



Universidad Nacional de San Luis
Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias

***Diseño e implementación de un sistema automatizado para
un seguidor solar con integración SCADA y control para la
máxima extracción de potencia.***

Autores: Peralta, Santiago Emmanuel; Silvera Quiroga, Diego Nicolas

Trabajo final de Ingeniería mecatrónica

Director: Dr. Asensio, E. Maximiliano
Codirector: Ing. Mezzano, Fernando Adrián
Asesor: Ing. Torres, Luis Raúl

Villa Mercedes, San Luis
Año 2026

DERECHO DE AUTOR

© 2026, Peralta, Santiago Emmanuel; Silvera Quiroga, Diego Nicolas.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

DEDICATORIA

Llegar a este punto de mi carrera me hace pensar lo afortunado que fui en vivir una gran experiencia y las enseñanzas que aprendí. Esto nunca hubiera ocurrido si no fuera por el gran esfuerzo que realizaron mis padres cada día para que pueda estudiar y siempre estar cuando los necesitaba. A mis hermanos por ayudarme y aconsejarme en cada etapa. A mis abuelas, con mucho amor estuvieron presente en cada momento. Además, la gran recompensa que recibí en esta experiencia fue conocer a mis amigos que me acompañaron en este recorrido y mis amigos de la vida que siguen estando. Por lo tanto, este trabajo final es dedicado cada una de estas personas.

Peralta, Santiago Emmanuel

Este trabajo final está dedicado, a mis padres, Rubén y María Gabriela, por acompañarme incondicionalmente a lo largo de mi vida, por brindarme todo lo necesario para llegar a ser la persona que soy hoy y, especialmente por apoyarme en cada etapa de este camino.

A mis hermanos, Denis, Pablo, María Inés y María Sol, y a mi sobrina Hanna, por estar siempre presentes, acompañarme y formar parte de cada momento importante de mi vida.

A mi novia y mis amigos, por acompañarme durante este recorrido, por estar presentes tanto en los buenos momentos como en los más difíciles y por brindarme siempre su apoyo y confianza.

Finalmente, a mis abuelos Estela, Román (Nono), Ramona (Nona) Y tíos, por regalarme una infancia hermosa, llena de recuerdos y momentos que siempre llevaré conmigo. Aunque algunos de ellos ya no estén físicamente, siento que continúan acompañándome en cada paso y que, de alguna manera, también forman parte de este logro.

Silvera Quiroga, Diego Nicolas

AGRADECIMIENTOS

En agradecimiento con la universidad por brindarnos la oportunidad de estudiar, a los profesores de la carrera que en cada escalón nos enseñaron sobre esta profesión y especialmente a ingeniero Asensio Maximiliano por brindarnos la confianza en este proyecto y las enseñanzas. A nuestro codirector ingeniero Mezzano Fernando y a nuestro asesor Ingeniero Torres Luis por estar en cada parte de este proyecto. A los integrantes del L.C.A. que participaron de forma solidaria a solucionar el desafío de este proyecto.

RESUMEN

El presente trabajo final aborda el diseño e implementación de un sistema automatizado para un seguidor solar de un eje, integrando un sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA), un convertidor de potencia y estrategias de control orientadas a maximizar la extracción de energía de un sistema fotovoltaico. El proyecto tomó como punto de partida dos prácticas profesionales supervisadas previas, una vinculada al convertidor de potencia y otra al sistema SCADA, que fueron adaptadas, mejoradas e integradas entre sí para conformar una plataforma funcional completa. Se realizaron modificaciones en los elementos de sensado, potencia y control del convertidor en función del panel solar utilizado, validando su correcto funcionamiento mediante ensayos de calibración de sensores y verificación de la adaptación realizada. Asimismo, se desarrolló el modelo matemático del convertidor y se llevaron a cabo simulaciones que permitieron diseñar un controlador de voltaje, al que posteriormente se incorporó un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia, logrando que el sistema opere de manera eficiente ante variaciones en las condiciones de irradiancia. En paralelo, se implementó una estrategia de posicionamiento del seguidor solar basada en valores históricos de irradiancia, y se integró el sistema SCADA con el seguidor y el convertidor mediante un protocolo de comunicación sobre red inalámbrica, lo que permitió la supervisión en tiempo real, el almacenamiento de información histórica y la interacción entre el usuario y el sistema. Las pruebas experimentales realizadas sobre el sistema completo demostraron su correcto funcionamiento, validando así la arquitectura propuesta, el desempeño del controlador y la integración de los distintos subsistemas. Los resultados obtenidos permiten concluir que se logró desarrollar una plataforma automatizada capaz de optimizar el rendimiento de una instalación fotovoltaica de pequeña escala, sentando además una base sobre la cual podrán incorporarse mejoras futuras, como sensores de irradiancia directa, fuentes de alimentación adicionales, sistemas de diagnóstico de fallas y acceso remoto seguro al sistema SCADA.

Palabras clave: algoritmo MPPT, convertidor de potencia, sistema fotovoltaico, sistema SCADA, seguidor solar.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: Propuesta	15
1.1. Introducción	15
1.2. Objetivos.....	18
1.2.1. Objetivo general	18
1.2.2. Objetivos específicos.....	18
1.3. Alcances y limitaciones	19
1.4. Marco teórico	20
1.4.1. Paneles solares:.....	20
1.4.2. Algoritmos de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT).....	27
1.4.3. Convertidores de potencia:.....	33
1.4.4. Controladores Digitales:	39
1.4.5. Microcontroladores.....	41
1.4.6. Seguidores solares:.....	42
1.4.7. Sistema SCADA:	44
1.4.8. Base de datos:	47
1.4.9. Protocolos de comunicación.....	50
1.4.10. Marco normativo: Higiene, seguridad y calidad aplicada	54
1.5. Justificación	55
CAPÍTULO 2: Descripción del sistema seguidor solar	56
2. Panel Solar	58
2.1. Descripción	58
2.2. Simulación de curvas	59
CAPÍTULO 3: Convertidor de potencia.....	61
3.1. Cálculos de componentes	62
3.1.1. Cálculo del divisor resistivo – voltaje	63

3.1.2.	Cálculo del divisor resistivo - Corriente.....	64
3.1.3.	Cálculo del inductor y capacitor.....	65
3.2.	Componentes Utilizados	66
3.3.	Ensayo experimental 1: Calibración de sensores	67
3.4.	Ensayo experimental 2: Verificación de la adaptación del convertidor de potencia	73
CAPÍTULO 4: Diseño e implementación de controlador de voltaje		79
4.	Controlador de voltaje	79
4.1.	Modelo promediado del convertidor	79
4.2.	Diseño del controlador de voltaje	81
4.3.	Controlador discreto en ecuaciones diferenciales.	89
4.4.	Resultados de simulación	90
4.5.	Ensayo experimental 3: Verificación del controlador de voltaje.	95
CAPÍTULO 5: Selección e implementación del algoritmo del MPPT.....		102
5.1.	Elección del MPPT.....	102
5.2.	Resultados de simulación: MPPT + Controlador de voltaje	103
5.3.	Ensayo experimental 4: MPPT + Controlador de voltaje	106
CAPITULO 6: Sistema SCADA		115
6.1.	Elección del Sistema SCADA.....	115
6.2.	Descripción del entorno del sistema SCADA.....	116
6.3.	Nuevas adaptaciones.....	117
6.4.	Creación de base de datos	118
6.4.1.	Base de datos MySQL.....	118
6.4.2.	Adaptación del SCADA a la nueva base de datos	123
6.5.	Diseño final del sistema SCADA	125
6.6.	Ensayo experimental 5: Verificación de la comunicación del sistema.....	127
CAPÍTULO 7: Programación de microcontroladores y ensayos de comunicación		132

7.1.	Comunicación entre sistema SCADA y seguidor solar	132
7.2.	Ensayo experimental 6: Comunicación del sistema SCADA al microcontrolador del seguidor solar.....	134
7.3.	Configuración y programación del microcontrolador STM32	136
7.3.1.	Configuración del entorno Cubelde	136
7.3.2.	Implementación del controlador digital en código C.....	142
CAPÍTULO 8: Implementación de un sistema automatizado para un seguidor solar con integración SCADA y control para la máxima extracción de potencia.		145
CAPÍTULO 9: Conclusiones		150
Glosario.....		152
Referencias Bibliográficas		153
Anexo/s		157
10.1.	Anexo A: Planos esquemáticos del convertidor de potencia.	157
10.2.	Anexo B: Pantallas del sistema SCADA.....	159

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1. Diagrama de bloques del sistema con controlador y algoritmo MPPT	16
Figura N° 2. Diagrama de bloques de la composición de la tesis	17
Figura N° 3. composición de un panel solar [2].	20
Figura N° 4. Estructura atómica del silicio (a); germanio (b); galio y arsénico (c) [3].....	21
Figura N° 5. Enlace covalente del átomo de silicio [3].	21
Figura N° 6. Niveles de energía [3].....	22
Figura N° 7. Impureza de antimonio en un material tipo n [3].	23
Figura N° 8. Impureza del boro en un material tipo n [3]......	23
Figura N° 9. Flujo de electrones contra flujo de huecos [3]......	24
Figura N° 10. Curvas corriente-voltaje y potencia-voltaje de un panel solar [6].	26
Figura N° 11. Variación de la corriente en base a la irradiancia [8].....	27
Figura N° 12. Efectos de la temperatura en la curva corriente-voltaje [8].	27
Figura N° 13. Esquema del efecto del MPPT en la conmutación del convertidor de potencia. ...	28
Figura N° 14. Diagrama de flujo del algoritmo P&O [11]......	29
Figura N° 15. Diagrama de flujo del algoritmo conductancia incremental [12].	31
Figura N° 16. Diagrama de circuito del convertidor buck [18].	34
Figura N° 17. Diagrama de circuito del convertidor buck - Modo 1 [18].	35
Figura N° 18. Diagrama de circuito del convertidor buck - Modo 2 [18].	35
Figura N° 19. Formas de onda [18].	36
Figura N° 20. Microcontrolador STM32F103C8T6 [21]......	42
Figura N° 21. Tipos de seguidores solares de un eje [26].....	43
Figura N° 22. Tipos de seguidores solares de dos ejes [26].	43
Figura N° 23. Diagrama de arquitectura del modelo SCADA - Norma ISA 112 [28].	46
Figura N° 24. Panel de control de XAMPP.	50
Figura N° 25. Panel Solar LV-Energy [41].	56

