



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD**  
**PROPUESTA TECNOLÓGICA**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO DE GESTIÓN DE  
ENERGÍA PARA UNA MICRORRED HÍBRIDA USANDO HIL**

PROPUESTA TECNOLÓGICA PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO EN ELECTRICIDAD

**Autores:**

Chasipanta Pila Wilian Alonso

Huaraca Sisilema Oscar David

**Tutor Académico:**

Ing. Msc. Byron Paul Corrales Bastidas

**LATACUNGA, MARZO 2026**

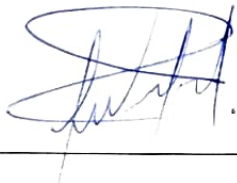
Latacunga, Marzo del 2026

## DECLARACIÓN DE AUTORIA

Nosotros, Chasipanta Pila Wilian Alonso con C.I.: 0550229256 y Huaraca Sislema Oscar David con C.I.: 1726307158, declaramos ser los autores del presente proyecto de Investigación: **“IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO DE GESTIÓN DE ENERGÍA PARA UNA MICRORRED HÍBRIDA USANDO HIL”**, siendo el Ing. Msc. Byron Paul Corrales Bastidas, tutor del presente trabajo, eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Atentamente,



---

Chasipanta Pila Wilian Alonso  
CC.: 0550229256



---


Huaraca Sislema Oscar David  
CC.: 1726307158

Latacunga, Marzo del 2026

## **AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO DE GESTIÓN DE ENERGÍA PARA UNA MICRORRED HÍBRIDA USANDO HIL”**, propuesto por los estudiantes: Chasipanta Pila Wilian Alonso con C.I.: 0550229256 y Huaraca Sislema Oscar David con C.I.: 1726307158 de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, considero que dicho proyecto de titulación cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos al tribunal de lectores.



---

Ing. Msc. Byron Paul Corrales Bastidas  
C.I.: 0502347768  
**TUTOR**

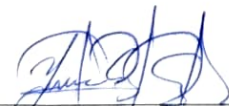
Latacunga, Marzo del 2026

### **AVAL DE APROBACIÓN DE LECTORES**

Cumpliendo con el Reglamento de Titulación de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en calidad de Lectores de Tribunal de Proyecto de Investigación con el Título **“IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO DE GESTIÓN DE ENERGÍA PARA UNA MICRORRED HÍBRIDA USANDO HIL”**, propuesto por los estudiantes Chasipanta Pila Wilian Alonso y Huaraca Sislema Oscar David de la Carrera de Electricidad, me permito indicar que los estudiantes ha concluido todas las observaciones y realizado las correcciones señaladas por el Tribunal de Lectores, además de validar el funcionamiento de la propuesta, por lo cual presentamos el Aval de aprobación del Proyecto de Titulación correspondiente a la modalidad de Informe de propuesta tecnológica en virtud de lo cual el o la postulante puede presentarse a la Defensa de su Proyecto de Titulación.

Particular que pongo en su conocimiento para los fines legales pertinentes.

Atentamente,



Lector 1 (Presidente)  
Ing.Msc. Yadyra Monserrath  
Ortiz Gonzalez  
C.C.:1722464110



Lector 2  
Ing.Msc. Manuel Ángel  
León Segovia  
C.C.:0502041353



Lector 3  
MBA. Diego Enrique Estupiñán Tello  
C.C.: 0501656508

Latacunga, Marzo del 2026

### **AVAL DE IMPLEMENTACIÓN**

En calidad de directora del proyecto formativo denominado “Modelado matemático en ingeniería: enfoques generales y aplicaciones” certifico que mediante el proyecto tecnológico “Implementación de un Módulo Didáctico de Gestión de Energía para una Microrred Híbrida usando HIL” de los señores Chasipanta Pila Wilian Alonso con cédula número 0550229256 y Huaraca Sislema Oscar David con cédula número 1726307158 realizan la entrega del módulo para las actividades inherentes al proyecto formativo en mención.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and flourishes, is written over a horizontal line. The signature appears to be 'Jessica Nataly Castillo Fiallos'.

Ing. Msc. Jessica Nataly Castillo Fiallos

C.I.: 0604590216

## AGRADECIMIENTOS

*Quiero agradecer a Dios por darme la vida, por brindarme la oportunidad de cumplir mis metas. Asimismo, a la imagen de San Juan Bautista, a quien me encomendé en este largo camino.*

*A mi alma máter, la Universidad Técnica de Cotopaxi, y a sus docentes por brindarme sus conocimientos para formarme como profesional. Extiendo mi gratitud a mi tutor, el Ing. Paul Corrales, ya que con su orientación se logró sacar adelante este proyecto.*

*A Oscar, mi compañero de tesis. Gracias por el tremendo trabajo en equipo.*

*Por último, a mis padres y hermanos, pilares fundamentales en mi etapa universitaria. Y a mi enamorada, gracias por brindarme su apoyo incondicional en los momentos buenos y malos de este camino.*

*Wilian Alonso*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradezco a Dios por el don de la vida y por brindarme la fortaleza y la oportunidad de demostrar que soy capaz de alcanzar mis metas. Gracias por permitirme desarrollar mis habilidades y conocimientos a lo largo de mi formación académica, haciendo posible culminar una etapa importante e inolvidable de mi vida.*

*A la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus docentes, por su guía, enseñanza y compromiso en mi formación profesional, aportando de manera significativa a mi crecimiento académico y personal.*

*A mis padres, hermanos, hermanas y amigos, por su apoyo incondicional, comprensión y acompañamiento constante, tanto en los momentos difíciles como en los de alegría durante este proceso. Su respaldo ha sido fundamental para alcanzar este logro.*

*Oscar David*

## DEDICATORIA

*"Mientras uno está vivo, uno debe amar lo más que pueda".*

*Y es por ese amor incondicional que hoy dedico este logro a mis padres, Carmen y José, por ser mi mayor ejemplo de perseverancia, esfuerzo y sacrificio. Gracias por creer en mí desde el primer día y brindarme todo lo necesario para alcanzar este sueño que hoy ya no es sueño, sino una realidad.*

*A mis hermanos Jane, Katy, Josué, Deivis, y de manera especial a Blanca y Wilo, por haber creído en mí y brindarme el respaldo que necesitaba para cumplir con esta meta.*

*A mi enamorada Diana Carolina, por ser mi refugio y mi paz durante gran parte de mi vida.*

*Este logro lleva el nombre de cada uno de ustedes, pues sin su apoyo, paciencia y amor incondicional, lograr esta meta no habría sido posible.*

*Wilian Alonso*

## **DEDICATORIA**

*Dedico este proyecto a mi padre y madre, Tomás y Rosario, los pilares de mi vida, por su amor incondicional, su esfuerzo constante y su apoyo en cada etapa de mi formación. Gracias por enseñarme el valor de la perseverancia, la responsabilidad y el trabajo honesto, y por confiar siempre en mí, incluso en los momentos más difíciles.*

*A mis hermanos y hermanas, por su compañía, cariño y motivación permanente, por estar presentes en cada logro y también en cada desafío, brindándome siempre ánimo para seguir adelante.*

*A mis amigos, por su apoyo sincero, su comprensión y por compartir conmigo momentos importantes durante este camino, haciendo más llevadero cada esfuerzo.*

*Este logro es también de ustedes, porque con su apoyo, confianza y cariño hicieron posible alcanzar esta meta.*

*Oscar David*

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL .....	v
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
RESUMEN .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
1. INFORMACIÓN GENERAL .....	1
2. INTRODUCCIÓN .....	2
2.1. SITUACION PROBLEMÁTICA .....	2
2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	3
2.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN .....	3
2.3.1. Objetivo de investigación .....	3
2.3.2. Campo de Acción .....	3
2.4. BENEFICIARIOS .....	3
2.4.1. Beneficiario Directo .....	3
2.4.2. Beneficiario Indirecto .....	3
2.5. JUSTIFICACIÓN .....	4
2.6. OBJETIVOS .....	4
2.6.1. General .....	4
2.6.2. Específicos .....	4
2.6.3. Sistemas de tareas .....	4
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	6
3.1. ANTECEDENTES .....	6
3.2. FUENTES DE ENERGÍAS RENOVABLES .....	7
3.2.1. Microrredes Híbridas .....	9
3.2.2. Modos de operación de la microrred .....	9
3.3. PANEL FOTOVOLTAICO .....	10

3.4.	MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE PANEL FOTOVOLTAICO.....	11
3.5.	INVERSOR .....	12
3.6.	AEROGENERADOR.....	13
3.7.	MODELO MATEMATICO AEROGENERADOR.....	13
3.7.1.	Potencia Eólica .....	13
3.7.2.	Potencia mecánica .....	14
3.7.3.	Potencia Eléctrica .....	14
3.8.	BATERÍA .....	15
3.8.1.	Tipos de baterías.....	15
3.9.	MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE BATERÍA .....	17
3.9.1.	State of Charge (SOC).....	17
3.9.2.	Estimación del SOC por método de conteo de Coulomb .....	17
3.10.	POTENCIA DE CARGA RESIDENCIAL .....	17
3.11.	SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA (EMS).....	18
3.12.	MICROCONTROLADORES.....	18
3.12.1.	Arduino Uno .....	18
3.12.2.	Arduino Mega.....	19
3.13.	PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN.....	19
3.13.1.	RS- 485 .....	20
3.13.2.	Protocolo Modbus.....	20
3.14.	LABVIEW .....	20
3.15.	HADWARE-IN-THE-LOOP (HIL).....	21
4.	MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS .....	22
4.1.	MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.....	22
4.1.1.	MÉTODO EXPLORATORIO .....	22
4.1.2.	MÉTODO ANALÍTICO .....	22
4.1.3.	MÉTODO DESCRIPTIVO .....	22

4.2.	TIPOS DE INVESTIGACIÓN .....	22
4.2.1.	INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL .....	22
4.2.2.	INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL .....	23
4.3.	EXTRACCIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS .....	23
4.3.1.	ANÁLISIS DEL RECURSO SOLAR.....	23
4.3.2.	ANÁLISIS DEL RECURSO EÓLICO .....	24
4.4.	MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE PANEL FOTOVOLTAICO.....	24
4.4.1.	Cálculo del modelo matemático. ....	25
4.4.2.	Validación de modelo matemático .....	27
4.5.	MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE AEROGENERADOR.....	27
4.5.1.	Cálculo del modelo.....	27
4.5.2.	Validación de modelo matemático .....	29
4.6.	ESTUDIO DE CARGAS DE UNA VIVIENDA TIPO D .....	30
4.7.	PROGRAMACIÓN EN ARDUINO .....	31
4.7.1.	Maestro .....	32
4.7.2.	Esclavos .....	32
4.8.	COMUNICACIÓN RS-485.....	34
4.9.	VALIDACIÓN Y PROTOTIPADO VIRTUAL .....	35
4.9.1.	Sistema fotovoltaico ID '1' .....	35
4.9.2.	Sistema Eólico ID '2' .....	36
4.9.3.	Demanda ID '3' .....	37
4.10.	DESARROLLO DEL HARDWARE .....	37
4.10.1.	ELECCIÓN DE COMPONENTES.....	38
4.11.	DISEÑO DE PCB .....	42
4.11.1.	Diseño esquemático (ISIS) .....	42
4.11.2.	Diseño de layout (ARES) .....	45
4.11.3.	PCB físico .....	46

4.12.	PROGRAMACION EN LABVIEW.....	46
4.13.	SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA (EMS).....	49
4.13.1.	Estrategia de control .....	49
4.13.2.	Balance de potencia .....	50
4.13.3.	Restricción fotovoltaica EMS .....	50
4.13.4.	Aplicación de eficiencia.....	51
4.13.5.	Lógica de saturación y protección .....	51
5.	ANALISIS DE RESULTADOS.....	53
5.1.	SIMULACIÓN HARDWARE-IN-THE-LOOP (HIL) .....	53
5.1.1.	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	53
5.2.	GENERACIÓN FOTOVOLTAICA.....	56
5.3.	GENERACIÓN EÓLICA.....	58
5.4.	GENERACIÓN HÍBRIDA.....	60
5.5.	GESTIÓN DE FALLA DE SUMINISTRO (BLACKOUT).....	62
5.6.	GESTION DEL SISTEMA EMS .....	63
5.7.	VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO....	65
5.8.	VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA EÓLICO .....	65
5.9.	PRESUPUESTO.....	65
5.10.	ANÁLISIS DE INDICADORES ECONÓMICOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO DE GESTIÓN DE ENERGÍA PARA UNA MICRORRED HÍBRIDA USANDO HIL. ....	67
6.	CONCLUSIONES.....	69
7.	REFERENCIAS .....	70
8.	ANEXOS.....	76

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sistema de tareas. ....	5
Tabla 2. Radiacion solar Latacunga - UTC. ....	23
Tabla 3. Velocidad del viento Latacunga – UTC. ....	24
Tabla 4. Datos del panel SP636 140W .....	25
Tabla 5. Constantes generales. ....	25
Tabla 6. Comparación de datos de potencia medida y calculada. ....	27
Tabla 7. Datos de aerogenerador SUNNILY X- 600W. ....	28
Tabla 8. Densidad del aire a distintas alturas. ....	28
Tabla 9. Constantes generales. ....	28
Tabla 10. Comparación de potencia medida y calculada. ....	30
Tabla 11. Estudio de cargas de una vivienda en Ecuador. ....	30
Tabla 12. Potencia consumida en vivienda en 24 horas del día. ....	31
Tabla 13. Lista de Materiales para el desarrollo del Hardware. ....	38
Tabla 14. Parámetros de configuración - Escenario A. ....	54
Tabla 15. Parámetros de Configuración - Escenario B. ....	54
Tabla 16. Parámetros de Configuración - Escenario C .....	55
Tabla 17. Parámetros de Configuración - Escenario D .....	56
Tabla 18. Costos directos de materiales para los módulos didácticos.....	66
Tabla 19. Costo de mano de obra para la construcción de los módulos didácticos.....	66
Tabla 20. Costos indirectos de fabricación.....	67
Tabla 21. Costo de total de la constucción de los módulos didácticos.....	67

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 1. Energía Solar.....	8
Figura. 2. Aerogeneradores .....	8
Figura. 3. Energía solar-eólica.....	8
Figura. 4. Arquitectura general de una Microrred.....	9
Figura. 5. Modo conectado a la red .....	10
Figura. 6. Modo Isla .....	10
Figura. 7 Partes de un panel solar fotovoltaico .....	11
Figura. 8 Diagrama eléctrico de un panel solar.....	11
Figura. 9. Diagrama de bloques del inversor CD-CA .....	13
Figura. 10. Partes de un aerogenerador de pequeña generación.....	13
Figura. 11 Batería de plomo ácido abierta.....	15
Figura. 12 Batería AGM.....	15
Figura. 13Batería Tipo Gel.....	16
Figura. 14 Baterías de Ion Litio.....	17
Figura. 15. Sistema de Gestión de Energía (EMS).....	18
Figura. 16. Arduino UNO.....	19
Figura. 17. Arduino Mega .....	19
Figura. 18. Módulo Conversor TTL a RS485 .....	20
Figura. 19. Configuración típica de prueba HIL .....	21
Figura. 20 Curva de potencia consumida en vivienda rural. ....	31
Figura. 21. Arquitectura de la comunicación (MAESTRO – ESCLAVO). ....	32
Figura. 22. Diagrama de flujo para el Código de emulación de los esclavos.....	33
Figura. 23. Visualización de la trama de datos de la demanda.....	34
Figura. 24. Diagramas de conexión RS-485/RS-422 .....	35
Figura. 25. Diagrama esquemático del prototipo del sistema fotovoltaico (FV) en Proteus....	36
Figura. 26. Diagrama esquemático del prototipo del sistema eólico (Wind) en Proteus. ....	37
Figura. 27. Diagrama esquemático del prototipo del sistema de la carga en Proteus. ....	37
Figura. 28. Sistema Fotovoltaico Físico. ....	40
Figura. 29. Sistema Eólico Físico.....	40
Figura. 30. Sistema Carga Físico.....	40
Figura. 31. Armado del prototipo para la comunicación.....	41
Figura. 32. Comunicación entre los esclavos mediante modbus RS-485.....	41

Figura. 33. Comunicación entre los esclavos mediante módulos RS-485.....	41
Figura. 34. Visualización de los datos recibidos en el Monitor Serial. ....	41
Figura. 35. Verificación de comunicación y lectura de sensores. ....	42
Figura. 36. Bornes de alimentación. ....	43
Figura. 37. Diseño de conexión LCD con I2C. ....	43
Figura. 38 Elementos para conexiones de entradas analógicas en Arduino.....	44
Figura. 39 Leds indicadores de límites de generación.....	44
Figura. 40 Vista de diseño modulo fotovoltaico y eólico.....	45
Figura. 41 Vista de módulo de esclavo 3. ....	45
Figura. 42 Vista de módulo maestro.....	46
Figura. 43. Diseño PCB para las microrredes. ....	46
Figura. 44. VISA Configure Serial Port. ....	47
Figura. 45. Visa Read Function.....	47
Figura. 46. función Match Pattern.....	47
Figura. 47. Grafica de curvas y arreglos matemáticos .....	47
Figura. 48. Built XY Graph.....	48
Figura. 49. Arquitectura del sistema.....	48
Figura. 50. Prototipo de la Interfaz.....	49
Figura. 51. EMS – Principal.....	50
Figura. 52. Nodo Función restricción solar. ....	51
Figura. 53. Diagrama de bloques de modelo de batería. ....	52
Figura. 54. Interfaz del Sistema de Gestión de Energía. ....	53
Figura. 55. Escenario de operación generación solar dominante. ....	57
Figura. 56. Comportamiento del Sistema de Gestión de Energia (EMS), generación fotovoltaica. ....	58
Figura. 57. Curva de generación fotovoltaica. ....	58
Figura. 58. Escenario de operación generación Eólica dominante.....	59
Figura. 59. Curva de generación Eólica. ....	59
Figura. 60. Comportamiento del Sistema de Gestión de Energia (EMS), generación eólica...	60
Figura. 61. Escenario de operación generación hibrida.....	61
Figura. 62. Curva de generación hibrida .....	61
Figura. 63. Comportamiento del Sistema de Gestión de Energía (EMS), generación hibrida.	62
Figura. 64. Escenario de operación falla de suministro (Blackout).....	63

Figura. 65. Dinámica de distribución de potencia y comportamiento del almacenamiento ante variaciones de generación.....	64
--	----

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

## FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

### TÍTULO: “IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO DE GESTIÓN DE ENERGÍA PARA UNA MICRORRED HÍBRIDA USANDO HIL”

#### **Autores:**

Chasipanta Pila Wilian Alonso

Huaraca Sislema Oscar David

#### **RESUMEN**

El presente trabajo desarrolla la implementación de módulos didácticos de un Sistema de Gestión de Energía (EMS) aplicado a una microrred híbrida *off-grid*, empleando la técnica *Hardware-in-the-Loop* (HIL) basado en Arduino para facilitar prácticas de laboratorio. La arquitectura del sistema se basa en una red de comunicación Maestro–Esclavo mediante el protocolo RS-485, integrando emuladores físicos que reproducen el comportamiento de la generación fotovoltaica, eólica y el perfil de carga de una vivienda.

Cada módulo dispone de un diseño individual de placa de circuito impreso (PCB) y una carcasa fabricada por impresión 3D, con etiquetado funcional orientado al uso didáctico. El nodo Maestro recopila información de tres nodos esclavos correspondientes al sistema fotovoltaico, sistema eólico y carga. En los nodos de generación, potenciómetros permiten ajustar variables como irradiancia solar y velocidad del viento, mientras que el nodo de carga utiliza la hora del día para emular el perfil horario de consumo residencial mediante una matriz de demanda.

La información generada se transmite a una interfaz desarrollada en LabVIEW, donde se integran la simulación del sistema de almacenamiento en baterías y el EMS. La validación experimental se llevó a cabo comparando los resultados del modelo matemático con mediciones reales de un panel fotovoltaico y un aerogenerador, obteniéndose errores porcentuales inferiores al 10% en la estimación de la potencia generada. Estos resultados confirman que el módulo propuesto constituye una plataforma confiable, de bajo costo y adecuada para la formación práctica en microrredes inteligentes.

**Palabra Clave:** HIL, Potencia, Sistema de manejo de energía (EMS), Irradiación, Velocidad del viento, Carga.

# TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

## FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

**THEME:** “IMPLEMENTATION OF AN ENERGY MANAGEMENT TEACHING  
MODULE FOR A HYBRID MICROGRID USING HIL”

**Author:**

Chasipanta Pila Wilian Alonso

Huaraca Sislema Oscar David

### ABSTRACT

This paper develops the implementation of educational modules for an Energy Management System (EMS) applied to a hybrid off-grid microgrid, using the Arduino-based Hardware-in-the-Loop (HIL) technique to facilitate laboratory practices. The system architecture is based on a Master-Slave communication network using the RS-485 protocol, integrating physical emulators that reproduce the behavior of photovoltaic and wind power generation and the load profile of a home.

Each module has an individual printed circuit board (PCB) design and a 3D-printed casing, with functional labeling geared towards educational use. The Master node collects information from three slave nodes corresponding to the photovoltaic system, wind system, and load. In the generation nodes, potentiometers allow variables such as solar irradiance and wind speed to be adjusted, while the load node uses the time of day to emulate the residential consumption profile using a demand matrix.

The information generated is transmitted to an interface developed in LabVIEW, where the battery storage system simulation and the EMS are integrated. Experimental validation was carried out by comparing the results of the mathematical model with actual measurements from a photovoltaic panel and a wind turbine, obtaining percentage errors of less than 10% in the estimation of the power generated. These results confirm that the proposed module is a reliable, low-cost platform suitable for practical training in smart microgrids.

**Keywords:** HIL, Power, Energy Management System (EMS), Irradiation, Wind Speed, Load.

## **1. INFORMACIÓN GENERAL**

**Tema del proyecto:** Implementación de un módulo didáctico de gestión de energía para una microrred híbrida usando HIL

**Modalidad de Titulación:**

Informe de propuesta tecnológica

**Carrera:** Electricidad

**Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto:**

Modelado matemático en ingeniería: enfoques generales y aplicaciones.

**Equipo de trabajo del Trabajo de Titulación:**

- **Estudiantes:**

Wilian Alonso Chasipanta Pila

Oscar David Huaraca Sislema

- **Tutor:**

Ing. Byron Paul Corrales Bastidas M.Sc.

**Área de conocimiento:** 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713 Electricidad y Energía.

**Línea de investigación:** Tecnología de la información y las comunicaciones, robótica, automatización y optimización de sistemas.

Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

**Sub líneas de investigación de la Carrera:** Diseño, construcción y explotación eficiente de sistemas eléctricos con energía convencional y alternativa.

## 2. INTRODUCCIÓN

Las microrredes híbridas, están compuestas generalmente por fuentes de energía renovables (Solar, Eólica) con sistemas de almacenamiento y generación convencional, representan una solución clave para la transición hacia sistemas energéticos sostenibles y resilientes [1]. Dichas microrredes operan ya sea conectados a la red principal o en isla, gestionando los problemas que surgen por la generación no continua de energía renovable, la optimización del despacho energético y la estabilidad del sistema.

La implementación de un Sistema de Gestión de Energía o Energy Manager System (EMS) facilita una coordinación adecuada entre los recursos energéticos, lo que resulta en una mejor eficiencia operativa, una disminución de gastos y una mejora en la confiabilidad del suministro [2]. Por ello, el desarrollo y validación de un EMS requiere varias pruebas donde se simule condiciones reales sin riesgos para un sistema físico.

La metodología Hardware-in-the-loop (HIL) consiste en una técnica de simulación en tiempo real que integra hardware físico, como microcontroladores, con modelos digitales ejecutados en softwares como MATLAB/Simulink, LabVIEW, Python u otro software, permitiendo simular el comportamiento de un sistema en tiempo real [3] [4].

### 2.1. SITUACION PROBLEMÁTICA

El crecimiento sostenido de la demanda mundial de energía, junto con la alta dependencia de fuentes fósiles y la urgencia de reducir el impacto negativo en el cambio climático, ha llevado al impulso de microrredes híbridas que integran tecnologías renovables [1]. Sin embargo, dichas microrredes presentan algunos desafíos técnicos significativos tales como:

- **Intermitencia de fuentes renovables:** La producción de energía solar y eólica está sujeta a la variabilidad de las condiciones meteorológicas., lo que dificulta garantizar un suministro energético estable [2].
- **Optimización energética:** Es necesario coordinar el despacho de energía entre múltiples fuentes y cargas para minimizar los costos operativos y maximizar la eficiencia energética, considerando restricciones como la capacidad de almacenamiento y la degradación de baterías [5].
- **Estabilidad del sistema:** Las microrredes deben mantener parámetros eléctricos (voltaje, frecuencia) dentro de rangos seguros, especialmente en modo isla [2]

- **Validación de controladores:** Los algoritmos de gestión energética deben ser puestas a pruebas en condiciones reales, pero implementar prototipos físicos es costoso y riesgoso.

## **2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

La escasez de módulos experimentales para el análisis y la experimentación de sistemas de gestión de energía (EMS) en microrredes híbridas, limita el desarrollo de prácticas de laboratorio orientadas al control en tiempo real, así como la evaluación experimental de su desempeño bajo condiciones realistas.

## **2.3. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN**

### **2.3.1. Objetivo de investigación**

Diseño de un sistema de gestión de energía para una microrred híbrida simulada empleando HIL.

### **2.3.2. Campo de Acción.**

330000 ciencias Tecnológicas /3306 Ingeniería y Tecnología Eléctricas / 3306.05 Aplicaciones Eléctricas.

3311 tecnología de la Instrumentación/331101 Tecnología de Automatización

## **2.4. BENEFICIARIOS**

### **2.4.1. Beneficiario Directo**

- Estudiantes de la facultad de CIYA

### **2.4.2. Beneficiario Indirecto**

- Comunidad científica

## **2.5. JUSTIFICACIÓN**

El interés en sistemas energéticos sostenibles ha crecido desde hace varios años, con un enfoque en microrredes híbridas que integran fuentes renovables [1]. Organizaciones como el Western Electricity Coordinating Council (WECC) y el Electric Power Research Institute (EPRI) han liderado estudios recientes sobre gestión energética, resaltando su importancia [2].

Sin embargo, se presentan problemas de intermitencia en la generación renovable y falta de herramientas didácticas accesibles para realizar pruebas de laboratorio. El presente proyecto contribuye al estudio y comprensión del control energético y simulación en tiempo real mediante HIL con Software especializado, adaptado para pruebas de laboratorio. El uso de microcontroladores brinda una solución económica para un EMS didáctico, permitiendo así validar algoritmos en escenarios reales sin riesgos, y optimizando recursos para prácticas de laboratorio.

## **2.6. OBJETIVOS**

### **2.6.1. General**

Implementar un módulo didáctico de sistema de gestión de energía para una microrred híbrida simulada, empleando Hardware-in-the-Loop (HIL), que permita la realización de prácticas de laboratorio accesibles para el análisis en microrredes inteligentes.

### **2.6.2. Específicos**

- Analizar el estado del arte de los sistemas de gestión de energía (EMS) aplicados para microrredes híbridas inteligentes.
- Diseñar e implementar un módulo didáctico basado en Hardware-in-the-loop (HIL) que emule sistemas de generación fotovoltaico, eólico y el perfil de carga de una microrred híbrida.
- Integrar una plataforma de supervisión y control en software que permita la visualización de parámetros en tiempo real y operación del EMS.
- Validar el funcionamiento del módulo mediante la comparación de resultados del modelamiento matemático y mediciones experimentales reales.

### **2.6.3. Sistemas de tareas**

En la Tabla 1. se presenta las tareas que se llevarán a cabo para alcanzar cada uno de los objetivos específicos precitados y, consecuentemente, el objetivo general de la investigación.

Tabla 1. Sistema de tareas.

Objetivos Específicos	Actividades (tareas)	Resultados Esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Analizar el estado del arte de los sistemas de gestión de energía (EMS) aplicados para microrredes híbridas inteligentes.	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Revisión de artículos científicos, tesis sobre microrredes, HIL, EMS.</li> <li>-Análisis de estrategias de control.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Comprensión de las tendencias actuales en EMS.</li> <li>-Identificación de modelos relevantes para el estudio.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bases de datos: Repositorios Universitarios, Revistas científicas, Libros, Artículos</li> <li>- Hojas de cálculos.</li> </ul>
Diseñar e implementar un módulo didáctico basado en Hardware-in-the-loop (HIL) que emule sistemas de generación fotovoltaico, eólico y el perfil de carga de una microrred híbrida	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Desarrollo de modelos matemáticos de generación fotovoltaica, eólica y estudio de perfil de carga.</li> <li>- Diseño de la arquitectura del sistema EMS.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelos matemáticos validados.</li> <li>- Diagrama funcional del EMS</li> <li>-Modulo HIL operativo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- LabVIEW.</li> <li>- Arduino IDE, Hardware electrónico.</li> </ul>
Integrar una plataforma de supervisión y control en software que permita la visualización de parámetros en tiempo real y operación del EMS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Implementación de la interfaz de supervisión en LabVIEW.</li> <li>- Configuración de comunicación Arduino-LabVIEW.</li> <li>- Pruebas de operación del EMS.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Plataforma HIL operativa.</li> <li>- Gráficas y métricas del sistema EMS</li> <li>-Estados del sistema.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- LabVIEW</li> <li>- Plataforma HIL (Arduino)</li> </ul>
Dar funcionamiento al módulo mediante la comparación de resultados del modelamiento matemático y mediciones experimentales reales.	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Ejecución de escenarios de prueba.</li> <li>-Comparación entre datos simulados y datos reales.</li> <li>-Análisis de resultados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Validación del sistema.</li> <li>-Evaluación de desempeño del módulo HIL.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-LabVIEW.</li> <li>-Plataforma HIL.</li> <li>-Hoja de cálculo.</li> </ul>

### **3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

#### **3.1. ANTECEDENTES**

La matriz energética mundial pasa por una transición en busca de impulsar de reducir las emisiones de carbono y combatir el cambio climático, mediante la adopción de fuentes de energía limpias y sostenibles. Este cambio global ha fomentado la integración de fuentes de energía renovables no convencionales, como los sistemas solares y eólicos no obstante la naturaleza estas fuentes de energía son intermitentes e impredecible lo que representa un desafío de gran magnitud para la estabilidad y fiabilidad de la red eléctrica.

Para [6] la estructura de los sistemas eléctricos modernos está evolucionando para integrar eficientemente la generación distribuida y las fuentes de energía renovable. En este contexto [7] señala que las microrredes se han convertido en un campo de intensa investigación, ya que permiten gestionar la generación local, el almacenamiento y las cargas de forma coordinada. El componente central de estas redes es el Sistema de Gestión de Energía (EMS), un algoritmo de control cuyo objetivo es optimizar la operación del sistema, especialmente cuando se incluyen soluciones de almacenamiento híbrido como baterías [6], [8]. El diseño de un EMS robusto es, por lo tanto, un desafío clave para garantizar la fiabilidad y eficiencia de la microrred [7].

El desarrollo de un EMS funcional exige, en primera instancia, un profundo entendimiento de los componentes que debe gestionar. Esto se logra a través del modelado matemático[9]. Para la generación fotovoltaica, es fundamental realizar un análisis matemático del panel solar para describir su comportamiento bajo distintas condiciones de irradiancia y temperatura [10]. De forma similar, para la generación eólica, es crucial la modelación del aerogenerador [11]. Este modelo se define por la curva de potencia del equipo, la cual describe la energía generada en función de la velocidad del viento, incluyendo sus límites operativos como la velocidad de arranque (cut-in) y de corte (cut-out) [11]. Herramientas de software como MATLAB/Simulink, LabVIEW, Python u otro software que son ampliamente utilizadas para el diseño, simulación y validación de estos modelos de generación [9],[10].

