de un

solo módulo, por lo tanto, la carga del condensador será más inmediata que en otras configuraciones.

De manera general, con los distintos resultados se comprobó que el sistema es apto para su uso en exteriores e interiores como equipo de laboratorio ya que permite realizar prácticas que incluyen el estudio del funcionamiento de una instalación solar fotovoltaica aislada, la determinación de los parámetros característicos de los paneles en distintas configuraciones y el seguimiento de máxima potencia en distintos modos de operación del sistema.

## 5.2 Trabajos futuros

Se propone continuar con el desarrollo del sistema de generación distribuida, teniendo en cuenta lo siguiente para obtener un sistema más óptimo y completo:

- Complementar el sistema de interconexión con un inversor de corriente directa a corriente alterna y de esta manera se obtendrá un sistema de generación con capacidad de operar tanto de forma aislada (modo isla), como conectada a la red. Este dispositivo permitirá estudiar la eficiencia en la conversión de energía, el funcionamiento del sistema bajo diferentes tipos de carga en régimen de alterna y la inyección de la energía producida a la red.
- Incorporar cada uno de los componentes del sistema en un bastidor, de este modo conseguir un sistema ordenado que facilitará la manipulación y conexión de cada uno de los elementos del equipo.
- Para mejorar la respuesta del sistema en interiores se deben utilizar focos halógenos de mayor tamaño y potencia para alcanzar niveles de irradiancia mayores y con ello aumentar el nivel de aprovechamiento de la capacidad de producción de los paneles. Los focos deben admitir regulación de intensidad para estudiar el comportamiento de los módulos ante las variaciones de irradiancia.
- Para mejorar el trazado de las curvas en condiciones de baja irradiancia, se podría implementar un algoritmo que varíe el período de muestro en función de la irradiancia. Es de interés que en estas condiciones el tiempo de captura de un dato a otro sea mayor.
- Para un correcto análisis y estudio de la influencia de la temperatura se debe implementar un sistema que permita variarla y controlarla en los paneles; respecto a la irradiancia, incorporar en el prototipo un sensor que permita determinar su valor y mostrarlo en la interfaz. Con estas mejoras se pueden conocer las condiciones concretas bajo las que se han realizado las medidas.
- Para disminuir la influencia de las posibles interferencias provocadas por el ruido eléctrico y acoplado, se debe diseñar para el sistema de caracterización una PCB que cumpla con las directivas de interferencia electromagnética.
- Se debe implementar e integrar un sistema de energía eólica como complemento al sistema fotovoltaico para obtener una instalación híbrida. De esta manera, el equipo de generación distribuida, además de permitir el análisis fotovoltaico, tendrá la facultad de realizar el estudio del funcionamiento y disposición de un sistema de generación de energía eólica.

Entre los parámetros de análisis estarán: trazado de curvas características del aerogenerador, tensión y potencia en función de la velocidad de rotación, par en función de la intensidad generada y la determinación de los puntos de operación frente a condiciones atmosféricas variables.

- Si se busca un sistema más independiente se puede incluir un sistema de orientación automático para seguimiento de máxima irradiancia y la variación del ángulo de inclinación. Incluir un sistema de conmutación automático, que realice las conexiones en serie y paralelo de los paneles, también, la conexión y desconexión de los sistemas de generación, almacenamiento y cargas. Todas estas opciones deben ser seleccionadas a través de la interfaz gráfica.

Para todas estas modificaciones es necesario adaptar la interfaz gráfica a medida que se integran más funcionalidades al sistema de generación distribuida.

## 6 Presupuesto

En esta sección se detalla el presupuesto de la realización del TFM, componiéndose de dos partes:

- Coste para el desarrollo del diseño hardware y software del prototipo a escala de generación distribuida.
- Coste de personal necesario para el desarrollo del trabajo.

La duración de este Trabajo Fin de Máster ha sido de seis meses, representa el trabajo de un graduado en ingeniería física a tiempo completo.