Figura N° 26. Seguidor Solar utilizado en esta tesis.	57
Figura N° 27. Ficha técnica panel solar LV-Energy.	58
Figura N° 28. Curva de corriente-voltaje (Panel solar LV-Energy LVE60PS).	59
Figura N° 29. Curva de potencia-voltaje (Panel solar LV-Energy LVE60PS).	59
Figura N° 30. Convertidor Interleaved de 3 piernas.	62
Figura N° 31. Circuito del divisor resistivo	63
Figura N° 32. Entorno de trabajo – primer ensayo.	68
Figura N° 33. Prueba 1 - Voltaje de entrada 14.8V - CH1: corriente de salida [A]; CH2: voltaje de salida [V].	68
Figura N° 34. Prueba 2 – Voltaje de entrada 19.9V - CH1: corriente de salida [A]; CH2: voltaje de salida [V].	69
Figura N° 35. Prueba 3 - Voltaje de entrada 25V - CH1: corriente de salida [A]; CH2: voltaje de salida [V].	70
Figura N° 36. Prueba 4 - Voltaje de entrada 15.1V - CH1: corriente de salida [A]; CH2: voltaje de salida [V]	71
Figura N° 37. Prueba 5 - Voltaje de entrada 20.3V - CH1: corriente de entrada [A]; CH2: voltaje de entrada [V].	72
Figura N° 38. Prueba 6 – Voltaje de entrada 25.1V CH1: corriente de entrada [A]; CH2: voltaje de entrada [V].	72
Figura N° 39. Especificaciones panel solar Kyocera.	74
Figura N° 40. Entorno de trabajo	75
Figura N° 41. Valor de resistencias variables.	75
Figura N° 42. Valores de irradiancia.	76
Figura N° 43. Voltaje de circuito abierto y corriente de cortocircuito.	76
Figura N° 44. valores de voltaje y corriente con un ciclo de trabajo del 20%.	77
Figura N° 45. Valores de voltaje y corriente con un ciclo de trabajo del 90%.	78
Figura N° 46. Circuito de un convertidor buck.	79
Figura N° 47. Estado encendido del interruptor.	80
Figura N° 48. Estado apagado del interruptor.	80

Figura N° 49. Lugar Geométrico de las Raíces.	82
Figura N° 50. Respuesta en el tiempo ante una entrada tipo escalón.....	83
Figura N° 51. Respuesta en el tiempo ante una entrada tipo escalón ampliada.	84
Figura N° 52. Lugar geométrico de las raíces en el plano Z.	85
Figura N° 53. Lugar geométrico de las raíces en el plano Z ampliando en sus polos.	85
Figura N° 54. Lugar geométrico de las raíces en el plano Z ampliando en su cero.....	86
Figura N° 55. Diseño del controlador en Matlab.	87
Figura N° 56. Efectos del controlador en el lugar geométrico de las raíces.	87
Figura N° 57. Efectos del controlador en el lugar geométrico de las raíces ampliado.	88
Figura N° 58. Efecto del controlador en la respuesta en el tiempo.	88
Figura N° 59. Tabla de la transformada de Laplace.....	90
Figura N° 60. Convertidor buck síncrono alimentado por el panel solar. en Simulink.	90
Figura N° 61. Parámetros del panel solar implementado en Simulink.....	91
Figura N° 62. Voltaje de referencia.....	92
Figura N° 63. Voltaje obtenido a la salida, variando el voltaje de referencia.	92
Figura N° 64. Señal de irradiancia variable.....	93
Figura N° 65. Voltaje obtenido a la salida, variando la señal de irradiancia.	94
Figura N° 66. Voltaje obtenido a la salida, variando la señal de irradiancia ampliado.....	94
Figura N° 67. Entorno de trabajo utilizado.	96
Figura N° 68. Elementos del entorno de trabajo.	96
Figura N° 69. Medición del valor de la resistencia variable.....	97
Figura N° 70. Medición del voltaje de entrada proveniente del panel solar.....	97
Figura N° 71. Voltaje de referencia y voltaje medido por los sensores del convertidor buck.....	98
Figura N° 72. Respuesta en el tiempo del voltaje ante cambio de referencia de 8 [V] a 12 [V]. .	99
Figura N° 73. Medición del voltaje de salida ante una referencia de 12 [V].	99
Figura N° 74. Voltaje de referencia y voltaje medido por los sensores del convertidor buck. ...	100

Figura N° 75. Respuesta en el tiempo del voltaje ante cambio de referencia de 12 [V] a 8 [V].	100
Figura N° 76. Medición del voltaje de salida ante una referencia de 8 [V].	101
Figura N° 77. Diagrama de bloques del sistema con controlador y algoritmo MPPT.	102
Figura N° 78. Circuitos implementados en Simulink, con voltaje de referencia fijo y con algoritmo MPPT.	103
Figura N° 79. Señal de irradiancia variable.	104
Figura N° 80. Comparativa entre las potencias de salida.	104
Figura N° 81. Valores de corriente voltaje y potencia activando y desactivando MPPT-Prueba 1.	110
Figura N° 82. Medición de irradiancia para la prueba 2.	110
Figura N° 83. Valores de corriente voltaje y potencia activando y desactivando MPPT-Prueba 2.	111
Figura N° 84. Medición de irradiancia para la prueba 3.	112
Figura N° 85. Valores de corriente voltaje y potencia activando y desactivando MPPT- Prueba 3.	113
Figura N° 107. Configuración del CLOCK del entorno CUBEIDE.	138
Figura N° 108. Configuración del ADC1 en el entorno CUBEIDE.	138
Figura N° 109. Configuración de la pestaña DMA en el entorno CUBEIDE.	139
Figura N° 110. Configuración TIMER 2 en el entorno CUBEIDE.	140
Figura N° 111. Configuración de los parámetros del Timer 2 dentro del entorno CUBEIDE.	140
Figura N° 112. Configuración del USB en modo CDC dentro del entorno CUBEIDE.	141
Figura N° 113. Diagrama de bloques de la interacción entre periféricos.	141
Figura N° 114. Diagrama de bloques del código C.	142
Figura N° 115. Controlador implementado en código C.	143
Figura N° 116. Algoritmo MPPT implementado en código C.	143
Figura N° 117. Diagrama de bloques del sistema completo.	145
Figura N° 118. Entorno de trabajo del sistema completo.	146
Figura N° 119. Medición de irradiancia.	146

Figura N° 120. Medición de la voltaje a circuito abierto y de la corriente de cortocircuito.	147
Figura N° 121. Envío de ángulo de referencia de 35 ° a través del sistema SCADA.....	148
Figura N° 122. Envío de ángulo de referencia de 75 ° a través del sistema SCADA.....	148
Figura N° 123.Circuito de potencia del convertidor Interleaved	157
Figura N° 124. Circuito de sensado de voltaje del convertidor Interleaved	157
Figura N° 125. Circuito de sensado de corriente del convertidor Interleaved.....	158
Figura N° 126. Circuito de control del convertidor Interleaved	158
Figura N° 127. Pantalla de inicio de sesión.	159
Figura N° 128. Pantalla principal.	159
Figura N° 129. PopUp alertas.....	160
Figura N° 130. PopUp de rendimiento.	160
Figura N° 131. Pantalla de configuración de alertas.	161
Figura N° 132. Pantalla de configuración de usuarios.	161
Figura N° 133. PopUp histórico de alertas.....	162
Figura N° 134. PopUp histórico de rendimiento.....	162

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1. Comparativa entre algoritmos MPPT.	33
Tabla N° 2. Valores del panel solar en una conexión en serie.	58
Tabla N° 3. Valores obtenidos a partir de la simulación.	60
Tabla N° 4. Valores de operación.	65
Tabla N° 5. Valores de los componentes utilizados	67
Tabla N° 6. Valores obtenidos en la prueba 1.	69
Tabla N° 7. Valores obtenidos en la prueba 2.	69
Tabla N° 8. Valores obtenidos en la prueba 3.	70
Tabla N° 9. Valores obtenidos en la prueba 4.	71
Tabla N° 10. Valores obtenidos en la prueba 5.	72
Tabla N° 11. Valores obtenidos en la prueba 6.	73
Tabla N° 12. Parámetros del panel solar Kyocera.	74
Tabla N° 13. Variables del convertidor buck.	80
Tabla N° 14. Parámetros de la planta.	81
Tabla N° 15. Comparativa de la eficiencia del sistema.	106
Tabla N° 16. Valores del panel solar Solartec M-75	107
Tabla N° 17. Valores de temperatura registrada el día 25 de febrero.	108
Tabla N° 18. Valores de voltaje y corriente sin carga para una irradiancia de 118 [W/m ²].	109
Tabla N° 19. Valores de voltaje y corriente sin carga para una irradiancia de 617 [W/m ²].	111
Tabla N° 20. Valores de voltaje y corriente sin carga para una irradiancia de 1349 [W/m ²] ..	112
Tabla N° 21. Resultados obtenidos en el ensayo.	114
Tabla N° 22. Comparativa de las modificaciones realizadas en el sistema SCADA.	118
Tabla N° 23. Estructura de la tabla usuarios.	120
Tabla N° 24. Estructura de la tabla registro_usuarios.	121
Tabla N° 25. Estructura de la tabla angulos_optimos.	121

Tabla N° 26. Estructura de la tabla modo_operacion..... 121

Tabla N° 27. Estructura de la tabla mediciones. 122

Tabla N° 28. Estructura de la tabla config_alarmas 122

Tabla N° 29. Estructura de la tabla alarmas. 123

Tabla N° 30. Características del protocolo de comunicación. 134

CAPÍTULO 1: Propuesta

1.1. Introducción

La creciente demanda de fuentes de energía renovable ha impulsado el desarrollo de sistemas fotovoltaicos cada vez más eficientes y automatizados. Entre las estrategias utilizadas para incrementar el aprovechamiento de la energía solar se encuentran los seguidores solares, que permiten orientar los paneles hacia la posición de mayor irradiancia, los algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (Maximum Power Point Tracking, MPPT), que optimizan la extracción de energía disponible, y los sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), que posibilitan la supervisión, el control y la adquisición de datos en tiempo real. La integración de estas tecnologías permite mejorar el rendimiento, la operación y el monitoreo de las instalaciones fotovoltaicas.

En este contexto, el presente trabajo final toma como punto de partida dos Prácticas Profesionales Supervisadas (PPS) desarrolladas por los autores de esta Tesis, orientadas a la automatización de un seguidor solar perteneciente a la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de San Luis. Dichas prácticas abordaron, de manera independiente, el desarrollo de un sistema SCADA y de un convertidor de potencia.

A partir de estos desarrollos previos, en esta tesis se llevó a cabo la integración de ambos sistemas y su adaptación a un seguidor solar de un eje. En el convertidor de potencia se realizaron modificaciones en las etapas de sensado, potencia y control, adecuándolas a las características del panel fotovoltaico empleado y validando su funcionamiento mediante ensayos experimentales. Paralelamente, el sistema SCADA fue ampliado incorporando mejoras en la base de datos, el sistema de autenticación, las funcionalidades de supervisión y la interfaz gráfica, con el propósito de ofrecer una herramienta más robusta para el monitoreo y la interacción con el sistema.

Asimismo, se desarrollaron modelos y simulaciones del sistema fotovoltaico que permitieron diseñar e implementar estrategias de control y algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), orientados a maximizar la energía extraída del panel solar frente a variaciones de irradiancia y temperatura. En la figura N°1 se observa un diagrama de cómo se incorporaron al sistema.