Una vez diseñado el algoritmo del EMS, el paso crítico es su validación. Probar un controlador directamente en un sistema físico real es costoso y arriesgado. Por esta razón, la metodología de Simulación Hardware-in-the-Loop (HIL) se presenta como la solución estándar de la industria [3]. HIL es una técnica de prueba donde un controlador real (el "hardware") interactúa con una simulación en tiempo real de la "planta" (el sistema físico, en este caso, la microrred).

Esto permite probar el controlador en un entorno seguro, repetible y realista, superando las limitaciones de una simulación puramente de software (SIL) [3].

La viabilidad de esta metodología ha sido demostrada en proyectos académicos locales. Investigaciones de la Escuela Politécnica Nacional (EPN) han implementado con éxito sistemas HIL utilizando Simulink como el entorno de simulación y placas Arduino como el hardware externo donde se ejecutan los controladores [12]. En dichos estudios, se establece la comunicación serial entre el software y el hardware para el intercambio de datos en tiempo real [12].

La viabilidad de esta metodología ha sido demostrada en proyectos académicos locales. Investigaciones de la Escuela Politécnica Nacional (EPN) han implementado con éxito sistemas HIL utilizando Simulink como el entorno de simulación y placas Arduino como el hardware externo donde se ejecutan los controladores [12]. En dichos estudios, se establece la comunicación serial entre el software y el hardware para el intercambio de datos en tiempo real [12]. Siguiendo esta metodología validada, la presente tesis propone el diseño de un EMS para una microrred híbrida. Se crearán los modelos matemáticos de los generadores (solar y eólico) [10], [11] y se implementarán como "simuladores" en una plataforma Arduino [12]. Este hardware emulará el comportamiento de la microrred real y se comunicará vía serial [12]. Con el algoritmo del EMS, el cual será diseñado y probado dentro del entorno virtual [3], validando así su desempeño mediante una plataforma HIL de bajo costo.

### **3.2. FUENTES DE ENERGÍAS RENOVABLES**

**Energía Solar.** - Se denomina energía solar a la energía obtenida a partir de la radiación emitida por el Sol hacia la Tierra. Debido a su origen natural y disponibilidad continua, se clasifica como una fuente renovable.

La conversión de esta radiación en electricidad se lleva a cabo mediante módulos fotovoltaicos, conformados por celdas solares encargadas de transformar la energía luminosa en energía eléctrica [13].



Figura. 1. Energía Solar [13].

**Energía Eólica.** - La energía eólica es una de las fuentes renovables más antiguas utilizadas por la humanidad. En la actualidad, su aplicación principal se centra en la generación de energía eléctrica mediante aerogeneradores, los cuales transforman la energía cinética del viento en electricidad a través de un sistema de conversión mecánico-eléctrico [13].



Figura. 2. Aerogeneradores [13].

**Energía solar-eólica.** – La combinación de la energía eólica y solar representa una opción más adecuada para la electrificación de zonas remotas. Estas fuentes pueden complementarse mutuamente, lo que contribuye a mejorar la calidad del suministro energético. Este tipo de sistema puede incrementar efectivamente el factor de utilización de la energía, aumentar la confiabilidad del servicio y reducir las necesidades de almacenamiento, gracias a la naturaleza complementaria entre la disponibilidad solar y eólica [14].



Figura. 3. Energía solar-eólica [14].

### 3.2.1. Microrredes Híbridas

Para [1], [15], [16], las microrredes son configuraciones avanzadas que integran tanto fuentes de generación convencionales como no convencionales como se muestra en la Figura. 4. Estas tecnologías incluyendo sistemas de almacenamiento de energía, con el fin de maximizar la eficiencia en el uso de los recursos energéticos y mejorar la sostenibilidad del sistema eléctrico. Estas redes inteligentes son especialmente aplicables en zonas rurales o aisladas, así como en instalaciones críticas donde se requiere alta disponibilidad, confiabilidad y eficiencia en el suministro eléctrico.

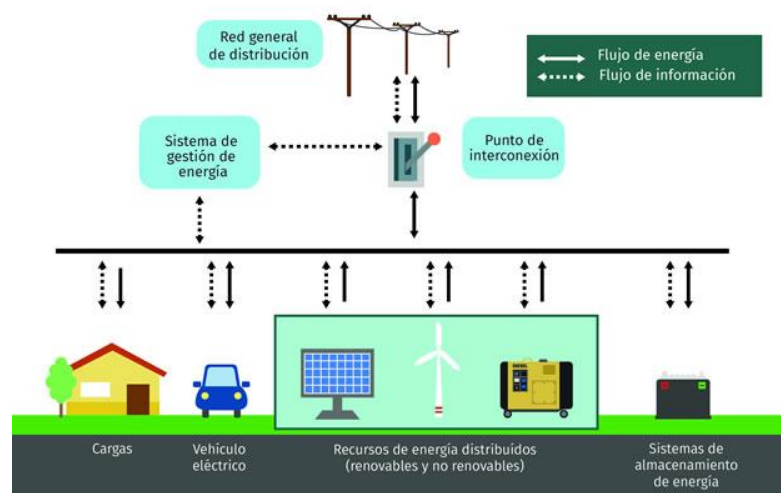


Figura. 4. Arquitectura general de una Microrred [17].

Dentro de una microrred, las cargas y las fuentes energéticas pueden ser desconectadas y conectadas al sistema o red eléctrica principal. Para [18] Las microrredes híbridas, integran diversos recursos energéticos. Entre los recursos energéticos típicos que componen estas microrredes se encuentran los paneles fotovoltaicos y los aerogeneradores.

### 3.2.2. Modos de operación de la microrred

Según [14]. Una microrred puede operar en dos modos principales: conectado a la red (on - Grid) y modo isla (off - Grid). Estos modos determinan como una microrred interactúa con la red eléctrica principal, las fuentes renovables, el almacenamiento de energía y las cargas, y son gestionados por el EMS para optimizar el rendimiento y la eficiencia energética.

**Modo conectado a la red.** - En este modo, la microrred está sincronizada y conectada a la red eléctrica, permitiendo el intercambio bidireccional de energía. La microrred puede consumir energía de la red cuando la generación renovable o el almacenamiento son insuficientes, y exportar el exceso de energía [14].

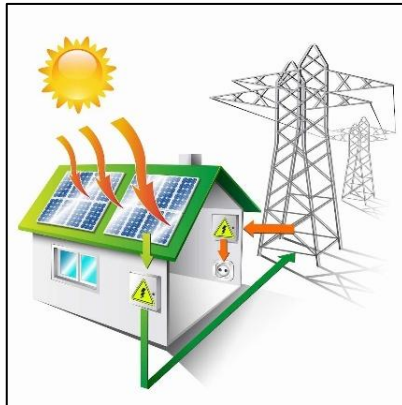


Figura. 5. Modo conectado a la red [14].

**Modo Isla.** - En el modo isla, la microrred opera de manera independiente de la red eléctrica, utilizando únicamente sus fuentes de generación y almacenamiento de energía para alimentar las cargas [14].



Figura. 6. Modo Isla [14].

### 3.3. PANEL FOTOVOLTAICO

Los paneles fotovoltaicos constituyen componentes esenciales en los sistemas de generación solar integrados en microrredes. Estos dispositivos captan la radiación solar incidente y la convierten en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico, estos se conforman de varias celdas fotovoltaicas teniendo así su unidad básica.

Las celdas fotovoltaicas es un mecanismo conformado por metales sensibles a rayos de luminosidad, cuando reciben dichos rayos estos generan electricidad. Estas celdas se fabrican con material de silicio y otros aditamentos químicos compuestos, las cuales generan un promedio entre 2-4 Amperios (ACC) y un voltaje de 0,46 – 0,48 voltios (VCC) [19]

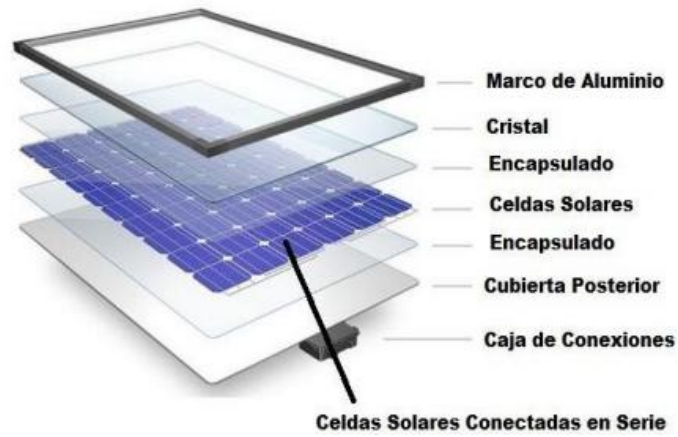


Figura. 7 Partes de un panel solar fotovoltaico [19].

### 3.4. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE PANEL FOTOVOLTAICO

El panel solar fotovoltaico se modelará como se muestra en Figura. 8, es un arreglo de celdas solares fotovoltaicas, donde se agruparán en serie y/o paralelo para formar el panel solar [10].

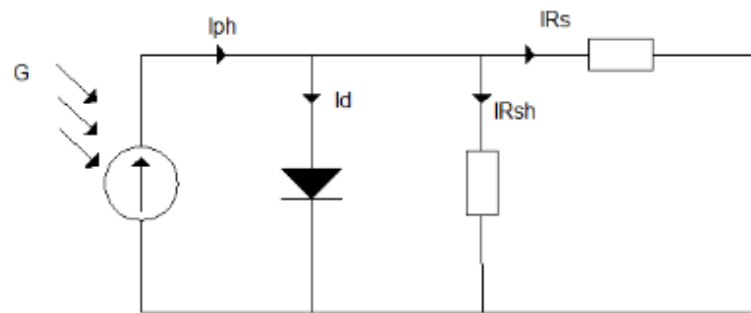


Figura. 8 Diagrama eléctrico de un panel solar [10].

Este circuito consta de una fuente de corriente  $I_{ph}$  que simula la corriente fotogenerada que depende de la radiación solar ( $G$ ) que recibe, un diodo p-n, que por medio del efecto fotoeléctrico convierte la radiación solar en energía eléctrica y elementos resistivos que simulan el efecto de pérdidas en el sistema  $R_{sh}$  (pérdidas por corriente de fuga o resistencia shunt) y resistencia de serie  $R_s$ ; estos valores se consideran de la siguiente manera:  $R_{sh} = \infty$  y  $R_s = 0$  con el fin de obtener los valores máximos de corriente de cortocircuito  $I_{sc}$  [9].

Aplicando la ley de corriente de Kirchhoff, las características de corriente del panel se pueden expresar de la siguiente manera [20]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_o * [\exp^{\frac{qV}{kT}} - 1] \quad (1)$$

Donde  $I_{pv}$  es igual a la corriente de la celda,  $q$  es igual a la carga de un electrón ( $1.6 \times 10^{-19}$  c),  $k$  es igual a la constante de Boltzmann ( $1.380 \times 10^{-23}$  c) y  $T$  es la temperatura de la celda en grados kelvin.

La corriente fotónica dada por la Ecuación 2:

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i(T_{cell} - T_{ref})] \cdot \lambda \quad (2)$$

Donde  $\lambda$  es igual a la proporción de irradiación solar,  $I_{sc}$  es la corriente de cortocircuito de la celda,  $k_i$  es el coeficiente de temperatura de corriente de cortocircuito,  $T_{cell}$  y  $T_{ref}$  es igual a la temperatura de referencia de la celda en grados Kelvin.

Por lo tanto, la corriente de saturación del diodo  $I_0$  y voltaje térmico  $V_t$ , definidas por la Ecuación 3 y Ecuación 4.

$$I_0 = I_{ph} \left[ \exp\left(\frac{V_{oc}}{n \cdot V_t}\right) \right]^{-1} \quad (3)$$

$$V_t = \frac{kT}{q} \quad (4)$$

Siendo,  $V_{oc}$  el voltaje de circuito abierto,  $n$  la idealidad del diodo de silicio (1.2),  $V_t$  el voltaje térmico. La potencia de salida  $P$ , se da por la Ecuación 5.

$$P = V \cdot I_{pv} \quad (5)$$

### 3.5. INVERSOR

Un inversor es un dispositivo encargado de convertir energía en corriente continua (DC) en corriente alterna (AC). En el ámbito de las microrredes, permite adaptar la energía generada por fuentes renovables para su uso en cargas de tipo alterno. Estos equipos pueden clasificarse según el número de fases (monofásicos o trifásicos), el tipo de semiconductor de potencia utilizado (BJT, MOSFET, IGBT, entre otros) y la forma de onda entregada en su salida [21].

**Onda Senoidal Pura:** Es la tecnología de mayor calidad, compatible con todos los equipos electrónicos y motores, ya que replica fielmente la señal de la red [22].

**Onda Senoidal Modificada:** Utiliza conmutadores electrónicos para aproximar una señal senoidal mediante pulsos. Es adecuada para cargas resistivas simples (iluminación, TV), pero puede afectar el rendimiento de motores o cargas inductivas [22].

**Onda Cuadrada:** Representa la tecnología más básica y económica, con una alta distorsión armónica, lo que limita su uso a aplicaciones de muy baja sensibilidad técnica [23].

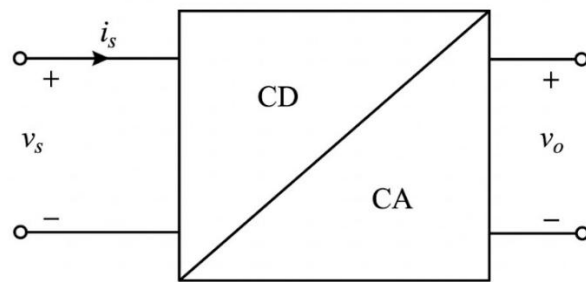


Figura. 9. Diagrama de bloques del inversor CD-CA [21].

### 3.6. AEROGENERADOR

Para [24] el aerogenerador es un equipo encargado de aprovechar la energía cinética del viento y convertirla en energía eléctrica en condiciones óptimas de funcionamiento. Existen múltiples diseños y tecnologías adaptadas a distintas aplicaciones, permitiendo ya sea el aprovechamiento mecánico directo o la posterior conversión electromecánica para la obtención de electricidad.

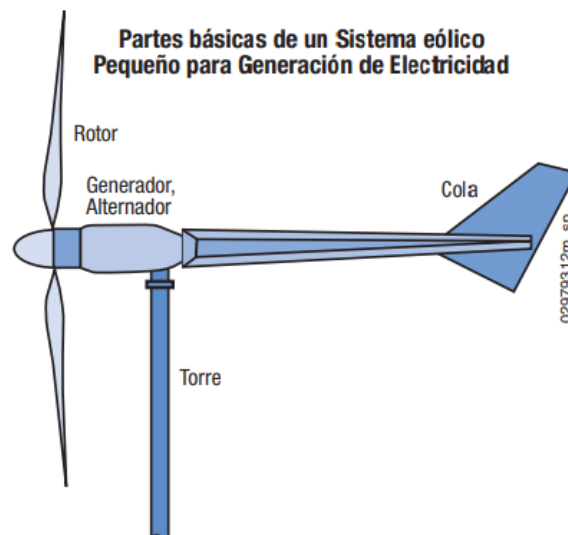


Figura. 10. Partes de un aerogenerador de pequeña generación [25].

### 3.7. MODELO MATEMATICO AEROGENERADOR

La modelación matemática del aerogenerador tiene como objetivo caracterizar el desempeño dinámico del sistema de conversión eólica–eléctrica, considerando las variables que intervienen en el proceso de generación. Este modelo integra variables y ecuaciones que representan el comportamiento de un aerogenerador.

#### 3.7.1. Potencia Eólica

Energía que se produce por la masa de aire en movimiento a una velocidad  $V$  tiene una energía cinética [26].

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad (6)$$

Donde:  $m$  es la masa del aire (kg),  $V$  es la velocidad de viento (m/s).

Sabemos que la energía del viento no solo depende de la velocidad sino también de su densidad se obtiene la ecuación de potencia del viento disponible

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (7)$$

Donde  $\rho$  la densidad del aire, que a efectos prácticos puede suponerse prácticamente constante. Debemos comprender también que el coeficiente de potencia está relacionado con la potencia mecánica a la potencia del viento y la relación de velocidad de punta [26].

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3\beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6\lambda \quad (8)$$

En este caso debido a que no se cuenta con un tacómetro para medir las RPM del aerogenerador es imposible calcular el coeficiente de potencia, por ello se toma en cuenta el valor constante de 0.25, es valor es el umbral de  $C_p$  en aerogenerador pequeños.

### 3.7.2. Potencia mecánica

Para establecer la potencia mecánica máxima del aerogenerador aprovechada por sus aspas, se puede establecer haciendo uso de la ley de Betz que se describe en la siguiente ecuación [24].

$$P_m = C_p \cdot P_v \quad (9)$$

$C_p$  coeficiente de potencia,  $P_v$  Potencia del viento.

### 3.7.3. Potencia Eléctrica

Considerando la energía cinética asociada a una masa de aire en movimiento que atraviesa el área barrida por el rotor del aerogenerador, es posible establecer la relación existente entre la velocidad del viento y la potencia generada. Dicha potencia corresponde a la energía transferida por el flujo de aire por unidad de tiempo. [27].

$$P_e = \eta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \quad (10)$$

Donde,  $P_e$  potencia eléctrica,  $\eta$  eficiencia global del sistema,  $\rho$  densidad del aire,  $A$  área de barrido de las aspas,  $C_p$  coeficiente de potencia.

### 3.8. BATERÍA

La batería es una parte primordial de las microrredes que funcionan en modo Isla u Off-Grid, ya que esta especificado para funcionar sin la conexión a la red eléctrica. Sirve de elemento para almacenar energía producida ya sea de paneles fotovoltaicos o aerogeneradores para luego en condiciones donde no se tenga dichas energías, la batería entregue la energía almacenada a la carga que se encuentra conectada para que esta funcione con normalidad [28].

#### 3.8.1. Tipos de baterías

##### Baterías de plomo ácido

Aunque son ampliamente utilizadas en el ámbito automotriz debido a su capacidad de proporcionar altas corrientes instantáneas, estas baterías no están diseñadas para descargas profundas y demandan mantenimiento frecuente. Por ello, su aplicación en sistemas fotovoltaicos resulta limitada [29].



Figura. 11 Batería de plomo ácido abierta [29].

##### Baterías tipo AGM

Las baterías AGM, cuyo electrolito se encuentra absorbido en separadores de fibra de vidrio, son unidades selladas libres de mantenimiento. Su capacidad para trabajar con altas corrientes y su versatilidad de instalación las convierten en una alternativa adecuada para aplicaciones fotovoltaicas [29].



Figura. 12 Batería AGM [29].

## Baterías de Gel

Su composición química corresponde a un electrolito en estado gelificado y a una estructura completamente sellada, lo que impide la liberación de líquidos ante posibles inclinaciones o volcamiento, permitiendo además su instalación en posición vertical sin inconvenientes.

Estas baterías se encuentran disponibles en niveles de tensión de 6 V, 12 V, 24 V y 48 V, y pertenecen a la tecnología de plomo-ácido. Sus dimensiones varían en función de la capacidad nominal expresada en amperios-hora (Ah).

Si bien su costo inicial es superior al de las baterías AGM y a las de plomo-ácido abiertas, esta diferencia se justifica por su mayor eficiencia operativa y por las condiciones de garantía, siempre que se respeten las especificaciones de uso indicadas por el fabricante. Adicionalmente, no requieren labores de mantenimiento y presentan un desempeño adecuado en entornos con ventilación limitada [29].



Figura. 13Batería Tipo Gel [29].

## Baterías de Ion Litio

Las baterías de litio se estructuran a partir de un electrodo negativo constituido por óxidos metálicos de litio y un electrodo positivo basado en materiales carbonosos, junto con un electrolito compuesto por sales de litio que facilita el transporte de cargas eléctricas dentro de la celda.

Este tipo de tecnología presenta una alta demanda en aplicaciones de electrónica portátil y en el sector de los vehículos eléctricos, debido a su elevada densidad energética. En la actualidad, su uso se ha extendido también al ámbito de las energías renovables, donde compite como una alternativa eficiente para sistemas fotovoltaicos, gracias a sus favorables características operativas [29].



Figura. 14 Baterías de Ion Litio [29].

### 3.9. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE BATERÍA

El modelamiento matemático de la batería, describe el comportamiento dinámico de la batería al almacenar y despachar energía al sistema. Este modelo integra variables y ecuaciones que representan el comportamiento de una de la batería.

#### 3.9.1. State of Charge (SOC)

El estado de carga (SOC) constituye uno de los indicadores más relevantes en el análisis del desempeño de una batería. Este parámetro se define como la relación entre la capacidad disponible en un instante determinado  $Q(t)$  a la capacidad nominal ( $E_{nom}$ ). La capacidad nominal es proporcionada por el fabricante y representa la carga máxima que la batería puede almacenar, el SOC se puede definir como se presenta a continuación [30]:

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{E_{nom}} \quad (11)$$

#### 3.9.2. Estimación del SOC por método de conteo de Coulomb

El modelo se basa en la ecuación diferencial del SOC, el estado de carga en un instante  $t$  depende del estado de carga anterior más la integral de la potencia que entra o sale de la batería en el intervalo de tiempo dado [30]. El SOC se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$SOC(t) = SOC(t - 1) + \frac{\int_{t-1}^t P_{bat}(t) \cdot dt}{E_{nom}} \times 100 \quad (12)$$

Donde,  $SOC(t)$  es el estado de carga actual (%),  $SOC(t - 1)$  es el estado de carga en el paso anterior,  $P_{bat}$  es la potencia de la batería (positiva al cargar y negativa al descargar).

### 3.10. POTENCIA DE CARGA RESIDENCIAL

Potencia requerida por un sistema eléctrico, promediada en un periodo o intervalo de tiempo determinado[31].

La potencia activa (W) representa la demanda instantánea del sistema, la cual debe ser cubierta de manera simultánea por las unidades de generación disponibles. El cumplimiento de este equilibrio en tiempo real resulta esencial para garantizar la estabilidad operativa del sistema eléctrico.

### 3.11. SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA (EMS)

Es un conjunto de herramientas, software y hardware diseñados para monitorear, controlar y optimizar el uso, generación y distribución de energía en un sistema, como microrredes, edificios, plantas industriales o redes eléctricas. El EMS recopila datos en tiempo real de sensores (voltaje, corriente, potencia), procesa esta información mediante algoritmos de control y optimización, y toma decisiones para maximizar la eficiencia energética, minimizar costos, reducir emisiones y garantizar la estabilidad del sistema [1].

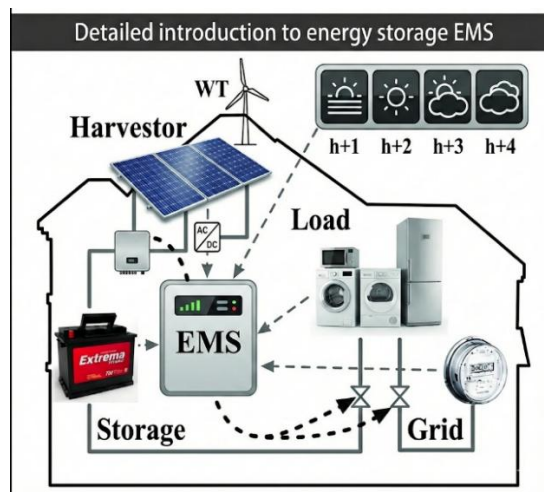


Figura. 15. Sistema de Gestión de Energía (EMS) [1].

### 3.12. MICROCONTROLADORES

El microcontrolador es un sistema computacional compacto implementado en un solo circuito integrado, que incorpora una unidad central de procesamiento, memoria de datos y programa, así como periféricos de entrada y salida. Su diseño está enfocado en aplicaciones de control dedicadas, donde se requiere ejecutar tareas específicas dentro de sistemas embebidos [32].

#### 3.12.1. Arduino Uno

Esta placa Arduino, perteneciente a la línea básica, ofrece compatibilidad con una amplia variedad de módulos de expansión (shields). Cuenta con 14 pines digitales de propósito general, incluyendo 6 con capacidad de modulación por ancho de pulso (PWM), además de 6 canales analógicos. También integra interfaces de comunicación serial como I2C, SPI y UART para la interacción con dispositivos externos [33].



Figura. 16. Arduino UNO [33].

### 3.12.2. Arduino Mega

El Arduino basado en el ATmega2560 amplía significativamente los recursos de hardware disponibles, integrando 54 pines digitales configurables como entrada o salida, incluyendo 16 con capacidad de modulación por ancho de pulso (PWM). Además, dispone de 16 canales analógicos, cuatro puertos de comunicación serial UART, e interfaces I2C y SPI para conexión con periféricos externos. El sistema también soporta seis interrupciones externas y es compatible con los módulos de expansión de la familia Arduino [34].



Figura. 17. Arduino Mega [34].

## 3.13. PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN

Los protocolos de comunicación es un conjunto de normas, reglas, pautas o instrucciones de forma, cuyo cumplimiento es de carácter obligatorio para un correcto intercambio de información [37].

En los sistemas modernos de comunicación industrial, coexisten protocolos abiertos que promueven la interoperabilidad entre equipos de diversos fabricantes y protocolos propietarios que restringen su uso a dispositivos de una misma marca. Esta diferencia influye directamente en la escalabilidad y flexibilidad de los sistemas implementados [37].

### 3.13.1. RS- 485

El estándar define un esquema de comunicación en bus perteneciente a la capa física del modelo OSI, estableciendo los requisitos eléctricos de los circuitos de transmisión y recepción. La transferencia de datos se lleva a cabo bajo un esquema serial asíncrono, caracterizado por el envío secuencial de bits sin la utilización de una señal de sincronización común [35].

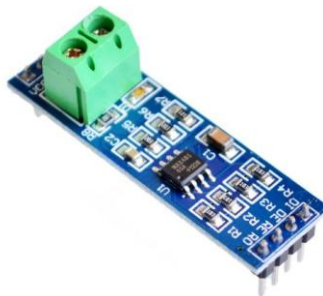


Figura. 18. Módulo Conversor TTL a RS485 [36].

### 3.13.2. Protocolo Modbus

Modbus constituye un protocolo de aplicación orientado a la automatización industrial, diseñado para el intercambio estructurado de datos entre dispositivos de campo y sistemas de control. Basado en un modelo maestro–esclavo, organiza la comunicación en tramas de solicitud y respuesta, posibilitando operaciones de lectura y escritura de registros sobre enlaces seriales [37].

#### Tipos de comunicación Modbus

El protocolo Modbus cuenta con distintas modalidades de funcionamiento que se adaptan a las necesidades dependiendo de la industria o el tipo de conectividad que se desee realizar [37].

### 3.14. LABVIEW

LabVIEW, desarrollado por National Instruments, es una plataforma de programación gráfica utilizada en aplicaciones de adquisición de datos, automatización y pruebas. Su estructura basada en bloques funcionales permite diseñar sistemas de manera visual, incorporando herramientas para la comunicación con instrumentos y la construcción de interfaces de supervisión integradas [38]. LabVIEW es una plataforma que simplifica la integración entre hardware y software en aplicaciones de ingeniería. Su enfoque de programación gráfica facilita el diseño de interfaces de supervisión y la implementación de algoritmos de análisis y control. Además, permite la interoperabilidad con otras herramientas y lenguajes, favoreciendo la reutilización de bibliotecas externas [38].

### 3.15. HADWARE-IN-THE-LOOP (HIL)

Es una técnica de simulación en tiempo real utilizada para el desarrollo, prueba y validación de sistemas, como controladores eléctricos. En HIL, el hardware real se conecta a un simulador en tiempo real que emula el comportamiento de la planta mediante modelos matemáticos. Este proceso permite probar el hardware en un entorno controlado y seguro, replicando condiciones del mundo real. HIL combina la simulación de la planta con interfaces de entrada/salida (I/O) que emula sensores y actuadores, proporcionando retroalimentación en tiempo real al controlador bajo prueba[3], [4], [39].

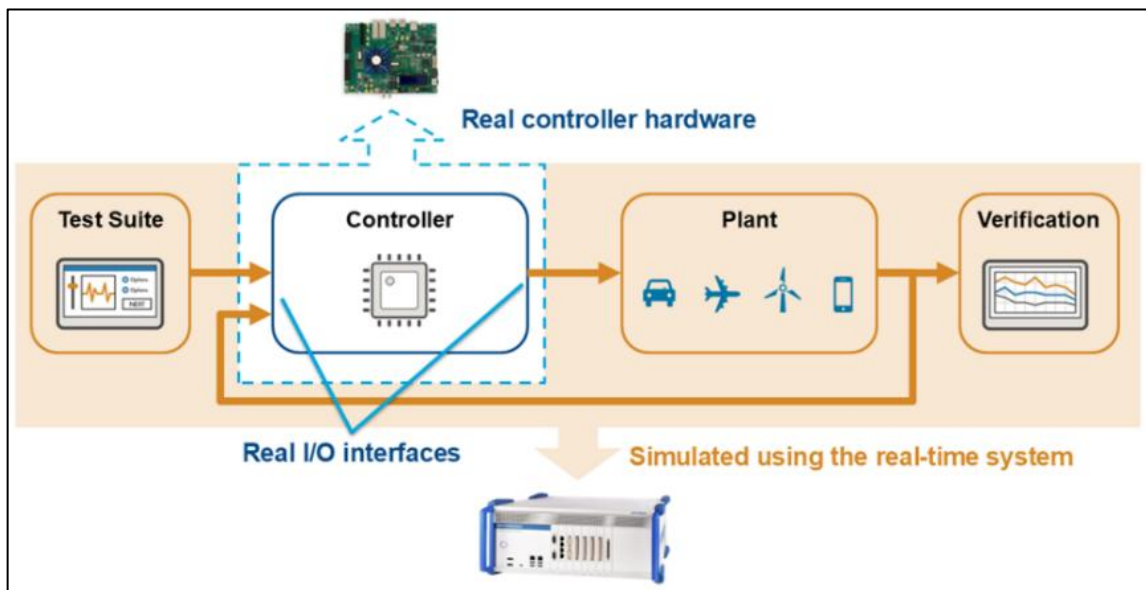


Figura. 19. Configuración típica de prueba HIL [3].

## **4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS**

### **4.1. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN**

El diseño e implementación del sistema de gestión de energía (EMS) mediante la técnica Hardware-in-the-Loop (HIL) se sustentó en la aplicación de métodos científicos que orientaron el proceso de análisis, modelado, experimentación y validación del sistema.

#### **4.1.1. MÉTODO EXPLORATORIO**

El método exploratorio nos permite comprender cómo funcionan las microrredes híbridas y las técnicas de simulación HIL mediante el estudio del arte. Este método permitió identificar los límites de las simulaciones y el hardware que tendrá el proyecto. A su vez, se logró identificar el tipo de comunicación que se utilizará, siendo este el estándar RS-485, el cual, por sus cualidades de robustez, será el encargado de la comunicación.

#### **4.1.2. MÉTODO ANALÍTICO**

El método analítico nos permite comprender el funcionamiento complejo de los recursos energéticos que constituyen el proyecto (paneles solares y aerogeneradores) a partir de sus modelos matemáticos fundamentales. Por esta razón, se analizaron las ecuaciones características de corriente (I) y voltaje (V), con el fin de implementarlas en los algoritmos que serán ejecutados en los microcontroladores Arduino del proyecto. De esta manera se logra la separación del sistema en sus tres componentes principales; generación, demanda y control.

#### **4.1.3. MÉTODO DESCRIPTIVO**

En cuanto al método descriptivo, este fue empleado para la caracterización de las variables eléctricas y lógicas que intervienen en el sistema de gestión se utilizó al momento de realizar las conexiones físicas entre el maestro y los esclavos, así como el protocolo de comunicación y la estructura de trama de datos. Esto permite describir el comportamiento dinámico del EMS frente a las variaciones de irradiancia y viento simuladas.