## 6.1 Coste del diseño hardware y software

Tabla 6.1. Coste de los materiales para el diseño hardware y software.

Concepto		Cantidad	Precio und. (€)	Total (€)
Hardware	Ordenador Lenovo	1	700 €	700 €
	Regulador BlueSolar MPPT 75/10 VICTRON	1	79.39 €	79.39 €
	Interfaz VE.Direct a USB	1	28.42 €	28.42 €
	Placa solar fotovoltaica monocristalina VICTRON 30W / 12V	2	35.28 €	70.57 €
	Batería solar Victron Energy AGM Super Cycle 12V - 25Ah C20	1	58.81 €	58.81 €
	Soporte para panel solar	1	84,92 €	84,92 €
	Condensador electrolítico 2,2mF	1	5,95 €	5,95 €
	Diodo Shocky 15SQ045TR	2	1,42 €	2,84 €
	Adafruit power relay featherwing	1	8,77 €	8,77 €
	Resistencia 150KΩ	1	0,26 €	0,26 €
	Resistencia 10KΩ	2	0,23 €	0,23 €
	Resistencia 5KΩ	1	0,23 €	0,23 €
	Resistencia 6,8KΩ	1	0,23 €	0,23 €
	Resistencia 56 Ω	1	3,12 €	3,12 €
	Resistencia Chasis 5 Ω	2	4,09 €	8,18 €
	Sensor de corriente - ACS723	1	9,93 €	9,93 €
	STM32F411	1	14,97 €	14,97 €
	Termistor NTC 10K	1	0,53 €	0,53 €
	Clema	1	2,00 €	2,00 €
	Placa de prototipado	1	3,00 €	3,00 €
	Cable 10A (metros)	7	1,50 €	10,50 €
Conector mini Tamiya macho	6	1,62 €	9,72 €	
Conector mini Tamiya hembra	6	1,60 €	9,60 €	
Software	Matlab 2021	1	0,00 €	0,00 €
	LabVIEW 2020	1	0,00 €	0,00 €
	STM32CubeIDE	1	0,00 €	0,00 €
	STM32CubeMX	1	0,00 €	0,00 €
	KiCad (Diseño electrónico)	1	0,00 €	0,00 €
<b>TOTAL</b>				<b>1.112,17 €</b>

## 6.2 Coste del personal

A continuación, se desglosan los sueldos base por hora trabajada de las personas necesarias para realizar este trabajo, incluyendo el coste total que producen estas personas. Teniendo en cuenta el número de créditos del TFM es de 12 ECTS, se considera que se ha trabajado 300 horas. De esta forma, el coste de personal ha sido:

Tabla 6.2. Coste del personal.

Concepto	Horas	Precio por hora (€)	Total (€)
Graduado en ingeniería física	300	20 €	6.000,00 €
<b>TOTAL</b>			<b>6.000,00 €</b>

## 6.3 Presupuesto total

Tabla 6.3. Coste total del trabajo.

Concepto	Precio por hora (€)
Coste del diseño hardware y software	1.112,17 €
Coste del personal	6.000,00 €
<b>TOTAL (con IVA 21 %)</b>	<b>7.112,17 €</b>

Teniendo en cuenta la carga impositiva del 21 % por el IVA, a fecha de octubre del año 2022, el presupuesto total del proyecto asciende a siete mil ciento doce euros con diecisiete céntimos.