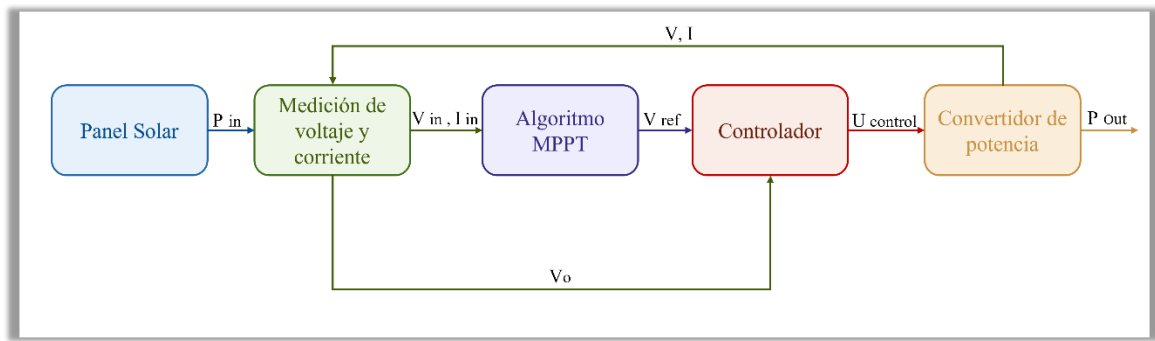


Figura N° 1. Diagrama de bloques del sistema con controlador y algoritmo MPPT

Para automatizar el posicionamiento del seguidor solar se implementó una estrategia basada en valores históricos de irradiancia, integrándose posteriormente con el sistema SCADA mediante protocolos de comunicación que posibilitan la supervisión y el control del sistema en tiempo real.

El principal aporte de este trabajo consiste en la integración de un sistema SCADA, un convertidor de potencia, estrategias de control, algoritmos MPPT y un sistema de seguimiento solar en una única plataforma automatizada, capaz de optimizar el rendimiento del sistema fotovoltaico y facilitar su supervisión, operación y análisis.

En los capítulos siguientes se presentan los fundamentos teóricos que sustentan el desarrollo del proyecto, la metodología empleada para el diseño e implementación de cada uno de los subsistemas, las modificaciones realizadas sobre los desarrollos previos, los ensayos experimentales efectuados para su validación y el análisis de los resultados obtenidos, que permitieron verificar el correcto funcionamiento del sistema automatizado propuesto.

El desarrollo de este trabajo final se visualiza en la figura N°2, mostrando las diferentes partes que lo componen.

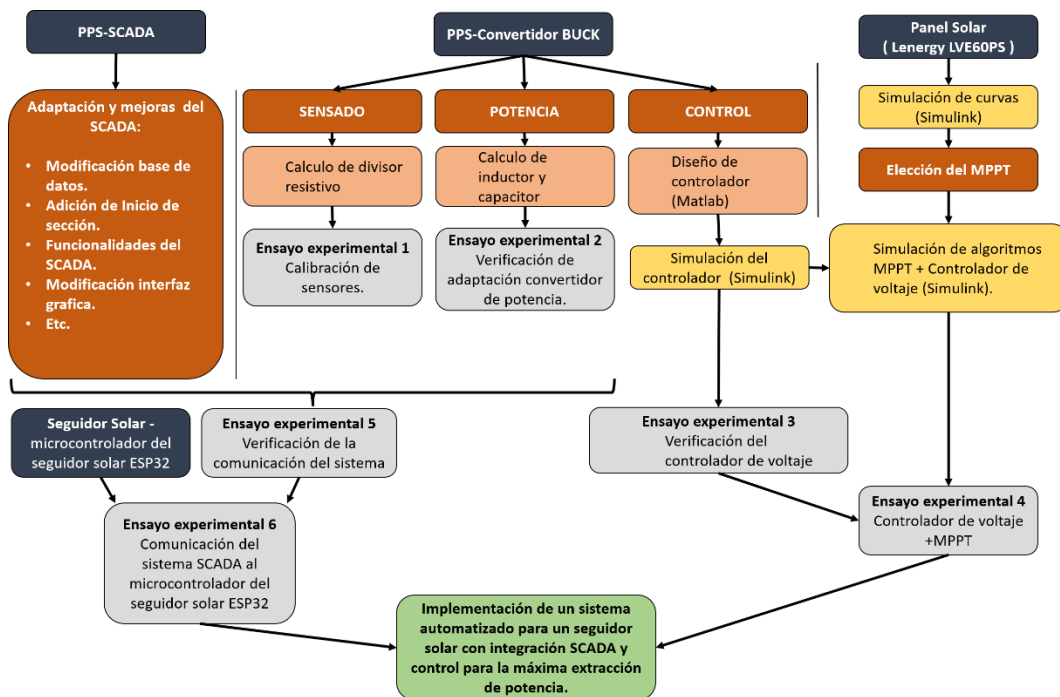


Figura N° 2. Diagrama de bloques de la composición de la tesis

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Como objetivo general se plantea la integración de un sistema SCADA y dispositivo de conversión de energía a un seguidor solar de un solo eje con el fin de automatizar y para optimizar el rendimiento del sistema fotovoltaico, además de incrementar su vida útil. Esta integración permitirá gestionar de forma eficiente la generación y transferencia de energía, ya sea para alimentar un banco de baterías, como así también otros dispositivos.

1.2.2. Objetivos específicos

- Integración del dispositivo de conversión de energía previamente desarrollado con los paneles fotovoltaicos.
- Integración del sistema SCADA a la placa de potencia.
- Estudio, análisis y selección del protocolo de comunicación para la integración del sistema SCADA.
- Desarrollo de la base de datos.
- Implementación de una estrategia de generación de referencias de posición para el sistema de seguimiento, utilizando datos históricos de irradiancia (posicionamiento solar).
- Desarrollo del modelo matemático que describa la dinámica del sistema.
- Simulación del modelo matemático en software específico.
- Elección y desarrollo de técnicas de control junto con el algoritmo MPPT.
- Simulación del sistema incorporando las técnicas de control y algoritmo MPPT.
- Implementación de las técnicas de control y algoritmo MPPT en el dispositivo de conversión de energía para su posterior integración al seguidor solar de un eje.
- Ejecución de pruebas del seguidor solar, con análisis de resultados, obtención de conclusiones y elaboración de la documentación del proyecto.

1.3. Alcances y limitaciones

Se desarrollará un sistema funcional correspondiente a la automatización de un seguidor solar de un eje, con capacidad de monitoreo, control y adquisición de datos, mediante la implementación de un sistema SCADA y la integración de un convertidor de energía preexistente, con el propósito de incrementar el rendimiento y prolongar la vida útil del sistema fotovoltaico. El sistema incorporará un algoritmo MPPT (Maximum Power Point Tracking) junto con estrategias de control destinadas a maximizar la eficiencia energética.

Para alcanzar dicha automatización, el diseño y la implementación se limitarán a un sistema de seguimiento solar de un solo eje, conformado por dos paneles fotovoltaicos. El sistema SCADA, desarrollado en lenguaje Python, operará de forma local en una computadora conectada directamente al sistema. En cuanto al convertidor de energía, si bien dispone de diversas funcionalidades, se configurará en modo Buck, permitiendo la alimentación eficiente de un banco de baterías o de otros dispositivos eléctricos.

1.4. Marco teórico

1.4.1. Paneles solares:

Introducción a sistemas fotovoltaicos:

Un dispositivo fotovoltaico es un elemento que tiene la capacidad de convertir la luz solar en electricidad, gracias al conjunto de celdas fotovoltaicas que están conectadas entre sí conformando el panel solar. Para obtener una mayor cantidad de energía eléctrica se debe aumentar el área superficial de este conjunto de celdas fotovoltaicas [1].

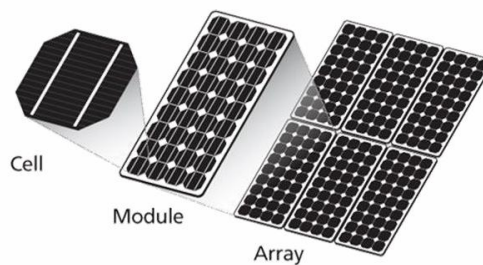


Figura N° 3. composición de un panel solar [2].

Funcionamiento:

Para comprender el funcionamiento de los paneles solares, es necesario explicar algunos conceptos básicos y analizar el material del que están compuestos los semiconductores. Los más utilizados en la industria fotovoltaica son el silicio (Si), el germanio (Ge) y el arseniuro de galio (GaAs).

Para entender sus propiedades, es fundamental conocer su estructura atómica y la forma en que sus átomos se enlazan entre sí para formar una estructura cristalina. Los átomos están constituidos por tres partículas subatómicas básicas: protones, neutrones y electrones. Los protones y los neutrones se encuentran en el núcleo del átomo, mientras que los electrones orbitan alrededor de este en diferentes niveles de energía [3].

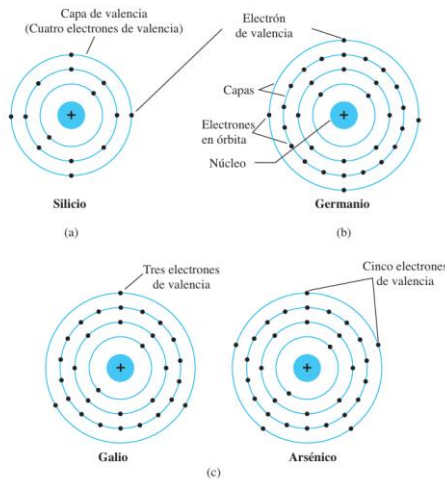


Figura N° 4. Estructura atómica del silicio (a); germanio (b); galio y arsénico (c) [3].

El elemento más utilizado en la construcción de paneles solares es el Silicio, gracias a los avances y por su abundancia. Este elemento presenta cuatro electrones orbitando en su capa más externa donde se denominan electrones de valencia. Esta denominación se utiliza para indicar que el potencial (potencial de ionización) requerido para remover cualquiera de estos electrones de la estructura atómica es significativamente más bajo que el requerido para cualquier otro electrón en la estructura [3].

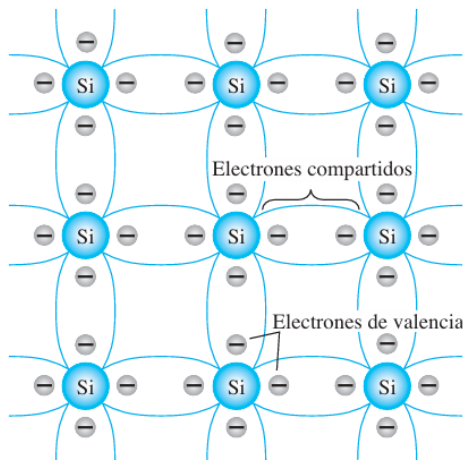


Figura N° 5. Enlace covalente del átomo de silicio [3].

El enlace covalente (unión entre dos electrones de valencia proveniente de otro átomos) es más fuerte en comparación entre el enlace del electrón de valencia y el núcleo del átomo padre pero aún es posible romper enlace covalente si el electrón de valencia absorbe la suficiente energía cinética proveniente de causas externas y asumir el estado “libre”.

El término libre se aplica a cualquier electrón que se haya separado de la estructura entrelazada fija y es muy sensible a cualquier campo eléctrico aplicado como el establecido por fuentes de voltaje o por cualquier diferencia de potencial. Las causas externas incluyen efectos como energía luminosa en forma de fotones y energía térmica (calor) del medio circundante. Los niveles de energía asociados con cada capa son diferentes según el elemento de que se trate. Sin embargo, en general: Cuanto más alejado está un electrón del núcleo, mayor es su estado de energía y cualquier electrón que haya abandonado a su átomo padre tiene un estado de energía mayor que todo electrón que permanezca en la estructura atómica [3].