### **4.2. TIPOS DE INVESTIGACIÓN**

#### **4.2.1. INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL**

Esta investigación se apoya en una revisión documental de los distintos trabajos sobre las microrredes, modelos matemáticos de recursos energéticos, con la finalidad de establecer los parámetros de operación seguros para el proyecto.

## 4.2.2. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

La parte fundamental del proyecto corresponde a la investigación experimental, debido a que se implementará un prototipo físico HIL en el que será posible manipular las variables independientes, como la irradiación, la velocidad del viento y la demanda de carga considerada en el proyecto. Como parte de estos experimentos, el trabajo se dividió en tres etapas fundamentales: el desarrollo de los modelos matemáticos dentro del Arduino, la comunicación entre el hardware y el software del Arduino, y la comunicación serial entre Arduino y LabVIEW.

## 4.3. EXTRACCIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS

Para la validación del sistema HIL, se obtuvieron los perfiles de irradiación solar y velocidad del viento correspondientes a la Universidad Técnica de Cotopaxi, ubicada en la ciudad de Latacunga [-0.91789, -78.632856], los datos fueron tomados de NASA POWER, PVGIS, METEONORM, METEOSAT con mediciones temporales de una hora durante un año.

### 4.3.1. ANÁLISIS DEL RECURSO SOLAR

Para determinar el potencial de generación fotovoltaica en la ubicación exacta del proyecto requirió verificar la información disponible. Para ello, se analizó el comportamiento de la irradiación solar mes a mes, comparando tres fuentes distintas con la finalidad de evitar errores por estimación. La Tabla 2 resume este contraste entre PVGIS, METEONORM y NASA POWER, permitiendo visualizar las condiciones y diferencias entre estas bases de datos reconocidas para elegir la más adecuada para el desarrollo de las simulaciones.

Tabla 2. Radiación solar Latacunga - UTC.

MES	DATOS DE RADIACIÓN SOLAR LATACUNGA - UTC			
	RADIACIÓN SOLAR MEDIDA (W/m <sup>2</sup> /mes)			
	PVGIS	METEONORM	NASA	PROMEDIO
Enero	156.68	189	136.47	160.72
Febrero	141.68	155	141.44	146.04
Marzo	149.81	175	130.49	151.77
Abril	144.2	169	158.52	157.24
Mayo	145.8	175	156.21	159.00
Junio	137.54	165	161.93	154.82
Julio	148.92	172	162.66	161.19
Agosto	170.38	171	184.17	175.18
Septiembre	179.39	161	196.42	178.94
Octubre	168.98	160	175.74	168.24
Noviembre	151.36	164	169.33	161.56
Diciembre	152.01	180	151.53	161.18

### 4.3.2. ANÁLISIS DEL RECURSO EÓLICO

Para determinar la viabilidad de la generación eólica en la microrred híbrida, se recopiló los datos de la velocidad del viento a 10 metros de altura. Como se indica en la Tabla 3, se adquirió los datos de los registros de la base de datos NASA POWER y los datos de la red satelital METEOSAT.

Tabla 3. Velocidad del viento Latacunga – UTC.

<b>DATOS DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO LATACUNGA - UTC</b>			
<b>MES</b>	<b>VELOCIDAD DEL VIENTO MEDIA (m/s)</b>		
	<b>NASA</b>	<b>METEOSAT</b>	<b>PROMEDIO</b>
Enero	2.11	2.78	2.44
Febrero	2.23	3.83	3.03
Marzo	2.46	2.75	2.60
Abril	1.98	2.82	2.40
Mayo	3.00	3.53	3.26
Junio	4.59	4.57	4.58
Julio	4.83	4.65	4.74
Agosto	4.74	4.41	4.57
Septiembre	4.29	4.51	4.40
Octubre	2.75	3.44	3.10
Noviembre	2.67	3.69	3.18
Diciembre	2.46	3.31	2.88

La selección de la zona de estudio, se mantiene con la ubicación tomada en la toma de datos de radiación solar (UTC - Latacunga), debido a que la microrred que se simula se está tomando como si fuera un solo sistema por ende van en la misma ubicación geográfica para los casos de estudio.

### 4.4. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE PANEL FOTOVOLTAICO

Para la simulación del subsistema de generación fotovoltaica, resulta necesario definir el modelo matemático descrito en el Capítulo 3, mediante el cual las variables de entrada, como la irradiancia, son transformadas en la potencia eléctrica entregada a la salida del sistema.

Puesto que el modelo se lo realizará usando microcontroladores se omite modelos complejos, en cambio se usará un modelo simplificado basado en el comportamiento lineal de la corriente de corto circuito y la irradiancia.

#### 4.4.1. Cálculo del modelo matemático.

##### Datos del panel solar.

Para realizar los cálculos correspondientes al modelo matemático se parte de las hojas de datos del panel solar SIMAX 156 Solar Module (SP636 140W), Anexo 1.

Tabla 4. Datos del panel SP636 140W

<b>DATOS DEL PANEL</b>	
Pmax(w)	140
Voc (V)	22.3
Isc(A)	8.25
Vmp (V)	18
Imp(A)	7.78
Ncell	36
beta (Cvoc) %/C°	-0.34
alpha (CIsc)%/C°	0.035
Tstc C°	25
Tnoct C°	45
Gstc (W/m^2)	1000
Gnoct(W/m^2)	800
NOCT (C°)	45

La selección del panel fotovoltaico previamente descrito se justifica por la disponibilidad de este tipo de módulos en las instalaciones de la universidad, lo que posibilita contrastar los resultados del modelado matemático del panel con mediciones reales obtenidas del mismo equipo. Esta comparación permite verificar la efectividad del modelo matemático empleado.

##### Datos generales

Los datos que se detallan en la Tabla 5 se trata de los valores constantes utilizados como constantes para desarrollar el modelo matemático.

Tabla 5. Constantes generales.

<b>DATOS GENERALES</b>	
Carga (q)	1.602176634E-19
K(boltzman)	1.380649E-23
Eg (Energia del silicio)	1.12
G (W/m <sup>2</sup> )	590.53

##### Temperatura de la celda

$$T_{cell} = T_{amb} + \frac{G}{G_{NOCT}} \times (NOCT - T_{amb NOCT}) \quad (13)$$

$$T_{cell} = 25 + \frac{555.47}{800} \times (45 - 45)$$

$$T_{cell} = 25 \text{ } ^\circ \text{C}$$

$$T_{cell} = 25 + 273.75 = 298.15 \text{ } ^\circ K$$

### Corriente fotónica

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i (T_{cell} - T_{ref})] \cdot \lambda \quad (2)$$

$$I_{ph} = [8.25 + 0.0028875 \cdot (298.15 - 298.15)] \times 0.55547$$

$$I_{ph} = 4.58 \text{ A}$$

### Voltaje térmico y Corriente de saturación

$$V_t = \frac{kT}{q} \cdot N_{cell} \quad (4)$$

$$V_t = \frac{1.380649E - 23 \cdot (25 + 273.15)}{1.602176634E - 19} \cdot 36$$

$$V_t = 169.41 \text{ V}$$

$$I_0 = I_{ph} \left[ \exp\left(\frac{V_{oc}}{n \cdot V_t}\right) \right]^{-1} \quad (3)$$

$$I_0 = 4.87 \cdot \left[ \exp\left(\frac{22.3}{1.2 \cdot 169.41}\right) \right]^{-1}$$

$$I_0 = 4.106 \text{ A}$$

### Corriente de salida

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V}{n \cdot V_t}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

$$I_{pv} = 4.58 - 4.106 \left[ \exp\left(\frac{18}{1.2 \cdot 169.41}\right) - 1 \right]$$

$$I = 4.202 \text{ A}$$

### Potencia de salida

$$P = V \cdot I_{pv} \quad (5)$$

$$P = 18 \cdot 4.202$$

$$P = 75.63 \text{ W}$$

Una vez determinada la potencia generada por el panel fotovoltaico, se incorporan las pérdidas asociadas a las condiciones reales de operación de un sistema fotovoltaico. En particular, se consideran las pérdidas originadas en el inversor ( $n_{inv} = 0.98$ ) y en el cableado del sistema ( $n_C = 0.97$ ).

$$P_{FV} = (P \cdot n_C) \cdot n_{inv} \quad (14)$$

$$P_{FV} = 73.33 \text{ W}$$

#### 4.4.2. Validación de modelo matemático

Para validar el modelo matemático aplicado, se tomó registros reales del panel solar físico, teniendo así la potencia de generación calculada mediante las fórmulas que se aplican en el modelo y la potencia real medida en distintos intervalos de tiempo del año 2022 presentados en [40].

Para ello, con la matriz de datos de irradiación solar obtenidas mediante la plataforma virtual NASA POWER del año 2022 en la zona de estudio (UTC - Latacunga), y remplazando los valores de irradiación en las fórmulas del modelo se obtuvo los siguientes resultados que se presentan en comparación con datos de medición real.

Tabla 6. Comparación de datos de potencia medida y calculada.

FECHA	IRRADIACIÓN (WH/M <sup>2</sup> )	POTENCIA MEDIDA (W)	POTENCIA CALCULADA (W)	ERROR %
14/2/2022 9:00	555.47	67.01	73.33	8.62
14/2/2022 10:00	585.53	75.41	77	2.06
14/2/2022 11:00	465.33	60.87	62	1.82
14/2/2022 12:00	433.53	56.89	58	1.91
14/2/2022 13:00	310.22	41.31	42	1.64

#### 4.5.MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE AEROGENERADOR

El modelado del sistema eólico tiene como objetivo convertir los datos de la velocidad del viento en potencia eléctrica que se sumara a la microrred. Al igual que en el modelo solar se prevé desarrollar el modelo matemático simplificado. Que permite aprovechar la energía cinética del viento y transformarla en energía eléctrica, sin embargo, se conoce que una turbina eólica no puede ser aprovechada al 100% por el límite de Betz.

##### 4.5.1. Cálculo del modelo.

##### DATOS DEL AEROGENERADOR

Para realizar los cálculos correspondientes al modelo matemático se parte de las hojas de datos del AEROGENERADOR SUNNILY X- 600W, Anexo 2.

Tabla 7. Datos de aerogenerador SUNNILY X- 600W.

<b>DATO</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>
Potencia nominal de aer.	600	W
Velocidad de arranque	2	m/s
Velocidad nominal	12.5	m/s
Velocidad de supervivencia	45	m/s
Diámetro del rotor (D)	1.85	m
Radio del rotor ®	0.925	m
Número de palas	3	-
Voltaje nominal	24	V
Densidad del (p)	0.89	kg/m <sup>3</sup>
Eficiencia del sistema (n)	0.85	-
Angulo de pala (β)	0	°

Para estimar la densidad del aire en la zona de estudio (UTC - Latacunga), se emplea la Tabla 8, que relaciona dicho valor con la altura sobre el nivel del mar.

Tabla 8. Densidad del aire a distintas alturas.

<b>ALTITUD</b>	<b>DENSIDAD (KG/M<sup>3</sup>)</b>				
	0°C	5°C	10°C	15°C	5°C
(Mt)					
0	1.28	1.25	1.23	1.21	1.17
500	1.21	1.19	1.17	1.15	1.11
1000	1.14	1.12	1.1	1.08	1.05
1500	1.07	1.06	1.04	1.02	0.98
2000	1.01	0.99	0.97	0.96	0.92
2500	0.94	0.92	0.91	0.89	0.86
3000	0.87	0.86	0.84	0.83	0.8
3500	0.81	0.79	0.78	0.76	0.74
4000	0.74	0.73	0.71	0.7	0.68
4500	0.67	0.66	0.65	0.64	0.62
5000	0.61	0.6	0.58	0.57	0.56

## DATOS GENERALES

La Tabla 9 detalla los valores constantes utilizados para el desarrollo del modelo matemático.

Tabla 9. Constantes generales.

<b>DATOS VIENTO</b>	
-	(m/s)
MAXIMO	6.49
MINIMO	0.81
PROMEDIO	2.67379781
DESVIACIÓN	1.22779323

## AREA DEL BARRIODO

$$A = \pi \times R^2 \quad (15)$$

$$A = \pi \times 0.93^2$$

$$A = 2.69 \text{ m}$$

### POTENCIA DEL VIENTO NOMINAL ( $P_v$ )

$$P_v = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \quad (7)$$

El valor de la velocidad es un valor que se puede variar dependiendo de la velocidad del viento, a manera de ejemplo se tomó el valor de 11 m/s para desarrollar el modelo.

$$P_v = \frac{1}{2} \times 0.89 \times 2.69 \times 3^3$$

$$P_v = 32.30 \text{ W}$$

### POTENCIA MECÁNICA

Para obtener el valor de potencia mecánica se usa el coeficiente de potencia ( $C_p = 0.25$ ) y potencia del viento nominal ( $P_v$ ).

$$P_m = C_p \times P_v \quad (9)$$

$$P_m = 0.25 \times 32.30$$

$$P_m = 0.07 \text{ W}$$

### POTENCIA ELECTRICA

$$P_e = \eta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p \quad (10)$$

$$P_e = 0.85 \cdot \frac{1}{2} \cdot (0.89) \cdot 2.69 \cdot 3^3 \cdot 0.25$$

$$P_e = 6.9 \text{ W}$$

#### 4.5.2. Validación de modelo matemático

Para validar el modelo matemático aplicado para el modelo del aerogenerador, se compara datos de la curva de potencia-velocidad del viento proporcionado por el fabricante del aerogenerador presentado [41] y en el ANEXO 2, con los cálculos realizados a diferentes mediciones de velocidad de viento.

En la Tabla 10 se presenta los resultados obtenidos en la comparación realizada.

Tabla 10. Comparación de potencia medida y calculada.

<b>VELOCIDAD DE VIENTO (m/s)</b>	<b>POTENCIA REAL (W)</b>	<b>POTENCIA CALCULADA (W)</b>	<b>ERROR %</b>
2	0	0	0%
3	6	6	0.0%
5	30	31	3.3%
7	140	150	7.1%
8	240	221	7.9%

#### 4.6. ESTUDIO DE CARGAS DE UNA VIVIENDA TIPO D

Para evaluar el desempeño del EMS en un escenario realista, se seleccionó como carga una vivienda unifamiliar rural. En la Tabla 11 se presenta el estudio de cargas asociada a dicha residencia.

Tabla 11. Estudio de cargas de una vivienda en Ecuador.

<b>ESTUDIO DE CARGAS DE UNA VIVIENDA EN ECUADOR</b>					
Equipos	Potencia (W)	Horas de uso	Energía (Wh)	FS	Energía (Wh)
Refrigerador	150	24	3600	1.1	3960
Ilu.Cocina	9	4	36	1.1	39.6
Ilu.Sala	27	3	81	1.1	89.1
Ilu.Baño	9	2	18	1.1	19.8
Ilu.Dormitorio	36	5	180	1.1	198
Ilu.Patio	36	2	72	1.1	79.2
Tv	75	4	300	1.1	330
Computadoras	90	4	360	1.1	396
Parlantes	14	2	28	1.1	30.8
Celulares	30	2	60	1.1	66
Totales	476		4735	1.1	5208.5

Considerando los electrodomésticos presentes en la vivienda, se realizó un estudio horario de consumo durante un ciclo de 24 horas, como se muestra en la Tabla 12. Este análisis tiene como fin identificar los picos máximos y mínimos de potencia de potencia que será utilizado para dimensionar la potencia necesaria que deberá generar el sistema fotovoltaico y eólico.

Tabla 12. Potencia consumida en vivienda en 24 horas del día.

Hora	Refrigerador	Ilu. Cocina	Ilu. Sala	Ilu. Baño	Ilu. Dormitorio	Ilu. Patio	Tv	Computadoras	Parlantes	Celulares	Potencia Total (W)
0	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150
1	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150
2	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150
3	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150
4	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150
5	150	9	0	0	36	0	0	0	0	30	225
6	150	0	0	9	0	0	75	0	0	0	234
7	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150
8	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150
9	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150
10	150	0	27	0	0	0	0	0	0	0	177
11	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150
12	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150
13	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150
14	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150
15	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150
16	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150
17	150	0	0	0	0	0	0	0	0	30	180
18	150	9	27	0	36	36	75	90	14	0	437
19	150	9	27	0	36	36	75	90	14	0	437
20	150	9	27	0	36	0	75	90	0	0	387
21	150	0	0	9	36	0	0	90	0	0	285
22	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150
23	150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150

Utilizando los registros de la Tabla 12, se construyó el perfil de demanda del sistema. La Figura. 20 muestra la curva de potencia total obtenida a partir de la correlación entre la hora y el consumo registrado.

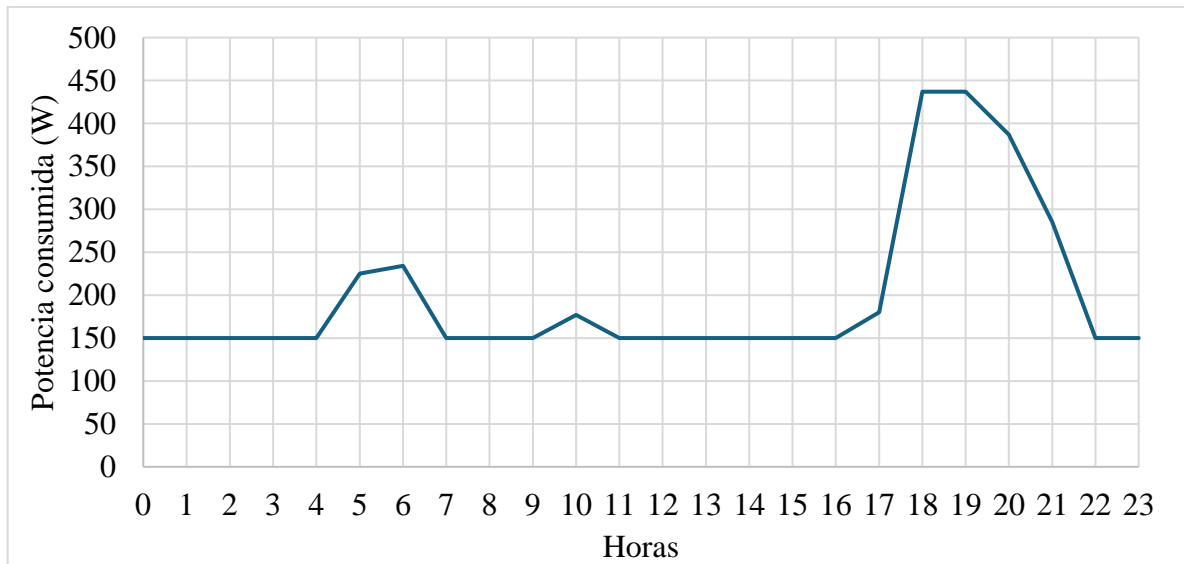


Figura. 20 Curva de potencia consumida en vivienda rural.

#### 4.7. PROGRAMACIÓN EN ARDUINO

Para la ejecución de la simulación planteada en este proyecto, fue necesario desarrollar el código en la plataforma de programación IDE de Arduino. Esta plataforma permite implementar entornos HIL de low-cost, y probar protocolos de comunicación por el Serial. Para la ejecución del código se utilizaron librerías como SoftwareSerial (donde se emulan puertos serie).

La programación consiste en la estructura del Maestro – Esclavo, mediante la comunicación serial, empleando módulos RS-485. La comunicación hecha por la vía RS-485 define a un Arduino UNO que se comporta como Maestro, el cual, a su vez controla 3 Arduino UNO esclavos los cuales simulan la generación fotovoltaica, la generación eólica, y la Demanda de una carga.

#### 4.7.1. Maestro

La finalidad principal del código del maestro es controlar el flujo de datos que son recibidos de los esclavos que posee el proceso. El código principal ciclo de trabajo (void loop) que ha sido creado para este propósito, implementa la técnica de Polling de los esclavos, evitando así las colisiones que se producen en el bus RS-485 (configurado en modo Half-Duplex, donde se puede mantener un flujo de información en ambas direcciones, pero nunca simultáneamente).

Cuando el maestro inicia la transacción envía por el bus el comando de solicitud que está simplificado en formato ASCII como (1, R: sistema fotovoltaico; 2, R: sistema eólico; 3, R: carga). A continuación, pasa a escuchar la respuesta. Cuando ya ha sido completada la lectura de los datos de los 3 subsistemas concatenará la información en una cadena única de texto para ser enviada por el puerto serial USB al computador, donde la puede ser controlada, visualizada y registrada.

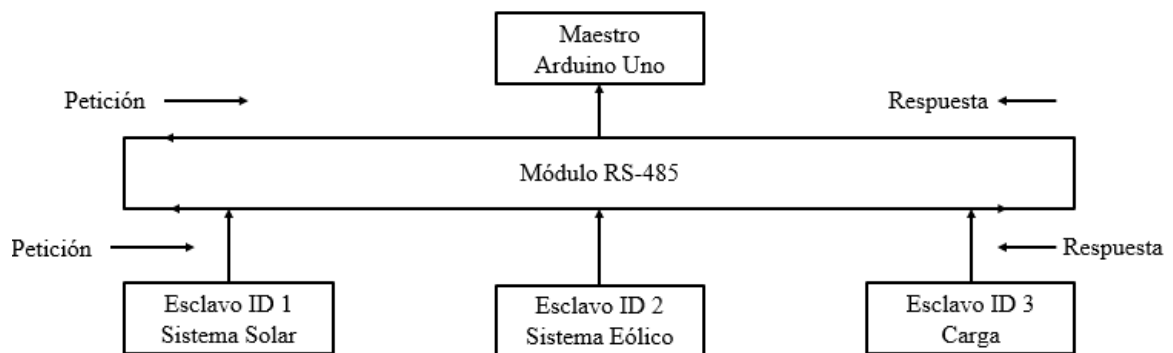


Figura. 21. Arquitectura de la comunicación (MAESTRO – ESCLAVO).

#### 4.7.2. Esclavos

La función principal de cada esclavo es ejecutar un modelo matemático. Este modelo procesa la lectura de las entradas analógicas correspondientes a los sensores o potenciómetros y las transforman en el valor de potencia eléctrica que debe de emular los esclavos.

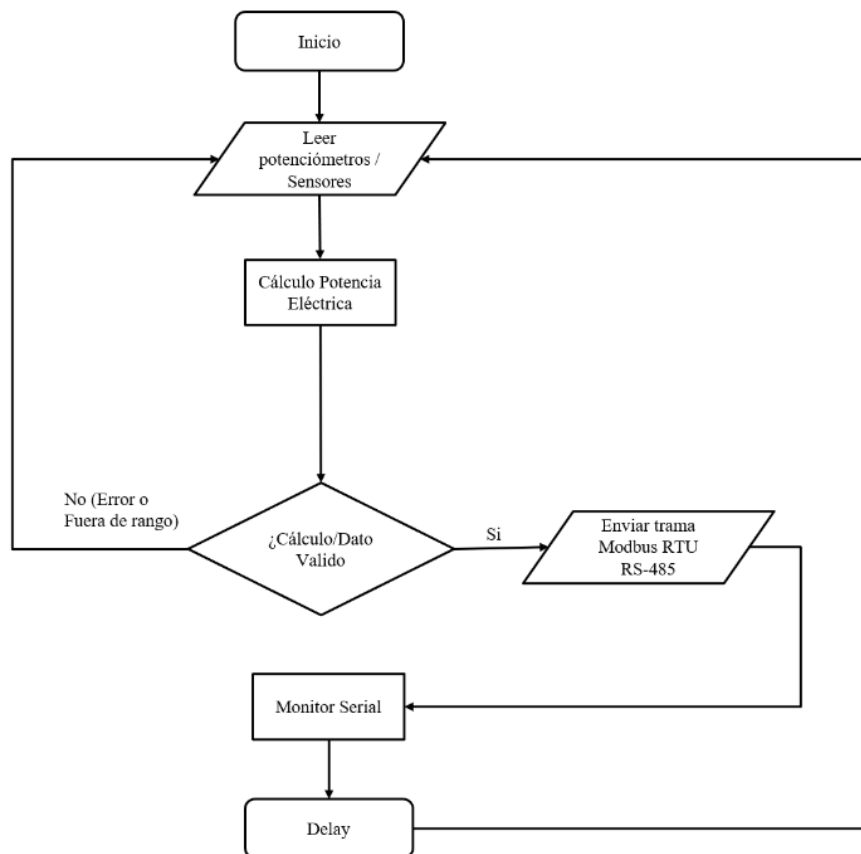


Figura. 22. Diagrama de flujo para el Código de emulación de los esclavos.

### Sistema fotovoltaico ID '1'

La programación del sistema fotovoltaico puede considerarse que implementa una versión simplificada del modelo de un diodo, ya que este último algoritmo hace y calcula la potencia de salida.

Las entradas analógicas A0 o A1 serán las encargadas de mapear los datos de irradiación de la solar global de 0 a  $1000 \text{ W/m}^2$ . Se implementan las ecuaciones características del diodo que permite obtener, por un lado, la corriente fotogenerada ( $I_{ph}$ ) y, por otro lado, la corriente de saturación del diodo ( $I_0$ ) y, así, obtener la potencia.

### Sistema Eólico ID '2'

El código referente al sistema eólico modela la conversión de energía cinética del viento en energía eléctrica. La parte principal de este modelo responde a la ecuación teórica de la potencia eléctrica.

$$P_e = \eta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p \quad (10)$$

Se implantaron límites de seguridad mediante la condicional (*if*) para las velocidades de corte. Es decir, Es decir, si se da la condición de que la velocidad del viento ( $v$ ) es menor que la velocidad de arranque definida por el fabricante ( $2,1 \frac{m}{s}$ ) o mayor que la velocidad de supervivencia ( $25 \frac{m}{s}$ ), se forzará a que la potencia de salida sea cero; simulando de esta forma el freno aerodinámico de una turbina real. A su vez se limitó la potencia nominal del generador ( $600W$ ) para que no se diesen valores irreales en la simulación.

### **Demanda ID '3'**

Con relación a la demanda se desarrolló un modelo determinista basado en perfiles predefinidos, el cual tiene como función emular el comportamiento de consumo eléctrico de un hogar o pequeña carga y pone en práctica un patrón temporal fijo.

Se definen constantes en la variable *const int DEMANDA [24]* que contienen los valores de consumo para cada hora del día y los valores del perfil tarifado en la tarifa de la dignidad. El potenciómetro que va conectado al pin A0 no regula potencia directamente, sino que regula la variable tiempo (0 – 23 horas). Esto permitirá regular manualmente el tiempo a lo largo de la simulación HIL a fin de evaluar la respuesta del sistema en relación con horarios convenientes (pico nocturno o valle matutino) de forma inmediata.

```
// Curva de Demanda
const int DEMANDA_DIARIA[24] = {
    150, 150, 150, 150, 150, 225, 234, 150, 150, 150, 177, 150,
    150, 150, 150, 150, 150, 180, 437, 437, 387, 285, 150, 150
};
```

Figura. 23. Visualización de la trama de datos de la demanda.

## **4.8. COMUNICACIÓN RS-485**

Para [42] este tipo de comunicación se establece a partir del acceso a multipunto desde un voltaje de 5v, con un rango de modo común del bus de - 7 V a +12 V, dependiendo de la circuitería se puede usar hasta 32 cargas y su velocidad máxima de transmisión es de 10Mbps. Las redes RS-485 se instalan por medio de diferentes nodos conectados entre sí de forma para relacionando entre sí un bus. En el gráfico adjunto de la comunicación se expone una típica red Conexiones para las implementaciones RS-485 half- dúplex, así como full-dúplex.

La gran mayoría de las aplicaciones RS-485 que se desarrollan son half-dúplex (dos hilos), en donde las implementaciones full-duplex requieren dos pares de señales (cuatro hilos), y permiten un mejor desempeño a través del establecimiento de la posibilidad de relación simultánea y por avivamiento de datos a través del nodo.

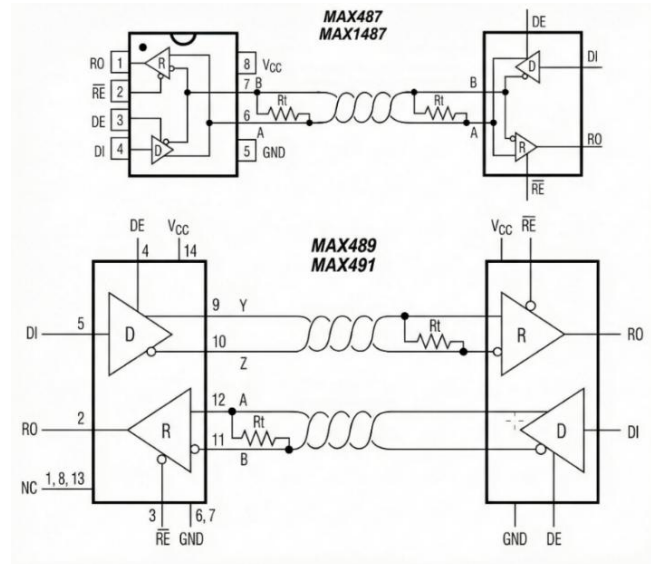


Figura. 24. Diagramas de conexión RS-485/RS-422 [42].

La comunicación en modo Half-Duplex ha sido la utilizada para todo el desarrollo del proyecto. El modo Half-Duplex permite formar un canal de comunicación bidireccional, pero no simultáneamente entre maestro y esclavos; cuando el maestro transmite los esclavos reciben y cuando los esclavos responden el maestro recibe.

#### 4.9. VALIDACIÓN Y PROTOTIPADO VIRTUAL

Antes de la implementación física de los elementos, se realizó una fase de validación funcional por medio del software de simulación denominado Proteus VSM (VSM = Virtual System Modelling). Esta fase fue importante para validar la lógica de control del firmware y la integridad de la arquitectura de comunicaciones sin riesgo de dañar ningún dispositivo electrónico.

##### 4.9.1. Sistema fotovoltaico ID '1'

En la Figura. 25 se muestra el prototipo del sistema fotovoltaico (FV) en el entorno de simulación, donde se ha integrado una placa Arduino UNO para la unidad de procesamiento y un display LCD 16×2 con interfaz I2C para mostrar las variables principales del sistema. Para representar de una manera sencilla el comportamiento de la irradiancia, se utiliza un LDR y una resistencia formando un divisor de tensión, y un potenciómetro para ofrecer una señal que

permite ajustar la señal de entrada y llevar a cabo una comparación en diferentes escenarios de operación. Además, en la electrónica se incluye un pulsador conectado a una entrada digital que permite cambiar entre el modo manual y automático, de tal manera que este montaje permita validar la lógica de control y la presentación de datos antes de su implementación física.

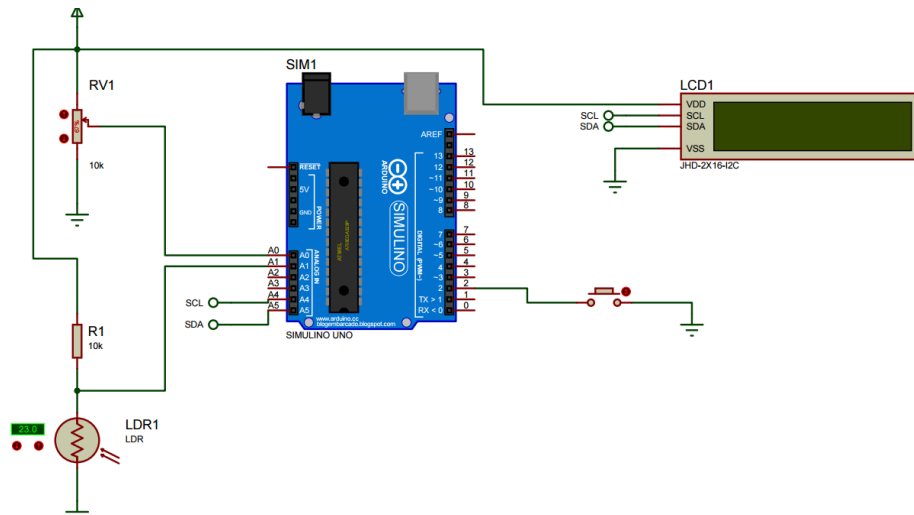


Figura. 25. Diagrama esquemático del prototipo del sistema fotovoltaico (FV) en Proteus.