# Bibliografía

- [1] A. Martínez *et al.*, “Sistema de gestión de energía para microrredes basado en control predictivo,” *Actas XXXVI Jornadas Automática, 2 - 4 septiembre 2015. Bilbao*, pp. 2–4, 2015, [Online]. Available: <https://www.ehu.es/documents/3444171/4484748/92.pdf>
- [2] P. A. Mancera Lagos, “MODELO DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES PARA UNA MICRORRED ELÉCTRICA AISLADA, BASADO EN UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS, PARA LA TRANSFERENCIA DE DATOS DE CONTROL,” 2017. [Online]. Available: <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/en/mdl-20203177951%0Ahttp://dx.doi.org/10.1038/s41562-020-0887-9%0Ahttp://dx.doi.org/10.1038/s41562-020-0884-z%0Ahttps://doi.org/10.1080/13669877.2020.1758193%0Ahttp://serisc.org/journals/index.php/IJAST/article>
- [3] R. D. Medina, “Microrredes basadas en Electrónica de Potencia: Características, Operación y Estabilidad,” *Ingenius*, no. 12, pp. 15–23, 2014, doi: 10.17163/ings.n12.2014.02.
- [4] “¿Qué es la Energía Distribuida? - Conciencia Eco.” <https://www.concienciaeco.com/2018/02/12/la-energia-distribuida/> (accessed Jul. 28, 2022).
- [5] “La generación distribuida: Características y microgeneración [fundacionendesa.org](https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/generacion-distribuida).” <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/generacion-distribuida> (accessed Jul. 28, 2022).
- [6] F. J. Sepúlveda González, “La generación distribuida en España,” UNIVERSIDAD\_CARLOS\_III\_DE\_MADRID, 2010.
- [7] M. Gómez González, “SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA CON PILA DE COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO ALIMENTADO CON RESIDUOS FORESTALES Y SU OPTIMIZACIÓN MEDIANTE ALGORITMOS BASADOS EN NUBES DE PARTÍCULAS,” Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2008.
- [8] A. C. Santos, D. B. Díez, E. C. Fernández, and M.-A. C. Gil, *Generación distribuida, autoconsumo y redes inteligentes*, vol. 91. 2015. [Online]. Available: [https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=9fOiCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=los+sistemas+de+distribución,+oportunidades+de+mejora+recursos+energéticos+distribuidos+\(DER\)+y+redes+hibridas+un+sistema+de+distribución+más+inteligente+y+flexible&ots=wqw7OENhxq&s](https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=9fOiCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=los+sistemas+de+distribución,+oportunidades+de+mejora+recursos+energéticos+distribuidos+(DER)+y+redes+hibridas+un+sistema+de+distribución+más+inteligente+y+flexible&ots=wqw7OENhxq&s)
- [9] FENERCOM, “Guía Básica de la Generación Distribuida”, [Online]. Available: <http://www.madrid.org/cs/Satellite?blobcol=urldata&blobheader=application/pdf&blobheadername1=Content-Disposition&blobheadervalue1=filename=GUIA+BASICA+DE+LA+GENERACION.pdf&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1181215450713&ssbinary=true>
- [10] D. TREBOLLE TREBOLLE, “LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN ESPAÑA,” Universidad Pontificia Comillas, 2006.
- [11] IEA International Energy Agency, “Distributed Generation in Liberalised Electricity

Markets,” *Int. Energy Agency*, p. 124, 2002.