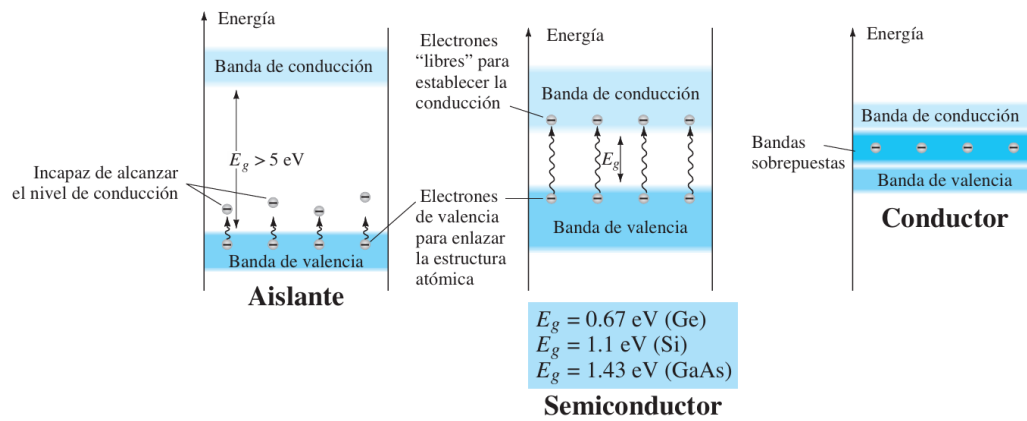


Figura N° 6. Niveles de energía [3].

Al elemento semiconductor se puede modificar su característica con la adición de átomos de impureza específicos al material semiconductor relativamente puro (dopado), dando como resultado alterar la estructura de las bandas lo suficiente para cambiar del todo las propiedades eléctricas del material.

El elemento que fue sometido al proceso de dopado se le denomina “material extrínseco” y existen dos tipos estos materiales que tiene una gran importancia en la fabricación de dispositivos semiconductores, son:

Material tipo n: se forman agregando un número predeterminado de átomos de impureza a una base de silicio. Un material tipo n se crea introduciendo elementos de impureza que contienen cinco electrones de valencia (pentavalentes), como el antimonio, el arsénico y el fósforo.

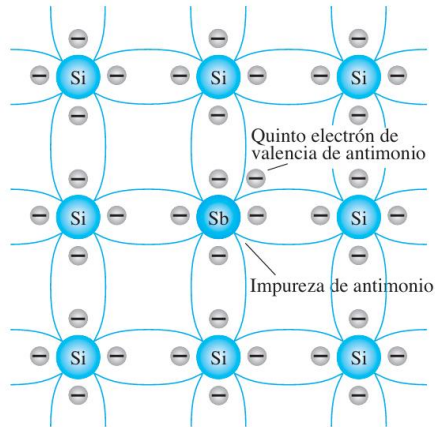


Figura N° 7. Impureza de antimonio en un material tipo n [3].

El material tipo p: se forma dopando un cristal de germanio o silicio puro con átomos de impureza que tienen tres electrones de valencia. Los elementos más utilizados para este propósito son boro, galio e indio. El efecto de uno de estos elementos, el boro, en una base de silicio.

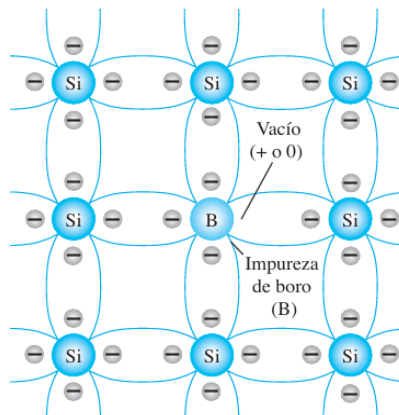


Figura N° 8. Impureza del boro en un material tipo n [3].

El efecto del hueco en la conducción se visualiza en la siguiente imagen, si un electrón de valencia adquiere la suficiente energía cinética para romper su enlace covalente y llenar el vacío creado por un hueco, entonces se creará un vacío o hueco en la banda covalente que cedió el electrón, por lo tanto, se crea una transferencia de huecos hacia la izquierda y de electrones hacia la derecha.

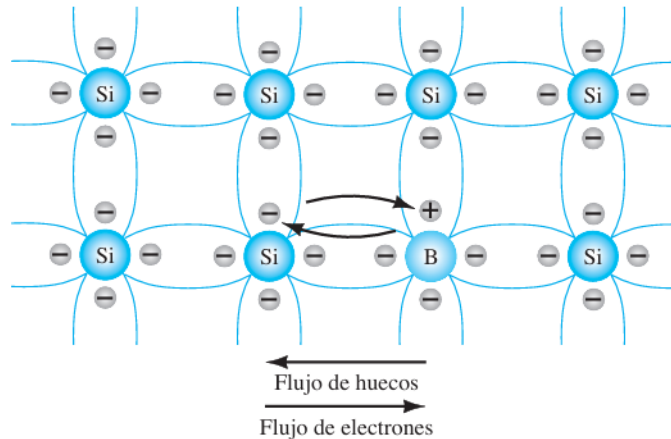


Figura N° 9. Flujo de electrones contra flujo de huecos [3].

Generalmente, una celda solar está compuesta por obleas de silicio con dopado tipo p y n, con el propósito de crear un electro-hueco cuando los fotones de la luz inciden sobre él [4]. Debido a esta acción se originan campos eléctricos por la unión PN, resultando una corriente adicional que es aprovechada como energía útil. Estas celdas deben tener características de resistencia mecánica, resistencia a la humedad y al calor. Para conseguir dichas características se cubren con capas de vidrios y etilvinilacetato (EVA). Estas capas son selladas y se colocan dentro de un marco metálico [5].

Tipos de paneles solares:

Los principales tipos de paneles solares se describen a continuación:

- **Paneles Solares Monocristalinos:** están hechos de un solo cristal de silicio puro, este se purifica, se funde y se cristaliza en lingotes, los cuales son cortados en finas láminas para hacer celdas individuales. Las celdas monocristalinas tienen un color uniforme, generalmente azul o negro. Este tipo de panel garantiza un rendimiento superior al resto de tecnologías, debido a que los átomos de silicio están situados en una posición predeterminada, facilitando la conductividad. Sin embargo, el proceso de fabricación es más largo y costoso. El rendimiento comercial de este tipo de celdas oscila entre el 16 % y 18 % y a nivel laboratorio alcanza una eficiencia del 27,6% [5].
- **Paneles Solares Policristalinos:** Estos provienen de diferentes cristales de silicio en lugar de uno. Las celdas policristalinas se fabrican de forma similar a las

monocristalinas. La principal diferencia es que las técnicas de producción son más simples, por ende, más económicas. Debido a la menor calidad del material, la eficiencia es inferior a la de una celda monocristalina, tal es así, que el récord de eficiencia a nivel laboratorio de una celda solar policristalina es 22,3 % [5].

- **Paneles solares de capa fina (Thin film):** Los paneles de película fina se caracterizan por tener capas muy finas que son lo suficientemente delgadas para ser flexibles. Los principales materiales para la construcción de este tipo de paneles son silicio amorfo (a-Si), telururo de cadmio (CdTe) y cobre seleniuro de indio y galio (CIGS). Durante los últimos años las eficiencias de las celdas CdTe y CIGS a nivel de investigación se aproximan o superan la eficiencia de las celdas de silicio policristalino 22,1 % y 22,9 % respectivamente. La eficiencia de a-Si llega solo al 14%. Una de las grandes ventajas de este tipo de celdas respecto a las de silicio monocristalino y policristalino es que su rendimiento se ve menos afectado por la temperatura, gracias a que los coeficientes de temperatura son más bajos. Para las celdas de silicio cristalino el coeficiente de temperatura está en el rango de $-0,4\% - 0,5\%$ por $^{\circ}\text{C}$, y para las celdas de película delgada (dependiendo del tipo de material), el coeficiente de temperatura es mucho menor, por ejemplo, para el silicio amorfo o el telururo de cadmio, los coeficientes de temperatura están en el rango de $-0,2 - 0,3 \%$ por $^{\circ}\text{C}$ [5].

Curvas de corriente-voltaje y su relación con la temperatura y la irradiancia:

La curva I-V representa todos los posibles puntos de operación (voltaje y corriente) de un módulo solar o un conjunto de ellos, con condiciones de irradiancia y temperatura conocidas. Dicha curva comienza en el punto de corriente de cortocircuito y acaba en el punto de voltaje de circuito abierto. El punto de máxima potencia representa la condición de funcionamiento óptimo del sistema dentro de las condiciones indicadas por la curva [5]. La curva está representada de la siguiente forma:

Los parámetros que definen los paneles solares son:

- Corriente de cortocircuito (ISC): corriente que se obtiene del panel solar cuando el voltaje en sus bornes es 0V. Constituye la máxima corriente que se puede obtener del panel solar.

- Voltaje de circuito abierto (VOC): es el máxima voltaje que proporciona el panel cuando no hay conectada ninguna carga y los bornes abiertos.
- Potencia máxima (P_{MAX}): es la potencia máxima que se puede extraer del panel solar y viene dada por el producto de la corriente y el voltaje. Tanto a circuito abierto como en cortocircuito la potencia es cero. Por tanto, existirá un lugar donde la potencia se hará máxima, coincidiendo con el máximo valor de voltaje y de corriente.
- Eficiencia (η): expresado en %, es el parámetro que define el funcionamiento del panel solar. Representa la relación entre la potencia que se obtiene del panel y la potencia de la luz que incide sobre ella.

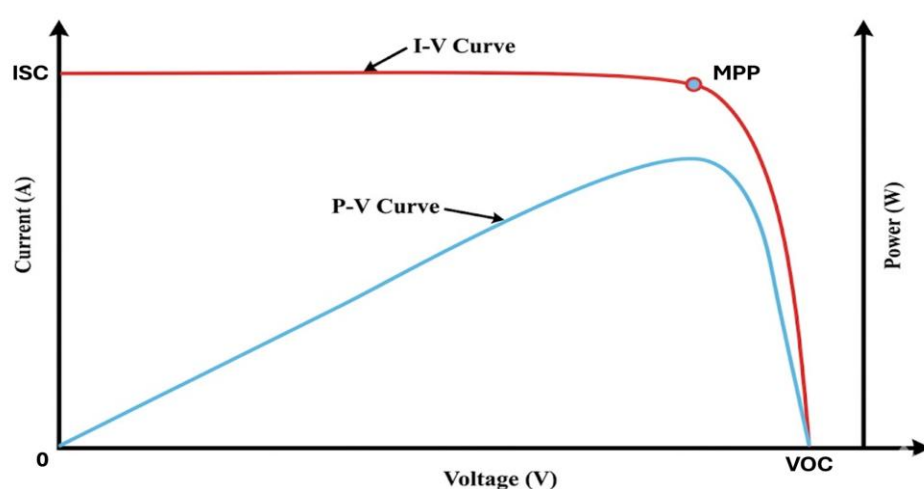


Figura N° 10. Curvas corriente-voltaje y potencia-voltaje de un panel solar [6].