#### 4.9.2. Sistema Eólico ID '2'

La Figura. 26 representa el prototipo de sistema eólico (esclavo 2) que se implementó en Proteus, en el cual un Arduino UNO actúa como la unidad de adquisición y procesamiento encargada de estimar la potencia generada a partir de la velocidad del viento. Se emula la velocidad mediante un potenciómetro (RV2), que se encuentra conectado a una de las entradas analógicas; una entrada digital está ocupada por un pulsador que permite activar el conmutador que se encuentra entre el modo manual para pruebas de operación y el modo automático. Por último, un LCD 16x2 con interfaz I2C se encuentra conectado a través de la alimentación y las señales de datos SDA/SCL; la intención de este elemento es visualizar las variables calculadas y verificar el comportamiento del sistema antes de construir el montaje físico.

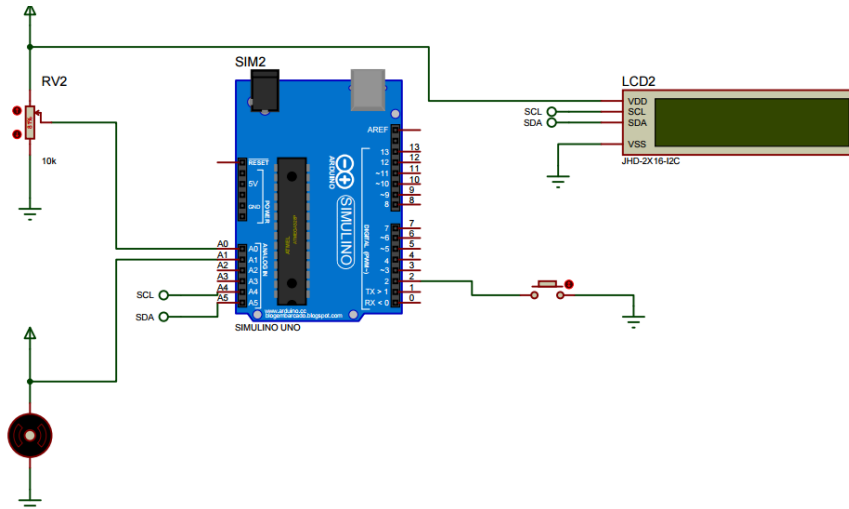


Figura. 26. Diagrama esquemático del prototipo del sistema eólico (Wind) en Proteus.

### 4.9.3. Demanda ID '3'

EL diagrama que se presenta a continuación es el perfil de demanda en Proteus. En él podemos ver un Arduino UNO conectado a un LCD 16×2 con interfaz I2C, tal y como el que se encuentra en el Esclavo 2, el Esclavo 1, el cual permite observar la información del sistema. La selección de la “hora del día” se emula mediante el potenciómetro RV3 conectado a una entrada analógica, de modo que al variar su posición se recorre el arreglo de la demanda diaria y se obtiene así la potencia correspondiente para dicha hora.

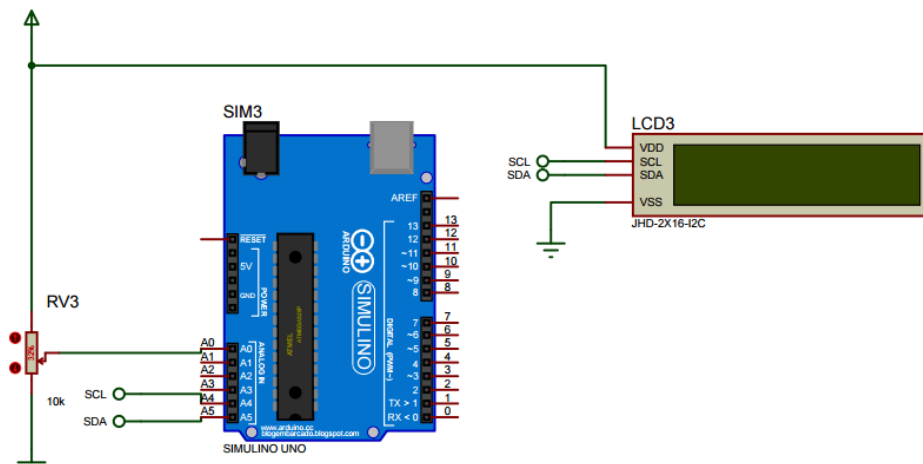


Figura. 27. Diagrama esquemático del prototipo del sistema de la carga en Proteus.

## 4.10. DESARROLLO DEL HARDWARE

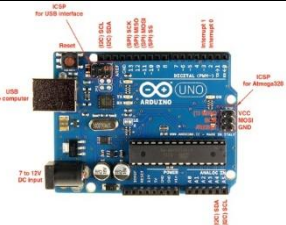

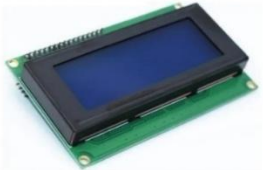


La creación del modelo físico Hardware-in-the-Loop (HIL) se realizó después de la validación lógica en entornos virtuales y antes de la integración de los subsistemas. La configuración final del sistema se caracteriza por la unión de cuatro subsistemas independientes, los cuales se interconectan mediante un bus de comunicación RS-485.









El protocolo Maestro-Esclavo, permite verificar, desde un medio controlado, el flujo de datos entre el coordinador y los aparatos campo. Esta sección permite verificar el correcto envío y el recibo de tramas de datos para asegurar que cada esclavo realiza las instrucciones solo cuando es consultado a través de su identificador y que las variables calculadas conservan la misma consistencia con las condiciones de operación dadas.

#### 4.10.1. ELECCIÓN DE COMPONENTES

La selección del hardware se basó en la adecuada viabilidad en relación con los requerimientos de programación del prototipo, la facilidad de ensamblado y su comercialización. Para el trabajo, se han implementado cuatro microcontroladores Arduino UNO, configurándose la arquitectura en un Maestro y tres esclavos; esta plataforma la gestión de protocolos de comunicación de manera simultánea y la baja latencia. La transmisión de los datos se realizará por los transceptores MAX485, que permitirá realizar la comunicación diferencial, operando con una única fuente de +5V.

Tabla 13. Lista de Materiales para el desarrollo del Hardware.

Nº	COMPONENTES	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	IMAGEN
1	Arduino UNO R3	Microcontrolador ATmega328P, 16MHz, 5V, USB Tipo B.	
2	Modulo RS-485	Chip basado en MAX485 Interfaz TTL a RS-485. Alimentación 5V.	
3	Pantalla LCD 20X4	Display alfanumérico de 4 filas y 20 caracteres. Fondo azul/verde.	
4	Potenciómetro	Resistencia variable de 10 k $\Omega$ (B10K), mono-vuelta.	
5	Pulsadores	Normalmente Abierto (NA), 4 pines.	

6	LED Rojo	Voltaje directo: 1.8V - 2.2V.	
7	LED Verde	Voltaje directo: 1.8V - 2.2V.	
8	Resistencia 120 Ω	1/4 Watt, tolerancia 5%.	
9	Resistencia 240 Ω	1/4 Watt, tolerancia 5%.	
10	Protoboard		
11	Cables Jumper	Macho-Macho y Macho-Hembra.	
12	Cables UTP	Categoría 5e o superior.	
13	Fuente de alimentación	5V DC / 2A (o Hub USB alimentado).	

Tras la selección y adquisición de los componentes electrónicos necesarios, se procedió al diseño del esquema de conexión para los primeros prototipos experimental. Las figuras detallan la integración de los elementos en la arquitectura propuesta.

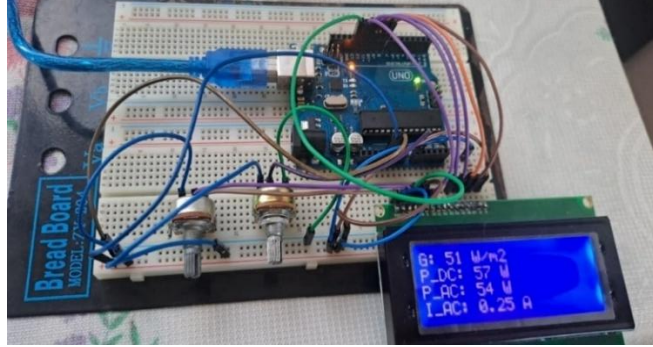


Figura. 28. Sistema Fotovoltaico Físico.

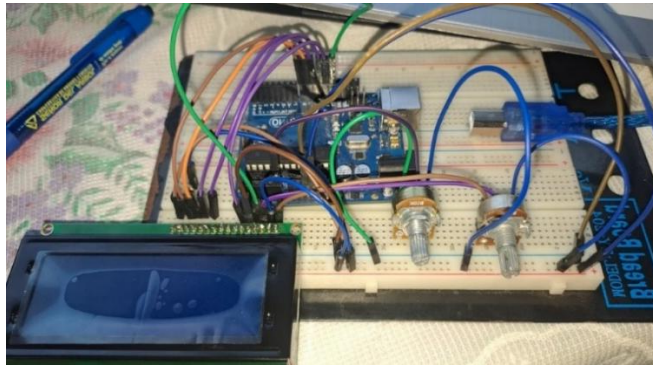


Figura. 29. Sistema Eólico Físico.

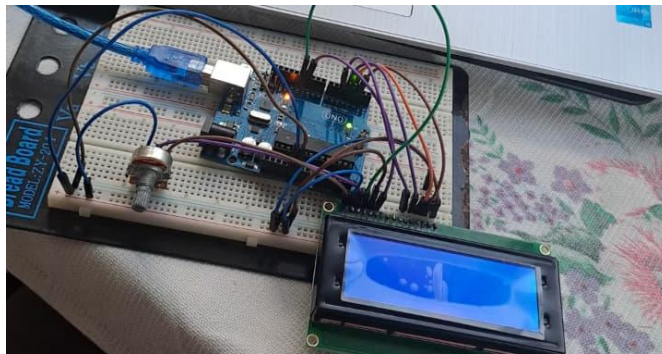


Figura. 30. Sistema Carga Físico.

Las siguientes figuras muestra finalmente la implementación física de la plataforma HIL que a través de la interconexión de los nodos de procesamiento mediante el bus de campo RS-485, que fue ejecutada satisfactoriamente. Las pruebas ejecutadas sobre el prototipo permiten confirmar que se logra estable el enlace de comunicación y que el nodo Maestro es capaz de gestionar adecuadamente la comunicación con los tres esclavos emuladores a la vez FV, Eólico, Carga sin perder trama alguna; es decir, se ha cumplido con la arquitectura de la red diseñada.

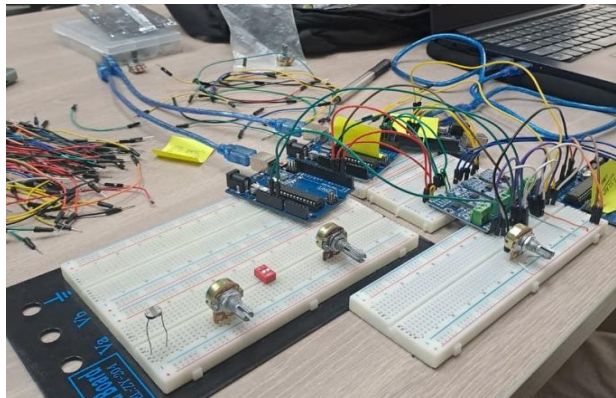


Figura. 31. Armado del prototipo para la comunicación.

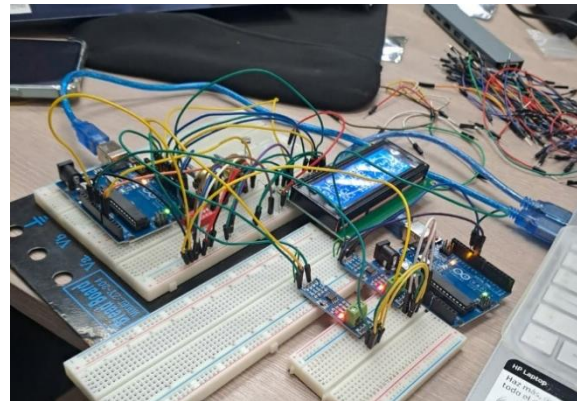


Figura. 32. Comunicación entre los esclavos mediante modbus RS-485.

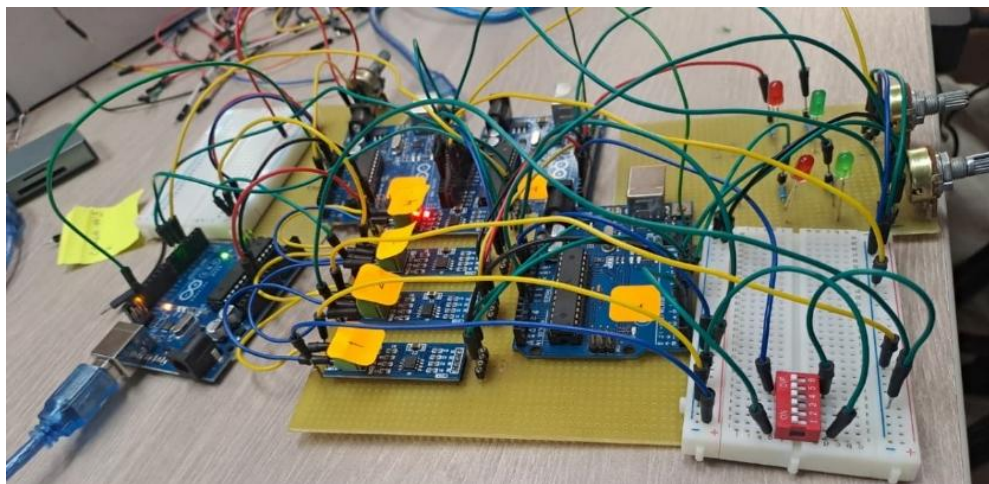


Figura. 33. Comunicación entre los esclavos mediante módulos RS-485.

En la Figura. 34 se muestra el sistema en estado de inicialización o reposo, donde respetando los potenciómetros de entrada en valor mínimo, el Maestro recibe correctamente la trama completa junto con los identificadores de cada uno de los esclavos (IDs 1, 2 y 3), reportando valores nulos o basales (Irradiancia=0.00, Viento=0.00). Por tanto, se concluye que incluso en el estado de reposo, la comunicación y la trama están correctamente sincronizadas y sin errores.

```

Monitor Serie x
Mensaje (Intro para mandar el mensaje de 'Ard
1;0.00;0.00;2;0.00;3.04;3;0;150.00;
1;0.00;0.00;2;0.00;3.04;3;0;150.00;
1;0.00;0.00;2;0.00;3.04;3;0;150.00;
1;0.00;0.00;2;0.00;3.04;3;0;150.00;
1;0.00;0.00;2;0.00;3.04;3;0;150.00;
1;0.00;0.00;2;0.00;3.04;3;0;150.00;
1;0.00;0.00;2;0.00;3.04;3;0;150.00;
1;0.00;0.00;2;0.00;3.04;3;0;150.00;
1;0.00;0.00;2;0.00;3.04;3;0;150.00;

```

Figura. 34. Visualización de los datos recibidos en el Monitor Serial.

Por otro lado, la Figura. 35 evidencia la respuesta dinámica del sistema a la potencia perturbaciones de las entradas analógicas. La figura presenta cómo el Maestro recibe actualizaciones a tiempo real, observando valores significativos mientras se comparan con los modelos matemáticos (ej. irradiancia:  $584.56 \text{ W}/m^3$ , Potencia Eólica: 406.66 W); una transferencia de las mediciones fluida hace posible validar que el bus RS-485 permite transmitir las múltiples telemetrías de las seis variables de estado a la vez.

```
1;584.56;232.71;2;10.75;406.66;3;12;150.00;  
1;584.56;232.71;2;10.75;406.66;3;12;150.00;  
1;584.56;232.71;2;10.75;406.66;3;12;150.00;  
1;584.56;232.71;2;10.75;406.66;3;12;150.00;  
1;584.56;232.71;2;10.75;406.66;3;12;150.00;  
1;584.56;232.71;2;10.75;406.66;3;12;150.00;  
1;584.56;232.71;2;10.75;406.66;3;12;150.00;  
1;584.56;232.71;2;10.75;406.66;3;12;150.00;
```

Figura. 35. Verificación de comunicación y lectura de sensores.

#### 4.11. DISEÑO DE PCB

El diseño de las placas PCB se lo realizo con el fin de, reducir capacitancias parasitas, mejorar la estabilidad mecánica en los terminales de los módulos RS 485, minimizar los falsos contactos en las distintas conexiones en la placa de protoboard de cada módulo de Arduino. Se selecciono el software de Proteus por la integración entre el entorno de captura esquemática (ISIS) y el diseño de placas de circuito impreso (ARES), lo cual permite la verificación del correcto funcionamiento del PCB mediante simulación del propio software.

##### 4.11.1. Diseño esquemático (ISIS)

En este apartado, se definen los bloques funcionales para los módulos (Maestro y Esclavos), priorizando la estandarización de los componentes para facilitar su ensamblaje y mantenimiento.

##### A. Sistema de Alimentación:

Para energizar el sistema, se implementó un bus de alimentación común. Para ello se seleccionó una fuente de alimentación externa de 9 V/500 mA CC, la cual se conectará a uno de los Arduinos por medio de su plug de alimentación. Cada placa integra borneras de conexión (Terminal Blocks) permitiendo así la derivación de líneas de voltaje y tierra para cada módulo.

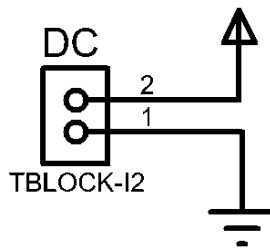


Figura. 36. Bornes de alimentación.

Esta conexión asegura que cada módulo comparta una referencia de tierra en común (GND), con el fin evitar bucles en masa y asegurar la estabilidad de señales analógicas y de comunicación diferencial de los módulos RS-485. Internamente cada módulo utiliza el regulador de voltaje del microcontrolador para reducir los 9 V a 5V requeridos por la lógica digital.

**B. Interfaz de visualización:**

Se cuenta con una pantalla LCD de 16x2 el cual permite visualizar diferentes parámetros de los esclavos individualmente, ya sea modo de operación (manual/auto), potencia de generación (W), irradiación solar ( $W/m^2$ ), velocidad del viento ( $m/s^2$ ) u otro parámetro que se desee analizar dependiendo de la programación establecida.

Para reducir el cableado, se utilizó el protocolo de comunicación I2C mediante un adaptador. Esta implementación permite controlar el LCD utilizando dos hilos de datos: SDA (Serial Data) y SCL (Serial Clock), conectados en los pines analógicos A4 y A5.

**BORNERA DE CONEXION LCD**

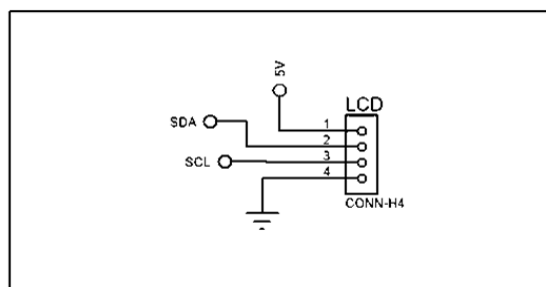


Figura. 37. Diseño de conexión LCD con I2C.

**C. Bloque de procesamiento y control de modo:**

Se diseño un esquema modular donde los esclavos fotovoltaicos (ID-1) y eólico (ID-2) comparten el mismo diseño PCB, ambos incluyen los mismos elementos electrónicos

que son: pulsador de modo el cual consta de un botón con resistencia Pull-up interna para alternar entre los modos manual y automático.

En la conexión de las entradas analógicas se encuentran conectados los potenciómetros para las pruebas manuales y bornes para el ingreso de señales en caso de tener sensores reales correspondientes a los sistemas.

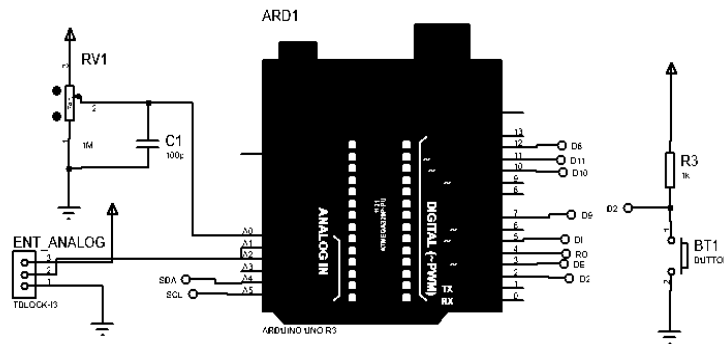


Figura. 38 Elementos para conexiones de entradas analógicas en Arduino.

Adicional se agregó leds para señalar parámetros de las microrredes acorde al código de programación elaborado anteriormente, los cuales se conectan a los pines digitales 7 y 12 del Arduino, que indicaran cuando el sistema ya sea eólico o fotovoltaico estén en sus límites de generación de máximo o mínimo.

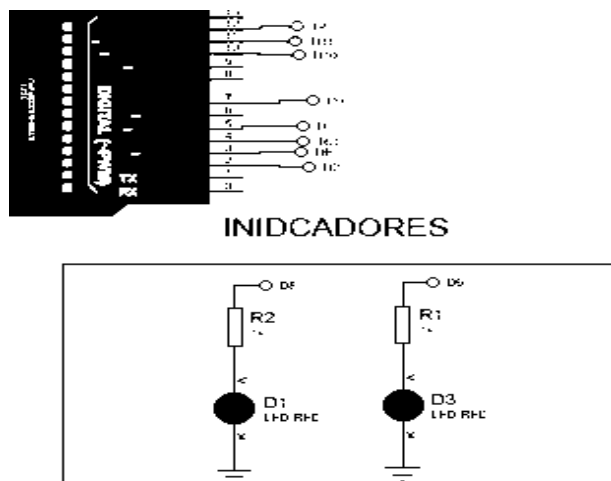


Figura. 39 Leds indicadores de límites de generación.

Por otro lado, el diseño del esclavo 3 de la Demanda o carga es más sencillo ya que cuenta con un potenciómetro para variar la hora del día acorde a la matriz de la Figura. 23, y finalmente el maestro el cual cuenta con un diseño más sencillo ya que es el encargado de recibir datos de los 3 esclavos no cuenta con muchas conexiones como los anteriores. Por último, se agrega el módulo MAX-RS-485 que será el encargado de realizar la comunicación maestro – esclavo del sistema.

#### 4.11.2. Diseño de layout (ARES)

Una vez validado el funcionamiento del diseño esquemático (ISIS), se utilizó la herramienta ARES para crear la placa PCB. Se unen todos los elementos mencionados anteriormente de cada módulo para crear pistas las cuáles serán las encargadas de que los módulos funcionen correctamente sin interferencias u otro tipo de falla común que se presentaba en las pruebas realizadas en el protoboard.

La herramienta de ares nos permite visualizar en 2d y 3d la placa diseñada, con el fin de verificar que las pistas de los circuitos se encuentren diseñados de manera correcta antes de fabricar la placa física. El diseño del módulo del sistema fotovoltaico y eólico son similares ya que solo cambia su lógica de programación.

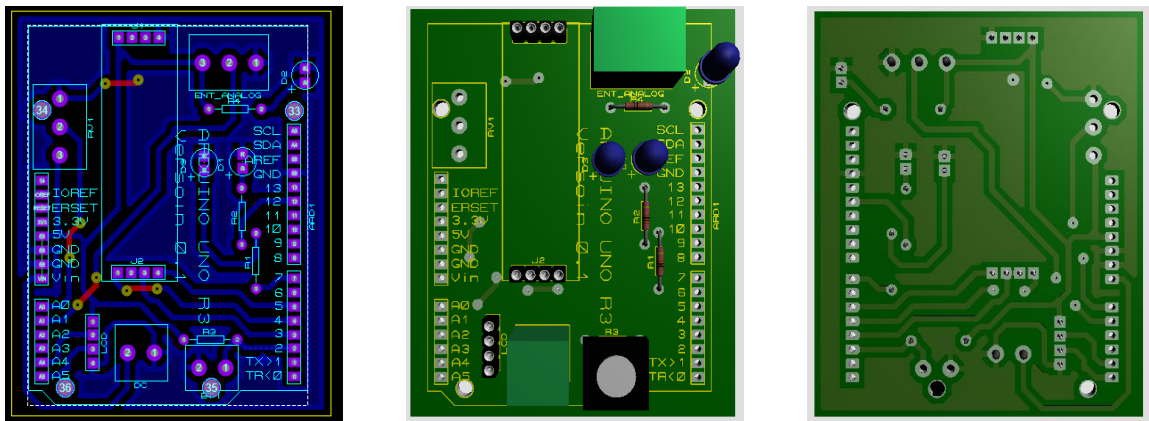


Figura. 40 Vista de diseño modulo fotovoltaico y eólico

Para el módulo de la demanda o carga se tiene el siguiente diseño que como se mencionó anteriormente es más sencillo a comparación del módulo los otros esclavos.

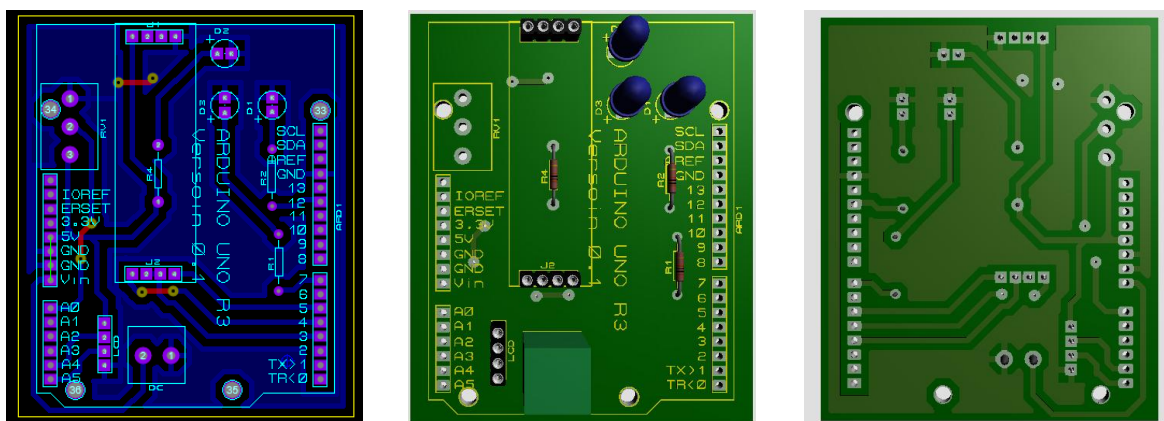


Figura. 41 Vista de módulo de esclavo 3.

Finalmente, para el módulo del maestro su diseño se simplifica aún más que los anteriores ya que no contiene muchos elementos electrónicos.

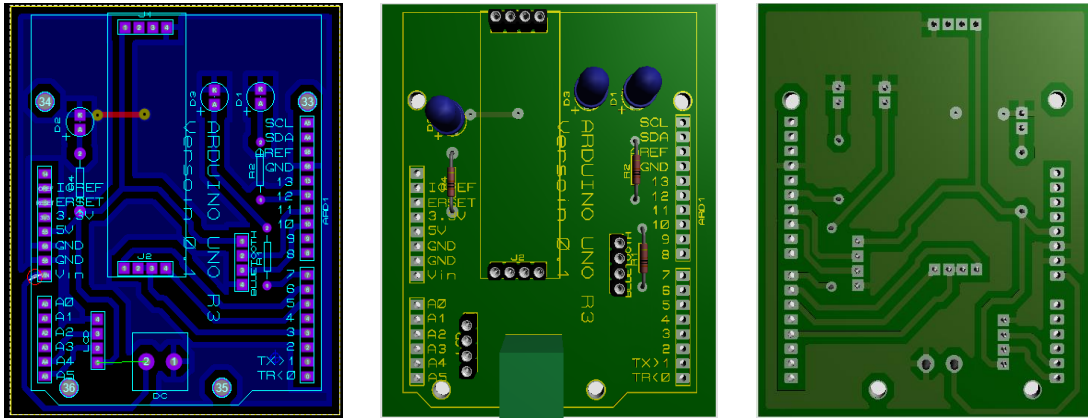


Figura. 42 Vista de módulo maestro.

### 4.11.3. PCB físico

Culminado el diseño en Proteus, se procedió a integrar dicho diseño en una placa de baquelita y adicional soldar los elementos electrónicos con ayuda de un cautín y estaño, teniendo así por completo el diseño de los PCB.

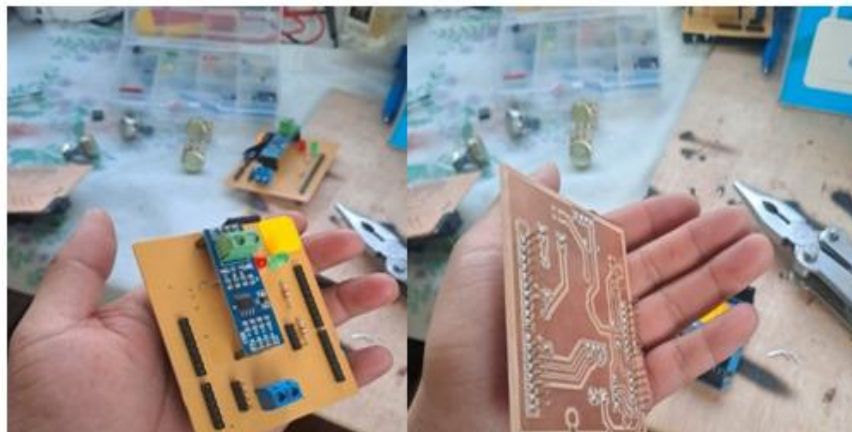


Figura. 43. Diseño PCB para las microrredes.

## 4.12. PROGRAMACION EN LABVIEW

Según [43] LabVIEW constituye un entorno de programación gráfica fundamentado en el lenguaje G, ampliamente empleado en sistemas de adquisición de datos y control. La utilización de bloques funcionales preconfigurados reduce la complejidad del desarrollo, optimizando la integración y el intercambio de información entre el hardware y los microcontroladores.

En la Figura. 44 el bloque VISA Configure Serial Port se constituye en la parte básica para la apertura de la sesión de comunicación [44]. Tiene la tarea de inicializar todos los parámetros de configuración del puerto serial para poder sincronizar correctamente el computador en el que se ejecuta el programa y el microcontrolador Arduino Maestro y asegurar así la integridad de la adquisición de datos.

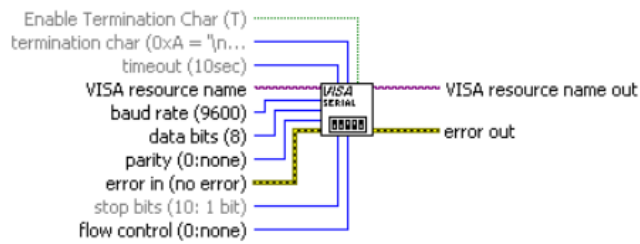


Figura. 44. VISA Configure Serial Port.

Según [44]. El bloque VISA Read se encarga de leer los datos desde el buffer de entrada del puerto serie especificado. La función de este bloque es extraer la cadena de caracteres (String) que es transmitida por el dispositivo externo (Arduino Maestro) y cargarla en la memoria del instrumento virtual para su posterior tratamiento.