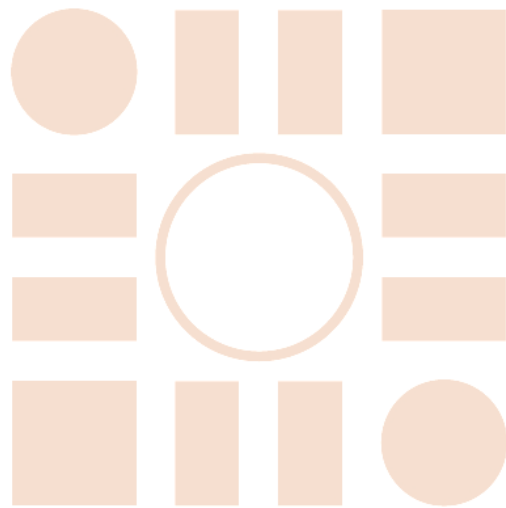
- [12] CIREN, “Impact of increasing the contribution of dispersed generation on the power system. CIGRE Study Committee no 37, Final Report, September 1998.” no. 37, p. 1998, 1998.
- [13] CIREN, “Dispersed Generation. Preliminary Report of CIREN (International Conference on Electricity Distribution), Working Group WG04, Brussels, Belgium, pp. 9 + Appendix (pp. 30), June 1999,” p. 1999, 1999.
- [14] H. L. Willis and W. G. Scott, *Distributed Power Generation: Planning and Evaluation Power Engineering*. CRC Press, 2000. doi: 10.1007/978-4-431-56042-5\_36.
- [15] N. Jenkins, J. B. Ekanayake, and G. Strbac, *Distributed Generation*. London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2000. doi: 10.1016/b978-0-08-040937-5.50001-2.
- [16] P. Dondi, D. Bayoumi, C. Haederli, D. Julian, and M. Suter, “Network integration of distributed power generation,” *J. Power Sources*, vol. 106, no. 1–2, pp. 1–9, 2002, doi: 10.1016/S0378-7753(01)01031-X.
- [17] T. Ackermann, G. Andersson, and L. Söder, “Distributed generation: A definition,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 57, no. 3, pp. 195–204, 2001, doi: 10.1016/S0378-7796(01)00101-8.
- [18] J. M. HERNÁNDEZ LÓPEZ, “LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA Y EL FUTURO DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN,” UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, 2015.
- [19] Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía | Gobierno | gob.mx, “¿Qué es la generación distribuida? -Grandes Usuarios de la Energía,” Jun. 06, 2014. <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/que-es-la-generacion-distribuida-estados-y-municipios> (accessed Jul. 29, 2022).
- [20] Redacción elDinero, “Generación distribuida y micro redes eléctricas,” *Institucional*, Sep. 12, 2016. <https://eldinero.com.do/28114/generacion-distribuida-y-micro-redes-electricas/> (accessed Jul. 29, 2022).
- [21] A. S. D. E. Generaci, “TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA,” pp. 59–75.
- [22] “Tecnología de Cogeneración | Absorsistem.” <https://www.absorsistem.com/tecnologias/cogeneracion/> (accessed Jul. 29, 2022).
- [23] V. Yepes Piqueras, “Motores endotérmicos o de combustión interna.” <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/rudolf-diesel/> (accessed Jul. 29, 2022).
- [24] “Generadores con Turbinas de gas.” <http://savoipower.com/turbinas.html> (accessed Jul. 29, 2022).
- [25] “Turbinas Hidraulicas. Funcionamiento y Tipos: Francis, Kaplan, Pelton.” <https://www.areatecnologia.com/mecanismos/turbinas-hidraulicas.html> (accessed Jul. 29, 2022).
- [26] “Turbina eólica – vista interior | CREA.” <https://crea-portaldemedios.siemens-stiftung.org/turbina-eolica-vista-interior-101865> (accessed Jul. 29, 2022).