Para conocer bien el funcionamiento de una celda fotovoltaica debemos de tener en cuenta dos procesos fundamentales:

- Efecto de la intensidad de iluminación (irradiancia): es la radiación que afecta principalmente a la corriente que puede entregar el panel solar [7].

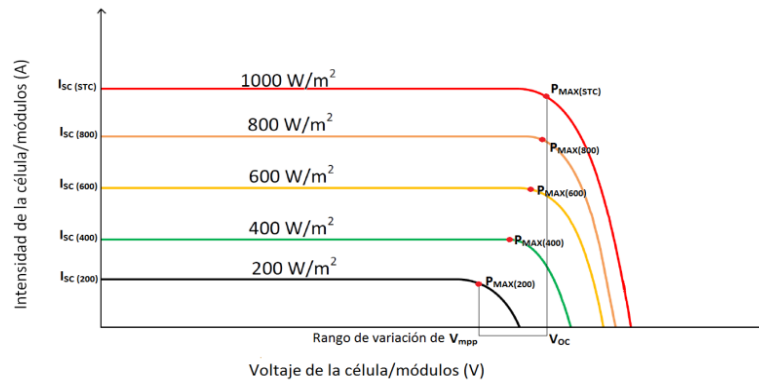


Figura N° 11. Variación de la corriente en base a la irradiancia [8].

- Efecto de la temperatura: la temperatura afecta principalmente a valores de voltaje de la curva I-V, teniendo mayor influencia en el voltaje de circuito abierto, aunque también varía el punto de máxima potencia, y ligeramente el valor de corriente de cortocircuito. En las celdas de Si, el potencial a circuito abierto disminuye un 0.4 % por cada grado de aumento de la temperatura, es decir, 2-3 mV/°C. [7]

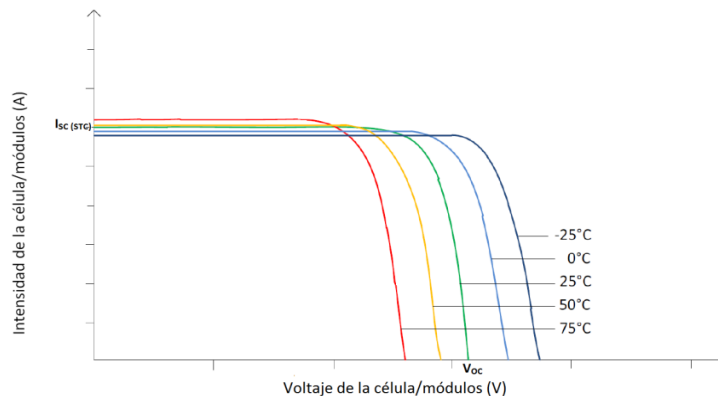


Figura N° 12. Efectos de la temperatura en la curva corriente-voltaje [8].

1.4.2. Algoritmos de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT)

Con el objetivo de obtener una mayor eficiencia del panel solar ante cambios de temperatura e irradiancia se utilizan algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), un algoritmo de control que permite operar en el MPP (Punto de Máxima Potencia). Siendo una función esencial en los sistemas fotovoltaicos (PV) para garantizar una extracción óptima de energía, dado que la curva de potencia-voltaje (P-V) de los paneles es no lineal y su

punto máximo varía continuamente de acuerdo con las condiciones ambientales de irradiancia solar y temperatura [9 y 10].

Se debe distinguir entre algoritmos MPPT directos (que modifican directamente el ciclo de trabajo u) y algoritmos indirectos con controlador de voltaje. En este trabajo se adopta una arquitectura en la que el algoritmo MPPT calcula periódicamente el voltaje de entrada (V_{ref}) y se transmite al controlador de voltaje que actúa sobre el ciclo de trabajo (u) para regular la salida.

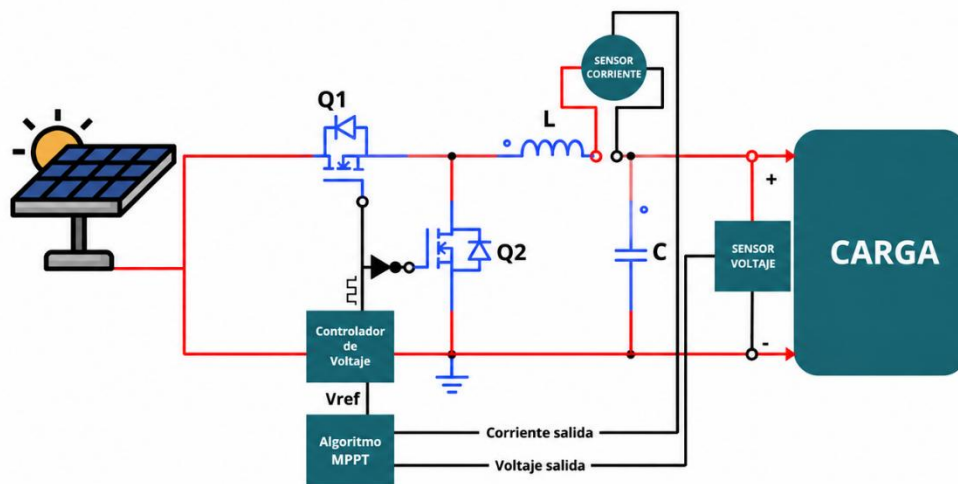


Figura N° 13. Esquema del efecto del MPPT en la conmutación del convertidor de potencia.

A continuación, se detallan 2 tipos de algoritmos muy utilizados en los sistemas fotovoltaicos:

Algoritmo de Perturba y Observa (P&O):

Su principio de funcionamiento se basa en aplicar una pequeña perturbación (incremento o decremento) en el voltaje de operación del panel PV y observar el cambio resultante en la potencia de salida (ΔP). El método “Perturba y Observa” (P&O) es uno de los algoritmos más empleados en aplicaciones comerciales debido a su simplicidad de implementación y bajo costo [9].

La derivada de la potencia con respecto al voltaje (dP/dV) define el comportamiento del algoritmo:

- Si la perturbación genera un aumento de potencia ($dP/dV > 0$), significa que el punto de operación se ha movido hacia el punto de máxima potencia (MPP), por lo que en el siguiente ciclo se aplica una perturbación con la misma dirección.
- Si la perturbación produce una caída de potencia ($dP/dV < 0$), indica que el MPP ha sido sobrepasado y el sistema invierte la dirección de la perturbación de voltaje [9,10].

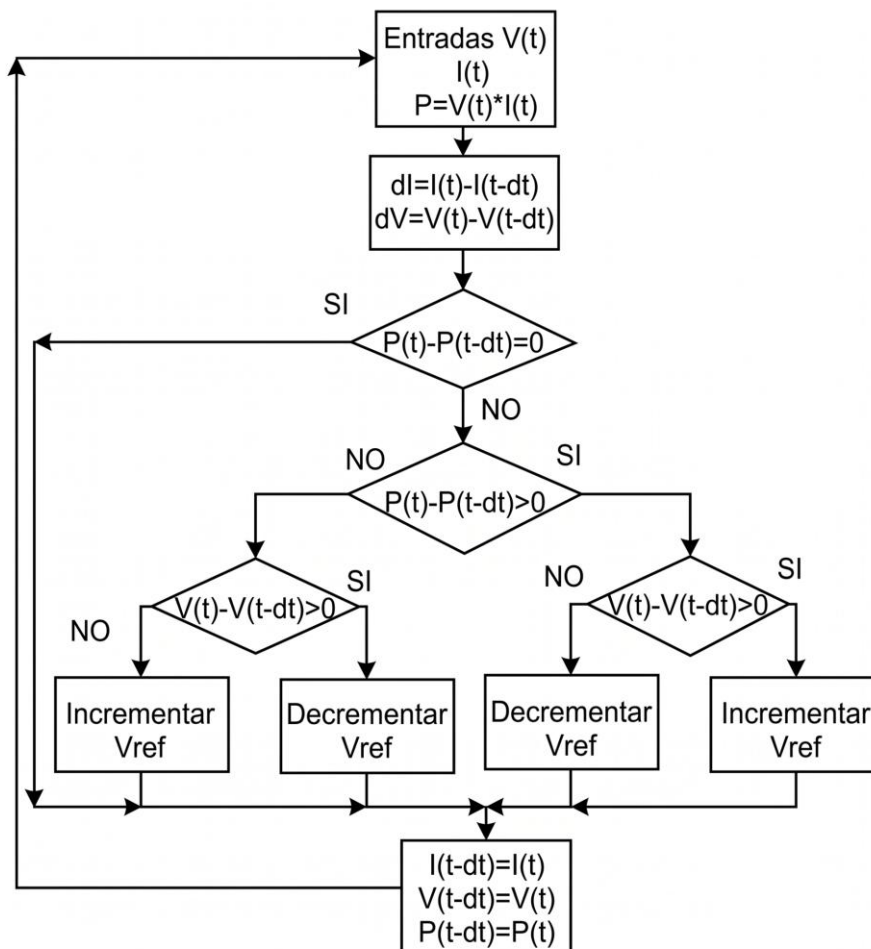


Figura N° 14. Diagrama de flujo del algoritmo P&O [11].

Limitaciones: incluso cuando se alcanza el MPP, el algoritmo continúa perturbando, lo que genera oscilaciones alrededor del punto óptimo y, por ende, pérdidas de energía. Además, su respuesta dinámica frente a variaciones rápidas de irradiancia (como un día parcialmente nublado) suele ser deficiente, pudiendo mover el punto de operación en dirección equivocada alejándose del MPP [9].

Algoritmo de Conductancia Incremental (INC)

El algoritmo de Conductancia Incremental (INC) mejora deficiencias del P&O, ofreciendo teóricamente un mejor seguimiento en condiciones de cambio rápido y la capacidad de detener las perturbaciones una vez alcanzado el MPP.

Mediante la expresión de potencia, este algoritmo analiza la pendiente de la curva P-V, donde la primera derivada de la potencia respecto al voltaje es exactamente igual a cero en el MPP.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (1)$$

Debido a que la potencia es el producto del voltaje y la corriente.

$$P = I \cdot V \quad (2)$$

La derivada se puede expresar como:

$$I + V \left(\frac{dI}{dV} \right) = 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} = -I/V. \quad (3)$$

De esta relación se establecen las reglas del algoritmo INC:

- Si $dI/dV > -I/V$ el punto de operación está a la izquierda del MPP, por lo tanto, se incrementa el voltaje.
- Si $dI/dV < -I/V$ el punto de operación está a la derecha del MPP, por lo tanto, se decrementa el voltaje.
- Si $dI/dV = -I/V$ se ha alcanzado el MPP exacto, no se realiza ninguna perturbación.