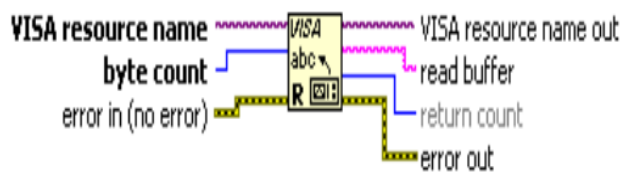


Figura. 45. Visa Read Function [44].

La Figura. 46 muestra la función Match Pattern se utiliza para localizar un patrón determinado en la cadena de texto de lectura del búfer [44]. Su funcionamiento no es complicado, ya que se trata de escanear la cadena de texto hasta poder llegar a encontrar el patrón definido.

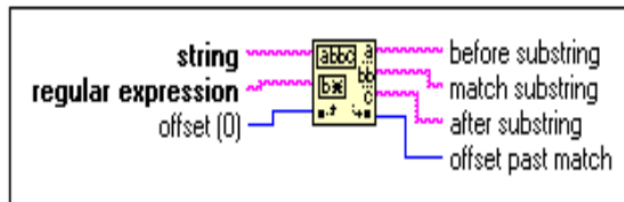


Figura. 46. función Match Pattern [44]

La Figura. 47 muestra la visualización de las curvas es efectuada por medio de la función Waveform Chart, la cual grafica los datos obtenidos en función del tiempo [44]. Cabe señalar que este bloque permite graficar no solo lecturas directas, sino también resultados de operaciones matemáticas.

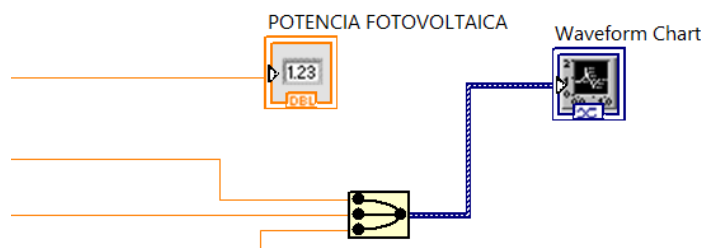


Figura. 47. Grafica de curvas y arreglos matemáticos

La Figura. 48 muestra cómo se logra almacenar los datos de las variables principales de consumo de potencia ( $P_{Fotovoltaica}$ ,  $P_{Eolica}$ ,  $P_{Demanda}$ ) con la finalidad de ejecuta la escritura del archivo de informe en la ruta especificada: sólo cuando el control booleano 'GRABAR' estaba habilitado; el usuario tenía poder para activar/desactivar el registro histórico.

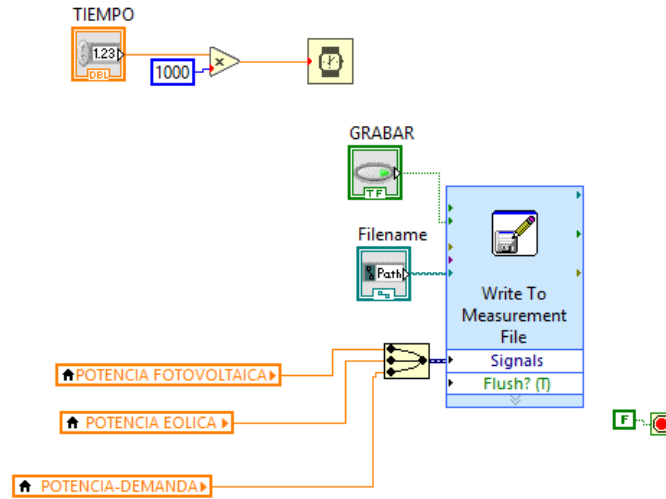


Figura. 48. Built XY Graph

RECEPCION DE LOS DATOS - DESDE ARDUINO

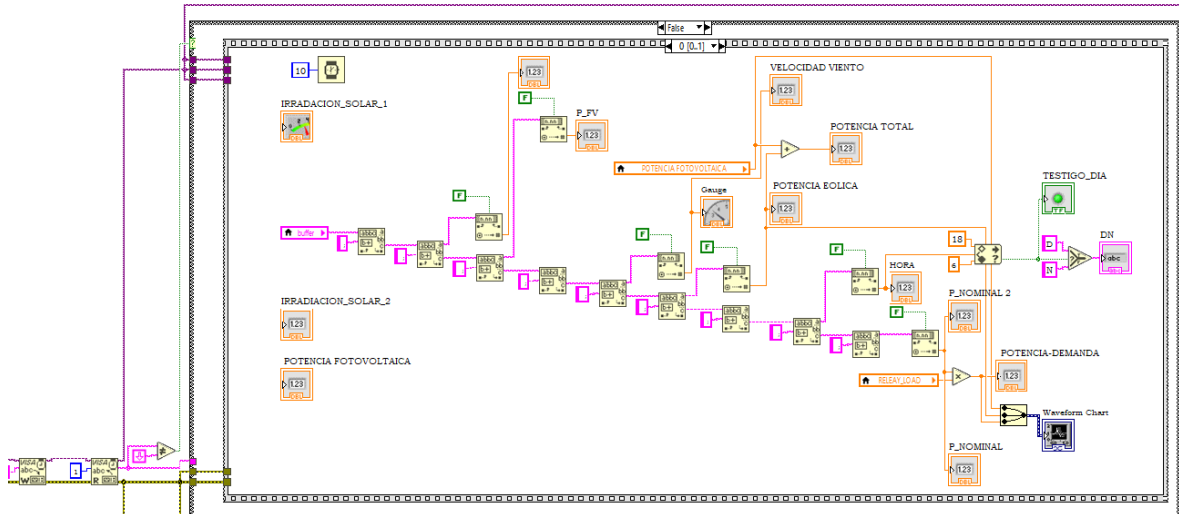


Figura. 49. Arquitectura del sistema.

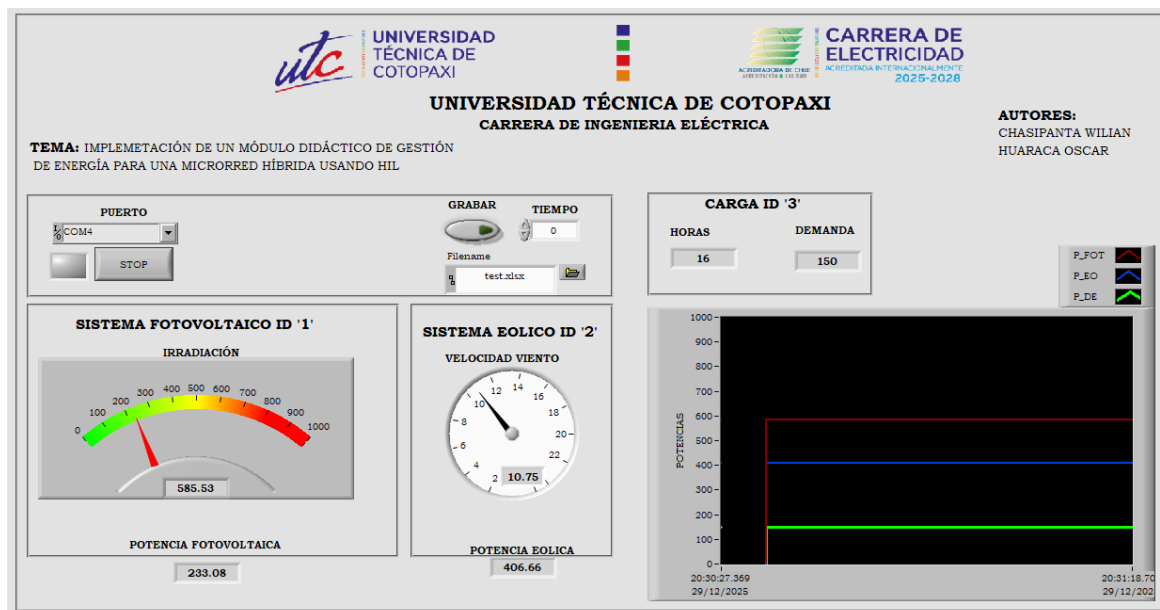


Figura. 50. Prototipo de la Interfaz.

### 4.13. SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA (EMS)

El sistema de gestión de energía (EMS), se implementó en el entorno virtual de LabVIEW el cual actúa como controlador supervisor de la microrred. Su objetivo es asegurar el balance de potencia instantáneo y la del suministro ante las variaciones de potencia generada por las fuentes renovables (solar y eólica) y los cambios de la demanda.

#### 4.13.1. Estrategia de control

Para la lógica de toma de decisiones, se adoptó una arquitectura de control basado en reglas. La elección de este esquema responde a su elevada solidez computacional y a su reducida latencia, propiedades que lo hacen adecuado para aplicaciones en tiempo real dentro de sistemas embebidos y entornos de simulación HIL.

El procedimiento del control se desarrollará teniendo en cuenta el banco de baterías como el elemento principal del sistema estable. La estrategia considera como primer objetivo el uso directo de los recursos renovables, llevando a cabo la gestión de los flujos de energía, que se basan en las siguientes premisas.

Por ello se usó el bloque Nodo de Formula (Formula Node) dentro del diagrama de bloques de LabVIEW, este bloque permite integrar códigos basados en sintaxis C en el entorno gráfico, la cual permite realizar operaciones matemáticas indispensables para el correcto funcionamiento del EMS. Como se presenta en la imagen de la Figura. 51 el bloque actúa como la unidad central del procesamiento CPU del sistema, centralizando las variables físicas y los parámetros de operación.

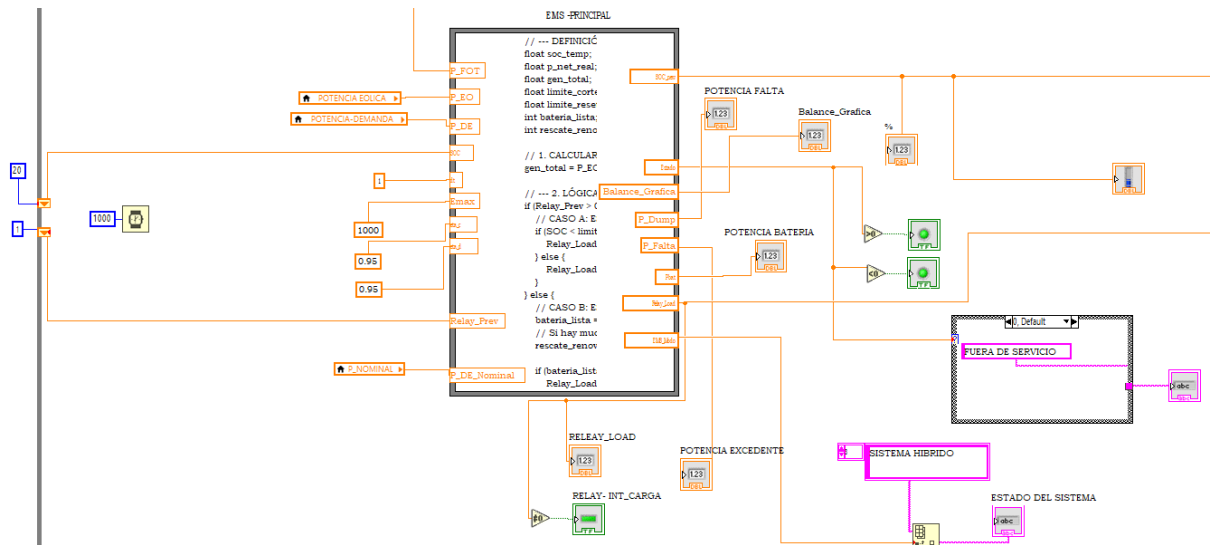


Figura. 51. EMS – Principal.

#### 4.13.2. Balance de potencia

Dentro del nodo de formula, el código ejecutara el balance de potencia instantánea  $P_{net\ real}$  y verificara las condiciones del sistema con una serie de estructuras *if – else*. El programa comprueba si la generación total ( $gen_{total}$ ) es suficiente para carga; caso contrario, consulta el nivel de SOC para determinar si la batería tiene suficiente energía disponible para compensar el déficit.

$$\Delta P = (P_{FV} + P_{EOL}) - P_{Carga} \quad (16)$$

Donde,  $\Delta P$  es la potencia neta,  $P_{FV}$  es la potencia generada por el sistema fotovoltaico,  $P_{EOL}$  es la potencia eólica generada por el sistema eólico y  $P_{Carga}$  representa la demanda total de la vivienda.

#### 4.13.3. Restricción fotovoltaica EMS

Con la finalidad de garantizar realismo físico a la simulación fue implementado el bloque de acondicionamiento de señal conocido como restricción solar, a través de un nodo de formula en LabVIEW, filtrando la ventana temporal para habilitar el paso de la potencia solamente en las horas de radiación solar.

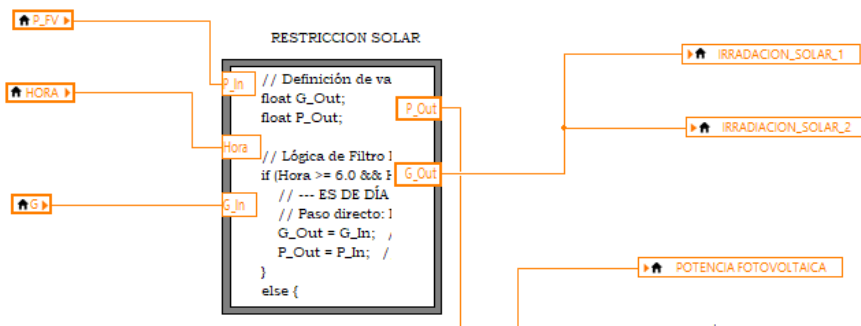


Figura. 52. Nodo Función restricción solar.

El programa se basa en la ubicación geográfica del proyecto -Ecuador/Zona horaria Ecuatorial en donde el fotoperiodo es comúnmente durante todo el año entre las 06:00 – 18:00.

#### 4.13.4. Aplicación de eficiencia

Se desarrollo dos ramas lógicas distintas para aplicar las eficiencias de manera realista:

- A. Rama de Carga ( $P_{net} \geq 0$ ):** Cuando el sistema detecta excedentes, la energía se inyecta a la batería. Sin embargo, en los sistemas reales no llega la misma potencia excedente a la batería debido a que se presentan perdidas térmicas y químicas y no se aprovecha toda la energía. Se aplica la eficiencia de carga ( $\eta_c$ ) como factor que se multiplica para reducir la energía efectiva almacenada:

$$SOC(t) = SOC(t - 1) + \frac{P_{net} \cdot \Delta t \cdot \eta_c}{E_{nom}} \times \frac{100}{3600} \quad (17)$$

- B. Rama de Descarga ( $P_{net} \leq 0$ ):** Cuando el sistema necesita de la energía almacenada en la batería para cubrir con la demanda del sistema, esta debe entregar más energía interna de la que llega para compensar con las perdidas internas. Se aplica la eficiencia de descarga ( $\eta_d$ ) como divisor para acelerar la reducción del SOC:

$$SOC(t) = SOC(t - 1) + \frac{P_{net} \cdot \Delta t}{E_{nom} \cdot \eta_d} \times \frac{100}{3600} \quad (18)$$

La multiplicación final en ambos casos, representa los factores de conversión de unidades de segundos a horas y a porcentaje.

#### 4.13.5. Lógica de saturación y protección

Para simular un modelo de batería física real y evitar resultados matemáticos incoherentes (carga de 120% o descarga de -10%), se implementó una lógica de saturación al final del bucle del cálculo:

- **Límite superior:** Si el cálculo del SOC resulta mayor al 100%, el valor se fuerza a dicho limite, y el excedente de energía se redirige a una variable de “Energía Desperdiciada”
- **Límite inferior:** Por otro lado, si el cálculo del SOC resulta menor al 20%, el valor se fuerza a dicho valor, esto debido a que por lo general las baterías tienen un límite de descarga para evitar que su vida útil sea reduzca con rapidez.

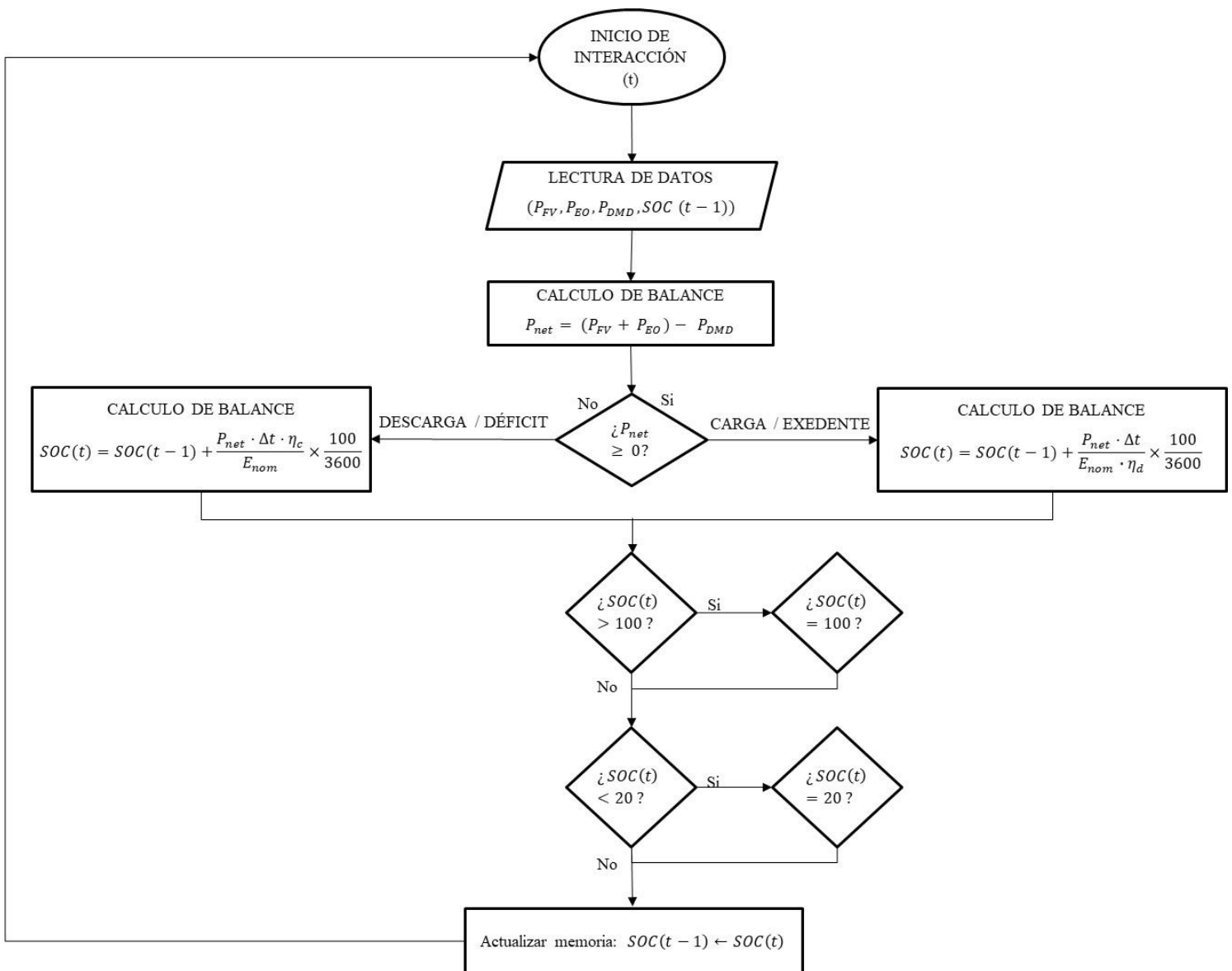


Figura. 53. Diagrama de bloques de modelo de batería.

## 5. ANALISIS DE RESULTADOS

### 5.1. SIMULACIÓN HARDWARE-IN-THE-LOOP (HIL)

Para [45], el HIL se define como una metodología de simulación en tiempo real que integra componentes físicos reales (hardware) dentro de un bucle de simulación numérica (software). Esta técnica permite emular las condiciones climáticas así como la demanda de la vivienda para validar algoritmos de control y sistemas de comunicación bajo condiciones controladas.

Para la validación del EMS, se desarrolló una plataforma de simulación HIL, la cual permite evaluar el rendimiento de los algoritmos de control implementados en el sistema, integrados a un dispositivo físico en un entorno de simulación. El sistema opera bajo un esquema de Simulación en Tiempo Real a Nivel de Señal, donde no existe intercambio de energía real, dado que es un entorno simulado en el que los datos digitales provenientes de los esclavos representan las variables físicas del sistema.

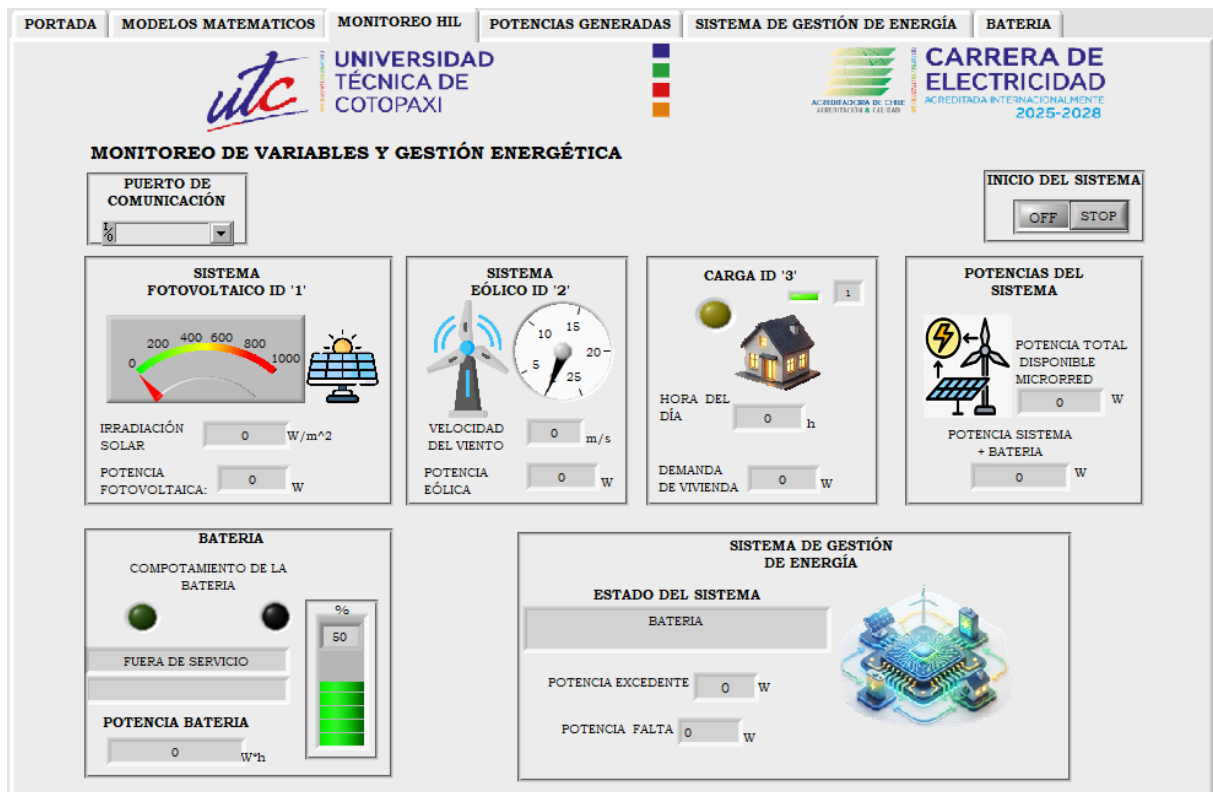


Figura. 54. Interfaz del Sistema de Gestión de Energía.

#### 5.1.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para validar el funcionamiento del algoritmo EMS propuesto, se han diseñado 4 casos de estudio que simulan condiciones extremas y nominales de operación:

## ESCENARIO A: GENERACIÓN SOLAR DOMINANTE

El propósito de este escenario de estudio es evaluar el desempeño de la estrategia de gestión de energía (EMS) bajo condiciones diurnas de alta radiación y nulo aporte eólico. Se busca confirmar la capacidad del algoritmo para cubrir el perfil de demanda maximizando el uso del recurso fotovoltaico y direccionando el excedente de generación hacia el sistema de almacenamiento.

Para la configuración del escenario de prueba, se definieron parámetros de entrada correspondientes a condiciones de alta irradiancia solar (típicas del mediodía) y una velocidad de viento nula. Asimismo, se inicializó el sistema de almacenamiento con un Estado de Carga (SOC) intermedio, con el fin de garantizar capacidad disponible para evaluar el proceso de carga.

Tabla 14. Parámetros de configuración - Escenario A.

VARIABLE	VALOR CONFIGURADO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
Irradiancia Solar	524	$W/m^2$	Alta irradiancia solar, acorde al caso de estudio
Velocidad del Viento	0	$m/s^2$	Ausencia de viento.
Demanda de carga	145-157	W	Consumo residencial promedio.
SOC Inicial	50	%	Batería a media capacidad.

## ESCENARIO B: GENERACIÓN EÓLICA DOMINANTE

El escenario propuesto evalúa la respuesta del sistema ante la inexistencia de generación fotovoltaica (condiciones nocturnas o de baja irradiancia). El propósito central es verificar que el EMS reasigne correctamente la prioridad de despacho hacia la turbina eólica, aprovechando un perfil de viento cuya potencia disponible supera los requerimientos de la demanda.

Tabla 15. Parámetros de Configuración - Escenario B.

VARIABLE	VALOR CONFIGURADO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
Irradiancia Solar	0	$W/m^2$	Ausencia de Irradiancia solar.
Velocidad del Viento	11	$m/s^2$	Velocidad de viento media – alta.
Demanda de carga	440	W	Consumo residencial promedio.
SOC Inicial	50	%	Batería a media capacidad.

### ESCENARIO C: OPERACIÓN DE MODO HÍBRIDO (SOLAR + EÓLICO)

El propósito de este escenario es corroborar la complementariedad energética del diseño. Se plantean condiciones de operación con disponibilidad simultánea de recurso solar y eólico para evaluar la respuesta del algoritmo. El análisis se centra en verificar la correcta agregación de la generación ( $P_{GEN} = (P_{FV} + P_{EOL})$ ) y confirmar que la lógica de control establezca la jerarquía adecuada, activando el modo 'Híbrido' para asegurar el aprovechamiento integral de la potencia disponible.

Se establecerán los parámetros de entrada asegurando que la potencia de ambas fuentes exceda el umbral mínimo de operación. La simulación contempla un escenario dual: por un lado, una demanda elevada que exija el aporte conjunto para ser satisfecha; y por otro, una condición de generación abundante que produzca un superávit energético suficiente para activar el régimen de carga rápida de las baterías.

Tabla 16. Parámetros de Configuración - Escenario C

VARIABLE	VALOR CONFIGURADO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
Irradiancia Solar	300	$W/m^2$	Ausencia de irradiancia solar
Velocidad del Viento	8	$m/s^2$	Velocidad de viento media - alta
Demanda de carga	437	W	Consumo residencial promedio.
SOC Inicial	50	%	Batería a media capacidad.

### ESCENARIO D: GESTIÓN DE FALLA DE SUMINISTRO (BLACKOUT)

Se analiza el comportamiento del algoritmo de gestión ante un estado de déficit energético crítico. La simulación recrea un entorno sin aporte de generación fotovoltaica ni eólica, sumado a un nivel de almacenamiento por debajo del límite operativo ( $SOC < 20\%$ ). El objetivo central es validar la lógica de desconexión automática, asegurando que el sistema priorice la integridad de los acumuladores frente a la continuidad del suministro.

Para forzar al sistema a entrar en estado de falla, se configurarán las variables de generación en cero y, crucialmente, se establecerá el Estado de Carga (SOC) en un valor por debajo del límite de corte programado ( $20\%$ ).

Tabla 17. Parámetros de Configuración - Escenario D

VARIABLE	VALOR CONFIGURADO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
Irradiancia Solar	0	$W/m^2$	Ausencia de irradiancia solar
Velocidad del Viento	0	$m/s^2$	Velocidad de viento media - alta
Demanda de carga	437	W	Consumo residencial promedio.
SOC Inicial	20	%	Batería a media capacidad.

Para comprobar el comportamiento dinámico del EMS bajo condiciones operativas, se ejecutaron las simulaciones en la plataforma *Hardware-in-the-Loop* (HIL) descrita anteriormente. Se organizó el sistema para que el equipo maestro recolecte la información de los tres esclavos (sol, viento y carga) de forma ordenada. Así, LabVIEW recibe todos los datos necesarios para ver el estado del sistema.

Se revisó el funcionamiento de las reglas de control para ver cómo el sistema gestionaba la carga y descarga de la batería ante los cambios en la energía disponible (solar y eólica) y el consumo de la casa. También comprobamos que se respetaran los límites de almacenamiento. Así, pudimos confirmar que el sistema toma las decisiones correctas sobre cuándo guardar o usar energía, y que el microcontrolador realiza los cálculos con la misma precisión que la computadora.

## 5.2. GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

El propósito de este escenario de estudio es evaluar el desempeño de la estrategia de gestión de energía (EMS) bajo condiciones diurnas de alta radiación y nulo aporte eólico. Se busca confirmar la capacidad del algoritmo para cubrir el perfil de demanda maximizando el uso del recurso fotovoltaico y direccionando el excedente de generación hacia el sistema de almacenamiento. Para la configuración de la prueba, se usó los datos de la Tabla 14.

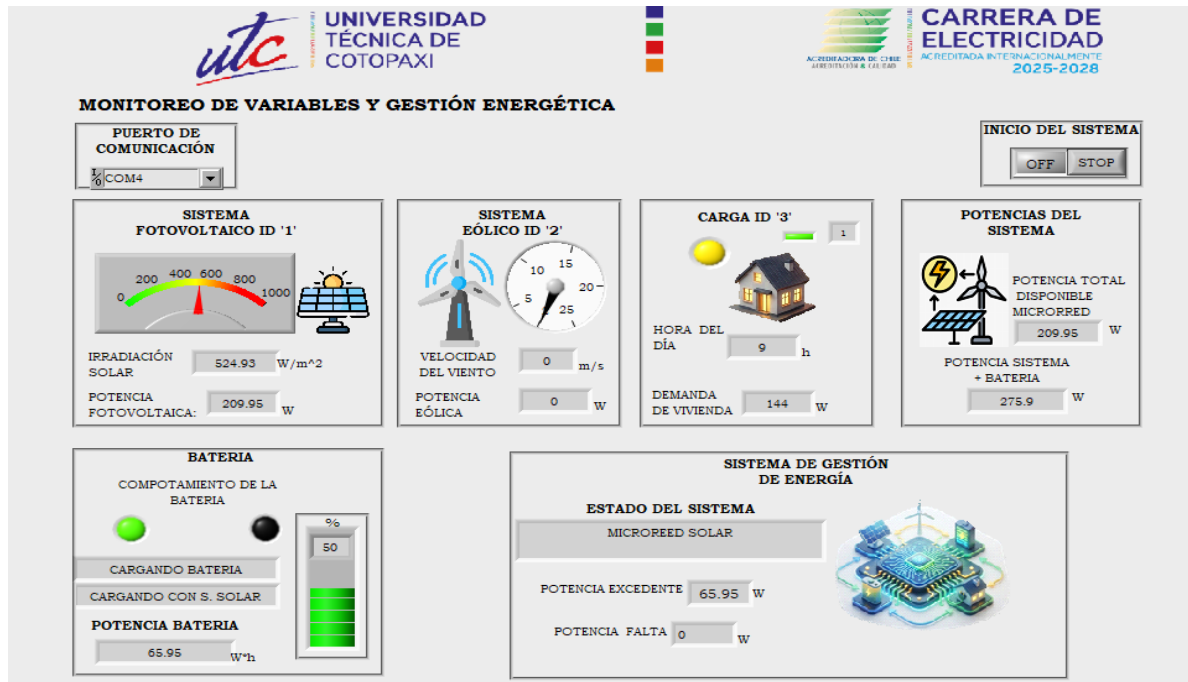


Figura. 55. Escenario de operación generación solar dominante.