- [27] O. Planas, “¿Qué es la energía solar térmica? Tipos de instalaciones,” 2011. <https://solar-energia.net/energia-solar-termica> (accessed Jul. 29, 2022).
- [28] “Esquema de una instalación fotovoltaica - Medioambiente y naturaleza.” <https://medioambienteynaturaleza.com/esquema-instalacion-fotovoltaica/> (accessed Aug. 14, 2022).
- [29] El Mundo Ecológico, “El problema de los vertederos en España - El Mundo Ecológico,” 2013. <https://www.elmundoecologico.es/medio-ambiente/el-problema-de-los-vertederos-en-espana/> (accessed Jul. 29, 2022).
- [30] “¿Qué es la biomasa? Centrales de energía de la biomasa,” *Fundación Endesa* [fundacionendesa.org](https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/centrales-renovables/central-de-biomasa). <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/centrales-renovables/central-de-biomasa> (accessed Jul. 29, 2022).
- [31] Master SI, “¿QUÉ ES UNA MICROTURBINA Y CÓMO SE APLICA EN SISTEMAS DE COGENERACIÓN?,” 2020. <https://mastersi.com.pe/blog/105-que-es-una-microturbina-y-como-se-aplica-en-sistemas-de-cogeneracion> (accessed Jul. 29, 2022).
- [32] J. M. López Espada, “Generación Distribuida: Tecnologías de Generación y Sistemas de Almacenamiento de Energía,” Universidad de Sevilla, 2018. [Online]. Available: <https://idus.us.es/xmlui/handle//11441/85419>
- [33] “La energía marina | Enel Green Power.” <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-marina> (accessed Jul. 29, 2022).
- [34] “¿Qué es la Energía Marina? - APPA Renovables.” <https://www.appa.es/appa-marina/que-es-la-energia-marina/> (accessed Jul. 29, 2022).
- [35] “Conoce la energía geotérmica. La energía inagotable.” Sep. 02, 2020. <https://www.fontgas.com/blog/la-energia-geotermica/> (accessed Jul. 29, 2022).
- [36] “Almacenamiento energético | Red Eléctrica de España.” <https://www.ree.es/es/red21/almacenamiento-energetico> (accessed Jul. 29, 2022).
- [37] J. A. Roca, “Las 10 mayores centrales hidroeléctricas de bombeo del mundo,” *El Periódico de la Energía*, Oct. 23, 2017. <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-centrales-hidroelectricas-de-bombeo-del-mundo/> (accessed Jul. 29, 2022).
- [38] Pontificia Universidad Católica de Chile, “Estado del arte y perspectivas de la tecnología CSP y de sistemas de almacenamiento en baterías.” [https://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno17/csp/Tipos\\_almacenamiento.html](https://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno17/csp/Tipos_almacenamiento.html) (accessed Jul. 29, 2022).
- [39] J. I. S. Martín, I. Zamora, J. J. S. M. V. Aperribay, and P. Eguía, “Energy Storage Technologies for Electric Applications,” *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11)*, no. 2, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, p. 6, Apr. 13, 2011.
- [40] A. Ander Goikoetxea, “Integration of Distributed Generation Using Energy Storage Systems,” Mondragon Unibertsitatea, 2011.
- [41] J. A. Guacaneme, D. Velasco, and C. L. Trujillo, “Revisión de las características de sistemas de almacenamiento de energía para aplicaciones en micro redes,” *Inf. Tecnol.*, vol. 25, no. 2, pp. 175–188, 2014, doi: 10.4067/S0718-07642014000200020.