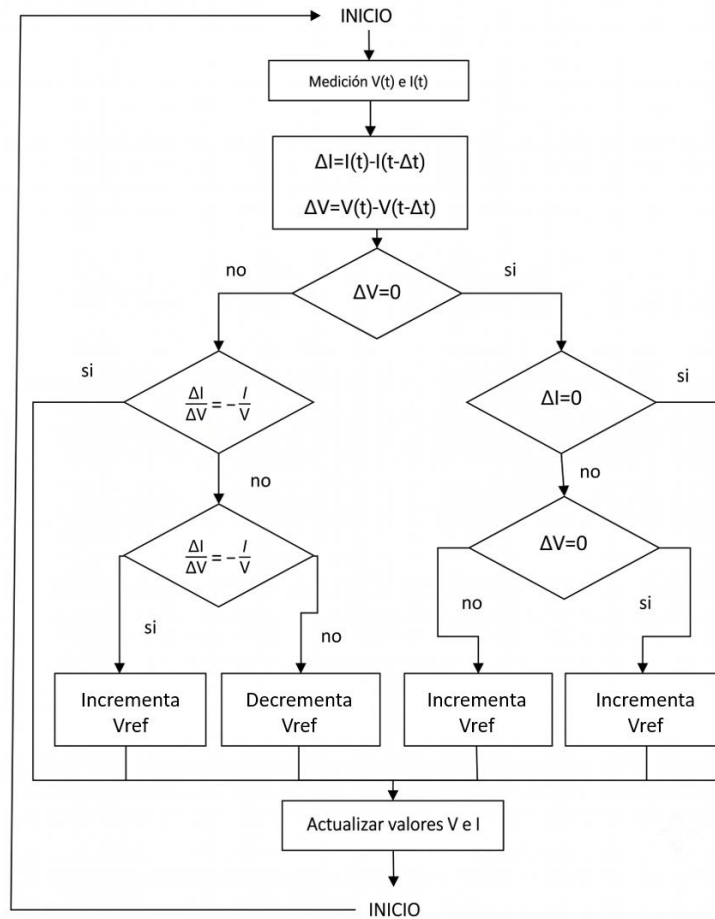


Figura N° 15. Diagrama de flujo del algoritmo conductancia incremental [12].

El controlador aumenta o disminuye el voltaje de referencia comparando estos valores en cada instante. Aunque es más robusto ante ruidos residuales, requiere sensores o carga computacional más compleja que el P&O [13,14].

Limitaciones: Este algoritmo al realizar el cálculo de derivadas (dI/dV) y comparaciones adicionales, requiere un microcontrolador más potente. Debido a que el cálculo de la derivada dI/dV es sensible al ruido presente en las señales de corriente y voltaje, esto puede generar decisiones erróneas; Dando como resultado costos de implementación ligeramente superior, requiriendo sensores de mayor precisión o circuitos de acondicionamiento de señales más elaborados [9].

Implementación de Paso Variable (Variable Step Size)

Tanto en P&O como en INC, uno de los aspectos más críticos es la **elección del tamaño de paso (perturbación)**, que enfrenta un problema: un paso grande garantiza una respuesta dinámica rápida, pero genera oscilaciones sustanciales en régimen permanente (perdiendo eficiencia); a la inversa, un paso muy pequeño elimina las oscilaciones, pero ralentiza inmensamente el sistema frente a transitorios climáticos.

Para solucionar este conflicto, se desarrollaron las variantes de tamaño de paso variable:

- P&O de paso variable: En lugar de mantener una perturbación fija, el ciclo de trabajo (ΔD) se ajusta de acuerdo con la magnitud del error de potencia mediante la fórmula $\Delta D(k) = \alpha \cdot \beta (P(k) - P(k-1))$, donde α es un factor de control y β es el signo de la dirección. Esto permite dar pasos grandes cuando la curva está empujada (lejos del MPP) y pasos minúsculos cuando se acerca al pico, atenuando fluctuaciones y mejorando la respuesta [10].
- INC de paso variable: Sigue la misma filosofía, escalando el paso a la distancia matemática que separa al punto actual del MPP. Un enfoque documentado es el algoritmo "VarInCo", donde el tamaño del paso es directamente proporcional a la suma de la conductancia instantánea e incremental: $\Delta D = \pm C \cdot (I/V + \Delta I/\Delta V)$. Otra propuesta usa la magnitud diferencial de potencia frente al voltaje multiplicada por un factor N , logrando atenuar drásticamente los saltos en el MPP [10,15].

Equivalencia Matemática y Desempeño Discreto

A pesar de que convencionalmente se asegura que el algoritmo conductancia incremental es superior al P&O, estudios exhaustivos en el dominio matemático discreto evidencian que **ambos métodos son analíticamente equivalentes**. La única disparidad recae en que el INC discreto omite un término de segundo orden relacionado con la diferenciación de potencia. Pruebas de eficiencia dinámica (bajo el estándar EN 50530) determinan que la desviación de rendimiento entre P&O e INC oscila en valores ínfimos (entre el 0.02% en condiciones estáticas y menos del 0.15% en dinámicas), sugiriendo que la Conductancia Incremental no es un algoritmo separado, sino una implementación específica de la lógica del Perturba y Observa [14].

A continuación, se presenta en la tabla 1 comparativa que detalla las diferencias clave entre los algoritmos Perturba y Observa (P&O) y Conductancia Incremental (INC), abarcando aspectos de implementación, rendimiento dinámico y eficiencia:

Tabla N° 1. Comparativa entre algoritmos MPPT.

Característica	Perturba y Observa (P&O)	Conductancia Incremental (INC)
Principio de funcionamiento	Se basa en evaluar el cambio de la potencia respecto al voltaje ($\Delta P / \Delta V$) de forma directa.	Compara la conductancia instantánea (I/V) con la conductancia incremental ($\Delta I / \Delta V$).
Complejidad de implementación	Muy sencilla. Es el método más primitivo y común por su facilidad de programación.	Mayor complejidad de software y hardware. Requiere cálculos de división y sensores más precisos para medir pequeños incrementos.
Oscilaciones en estado estacionario	Fluctúa continuamente alrededor del Punto de Máxima Potencia (MPP), lo que genera pérdida constante de energía.	Teóricamente puede detener las perturbaciones al alcanzar el MPP (cuando $\Delta I / \Delta V = -I/V$). En la práctica, el ruido de medición impide que se eliminen totalmente las oscilaciones.
Respuesta dinámica a cambios ambientales	Presenta un seguimiento deficiente y lento ante cambios rápidos de irradiancia, pudiendo perturbar en la dirección equivocada.	Convencionalmente se reporta un mejor desempeño y adaptabilidad bajo cambios rápidos de irradiancia. Sin embargo, estudios analíticos demuestran que matemáticamente también puede confundirse bajo ciertas rampas de irradiancia.
Velocidad de seguimiento	Generalmente más lenta, viéndose comprometida si se escoge un tamaño de paso (perturbación) muy pequeño.	Respuesta rápida debido a que analiza variaciones simultáneas de voltaje y corriente.
Sensibilidad a ruidos de medición	Relativamente más robusto ante ruido de sensores o ruido a largo plazo debido a su enfoque de búsqueda de pico.	Más susceptible a los ruidos residuales y a la tolerancia de error en los sensores al depender de incrementos matemáticos pequeños.
Costo del sistema	Bajo costo por sus requerimientos básicos.	Mayor costo por la necesidad de una instrumentación más sofisticada.

1.4.3. Convertidores de potencia:

En aplicaciones que involucran la carga de baterías o alimentación de cargas y dispositivos DC a partir de paneles PV, se utilizan convertidores de potencia DC-DC que son

intermediarios entre los paneles solares y los dispositivos al que se conecta en la salida del mismo.

Existen tres tipos principales de convertidores de potencia: el boost, el buck y el buck-boost. El primero se encarga de elevar el voltaje de entrada, el segundo se encarga de disminuirlo y el tercero es una mezcla de los dos anteriores. Todas estas configuraciones funcionan de forma no aislada, es decir, comparten una tierra en común y la variación de voltaje de salida depende del ciclo de trabajo aplicado al componente que conmuta [16].

Dado que el convertidor de potencia en su configuración Buck es el utilizado en este proyecto final, se procede a describir su principio de funcionamiento.

Un convertidor DC-DC reductor, es un circuito altamente eficiente que convierte un voltaje de corriente continua, a uno de menor valor también en corriente continua. Este tipo de circuito tiene un campo de aplicaciones muy amplio, proporcionando en general, un medio de reducción de voltaje muy eficiente y con alta densidad de potencia, permitiendo la reducción de la temperatura de funcionamiento y el tamaño de los dispositivos o artefactos que lo utilizan [17].

Principio de funcionamiento

En un regulador reductor, el voltaje promedio de salida V_a es menor que el voltaje de entrada V_s , por ello el nombre "reductor". El diagrama de circuito de un regulador reductor que usa un BJT de potencia se ve en la figura 16, y se parece a un convertidor de bajada. El funcionamiento del circuito se puede dividir en dos modos [18].

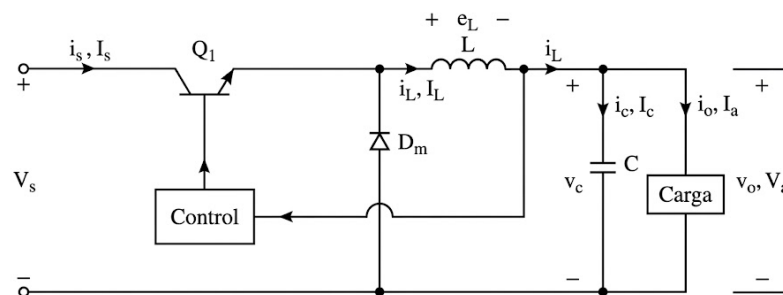


Figura N° 16. Diagrama de circuito del convertidor buck [18].

El modo 1 comienza cuando se cierra el transistor Q_1 cuando $t = 0$. La corriente de entrada, que aumenta, pasa por el inductor de filtro L , el capacitor de filtro C y el resistor de carga R .

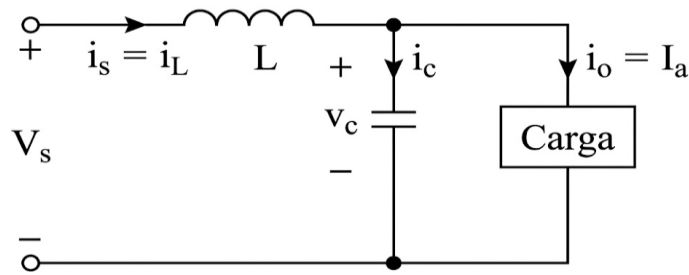


Figura N° 17. Diagrama de circuito del convertidor buck - Modo 1 [18].

El modo 2 comienza cuando se apaga el transistor Q_1 cuando $t = t_1$. El diodo de marcha libre D_m conduce, por la energía almacenada en el inductor, y la corriente del inductor sigue pasando por L , C , la carga y el diodo D_m . La corriente del inductor baja hasta que el transistor Q_1 se enciende de nuevo, en el siguiente ciclo. Los circuitos equivalentes de los modos de operación se ven en la figura 18.