El Sistema de Gestión de Energía (EMS) identifica correctamente el excedente de 65.95 W. Como respuesta lógica, el algoritmo conmuta al estado "MICRORRED SOLAR" y activa la carga de baterías. Esto se evidencia visualmente en la gráfica de comportamiento de la batería de la Figura. 55 donde la energía excedente que está siendo inyectado al almacenamiento. Por medio de esta gestión inteligente, el sistema no solo alimenta la carga, sino que aprovecha el "sobrante" solar para recuperar el (SOC) de la batería, preparándola para futuros eventos de baja generación.

En la Figura. 56 y Figura. 57 Se puede analizar que del escenario solar demuestra que el sistema opera con total eficiencia bajo condiciones de buena radiación. Se observó que la generación fotovoltaica se mantuvo estable en 209.95 W, cifra que supera sin problemas el consumo de la vivienda, el cual varía cerca de los 157.50 W. Al producir más energía de la que se necesitaba, se obtuvo un excedente "limpio" de 52.45 W; inteligentemente, el sistema detectó este sobrante y lo dirigió al banco de baterías, confirmando así que la microrred es capaz de autoabastecerse y guardar reservas energéticas al mismo tiempo, sin desperdiciar recursos.

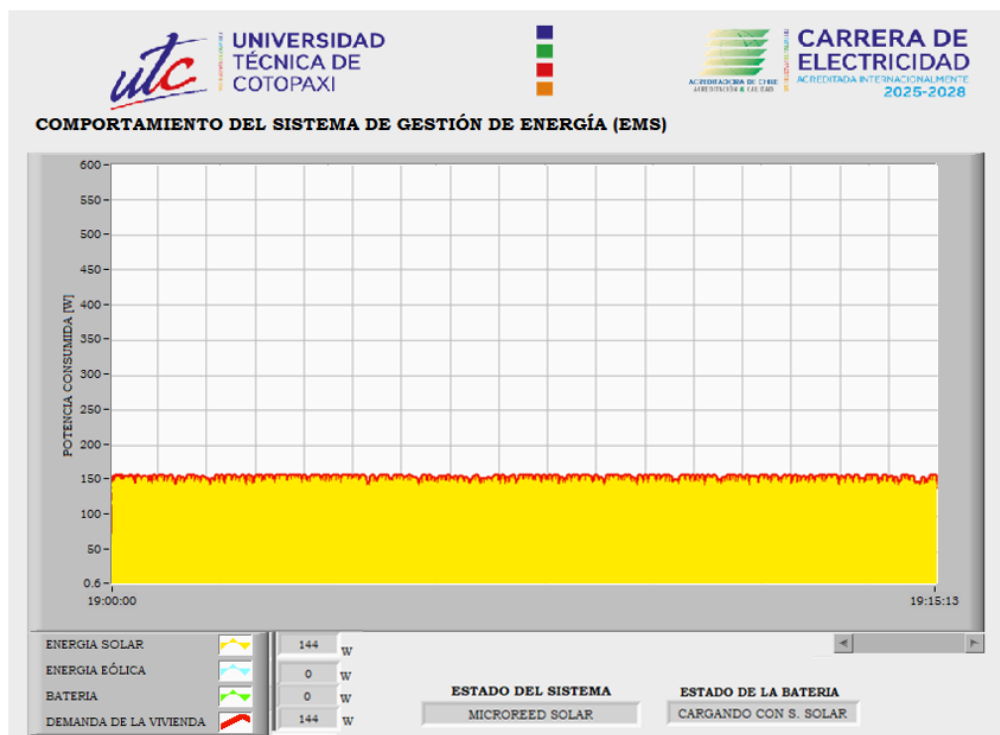


Figura. 56. Comportamiento del Sistema de Gestión de Energía (EMS), generación fotovoltaica.

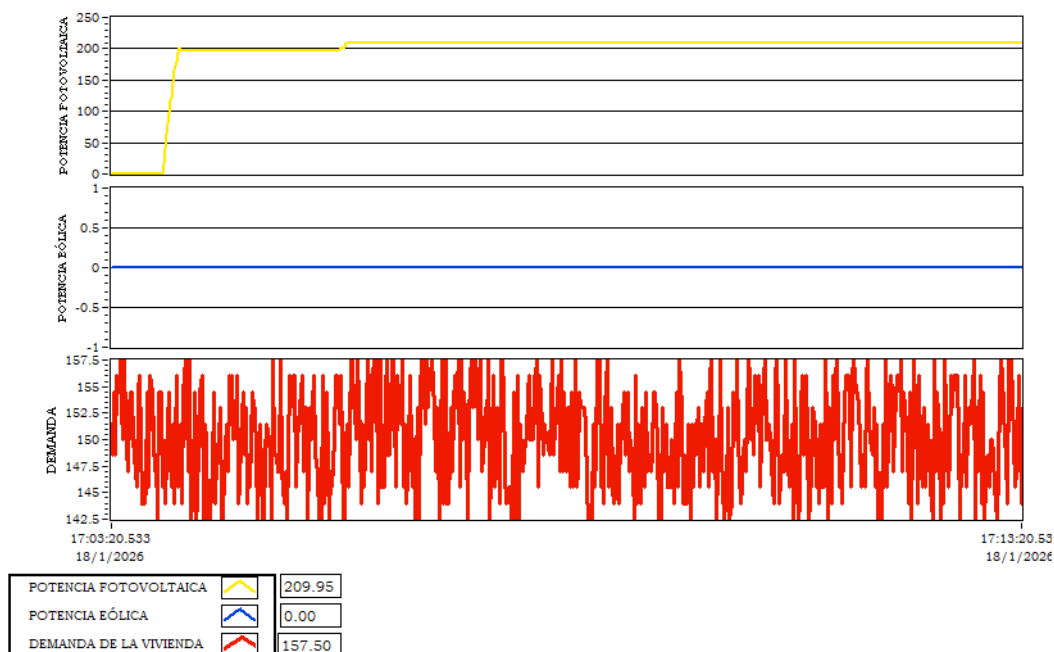


Figura. 57. Curva de generación fotovoltaica.

### 5.3. GENERACIÓN EÓLICA

El escenario propuesto evalúa la respuesta del sistema ante la inexistencia de generación fotovoltaica en condiciones nocturnas. El propósito es verificar que el EMS reasigne correctamente la prioridad de despacho hacia la turbina eólica, aprovechando un perfil de viento cuya potencia disponible supera los requerimientos de la demanda Tabla 15.

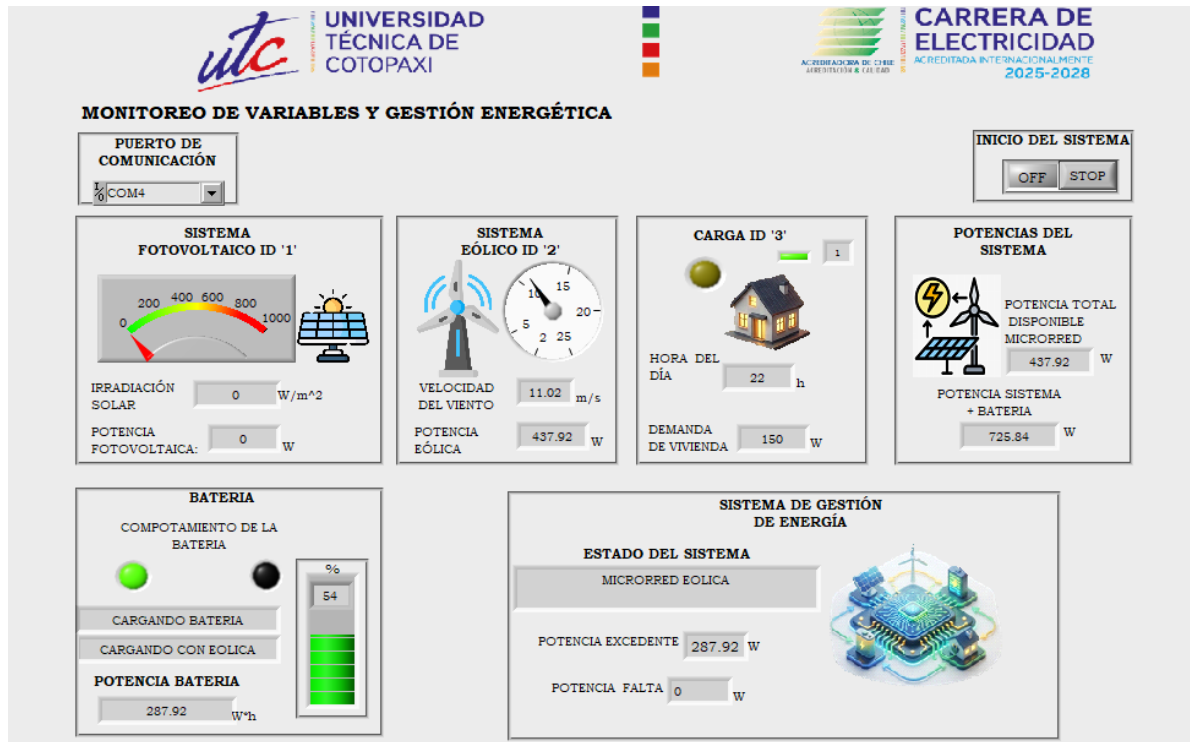


Figura. 58. Escenario de operación generación Eólica dominante.

Al observar las curvas de la Figura. 59 se puede observar cómo actúa el sistema Eólico. Mientras la generación solar permanece en cero, la generación eólica responde a una velocidad de viento de 11 m/s, entregando una potencia constante de 437.92 W. Este aporte energético es muy superior a la demanda de la vivienda, que en ese instante fluctúa cerca de los 142.5 W.

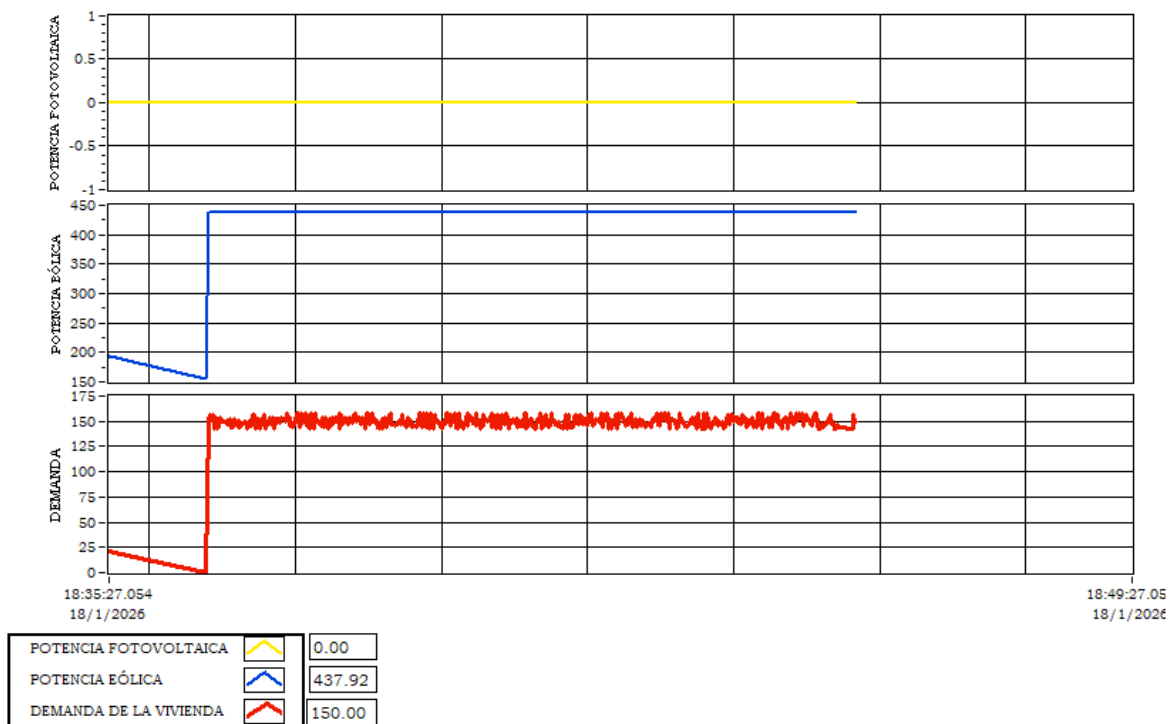


Figura. 59. Curva de generación Eólica.

En la Figura. 60 y el panel de control general, se confirma que el escenario eólico opera con total eficiencia bajo condiciones nocturnas. Se observa que la generación eólica se estabilizó en 437.92 W, superando el consumo de la vivienda (~142.5 W). Al producir mucha más energía de la que se necesitaba, se obtuvo un excedente de 295.42 W; inteligentemente, el sistema detectó este sobrante y lo dirigió al banco de baterías, confirmando así que la microrred es capaz de autoabastecerse y guardar reservas energéticas durante la noche, maximizando el recurso eólico disponible sin desperdiciar potencia.

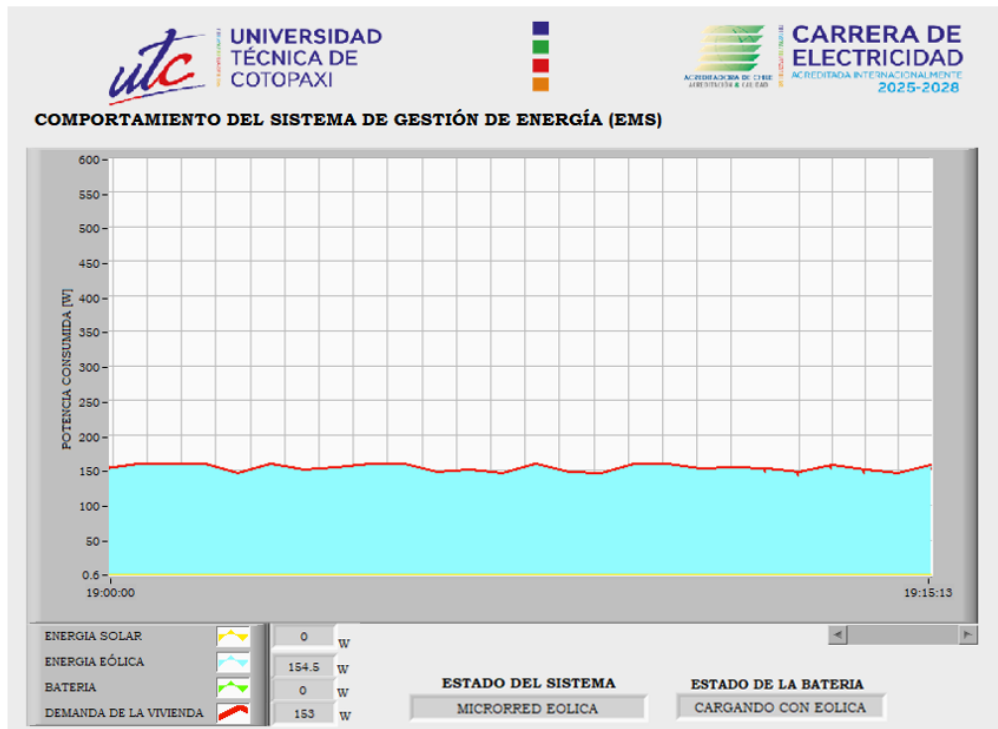


Figura. 60. Comportamiento del Sistema de Gestión de Energía (EMS), generación eólica.

#### 5.4. GENERACIÓN HÍBRIDA

En el escenario de generación híbrida, se evaluó la capacidad del sistema para integrar múltiples fuentes de simultáneas. Como se observa en la interfaz de monitoreo Figura. 61, el algoritmo EMS gestiona eficientemente el aporte de energía fotovoltaico 122.05W y la energía eólica 174.7 W, sumando una generación total disponible de 296.75 W. Dado que esta producción supera la demanda promedio de la vivienda 178 W, el sistema activa el estado “SISTEMA HÍBRIDO”, priorizando el abastecimiento de la carga y destinando el excedente a la recarga de las baterías.

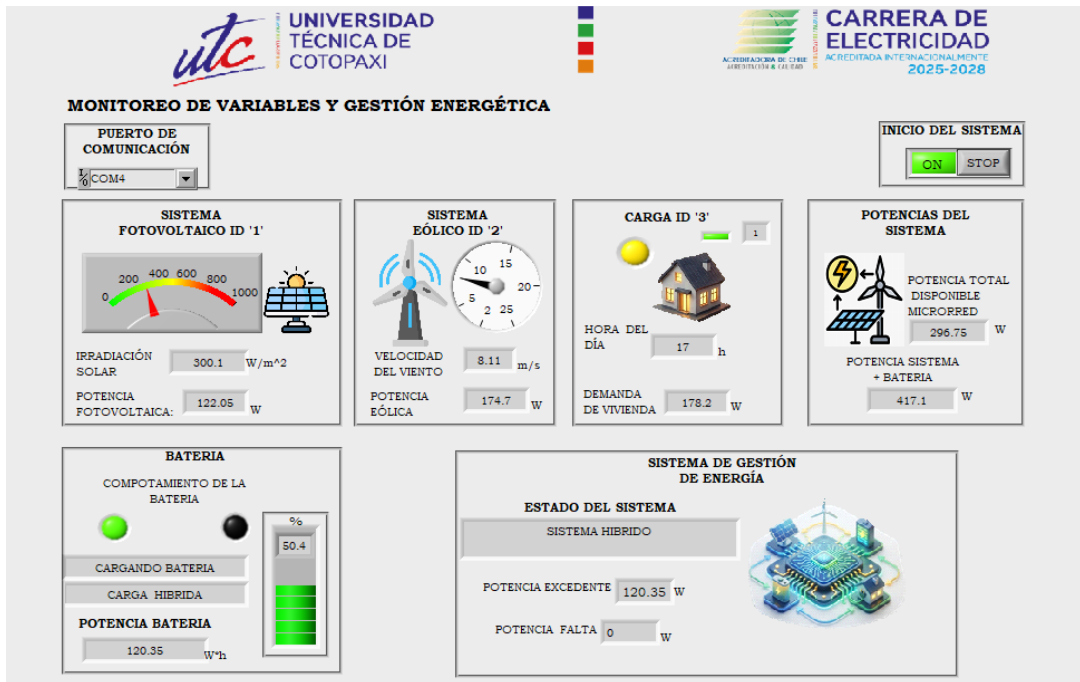


Figura. 61. Escenario de operación generación híbrida.

Por otra parte, la Figura. 62 muestra la dinámica temporal de estas variables, destacando el comportamiento de la curva de la demanda, la cual presenta fluctuaciones constantes alrededor de los 180 W. Estas variaciones simulan el perfil estocástico y dinámico de la carga residencial real, el cual está caracterizada por la conexión y desconexión aleatoria de dispositivos y variaciones transitorias de consumo.

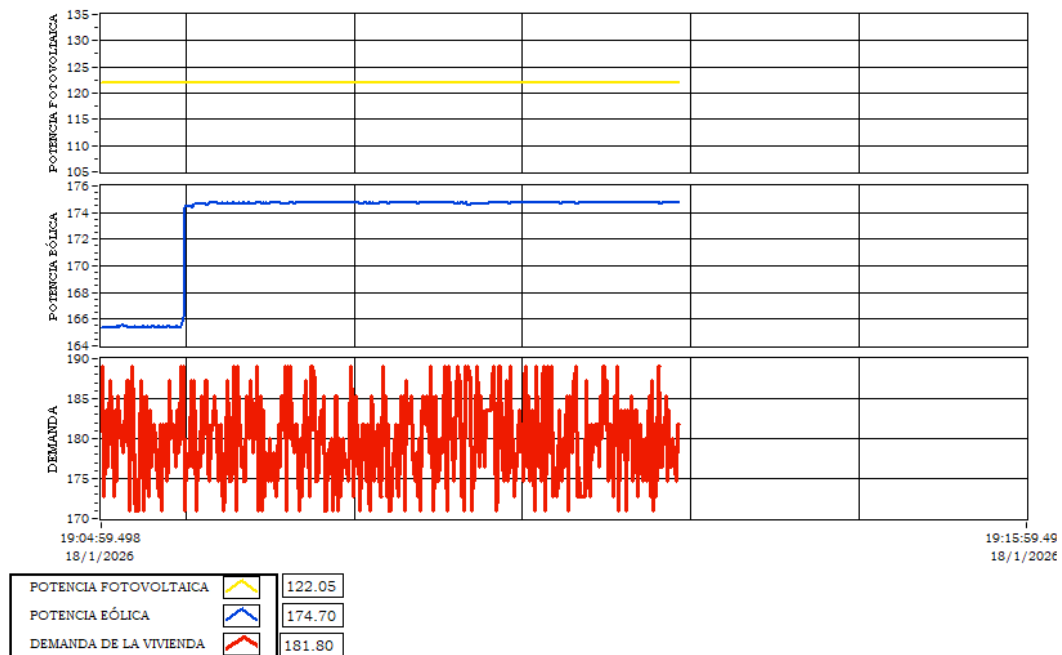


Figura. 62. Curva de generación híbrida

La Figura. 63 muestra el comportamiento del sistema de gestión energética mediante la visualización de potencias aplicadas. Se observa una clara priorización de fuentes donde la

energía solar, representada por la zona amarilla, actúa como la base de generación aprovechando una potencia disponible de 122 W. Sobre este umbral, la energía eólica zona celeste se superpone dinámicamente para cubrir el déficit restante y satisfacer la totalidad de la demanda de la vivienda. Esta sincronización activa el estado lógico “SISTEMA HIBRIDO”, validando la capacidad del algoritmo para gestionar simultáneamente ambas fuentes de generación.

La grafica muestra que la suma de ambas fuentes renovables generar un excedente energético constante sobre la demanda, este excedente es gestionado automáticamente por el sistema, hacia la batería, enviando un mensaje en la interfaz de monitoreo el indicador de estado “CARGA HIBRIDA”, para la batería

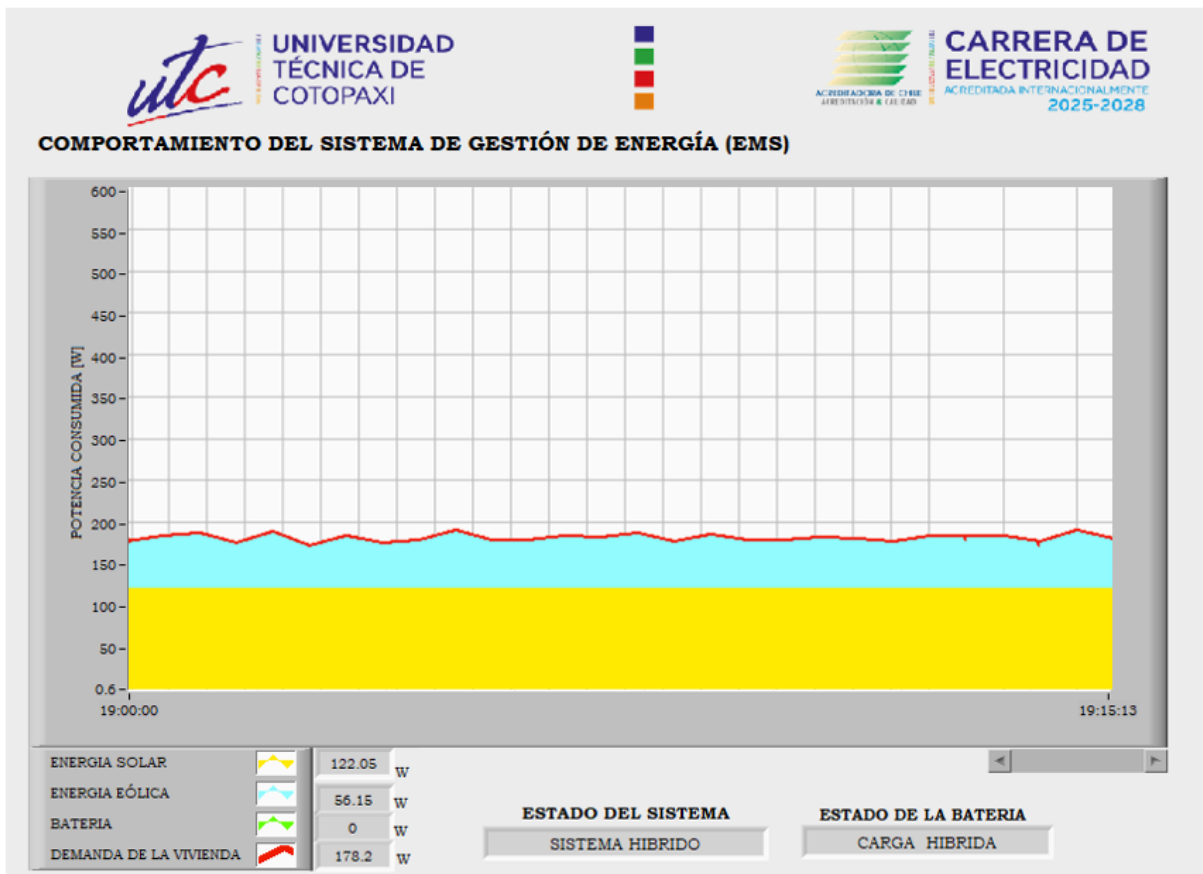


Figura. 63. Comportamiento del Sistema de Gestión de Energía (EMS), generación híbrida.

## 5.5. GESTIÓN DE FALLA DE SUMINISTRO (BLACKOUT)

Se analiza el comportamiento del algoritmo de gestión ante un estado de déficit energético crítico. La simulación recrea un entorno sin aporte de generación fotovoltaica ni eólica, sumado a un nivel de almacenamiento que alcanza su límite operativo inferior ( $SOC \leq 20\%$ ).

Para forzar al sistema a entrar en este estado de falla, se configuraron las variables de generación de acuerdo a la Tabla 17.



Figura. 64. Escenario de operación falla de suministro (Blackout).

## 5.6. GESTIÓN DEL SISTEMA EMS

Una vez completada la evaluación individual de cada escenario, es primordial analizar el comportamiento general del sistema. Los resultados obtenidos confirman que el algoritmo EMS no solo cumplió con las reglas programadas, sino que demostró ser capaz de adaptarse dinámicamente a los cambios.

Lo más relevante fue comprobar que el sistema respeta rigurosamente el balance de energía. No hubo "pérdida de datos" ni errores de cálculo. Por ejemplo, en el modo híbrido, vimos cómo la suma de la energía solar y eólica coincidió exactamente con la potencia total entregada a la microrred.

Otra preocupación inicial era si la comunicación entre los equipos (RS-485) sería lo suficientemente rápida. Las pruebas demostraron que el sistema responde prácticamente en tiempo real. El EMS fue capaz de detectar los cambios —como una caída repentina del viento o un aumento de demanda— y cambiar de estado (por ejemplo, de "Híbrido" a "Solo Batería") de forma instantánea, sin bloqueos ni retardos que pusieran en riesgo la estabilidad del suministro. Finalmente, el sistema demostró tener sus prioridades claras. En el escenario de falla (Blackout), aunque existía una demanda de energía por parte del usuario, el algoritmo decidió cortar el servicio al detectar que la batería estaba al 20%. Esto es crucial, ya que

demuestra que la lógica de protección "prevalece" sobre la necesidad de consumo, garantizando así que el banco de baterías no sufra daños irreversibles por descargas profundas.

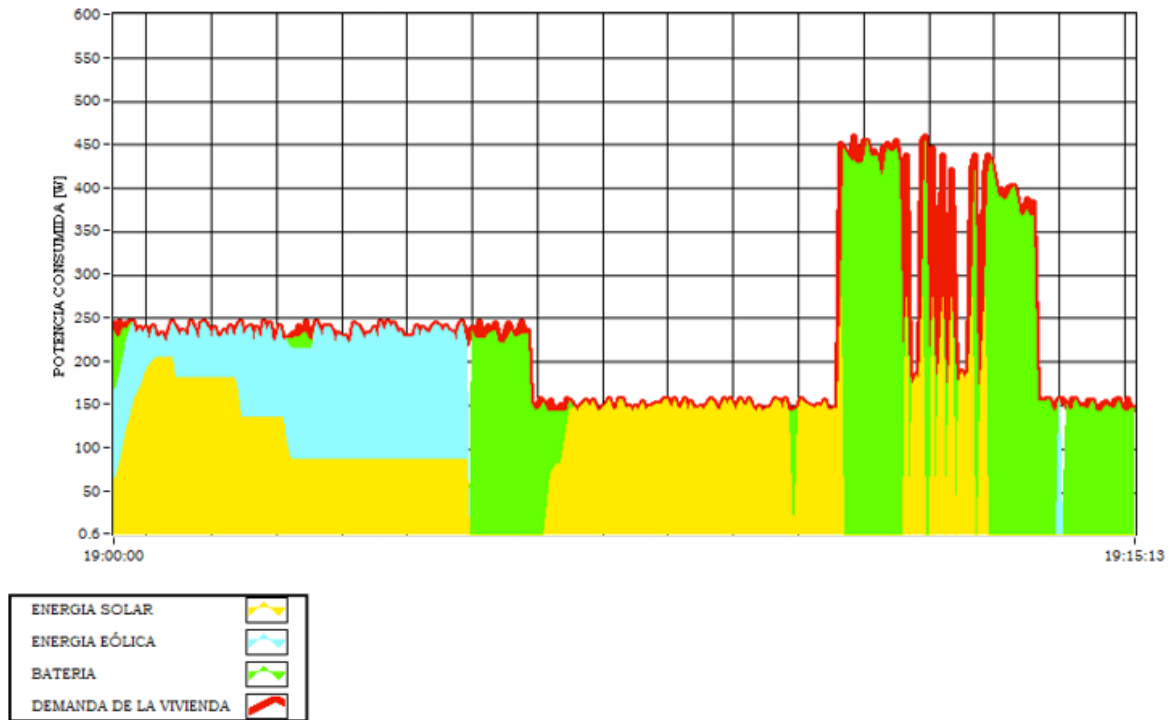


Figura. 65. Dinámica de distribución de potencia y comportamiento del almacenamiento ante variaciones de generación.

La Figura. 65 presenta un registro cronológico continuo que valida la estabilidad dinámica del sistema, superponiendo las cuatro variables críticas: Demanda (trazo rojo), Solar (área amarilla), Eólica (área celeste) y Batería (área verde).

El comportamiento del algoritmo se evidencia inicialmente en la etapa 19:00 a 19:15, donde el sistema opera en modo híbrido con aportes simultáneos de solar y eólica cubriendo la demanda base de ~240W. Posteriormente, ante la caída del recurso eólico, se observa una transición suave donde la batería (área verde) entra inmediatamente a cubrir el déficit energético, complementando a la solar para sostener el consumo.

Durante la fase intermedia, la demanda se estabiliza en un nivel bajo (~150W) y es cubierta casi en su totalidad por la generación fotovoltaica (área amarilla), reduciendo el consumo del banco de baterías. Finalmente, en la etapa crítica final, se registran picos de demanda extremos que superan los 450W. En este instante, el área verde crece drásticamente alcanzando su máxima amplitud, lo que confirma que la batería está descargándose a alta potencia para inyectar la corriente necesaria que la fuente solar no puede proveer, actuando como un "amortiguador" que evita el colapso del sistema ante sobrecargas transitorias.