- [42] M. J. del Valle Palacios, "Estudio y configuración de almacenamiento eléctrico en una red de distribución con generación renovable," Universidad Politécnica de Madrid, 2019. [Online]. Available: <http://oa.upm.es/54277/>
- [43] ABENGOA HIDROGENO, "Almacenar electricidad con tecnologías de hidrógeno," Feb. 16, 2016. <https://www.fundacionnaturgy.org/wp-content/uploads/2015/12/África-Castro.pdf> (accessed Jul. 29, 2022).
- [44] J. Meneses Ruiz, J. C. Montero Cervantes, and H. Godinez Enriquez, "Las Microrredes Eléctricas y la Transición Energética de México," *Transic. Energética. Noviembre 2018 - Enero 2019*, vol. 1, no. 1, pp. 18–23, 2018, [Online]. Available: <http://transicionenergetica.ineel.mx/Revista.mvc/CD3n1v1>
- [45] "Red Eléctrica de España." <https://www.ree.es/es> (accessed Aug. 14, 2022).
- [46] Grupo GEISER, "Basic control of wind turbines. Apuntes de la asignatura de Eca para Energías Renovables."
- [47] M. Ramos Rodríguez, "Diseño Y Análisis Económico Financiero De Una Instalación Eólica Onshore De 99 Mw En El Mercado Rumano Y Norteamericano," Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, 2016. [Online]. Available: [http://oa.upm.es/42996/1/PFC\\_Miguel\\_Ramos\\_Rodriguez.pdf](http://oa.upm.es/42996/1/PFC_Miguel_Ramos_Rodriguez.pdf)
- [48] FLUIDOSGRUPO15, "Componentes de una turbina eólica | Grupo 15," 2016. <https://grupo15fluidos.wordpress.com/2016/04/24/componentes-de-una-turbina-eolica/> (accessed Aug. 14, 2022).
- [49] S. Del Río Sánchez, "Diseño de un aerogenerador tipo H-Darrieus y estudio de la influencia del ángulo de pitch , mediante Mecánica de Fluidos Computacional," p. 109, 2017, [Online]. Available: <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/25546>
- [50] "Subsistema de captacion | Everything about solar energy," 2019. <http://energyprofessionalsymposium.com/?p=36656> (accessed Aug. 14, 2022).
- [51] Grupo GEISER, "Wind energy. Apuntes de la asignatura de Eca para Energías Renovables."
- [52] "Energía producida por un aerogenerador." <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/datos/viento/energia.html> (accessed Aug. 14, 2022).
- [53] F. J. Rodríguez Sánchez and Grupo GEISER, "Photovoltaic solar energy. Apuntes de la asignatura de Eca para Energías Renovables.," Universidad de Alcalá, 2019. doi: 10.1016/B978-0-12-818762-3.00005-4.
- [54] Á. Varillas Alvares, "Sistema de Energía Híbrida Eólico-Fotovoltaica para Vivienda Unifamiliar Aislada," Universidad Carlos III de Madrid, 2015.
- [55] A. E. García Alonso, "Maximum Power Point tracking algorithms for Solar Photovoltaic Systems," Universidad Politécnica de Madrid, 2017. [Online]. Available: <https://irjet.net/archives/V4/i1/IRJET-V4I1275.pdf>
- [56] M. Gonzalez Marin, "Sistema para la caracterización de paneles fotovoltaicos," Universidad del País Vasco, 2020.
- [57] Victron Energy, "Paneles monocristalinos BlueSolar".

- [58] E. Pérez Hernández, "Trazador de Curvas I-V de Bajo Coste para Células Fotovoltaica," Universidad de la Laguna, 2020.
- [59] ST, "32F411EDISCOVERY, Datasheet." [https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/dm00148985-discovery-kit-with-stm32f411ve-mcu-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00148985-discovery-kit-with-stm32f411ve-mcu-stmicroelectronics.pdf) (accessed Sep. 04, 2022).
- [60] Allegro, "ACS723 Hoja de datos ." <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/848070/ALLEGRO/ACS723.html> (accessed Sep. 04, 2022).
- [61] "(PDF) LM2904 Datasheet - Dual Operational Amplifier." <http://www.datasheet.es/PDF/62589/LM2904-pdf.html> (accessed Sep. 04, 2022).
- [62] "Specifications for NTX Thermistor." [https://www.electronicaembajadores.com/datos/pdf1/ss/sste/sstentc\\_series.pdf](https://www.electronicaembajadores.com/datos/pdf1/ss/sste/sstentc_series.pdf) (accessed Sep. 04, 2022).
- [63] Omron Electronic Components LLC, "PCB Relay G5LE." <https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/3191/G5LE-14-DC3-Omron-datasheet-10841140.pdf> (accessed Sep. 04, 2022).
- [64] Victron Energy, "V.E Direct Protocol," vol. 31, no. 0, [Online]. Available: <http://www.victronenergy.com/upload/documents/VE.Direct Protocol.pdf>
- [65] Victron Energy, "Manual del cargador solar MPPT - Victron BlueSolar MPPT," 2021.
- [66] "JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission." [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/es/#MR](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/#MR) (accessed Aug. 29, 2022).

Universidad de Alcalá  
Departamento de Electrónica  
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR



Universidad  
de Alcalá