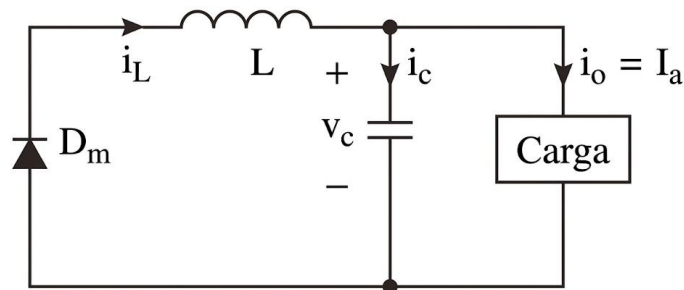


Figura N° 18. Diagrama de circuito del convertidor buck - Modo 2 [18].

Las formas de onda de voltajes y corrientes se muestran en la figura 19, para un paso continuo de la corriente por el inductor L . Se supone que la corriente aumenta y baja en forma lineal. En los circuitos prácticos, el interruptor tiene una resistencia finita y no lineal. En general, su efecto se puede despreciar, en la mayor parte de las aplicaciones. De acuerdo con la frecuencia de conmutación, la inductancia y capacitancia del filtro, la corriente del inductor puede ser discontinua.

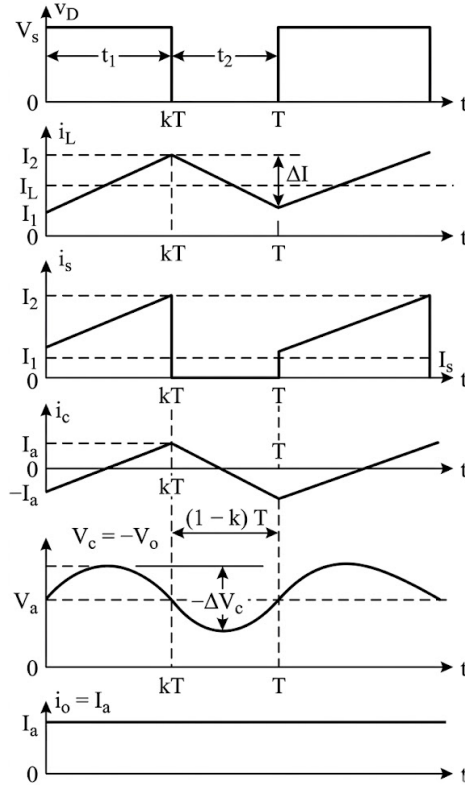


Figura N° 19. Formas de onda [18].

El voltaje a través del inductor L es, en general:

$$e_L = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (4)$$

Suponiendo que la corriente del inductor aumenta en forma lineal de I_1 a I_2 en el tiempo t_1 ,

$$V_s - V_a = L \cdot \frac{I_2 - I_1}{t_1} = L \cdot \frac{\Delta I}{t_1} \quad (5)$$

es decir,

$$t_1 = \frac{\Delta I \cdot L}{V_s - V_a} \quad (6)$$

y la corriente del inductor baja en forma lineal, de I_2 a I_1 en el tiempo t_2 ,

$$-V_a = -L \cdot \frac{\Delta I}{t_2} \quad (7)$$

es decir,

$$t_2 = \frac{\Delta I \cdot L}{V_a} \quad (8)$$

donde $\Delta I = I_2 - I_1$ es la corriente de rizo pico a pico en el inductor L . Igualando el valor de ΔI en las ecuaciones (5) y (7) se obtiene:

$$\Delta I = \frac{(V_s - V_a) \cdot t_1}{L} = \frac{V_a \cdot t_2}{L} \quad (9)$$

Se sustituye $t_1 = k \cdot T$ y $t_2 = (1 - k) \cdot T$ y se obtiene el voltaje promedio de salida:

$$V_a = V_s \cdot \frac{t_1}{T} = k \cdot V_s \quad (10)$$

Suponiendo que el circuito no tiene pérdidas, $V_s \cdot I_s = V_a \cdot I_a = k \cdot V_s \cdot I_a$ y la corriente promedio de entrada es:

$$I_s = k \cdot I_a \quad (11)$$

El periodo de conmutación T se puede expresar como sigue:

$$T = \frac{1}{f} = t_1 + t_2 = \frac{\Delta I \cdot L}{V_s - V_a} + \frac{\Delta I \cdot L}{V_a} = \frac{\Delta I \cdot L \cdot V_s}{V_a \cdot (V_s - V_a)} \quad (12)$$

que determina la corriente de rizo de pico a pico siguiente:

$$\Delta I = \frac{V_a \cdot (V_s - V_a)}{f \cdot L \cdot V_s} \quad (13)$$

es decir,

$$\Delta I = \frac{V_s \cdot k(1 - k)}{f \cdot L} \quad (14)$$

Se aplica la ley de corriente de Kirchhoff para poder expresar como sigue la corriente I_1 por el inductor:

$$I_L = I_c + I_o \quad (15)$$

Si se supone que la corriente de rizo de la carga ΔI_o es muy pequeña y despreciable, $\Delta I_1 = \Delta I_c$. La corriente promedio del capacitor, que entra durante $\frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{2} = \frac{T}{2}$, es:

$$\Delta I_c = \frac{\Delta \cdot I}{4} \quad (16)$$

El voltaje del capacitor se expresa como sigue:

$$v_c = \frac{1}{C} \cdot \int I_c dt + v_c(t=0) \quad (17)$$

y el voltaje de rizo pico a pico del capacitor es

$$\Delta v_c = v_c - v_c(t=0) = \frac{1}{C} \cdot \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{\Delta I}{4} dt = \frac{\Delta I \cdot T}{8 \cdot C} = \frac{\Delta I}{8 \cdot f \cdot C} \quad (18)$$

Se sustituye el valor de ΔI de la ecuación (13) o (14) en la ecuación (18), para llegar a:

$$\Delta v_c = \frac{V_a \cdot (V_s - V_a)}{8 \cdot L \cdot C \cdot f^2 \cdot V_c} \quad (19)$$

es decir,

$$\Delta v_c = \frac{V_s \cdot k(1-k)}{8 \cdot L \cdot C \cdot f^2} \quad (20)$$

Condición para corriente continua en el inductor y voltaje continuo en el capacitor.

Si I_L es la corriente promedio en el inductor, la corriente de rizo en el mismo es $\Delta I = 2I_L$.

Aplicando las ecuaciones (10) y (13) se obtiene:

$$\frac{V_s \cdot k(1-k)}{f \cdot L} = 2I_L = 2I_a = \frac{2k \cdot V_s}{R} \quad (21)$$

de donde se obtiene el valor crítico L_c del inductor:

$$L_c = L = \frac{R \cdot (1-k)}{2 \cdot f} \quad (22)$$

Si V_c es el voltaje promedio del capacitor, su voltaje de rizo es $\Delta V_c = 2V_a$. Con las ecuaciones (10) y (20) se obtiene:

$$\frac{V_s(1-k) \cdot k}{8 \cdot L \cdot C \cdot f^2} = 2V_a = 2k \cdot V_s \quad (23)$$

de donde el valor crítico C_c del capacitor es:

$$C_c = C = \frac{1-k}{16 \cdot L \cdot f^2} \quad (24)$$

El regulador reductor sólo requiere un transistor, es sencillo y tiene una eficiencia alta, mayor que 90%. La tasa di/dt de la corriente de carga se limita con el inductor L. Sin embargo, la corriente de entrada es discontinua, y en el caso normal se requiere un filtro de alisamiento en la entrada. Proporciona voltaje de salida de una polaridad, y corriente unidireccional de salida. Requiere un circuito de protección para el caso de un posible cortocircuito a través de la trayectoria del diodo [18].

Las ecuaciones obtenidas anteriormente serán utilizadas para posteriores cálculos del capacitor e inductor.

1.4.4. Controladores Digitales:

Para garantizar que el sistema alcance el valor deseado es importante mencionar el diseño y la implementación de controladores digitales.

Los sistemas de control digital utilizan dispositivos programables como microcontroladores. Estos sistemas ofrecen ventajas significativas, tales como una alta flexibilidad para modificar algoritmos mediante software, inmunidad al ruido y la eliminación de errores por degradación o tolerancia de componentes electrónicos.

Un sistema de control digital típico interactúa con el mundo físico continuo mediante tres etapas fundamentales: la adquisición de la señal mediante un conversor analógico-digital (ADC), el procesamiento a través de un algoritmo de control ejecutado a una frecuencia de muestreo fija, y la actuación sobre la planta mediante un conversor digital-analógico, comúnmente implementado a través de señales de Modulación por Ancho de Pulso (PWM).

Para controlar físicamente una planta, primero se debe comprender su dinámica, obteniendo su función de transferencia $G(s)$ que relaciona distintas variables del sistema.

Dado que el controlador se ejecutará en un microcontrolador, el análisis debe trasladarse al dominio discreto utilizando la Transformada Z. Esta herramienta matemática convierte secuencias temporales discretas en representaciones en el dominio de la frecuencia, facilitando el análisis de estabilidad. En el mapeo del plano continuo s al plano discreto z , definido por $z = e^{sT}$ (donde T es el período de muestreo), el semiplano izquierdo estable de s se proyecta dentro de un círculo de radio unitario en el plano z . Por lo tanto, un sistema discreto se considera estable si todos sus polos se ubican estrictamente dentro de este círculo unitario.

En la práctica, la conversión de señales discretas a continuas implica mantener constante el valor de la señal de control durante todo el período de muestreo. Este comportamiento se modela matemáticamente mediante un Retenedor de Orden Cero (ZOH - Zero Order Hold), cuya función de transferencia introduce un retardo en el sistema.

Para que el diseño del controlador digital sea preciso, la dinámica del ZOH debe incluirse en la discretización de la planta continua, herramientas computacionales como la función `c2d` de MATLAB automatizan este proceso, utilizando el método de retención de orden cero y un tiempo de muestreo T_s específico, generando así la planta equivalente en tiempo discreto $G(z)$.

El diseño del controlador digital tiene como propósito lograr que la planta cumpla con especificaciones de respuesta transitoria y de estado estable predefinidas.

Una condición fundamental para que este diseño sea físicamente realizable (causal) en el hardware es que el grado del polinomio del denominador sea mayor o igual al del numerador ($n \geq m$).

Una vez diseñada la función de transferencia del controlador $C(z)$, esta no puede ser interpretada directamente por el microcontrolador. Para su implementación, la expresión en el dominio de la frecuencia debe transformarse al dominio temporal discreto en forma de **ecuaciones en diferencias**.

Esto se logra multiplicando y dividiendo la función de transferencia por potencias inversas de z^{-n} y aplicando la anti-transformada Z. El resultado es una ecuación recursiva que permite al microcontrolador calcular la acción de control actual $u[k]$ utilizando una combinación lineal del

error actual $e[k]$, errores pasados ($e[k-1], e[k-2], \dots, e[k-n]$) y acciones de control calculadas en instantes de muestreo anteriores ($u[k-1], u[k-2], \dots, u[k-m]$) . Esta ecuación se programa directamente mediante código (software) en el hardware de control [19].

1.4.5. Microcontroladores

Para poder implementar los algoritmos MPPT y los controladores digitales es necesario el uso de microcontroladores, a continuación, se detallan los dispositivos implementados.