### 5.7. VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

Con los resultados presentados en la Tabla 6 respecto a la comparativa de potencia de generación del panel fotovoltaico, se tiene un error de 8.62% cuando se tiene una irradiación de 555.47 Wh/m<sup>2</sup> y en las comparaciones siguientes se mantiene un error por debajo del 5%, para cálculo se tomó en cuenta la irradiación mencionada de 555.47 Wh/m<sup>2</sup> dando como resultado una potencia de 73.33 W, sin embargo, en la medición real se tiene una potencia de 67.01 W, esto puede ser a que en el momento de la medición de la potencia de salida del panel físico pudo existir altercados que afectaron directamente al panel al momento de la medición como cambios climáticos, presencia de nubes en el instante de la medición, se llegó a esta conclusión debido a que la matriz de datos de irradiación solar obtenidos del sitio web de la NASA POWER, la irradiación solar es tomada por promedio durante periodos de tiempo aleatorio, a diferencia que la medición real que el dato es tomado en un instante de tiempo en específico, donde pudo presentarse las afecciones mencionadas.

### 5.8. VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA EÓLICO

Con los resultados presentados en la Tabla 10 respecto a la comparación de datos de potencia medidos y calculados, se tiene que al tener una velocidad de 3 m/s existe un error mínimo de 0% y luego con una velocidad de 5 m/s un error de 3.3%, a velocidades superiores en 7 y 8 m/s se obtuvo un error porcentual menor a 10%.

<b>VELOCIDAD DE VIENTO (m/s)</b>	<b>POTENCIA REAL (W)</b>	<b>POTENCIA CALCULADA (W)</b>	<b>ERROR %</b>
2	0	0	0%
3	6	6	0.0%
5	30	31	3.3%
7	140	150	7.1%
8	240	221	7.9%

Validando así nuestro modelamiento matemático aplicado en los microcontroladores para que emulen el comportamiento real del aerogenerador.

### 5.9. PRESUPUESTO

El presente análisis evalúa la viabilidad económica de la implementación del módulo didáctico de gestión de energía. El estudio se centra en la comparación de costos frente a soluciones comerciales y en la valoración de los beneficios asociados a la formación académica. Se

detallan los costos directos asociados a la construcción del módulo didáctico. Se considera que el desarrollo utiliza componentes de hardware libre (Arduino) y licencias de software académicas ya disponibles en la institución.

Para determinar la viabilidad económica del proyecto y establecer el valor real del módulo didáctico desarrollado, se realizó un análisis de costos unitarios bajo una estructura de producción estándar. Este análisis presenta la inversión en tres categorías: Costos directos de materiales, correspondientes al Hardware y componentes electrónicos, Costos de mano de obra, que valora las horas de ingeniería invertidas en diseño y programación y Costos indirectos de fabricación, que incluyen el consumo energético y desgaste de herramienta.

A continuación, se presentan las siguientes tablas correspondientes a los costos mencionados anteriormente:

Tabla 18. Costos directos de materiales para los módulos didácticos.

<b>COSTOS DIRECTOS MATERIALES Y COMPONENTES</b>				
<b>ÍTEM</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>COSTO UNITARIO</b>	<b>COSTO TOTAL</b>
Microcontroladores	4	Arduino Uno	\$15.00	\$60.00
Comunicación	4	Módulos RS-485 (MAX485)	\$2.50	\$10.00
Pantalla LCD	3	Pantalla LCD 16x2 con comunicación I2C.	\$5.50	\$16.50
Cables con terminales banana	12	Cables para comunicación y alimentación de los módulos.	\$1.66	\$20.00
PCB (Placas)	4	Fabricación de PCB.	\$6.25	\$25.00
Componentes Electrónicos.	1	Kit (Resistencias, LEDs, Pines, Borneras, jacks hembra)	\$28.00	\$28.00
Carcasa 3D	1	Filamento PLA (1 Rollo aprox. usado)	\$25.00	\$25.00
Varios	1	Cables, tornillería, estaño, pulsadores	\$15.00	\$15.00
Fuente Alimentación.	1	Fuente 9VDC	\$10.00	\$10.00
<b>TOTAL:</b>				<b>\$209.50</b>

Tabla 19. Costo de mano de obra para la construcción de los módulos didácticos.

<b>MANO DE OBRA E INGENIERIA</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>HORAS INVERTIDAS</b>	<b>COSTO/HORA</b>	<b>COSTO TOTAL</b>
Diseño PCB y 3D	20	\$3.00	\$60.00
Programación	40	\$3.00	\$120.00
Ensamble y Pruebas	20	\$3.00	\$59.50

<b>TOTAL, MANO DE OBRA</b>	<b>\$239.50</b>
----------------------------	-----------------

Tabla 20. Costos indirectos de fabricación.

<b>COSTOS INDIRECTOS DE FABRICACION</b>	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>COSTO TOTAL</b>
Impresión 3D, Soladura y pruebas	\$80.00
Otros indirectos	\$26.60
<b>TOTAL, INDIRECTOS</b>	<b>\$106.60</b>

Tabla 21. Costo de total de la construcción de los módulos didácticos.

<b>COSTO TOTAL UNITARIO</b>	<b>\$555.60</b>
-----------------------------	-----------------

El costo para fabricar el módulo didáctico diseñado como se observa en la Tabla 21 es de \$555.60 que al compararlo con un simulador HIL producido por empresas dedicadas a simuladores en tiempo real como es el Typhoon HIL 402, el cual tiene la capacidad de integrar inversores físicos para mayores rangos de simulación, dicho simulador cuesta alrededor de los \$12,000.00, comparado con nuestro simulador HIL se tiene un precio notablemente menor a dicho simulador HIL.

#### **5.10. ANÁLISIS DE INDICADORES ECONÓMICOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO DE GESTIÓN DE ENERGÍA PARA UNA MICRORRED HÍBRIDA USANDO HIL.**

En el contexto de optimización de recursos financieros dentro de organizaciones académicas o industriales, surge la necesidad de evaluar alternativas de inversión cuando existen diferencias significativas de precio entre equipos que cumplen funciones similares. En este caso, se analiza la implementación de un equipo experimental con un costo de 555.60 USD frente a un equipo con un costo en el mercado de 12000 USD de la marca Typhoon HIL 402. Con la finalidad de determinar el indicador económico más adecuado para evaluar la conveniencia financiera en la implementación del equipo experimental frente a uno de marca comercial, se debe considerar la eficiencia económica y rentabilidad.

#### **RELACIÓN COSTO–BENEFICIO (RCB)**

La Relación Costo–Beneficio permite comparar dos alternativas que generan resultados similares, identificando cuál opción maximiza el aprovechamiento de recursos, dando como resultado un ahorro generado o beneficio neto, en el presente caso:

Beneficio neto = Costo Producto mercado – Costo Producto alternativo

Beneficio neto = 12000 – 555.60 = 11444.4 USD

El beneficio neto del modelo experimental es de 11444.4 USD. Si ambos equipos cumplen la misma función operativa y técnica, el beneficio es equivalente; por tanto, el análisis se centra en el costo.

$$RCB = \frac{\textit{Beneficio}}{\textit{Costos}} \cdot 100$$

$$RCB = \frac{11444.40}{12000} \cdot 100 \%$$

$$RCB = 95.37\%$$

## 6. CONCLUSIONES

- La integración de arquitecturas de hardware (Arduino) con entornos de instrumentación virtual (LabVIEW) permitió la materialización de un sistema de gestión de energía (EMS) funcional y eficiente. Mediante el establecimiento de protocolos de comunicación serial (MAX-RS485), se consiguió una supervisión instantánea y un control centralizado de la microrred híbrida, validando la robustez de esta interfaz para aplicaciones de monitoreo en tiempo real.
- Mediante el análisis de resultados se validó los modelos matemáticos aplicados para la simulación de la microrred eólica y fotovoltaica, al momento de comparar los datos de potencia de la medición real con los resultados del cálculo por medio del modelo matemático, se tubo resultados donde se presenta errores porcentuales mínimos en el caso del sistema fotovoltaico mientras que en el caso del sistema eólico se tubo errores más grandes debido a la limitación del cálculo para el modelamiento matemático del sistema.
- Se constató que la visualización de información a través de LabVIEW desempeña un papel fundamental. La interfaz desarrollada facilita el seguimiento en tiempo real de variables relevantes, como el Estado de Carga (SOC) y los flujos de potencia, lo que aporta claridad al funcionamiento del algoritmo de gestión. De esta manera, se puede interpretar cómo las fluctuaciones en los recursos solar y eólico desencadenan las distintas acciones de control implementadas en el sistema.
- Mediante los resultados obtenidos al aplicar los casos de estudio propuestos, se observa que el sistema de gestión de energía aplica las respectivas decisiones para que el sistema trabaje con normalidad al tener ya sea una potencia demandada alta o baja, ya sea mediante el uso de una sola microrred (solar o eólica), combinadas (microrred híbrida) esto cuando se disponga de potencia de generación de las microrredes o en el caso de tener baja generación se use la batería para compensar con la potencia faltante o netamente se use la batería al no tener ninguna fuente de generación, además de cumplir con la desconexión de la carga cuando la batería llegue al SOC menor al 20% , para salvar los equipos.

## 7. REFERENCIAS

- [1] N. Hatziargyriou, “MICROGRIDS :Architectures and Control”, Greece, 2014. Accedido: 25 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: [www.wiley.com](http://www.wiley.com)
- [2] D. Olivares, A. Mehrizi-sani, y A. Etemadi, “Trends in Microgrid Control”, dic. 2013.
- [3] MathWorks, “¿Qué es el hardware en el bucle (HIL)? - MATLAB y Simulink”. Accedido: 29 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/discovery/hardware-in-the-loop-hil.html>
- [4] OPAL-RT, “Hardware en el bucle | Simulación HIL”. Accedido: 29 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.opal-rt.com/hardware-in-the-loop/>
- [5] S. Ali, Z. Zheng, M. Aillerie, J.-P. Sawicki, M.-C. Péra, y D. Hissel, “A Review of DC Microgrid Energy Management Systems Dedicated to Residential Applications A Review of DC Microgrid Energy Management Systems Dedicated to A Review of DC Microgrid Energy Management Systems Dedicated to Residential Applications”, *Residential Applications. Energies*, vol. 2021, n° 4, p. 4308, 2021, doi: 10.3390/en14144308i.
- [6] O. R. Pérez-Aballe, C. Nicolas-Martin, J. González-García, P. Flores-Martín, y D. Santos-Martin, “Energy Management System in an Electrical Microgrid with Hybrid Storage and a Multi-Objective Approach”, *Revista Politecnica*, vol. 56, n° 1, pp. 47–58, ago. 2025, doi: 10.33333/rp.vol56n1.04.
- [7] J. L. Sampietro y P. Pico Valencia, “Revisión bibliográfica de sistemas de control para gestión de micro-redes de energía”, *MASKAY*, vol. 8, n° 2, p. 60, nov. 2018, doi: 10.24133/maskay.v8i2.971.
- [8] A. Deluque Pinto, E. Pérez González, y G. Gutiérrez Ramírez, “Sistema de gestión de energía para una microrred con almacenamiento en baterías e incorporación de biomasa”, *TecnoLógicas*, vol. 25, n° 54, p. e2356, ago. 2022, doi: 10.22430/22565337.2356.
- [9] M. A. Ponce-Jara, J. E. Chancay-Castro, C. Velásquez-Figueroa, y G. Velásquez-Figueroa, “Modelado, diseño y simulación de sistemas de micro-generación solar fotovoltaicos utilizando MATLAB”, *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, vol. 5, n° 2, p. 98, sep. 2020, doi: 10.35381/r.k.v5i2.960.
- [10] JEFFERSON EUSEBIO CATA SÁNCHEZ y FULTON MIJAIL RODRÍGUEZ SÓCOLA, “ANÁLISIS MATEMÁTICO DE UN PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO

- DE SILICIO”, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE GUAYAQUIL, GUAYAQUIL, 2015. Accedido: 8 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/10250>
- [11] CARLOS XAVIER MÉNDEZ MARCILLO y JUAN PATRICIO SEGARRA VÉLEZ, “MODELACIÓN DE UN AEROGENERADOR DE IMAN PERMANENTE Y SU CONTROLADOR.”, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA, CUENCA, 2015. Accedido: 8 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/8399/1/UPS-CT004930.pdf>
- [12] JEFFERSON JAVIER PINZÓN SOLANO, “ESTUDIO, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ESQUEMAS DE CONTROL PARA PROCESOS NO LINEALES DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN MEDIANTE ‘HARDWARE IN THE LOOP’ DE CONTROLADORES APLICADOS AL MODELO DE UN INVERNADERO”, ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, QUITO, 2022. Accedido: 8 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/23247/1/CD%2012660.pdf>
- [13] Guacapiña Simba Brayan Ivan, “DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO PARA CUBRIR LA DEMANDA ELÉCTRICA BÁSICA DE USUARIOS RESIDENCIALES CLASE C MEDIANTE ENERGÍAS RENOVABLES”, UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI, Latacunga, 2022. Accedido: 27 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utc.edu.ec/server/api/core/bitstreams/1b71542b-9a08-4b74-99ac-dfba56b84d7b/content>
- [14] R. Elizabeth, G. Pozo, B. Domenech Léga, y D. Laia Ferrer Martí, “Diseño de sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales considerando incertidumbre en la estimación de la demanda”, *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*, jun. 2023, doi: 10.5821/DISSERTATION-2117-402157.
- [15] K. Sozański, “Overview of Signal Processing Problems in Power Electronic Control Circuits”, 1 de junio de 2023, *MDPI, Poznan*. doi: 10.3390/en16124774.
- [16] I. A. Salazar Escobar, “Diseño de un sistema de gestión de energía basado en control predictivo por modelo para una microrred aislada localizada en zonas rurales del Ecuador”, Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolqui, 2022.

- [17] J. Meneses, J. Montero, y H. Godídez, “Las Microrredes Eléctricas y la Transición Energética de México”. Accedido: 29 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://transicionenergetica.ineel.mx/Revista.mvc/CD3n1v1>
- [18] A. O. Rousis, D. Tzelepis, I. Konstantelos, C. Booth, y G. Strbac, “Design of a hybrid ac/dc microgrid using homer pro: Case study on an islanded residential application”, *Inventions*, vol. 3, n° 3, sep. 2018, doi: 10.3390/inventions3030055.
- [19] Suárez Marcos y Vallejo Jacinto, “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA SISTEMAS AISLADOS DE LA RED PÚBLICA, CON UNA CARGA DE 200W”, 2022.
- [20] Córdoba Alejandro, “Emulación de un sistema solar fotovoltaico en un dispositivo de ejecución en tiempo real de bajo costo mediante HIL”, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2021.
- [21] MUHAMMAD H RASHID, *ELECTRÓNICA DE POTENCIA PARTE III Inversores Convertidores CD-CA*, 3ª ed. México, D.F.: Pearson Educación, 2013. Accedido: 14 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://bibliotecadigital.utn.edu.ec/files/original/7cc92ef6502f016a3adfa0e9ce0cf26e190d0e4f.pdf>
- [22] AutoSolar, “¿Cómo son los inversores de onda senoidal? ”. Accedido: 14 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://autosolar.es/aspectos-tecnicos/como-son-los-inversores-de-onda-senoidal>
- [23] CC-CA, “Convertidores CC-CA: inversores de onda cuadrada”, pp. 3–7, 2020, Accedido: 14 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.uv.es/emaset/iep00/descargas/INVERSORES%20SQW.pdf>
- [24] Jayden Byron Vicente Guayanay, “MODELO MATEMÁTICO PARA PREDECIR LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA EÓLICA A CORTO PLAZO, UTILIZANDO REDES NEURONALES.”, UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA, Loja, 2020.
- [25] Departamento de Energía de Estados Unidos (U.S. Department of Energy), “Sistemas Eólicos Pequeños para Generación de Electricidad. Una guía para consumidores en Nuevo México”, vol. 1, n° 2, pp. 10–15, 2007, Accedido: 9 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://docs.nrel.gov/docs/fy07osti/42070.pdf>

- [26] J. Mur Amada, “CURSO DE ENERGÍA EÓLICA ”, *Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Zaragoza* , vol. 1, nº 1, pp. 5–25, ene. 2015, Accedido: 9 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.windygrid.org/manualEolico.pdf>
- [27] Jorge Andrés Narváez Hidalgo y Alexy Fabian Vinueza Lozada, “Diseño aerodinámico de álabes de 100 KW para aerogeneradores de eje horizontal ubicados en la zona del Cerro Villonaco”, *Enfoque UTE*, vol. 9, nº 3, sep. 2018, doi: <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n3.330>.
- [28] Dominguez Michelle, “DISEÑO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO RESIDENCIAL AUTÓNOMO PARA CONSUMO NIVEL 1”, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2024.
- [29] W. Alarcon y S. Sanchez, “Características de baterías para instalaciones de sistemas fotovoltaicos aislados en zonas rurales del departamento de Santander Colombia”, UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER, Colombia, 2021.
- [30] W.-Y. Chang, “The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review”, *ISRN Applied Mathematics*, vol. 2013, pp. 1–7, jul. 2013, doi: 10.1155/2013/953792.
- [31] Leonel Chica Martínez, Gustavo Raúl Ordoñez, y Jenny Lorena Arias Zambrano, “Norma Ecuatoriana de la Construcción : Instalaciones Eléctricas”, 2018.
- [32] NATANAEL MELCHOR HERNÁNDEZ, “TARJETA DE DESARROLLO PARA MICROCONTROLADORES PIC”, INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, Mexico, 2009. Accedido: 6 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/8682/205.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [33] Docs, “ARDUINO UNO”, DOCS.ARDUINO. Accedido: 7 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/>
- [34] Arduino, “Arduino Mega 2560 ”, MCI ELECTRONICS . Accedido: 7 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://arduino.cl/producto/arduino-mega-2560/>
- [35] Radabán Juan J., “Diseño y desarrollo de una red MODBUS RTU basada en Arduino”, Universidad de Sevilla, Sevilla, 2017.

- [36] “Módulo Conversor TTL a RS485 MAX485 - AV Electronics”. Accedido: 23 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://avelectronics.cc/producto/modulo-conversor-ttl-a-rs485-max485/>
- [37] RENATO ANDRÉS VERA VILLAMIL, “Diseño e implementación de un prototipo de tarjeta de comunicación a una red modbus rtu para un sensor analógico de 0-10v”, ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, QUITO, 2024. Accedido: 9 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/25804/1/CD%2014450.pdf>
- [38] National Instruments (NI), “LabVIEW - NI”. Accedido: 2 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.ni.com/es/support/downloads/software-products/download.labview.html#570679>
- [39] A. T. Al-Hammouri, L. Nordstrom, M. Chenine, L. Vanfretti, N. Honeth, y R. Leelaruji, “Virtualization of synchronized phasor measurement units within real-time simulators for smart grid applications”, *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012, doi: 10.1109/PESGM.2012.6344949.
- [40] T. Chasi y F. Pilatasig, “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CORRIENTE-VOLTAJE Y POTENCIA-VOLTAJE EN PANELES FOTOVOLTAICOS”, UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI, Latacunga, 2022.
- [41] W. Pinos, “ANÁLISIS Y PARAMETRIZACIÓN DE UN AEROGENERADOR MICRO-EÓLICO AISLADO PARA LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA”, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, Cuenca, 2015.
- [42] Intronic, “Comunicación a distancia con RS-485, cálculos y diseño más envío de datos SPI ”. Accedido: 27 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=JzQLvg1tZzg&t=275s>
- [43] Musuña Chugchilán Carlos Rubén. y Veintimilla Calvopiña Franklin Humberto., “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA LA VISUALIZACIÓN DE LAS CURVAS DE EFICIENCIA DE LOS PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS.”, UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI, Latacunga, 2018.

- [44] G. Andrés, H. Londoño, y P. Auxiliar, “CURSO BÁSICO DE LABVIEW 6i”.
- [45] S. Nigam, O. Ajala, A. D. Domínguez-García, y P. W. Sauer, “Controller Hardware in the Loop Testing of Microgrid Secondary Frequency Control Schemes”, U.S.A, jun. 2020. Accedido: 3 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: [https://aledan.ece.illinois.edu/files/2020/09/PSCC\\_2020.pdf](https://aledan.ece.illinois.edu/files/2020/09/PSCC_2020.pdf)

## 8. ANEXOS

### ANEXO 1: Panel fotovoltaico SIMAX156



## SIMAX 156 Polycrystalline Solar Module (SP636-125W-145W)



### Mechanical Characteristics

Solar Cell	Polycrystalline silicon solar cell 156x156(mm)
No. of Cells	36(4x9)
Dimensions	1482x676x50(mm)
Weight	14kg
Front Glass	3.2mm(0.13 inches) tempered glass
Frame	Anodized aluminum alloy

### Output

Cable Type	$\Phi=4\text{mm}^2$
Lengths	L=900mm
Junction Box	PV-GZX0601 MC3 or MC4

### Temperature Coefficients

Nominal operating cell temperature(NOCT)	$45 \pm 2^\circ\text{C}$
Temperature Coefficient of Pmax	$-0.39\%/^\circ\text{C}$
Temperature Coefficient of Voc	$-0.34\%/^\circ\text{C}$
Temperature Coefficient of Isc	$0.035\%/^\circ\text{C}$

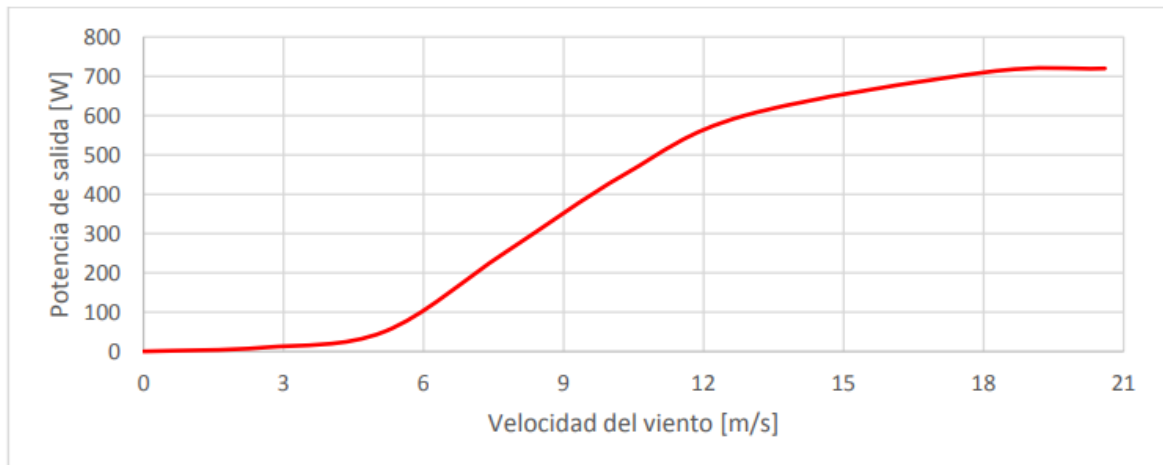
## Electrical Specifications

Parameter	SP636-125	SP636-130	SP636-135	SP636-140	SP636-145
Peak power P <sub>max</sub> (W)	125±3%	130±3%	135±3%	140±3%	145±3%
Open circuit voltage Voc(V)	21.7	21.7	22.3	22.3	22.9
Max. power voltage V <sub>mp</sub> (V)	17.7	17.5	18	18	18.5
Max. power current I <sub>mp</sub> (A)	7.14	7.43	7.5	7.78	7.84
Short circuit current Isc(A)	7.57	7.87	7.95	8.25	8.31
Dimensions(L*W*H)	1482*676*50				
Weight(kg)	14				
Max. over-current (A)	14				
Max. system voltage (V)	1000V DC				
Application Class	Class A				
Mono crystalline silicon solar cell	156x156*0.19mm				
No. of cells and connections	36 series				
No. of bypass diodes	6				
Bypass diode rating (A)	10				
Bypass diode max. junction temperature(°C)	200				
Bypass diode thermal resistance(°C/W)	3.0				
STC	Irradiance:1000W/m <sup>2</sup> , Cell temperature:25°C, AM:1.5				
Maximum No. of series connection	43				
Maximum No. of parallel connection	2				

**ANEXO 2: Aerogenerador SUNNILY X-600 de 600 W**

Model name	IDEAL 600W
Model Number	X-600
Wind turbine type	Horizontal axis, up-wind
Rotor diameter	1850mm
Net weight	15kg
Tower diameter	48-50mm
Blades number	3
Blades material	Carbon fiber reinforced plastic
Blades mass	660g/pcs
Body material	Aluminum high pressure diecast
Body construction	Inside screw joint

Product finish	Clamp-based Thermosetting powder coating
Tower connection	Bolt-on clamp
Start up wind speed	2m/s
Cut in wind speed	2.5m/s
Survival wind speed	50ms/
Rated power	600W(12.5m/s)
Rated rotor speed	800rpm
Maximum power	700W(15m/s)
Working temp. range	from -40°C to 60°C
Product life (years)	15
The sound pressure level	LAeq 35dB @ 5m/s @ 5m behind rotor (an air density of 1,225 kg/m³)
Generator	Synchronous-type, three-phase power generator with neodymium iron boron magnets
Rated output voltage	Off grid 24V or 48V DC ;on grid 48V DC
Braking system	Electro-magnetic & blade over speed aerodynamic braking system
Yaw control	360 degree free yaw
Direction control	Tail tracing
Control system	Brake mode
	Safety control
	Anti-island control(when grid tie)
Recommended system	Off grid: deep cycle lead acid battery
	On grid,pls contact your dealer
Note: At cut-in wind speed, it produces power, but it requires higher wind speed to charge battery or transfer to grid	



**2) Package Type:**

Each wind turbine in a strong carton + inner foam protection case as shipping carton. Well protected and safe.

**3) Port:**

NINGBO, SHANGHAI

**4) Lead Time for wind turbines**

Quantity(Pieces)	1-20	21-100	101-300	> 500
Est. Time(days)	7	15	30	To be negotiated

**5) The payment term:**

TT / Paypal

**6) After Service:**

- Product manufacturing and testing are in line with national standards.
- The product is tested by professional inspectors to ensure that the various indicators of the product meet your requirements.
- If the products we provide have quality problems during the warranty period, we are willing to bear all responsibilities.

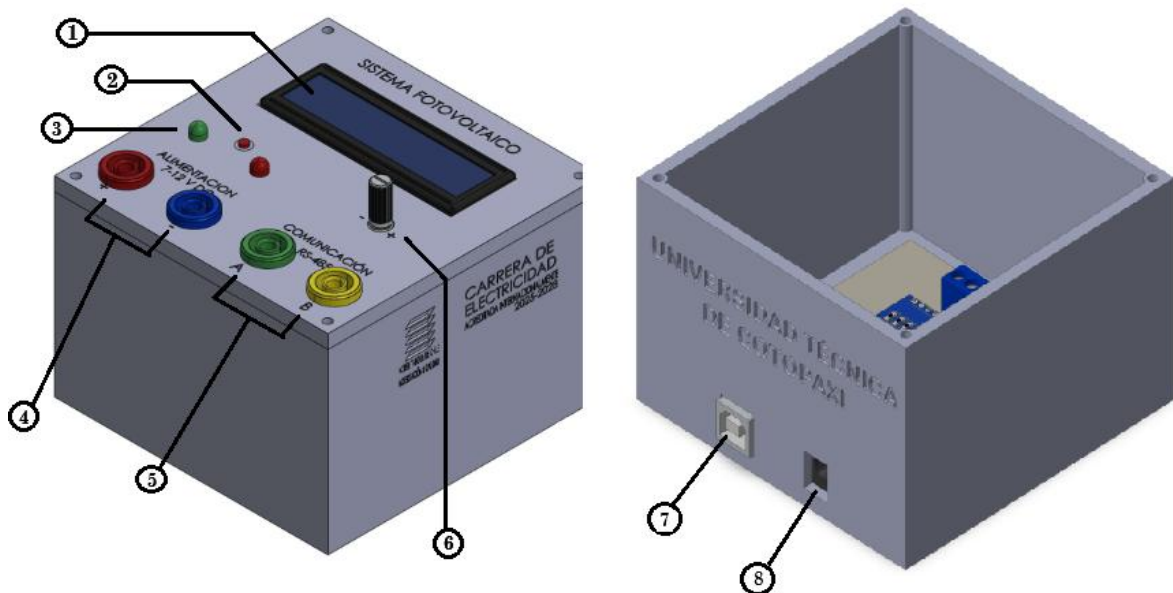
## MANUAL DE USO

### FUNCIONAMIENTO Y ESTRUCTURA DEL SISTEMA

El sistema cuenta con 4 microcontroladores Arduino UNO, que emulan microrredes híbridas y un perfil de carga los cuales envían datos a un maestro por medio de comunicación RS-485, como se detalla a continuación.

#### ESCLAVO 1 – SISTEMA FOTOVOLTAICO

El módulo del Esclavo 1, cuenta con programación del modelo matemático de un diodo ideal, y un módulo impreso en material plástico para que sea práctico y su estructura es de la siguiente manera:



Modelo de módulo de Sistema fotovoltaico.

- |                                  |                                      |
|----------------------------------|--------------------------------------|
| ① Pantalla LCD                   | ⑤ Jacks de comunicación RS-485       |
| ② Pulsador para cambio de modo   | ⑥ Controlador de irradiación solar   |
| ③ Leds indicadores               | ⑦ Puerto USB-B                       |
| ④ Jacks de alimentación 5-12 VDC | ⑧ Conector de alimentación 7- 12 VDC |

#### CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN:

El código de programación se encuentra adjunto en el drive proporcionado al docente (ESCLAVO\_FV\_01.ino).

Se hace énfasis en la sección 5 del código de programación, donde se encuentra ubicado los parámetros que se pueden cambiar ya sea para usar otro modelo de panel fotovoltaico o configuración del arreglo de los paneles.

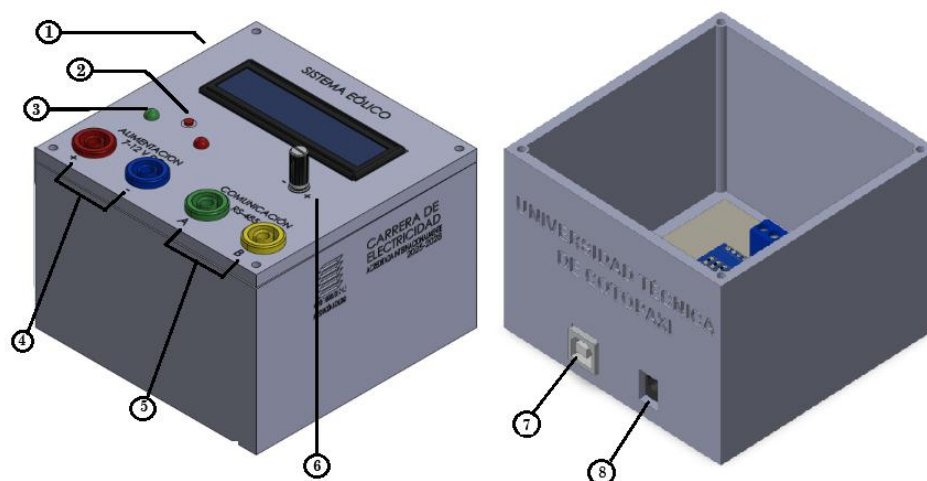
```
// --- 5. PARÁMETROS FÍSICOS DE PANEL SOLAR ---
const int Cells_in_Panel = 36;
const float Vmp_stc = 18.0;
const float I_sc = 8.25;
const float V_oc = 22.3;
const float T_stc_K = 298.15;
const float G_stc = 1000.0;
const float NOCT = 45.0;
const float G_NOCT = 800.0;

// Coeficientes
const float beta = -0.0034;
const float ki = 0.0028875;
const float k_boltz = 1.380649E-23;
const float q_c = 1.602176634E-19;
const float n = 1.2;
const float T_amb_NOCT = 20.0;
const float T_amb = 25.0;

// ARREGLO DE PANELES Y CONSTANTES DE EFICIENCIA
const int Ns = 3; // PANELES EN SERIE
const int Np = 1; // PANELES EN PARALELO
const float eff_cables = 0.97; //EFICIENCIA DE CONDUCTORES
const float eff_inverter = 0.98; //EFICIENCIA DE INVERSOR
const float G_MAX_MAP = 1000.0; //IRRADIANCIA MÁXIMA
```

## ESCLAVO 2 - SISTEMA EÓLICO

El módulo del Esclavo 2, cuenta con programación del modelo matemático de los aerogeneradores, y un módulo impreso en material plástico para que sea practico y su estructura es de la siguiente manera:



Modelo de módulo de Sistema eólico.

- ① Pantalla LCD
- ② Pulsador para cambio de modo
- ③ Leds indicadores
- ④ Jacks de alimentación 5-12 VDC
- ⑤ Jacks de comunicación RS-485
- ⑥ Controlador de velocidad de viento
- ⑦ Puerto USB-B
- ⑧ Conector de alimentación 7- 12 VDC

### Código de programación:

El código de programación se encuentra adjunto en el drive proporcionado al docente (ESCLAVO\_EO\_02.ino).

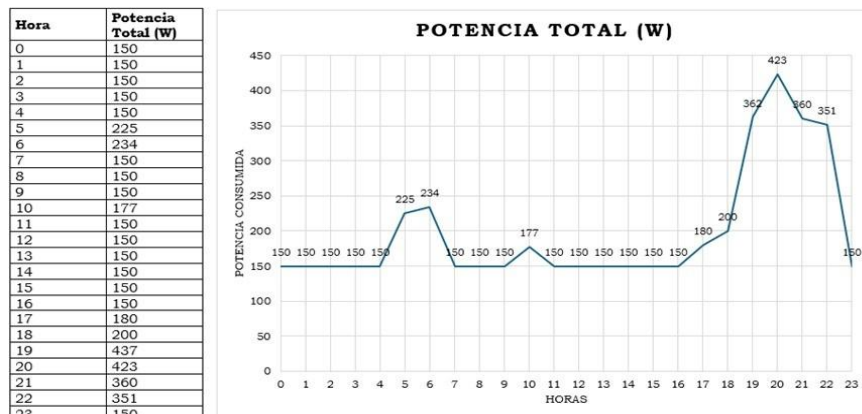
Se hace énfasis en la sección 5 del código de programación, donde se encuentra ubicado los parámetros que se pueden cambiar ya sea para usar otro modelo del aerogenerador.

```
// --- 5. CONSTANTES FÍSICAS DE AEROGENERADOR ---
const float DENSITY_AIR = 0.89;
const float DIAMETER_ROTOR = 1.85;
const float CP = 0.25;
const float EFF_SYSTEM = 0.85;
const float V_AC = 220.0;
const float V_MAX_MAP = 25.0; //VELOCIDAD m/s
const int maxMotorLectura = 350;

// Límites de Operación De VELOCIDAD DE VIENTO
const float V_ARRANQUE = 2;
const float V_CALCULO_MIN = 2.1;
const float V_CORTE = 16;
```

### ESCLAVO 3 – CARGA O DEMANDA DOMICILIARIA

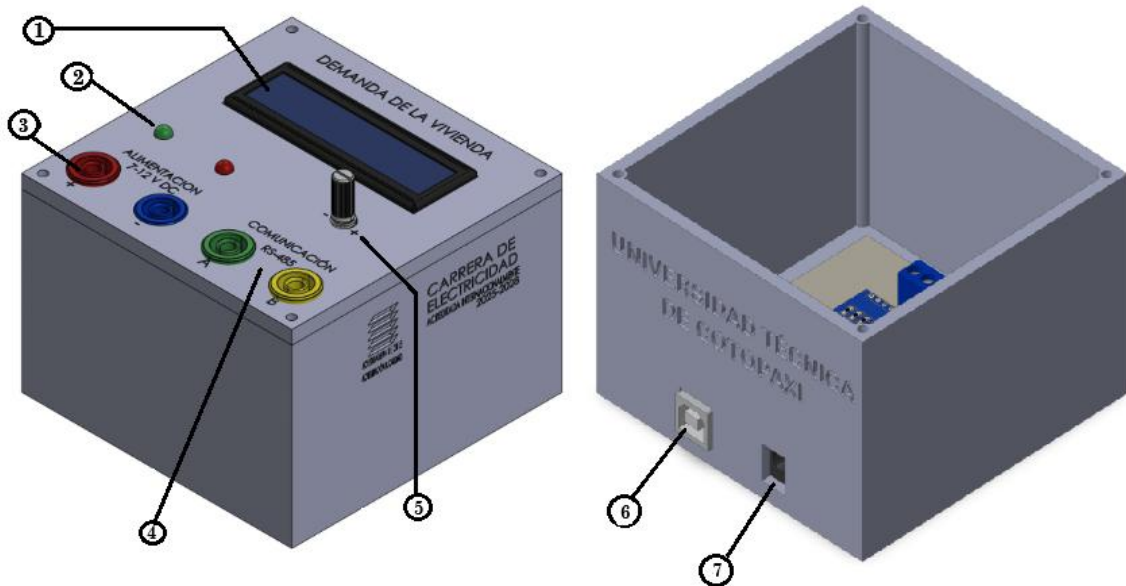
Para el estudio de la demanda se realizó previamente un estudio de cargas de una vivienda, mediante el perfil de carga realizado se obtuvo los datos que se muestran a continuación:



Curva de demanda en función de la hora del día.

En la figura anterior se muestra como es el comportamiento de la demanda de potencia en la vivienda, en el transcurso del día (24 horas), teniendo picos máximos y mínimos de demanda a diferentes horas.

De igual manera se cuenta con un módulo impreso 3D, que contiene:



Modelo de módulo de Carga o demanda.

- ① Pantalla LCD
- ② Leds indicadores
- ③ Jacks de alimentación 5-12 VDC
- ④ Jacks de comunicación RS-485
- ⑤ Controlador de velocidad de viento
- ⑥ Puerto USB-B
- ⑦ Conector de alimentación 7- 12 VDC

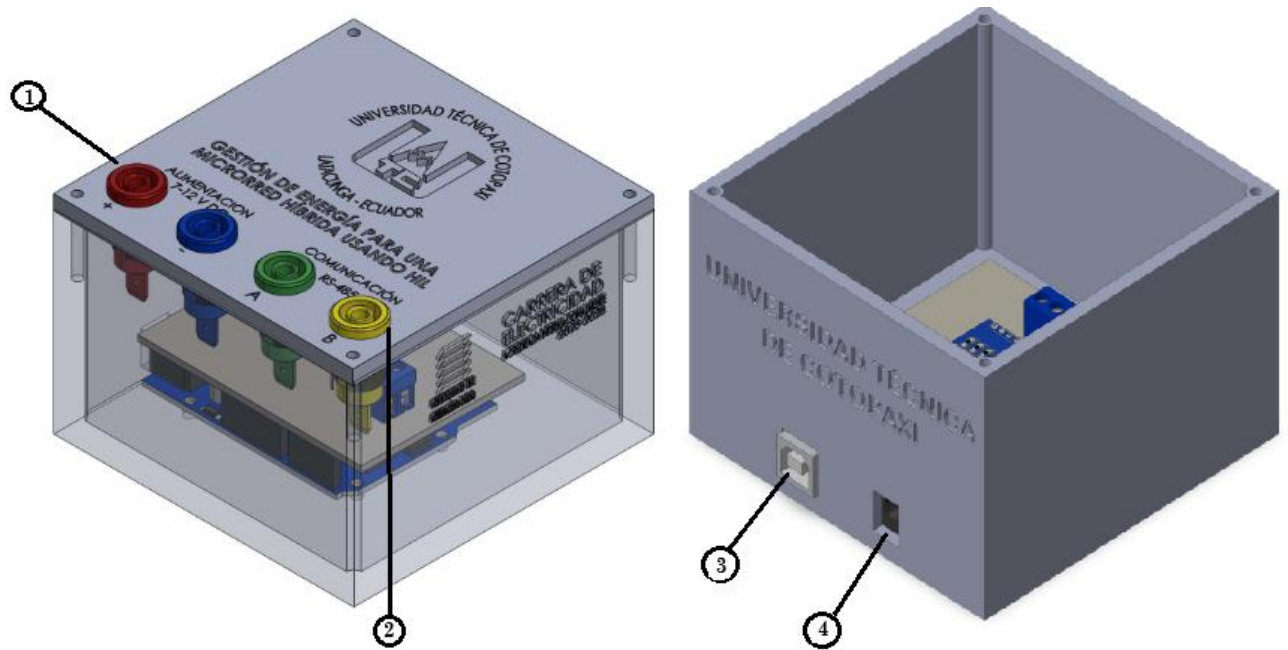
### Código de programación:

El código de programación del esclavo 3 (ESCLAVO\_LD\_03.ino), cuenta con el perfil de demanda de una vivienda común, en el código de programación si se desea cambiar con otro perfil de demanda ya sea menor o mayor acorde a cada hora del día (0-23 horas), se debe modificar la sección 4 del código:

```
// --- 4. PERFIL DE CONSUMO ---
const int DEMANDA_DIARIA [24] = {
  150, 150, 150, 150, 150, 225, 234, 150, 150, 150, 177, 150,
  150, 150, 150, 150, 150, 180, 437, 437, 387, 285, 150, 150
};
```

## MAESTRO

La estructura del maestro es más sencilla ya que al solo recibir datos no necesita de indicadores o pantallas LCD, el maestro contiene los siguientes elementos:



Modelo de módulo de Maestro.

- ① Jacks de alimentación 5-12 VDC
- ② Jacks de comunicación RS-485
- ③ Puerto USB-B
- ④ Conector de alimentación 7- 12 VDC

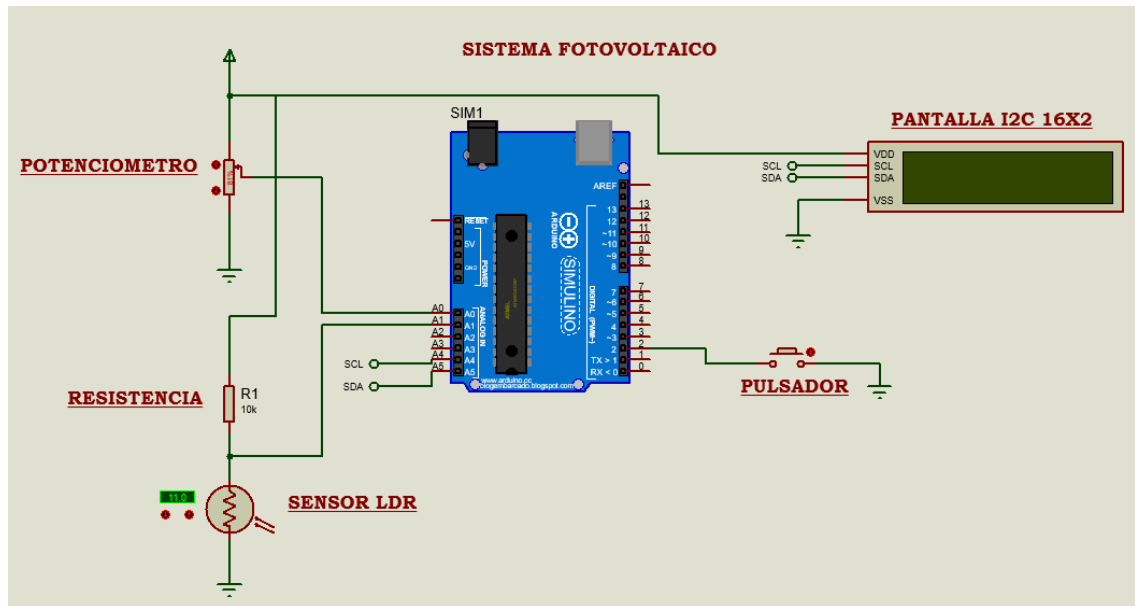
### Código de programación:

El código del Maestro recibe los siguientes datos de cada esclavo: Irradiancia ( $W/m^2$ ) y Potencia eléctrica (W) correspondiente al Esclavo 1, Velocidad de viento ( $m/s^2$ ) y Potencia eléctrica (W) correspondiente al Esclavo 2 y Potencia eléctrica (W) y Hora (0-23) correspondiente al Esclavo 3.

## CONEXIÓN DE ELEMENTOS ELECTRONICOS

### SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para el desarrollo del prototipo del sistema fotovoltaico partimos del esquema que se muestra en la figura presenta a continuación.



Esquema de conexión modelo fotovoltaico.

## PASOS DE CONEXIÓN

### A.- ALIMENTACION DEL PROTOBOARD:

- Conecta un cable desde el pin 5V del Arduino a la línea roja (+) de la protoboard.
- Conecta un cable desde el pin GND del Arduino a la línea azul (-) de la protoboard.

### B.- CONEXIÓN DEL SENSOR DE LUZ (LDR):

- Inserta el LDR en la protoboard.
- Conecta una pata del LDR a la línea de **5V (+)**.
- Conecta la otra pata del LDR a un punto de la protoboard y, desde ese mismo punto, conecta una pata de la resistencia de **10kΩ**.
- Conecta la otra pata de la resistencia de 10kΩ a la línea de **GND (-)**.
- Desde el punto de unión entre el LDR y la resistencia de 10kΩ, conecta un cable al pin analógico **A2** del Arduino.

### C.- CONEXIÓN DEL POTENCIÓMETRO:

- Inserta el potenciómetro en la protoboard.
- Conecta uno de los terminales extremos a la línea de **5V (+)**.
- Conecta el otro terminal extremo a la línea de **GND (-)**.
- Conecta el terminal central (wiper) al pin analógico **A1** del Arduino.

### D.- CONEXIÓN DEL PULSADOR:

- Inserta el pulsador en la protoboard.
- Conecta una pata del pulsador a la línea de **GND (-)**.
- Conecta la otra pata del pulsador al pin digital **2** del Arduino.

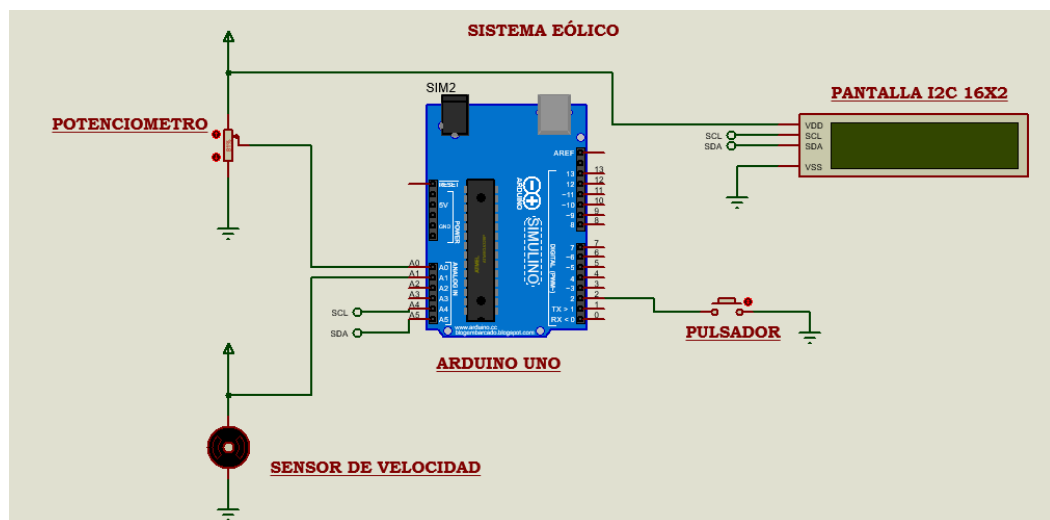
## E.- CONEXIÓN DE LA PANTALLA LCD I2C:

El módulo I2C tiene 4 pines: GND, VCC, SDA, SCL.

- Conecta el pin **GND** del módulo I2C a la línea de **GND** (-) de la protoboard.
- Conecta el pin **VCC** del módulo I2C a la línea de **5V** (+) de la protoboard.
- Conecta el pin **SDA** del módulo I2C al pin analógico **A4** del Arduino.
- Conecta el pin **SCL** del módulo I2C al pin analógico **A5** del Arduino.

## SISTEMA EÓLICO

Para el desarrollo del prototipo del sistema eólico partimos del esquema que se muestra en la siguiente figura.



Esquema de conexión modelo eólico.

## PASOS DE CONEXIÓN

### A.- ALIMENTACION DEL PROTOBOARD:

- Conecta un cable desde el pin 5V del Arduino a la línea roja (+) de la protoboard.
- Conecta un cable desde el pin GND del Arduino a la línea azul (-) de la protoboard.

### B.- SENSOR DE VELOCIDAD (TURBINA EÓLICA)

En el esquema se representa con un motor. Físicamente, usarás un motor DC pequeño que, al girar con el viento, genera voltaje.

- **Terminal Negativo (-)** → Riel Azul (GND).
- **Terminal Positivo (+)** → Pin **A0** del Arduino.

*Nota:* Si usas un motor real como generador, asegúrate de que el voltaje generado no supere los 5V para no dañar el Arduino. Si genera más, necesitarás un divisor de voltaje.

### C.- CONEXIÓN DEL POTENCIÓMETRO:

- Inserta el potenciómetro en la protoboard.
- Conecta uno de los terminales extremos a la línea de **5V (+)**.
- Conecta el otro terminal extremo a la línea de **GND (-)**.
- Conecta el terminal central (wiper) al pin analógico **A1** del Arduino.

### D.- CONEXIÓN DEL PULSADOR:

- Inserta el pulsador en la protoboard.
- Conecta una pata del pulsador a la línea de **GND (-)**.
- Conecta la otra pata del pulsador al pin digital **2** del Arduino.

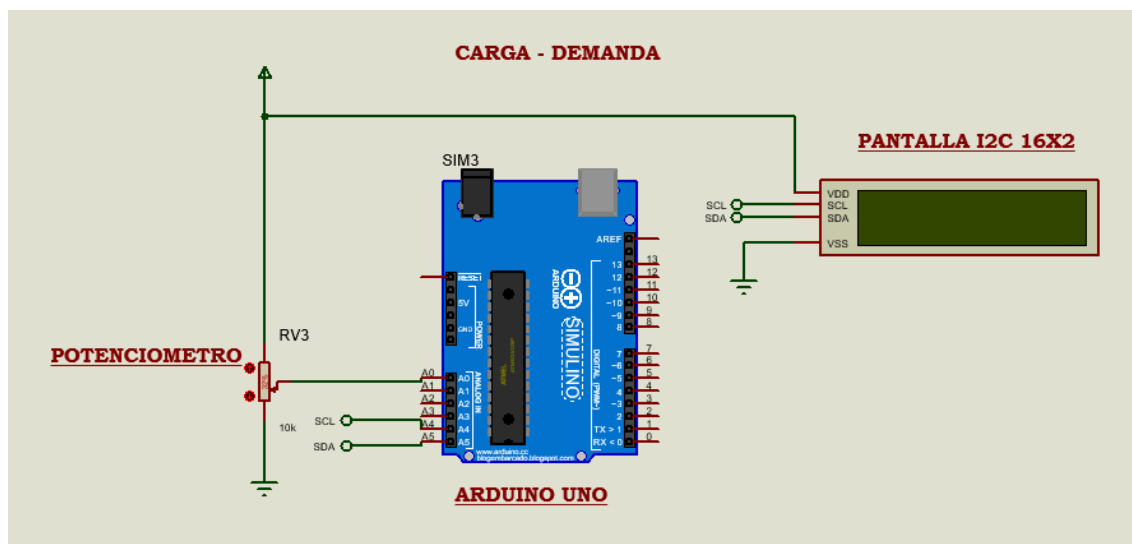
### E.- CONEXIÓN DE LA PANTALLA LCD I2C:

El módulo I2C tiene 4 pines: GND, VCC, SDA, SCL.

- Conecta el pin **GND** del módulo I2C a la línea de **GND (-)** de la protoboard.
- Conecta el pin **VCC** del módulo I2C a la línea de **5V (+)** de la protoboard.
- Conecta el pin **SDA** del módulo I2C al pin analógico **A4** del Arduino.
- Conecta el pin **SCL** del módulo I2C al pin analógico **A5** del Arduino.

## MODELO DE DEMANDA O CARGA

Para el desarrollo del prototipo del sistema de la demanda de la vivienda partimos del esquema que se muestra en la siguiente figura.



Esquema de conexión modelo de la carga de una vivienda.

## PASOS DE CONEXIÓN

### A.- ALIMENTACION DEL PROTOBOARD:

- Conecta un cable desde el pin 5V del Arduino a la línea roja (+) de la protoboard.
- Conecta un cable desde el pin GND del Arduino a la línea azul (-) de la protoboard.



## LABVIEW

El software diseñado en LabView cuenta con 6 pestañas o ventanas que corresponden a:

- **Caratula:** Se presenta el título general del software.
- **Modelos matemáticos:** Se presenta brevemente los modelos matemáticos presentes en cada módulo esclavo.

**DEFINICIONES DE LOS MODELOS MATEMATICOS**

**MODELAMIENTO FOTOVOLTAICO**

Este modelo representa la celda solar como una fuente de corriente dependiente de la irradiancia, conectada en paralelo con un diodo.

**FORMULA GENERAL**

$$I_{pv} = I_{ph} - I_o \cdot [\exp^{\frac{qV}{kT}} - 1]$$

**DONDE:**

$I_{pv}$ : Corriente de salida del panel fotovoltaico [A].  
 $I_{ph}$ : Corriente fotogenerada [A].  
 $I_o$ : Corriente de saturación inversa del diodo [A].  
 $q$ : Carga elemental del electrón ( $1.602 \times 10^{-19}C$ ).  
 $V$ : Voltaje en los terminales de la celda [V].  
 $k$ : Constante de Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23}J/K$ ).  
 $T$ : Temperatura absoluta de la celda [K].

**MODELAMIENTO EOLICO**

El modelamiento matemático del aerogenerador describe el comportamiento dinámico del sistema que convierte la energía del viento en energía eléctrica.

**FORMULA GENERAL**

$$P_e = \eta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p$$

**DONDE:**

$P_e$ : Potencia eléctrica generada [W].  
 $\eta$ : Eficiencia mecánica/eléctrica del sistema.  
 $\rho$ : Densidad del aire [ $kg/m^3$ ].  
 $A$ : Área de barrido de las aspas del rotor [ $m^2$ ].  
 $V$ : Velocidad del viento incidente [ $m/s$ ].  
 $C_p$ : Coeficiente de potencia del rotor (Límite de Betz).

**MODELAMIENTO BATERIA**

Se trata de un Modelo de Batería por Conteo de Coulomb determinando el Estado de Carga (SOC(t)) actual de la batería.

**FORMULA GENERAL**

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{\int_{t-1}^t P_{bat}(t) \cdot dt}{E_{nom}} \times 100$$

**DONDE:**

$SOC(t)$ : Estado de Carga actual de la batería [%].  
 $SOC(t-1)$ : Estado de Carga en el instante anterior [%].  
 $P_{bat}(t)$ : Potencia de flujo en la batería en el tiempo t [W].  
 $E_{nom}$ : Energía nominal total de la batería [Wh].  
 $dt$ : Diferencial de tiempo o paso de integración.

- **Monitoreo HIL:** En esta pestaña se presenta mediante medidores gráficos y numéricos los datos recopilados de cada modulo esclavo por medio del maestro, además de tener el selector del puerto serial, el cual se debe escoger el puerto por el cual esté conectado el USB del modulo del Maestro, y también un botón de Stop situado en la parte superior derecha para detener la simulación del software.

**MONITOREO DE VARIABLES Y GESTIÓN ENERGÉTICA**

PUERTO DE COMUNICACIÓN: [COM1]

INICIO DEL SISTEMA: [OFF] [STOP]

**SISTEMA FOTOVOLTAICO ID '1'**

IRRADIACIÓN SOLAR: 0 W/m<sup>2</sup>

POTENCIA FOTOVOLTAICA: 0 W

**SISTEMA EOLICO ID '2'**

VELOCIDAD DEL VIENTO: 0 m/s

POTENCIA EÓLICA: 0 W

**CARGA ID '3'**

HORA DEL DÍA: 0 h

DEMANDA DE VIVIENDA: 0 W

**POTENCIAS DEL SISTEMA**

POTENCIA TOTAL DISPONIBLE MICRORRED: 0 W

POTENCIA SISTEMA + BATERIA: 0 W

**BATERIA**

COMPORTAMIENTO DE LA BATERIA: [ON]

POTENCIA BATERIA: 0 W-h

**SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA**

ESTADO DEL SISTEMA

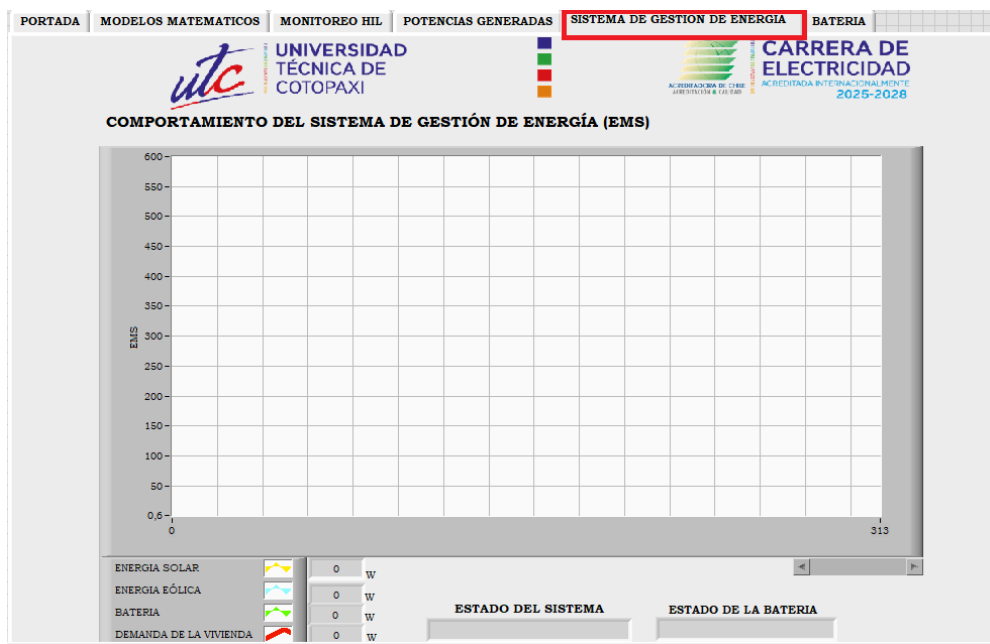
POTENCIA EXCEDENTE: 0 W

POTENCIA FALTA: 0 W

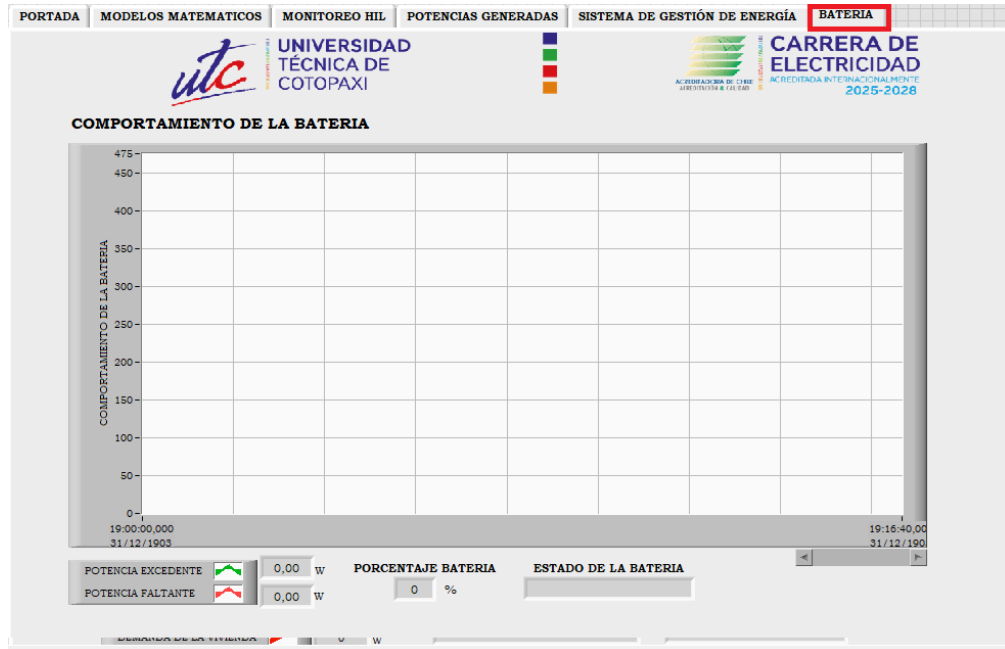
- Potencias generadas:** En este apartado se presenta graficas de las potencias de cada sistema de generación y demanda, con el fin de visualizar como se comportan las curvas de potencia en diferentes parámetros climatológicos o diferentes perfiles de carga en el caso de la curva de la demanda, además se tiene presente la posibilidad de grabar en un archivo de Excel dichos datos de cada curva presionando el botón de la esquina superior derecha.



- Sistema de gestión de energía (EMS):** Esta sección, presenta la grafica del balance de potencia que se tiene en el EMS, permite visualizar el comportamiento de las curvas de potencia cuando se tiene diferentes casos de estudio.

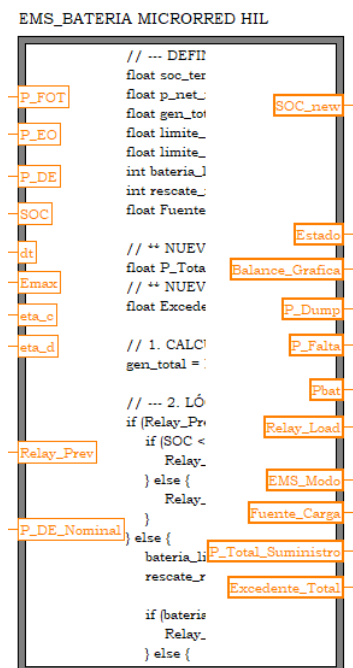


- **Batería:** Esta última pestaña, presenta la gráfica cuando se tiene un excedente de potencia generada o un déficit de la misma, además de parámetros de carga y descarga (SOC), y un porcentaje que muestra cuanta capacidad de carga se tiene en dicha batería.

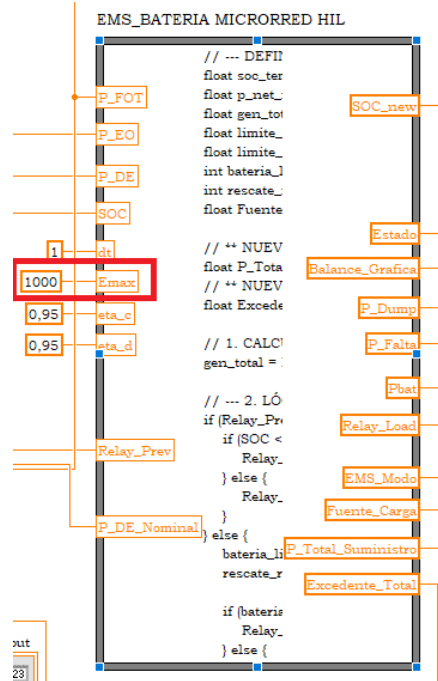


### Configuración de batería en diagrama de bloques

Para configurar los parámetros de la batería en la ventana de diagramas de bloque de LAVBIEW, nos ubicamos en el formule node llamado: EMS\_BATERIA MICRORRED HIL.



Ubicados en el formule node, para modificar la energia maxima que puede almacenar modificamos la constante numerica de la entrada Emax, para simulaciones rapidas se recomienda mantenerlo en valores de 500 a 1000.



Para modificar el porcentaje de carga al momento de iniciar la simulacion, se debe cambiar el valor de la constante de entrada de la variable SOC (Estado de Carga), el cual permite variar el estado de carga de batería de 0-100 % dependiendo del usuario.