STM32

El STM32F103C8T6 es un microcontrolador ARM Cortex-M3 de 32 bits fabricado por STMicroelectronics, que opera a una frecuencia de 72 MHz. Entre sus periféricos integrados incluye un controlador USB 2.0 Full Speed capaz de operar a 12 Mbps. Es importante aclarar que este controlador funciona únicamente en modo dispositivo (device): el STM32F103C8T6 puede presentarse ante una computadora como un periférico USB, pero no puede actuar como host para controlar otros dispositivos USB. La computadora es siempre el host que inicia y gestiona la comunicación [20].

La clase de dispositivo USB más utilizada para comunicación con PC en microcontroladores es CDC (Communication Device Class, Clase de Dispositivos de Comunicación). USB CDC le permite al microcontrolador emular un puerto serie virtual, conocido como Virtual COM Port: la computadora lo reconoce exactamente igual que si fuera un puerto serial COM tradicional, sin necesidad de instalar drivers adicionales en la mayoría de los sistemas operativos modernos (Windows 10/11, Linux y macOS). Desde el software de la computadora, enviar y recibir datos es idéntico a trabajar con un puerto serie clásico, lo que simplifica enormemente el desarrollo [20].

Para facilitar la implementación de esta clase en el STM32F103C8T6, STMicroelectronics provee el USB Device Stack junto con las librerías HAL (Hardware Abstraction Layer), que abstraen los detalles de bajo nivel del protocolo USB: descriptores de dispositivo, mecanismos de enumeración, tipos de transferencia (control, bulk, interrupt, isochronous). El desarrollador solo necesita trabajar con funciones de alto nivel para enviar y recibir bytes, sin gestionar directamente el hardware USB [20].

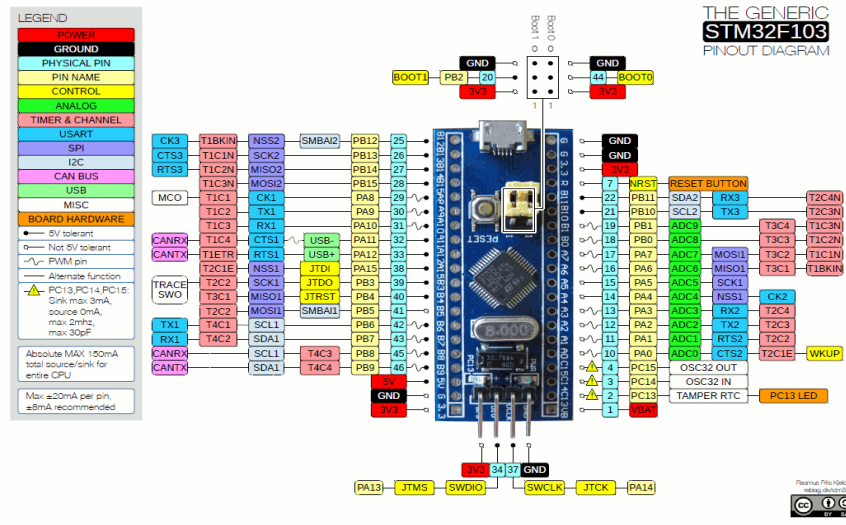


Figura N° 20. Microcontrolador STM32F103C8T6 [21].

Microcontrolador ESP32

El ESP32 integra en el mismo chip, además de su núcleo de procesamiento, un módulo Wi-Fi 802.11 b/g/n con un stack TCP/IP completo incorporado en su firmware. Esto le permite conectarse a una red local, obtener una dirección IP, y actuar directamente como servidor o cliente TCP sin necesidad de hardware adicional. Esta capacidad es la que hace posible la comunicación entre el sistema SCADA en la computadora y el ESP32 que controla el posicionamiento del seguidor solar, usando como canal de datos la red Wi-Fi del laboratorio [22].

1.4.6. Seguidores solares:

Para lograr la optimización de la energía obtenida a partir de una instalación fotovoltaica hay diferentes metodologías, uno de ellos es aumentar la cantidad de radiación solar recibida por el panel. Un seguidor solar es un dispositivo conformado por una parte fija y una móvil, cuya finalidad es el aumento de la captación de radiación solar, para lo cual cuenta con una superficie que debe permanecer perpendicular a los rayos del sol durante el día y dentro de su rango de movimiento [24].

Tipos de Seguidores

Los seguidores solares pueden ser clasificados de diversas maneras:

Según el tipo de movimiento

Seguidores a un eje: Presentan un grado de libertad en su movimiento. La rotación de la superficie de captación se hace sobre un solo eje, este puede ser horizontal, vertical u oblicuo. Este tipo de seguimiento representa un mínimo grado de complejidad. Su limitación consiste en que no puede realizar un seguimiento completo del sol ya que solo puede seguir ya sea la azimuth o la altura solar, pero no ambas [25].

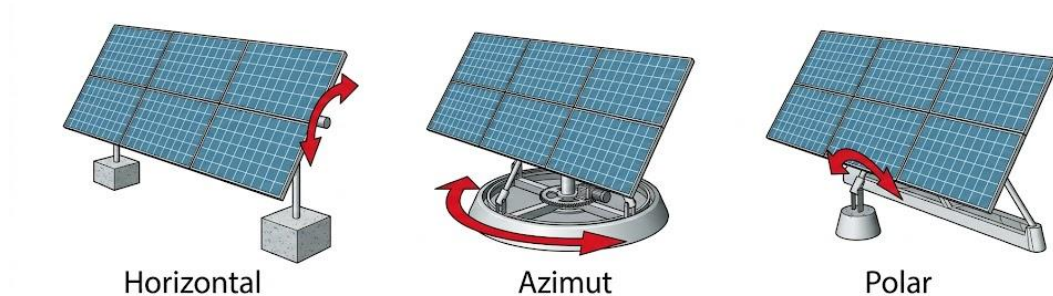


Figura N° 21. Tipos de seguidores solares de un eje [26].

Seguidores a dos ejes: Poseen dos grados de libertad, capaces de hacer un seguimiento solar más preciso. Este tipo de seguidor está en capacidad de realizar un seguimiento total del Sol, tanto en altura como en azimuth, aunque el rendimiento de la instalación puede ser superior en comparación con los de un solo eje [25].

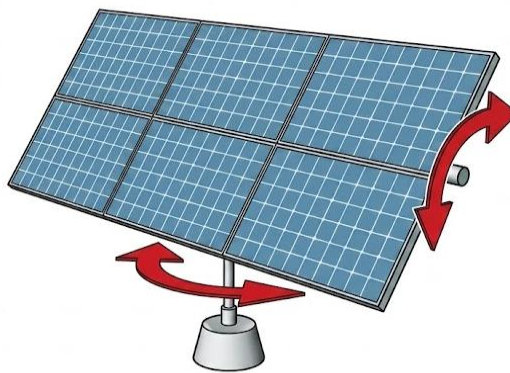


Figura N° 22. Tipos de seguidores solares de dos ejes [26].

A modo de comparación puede decirse que los seguidores a un eje tienen como ventaja ser simples y menos costosos, pero como desventajas es impreciso y su captación de energía es

menor; por otra parte, los seguidores a dos ejes tienen mayor precisión y permiten una mayor captación de energía, pero su costo es mayor [25].

Según su algoritmo de seguimiento:

- Seguidores por punto luminoso: Poseen un sensor que les indica cual es el punto del cielo más luminoso y al que deben apuntar. El algoritmo de este tipo de seguidor basa su funcionamiento en la señal integrada por uno o varios sensores, dependiendo de dicha señal se envía un comando de control a uno o varios motores para que se posicionen en el punto más adecuado de luminosidad.
- Seguidores con programación astronómica: Estos mediante un programa conocen en qué punto debería estar el Sol a cada hora y apuntan a dicha posición. Presenta una independencia de las condiciones climáticas ya que su algoritmo no requiere de sensores que indiquen cual es el punto más luminoso. El seguimiento en este caso depende únicamente de una serie de ecuaciones que predicen la ubicación del Sol en cualquier momento.

Si se comparan estos seguidores puede notarse que los seguidores por punto luminoso presentan una mayor facilidad para implementar el algoritmo de seguimiento, pero presentan poca fiabilidad; mientras que con una programación astronómica se presenta una mayor fiabilidad, pero es más difícil la implementación del algoritmo de seguimiento. En los sistemas fotovoltaicos basados en un seguimiento directo del Sol, el seguimiento más empleado es el que utiliza las coordenadas calculadas, pero es una tecnología muy cara y engorrosa desde el punto de vista de su mantenimiento y control [25].

1.4.7. Sistema SCADA:

La implementación de un sistema SCADA (por sus siglas en inglés Supervisory Control And Data Acquisition) se basa en la necesidad de recompilar y visualizar información, el resguardo del rendimiento del proceso en una base de datos y el análisis de la información adquirida [27].

Los sistemas S.C.A.D.A. se consideran como una arquitectura de la conexión de varios dispositivos (sensores, motores, actuadores, bombas, etc.) en un solo punto central permitiendo una comunicación con el usuario y el proceso de producción con el propósito de adquirir datos del estado en que se encuentran estos elementos, registrar eventos, cumplir con un monitoreo

del proceso en tiempo real y una de las principales funciones es generar alertas en el caso que exista un escenario desfavorable en el proceso de producción. Para el éxito de estos sistemas se tiene en cuenta varios aspectos como lo son protocolo de comunicación, la arquitectura de comunicación, el alcance que va a poseer y la elección del entorno para la interacción entre el usuario y el S.C.A.D.A. (la norma ISA 112 que habla al respecto del entorno).

Norma ISA:

Las normas internacionales consensuadas de ISA (en sus siglas en inglés International Society of Automation) tiene como objetivo establecer los requisitos esenciales para procesos, sistemas, productos o materiales, estableciendo estándares de calidad y consistencia. Donde estas normas hacen mención que su implementación nos garantiza un aumento a la seguridad (protege a los trabajadores y la comunidad siguiendo prácticas de seguridad comprobada), mejora la comunicación (garantiza una comunicación clara y estandarización entre sistema y equipos), reduce costos, aumenta la intercambiabilidad (implica la integración de componentes y sistemas de diferentes proveedores) y preservar al medio ambiente.

A continuación, se mencionan las normas que se tendrán en cuenta para el desarrollo del sistema S.C.A.D.A. para alcanzar los beneficios anteriormente mencionados.

Norma ISA 112: El comité encargado en desarrollar las normas ISA 112 hicieron énfasis en involucrar todos los actores involucrados en el sistema S.C.A.D.A. y estos son: usuarios finales, integradores, proveedores de hardware y software, contratistas y entes regulatorios. El alcance de esta norma es brindar una guía integral para el diseño, implementación, operación y mantenimiento de sistemas SCADA, recopilando y documentando las mejores prácticas aplicadas en diversas industrias. Dentro de su estructura normativa, el comité propone una arquitectura funcional de referencia, representada por capas identificadas con letras, tal como se muestra en la Figura 23. Esta arquitectura es independiente del tipo de tecnología utilizada o del tamaño del sistema, y su propósito es servir como modelo común que describa la estructura general de la mayoría de los sistemas SCADA, facilitando su comprensión, implementación y comparación con otros modelos existentes [28].

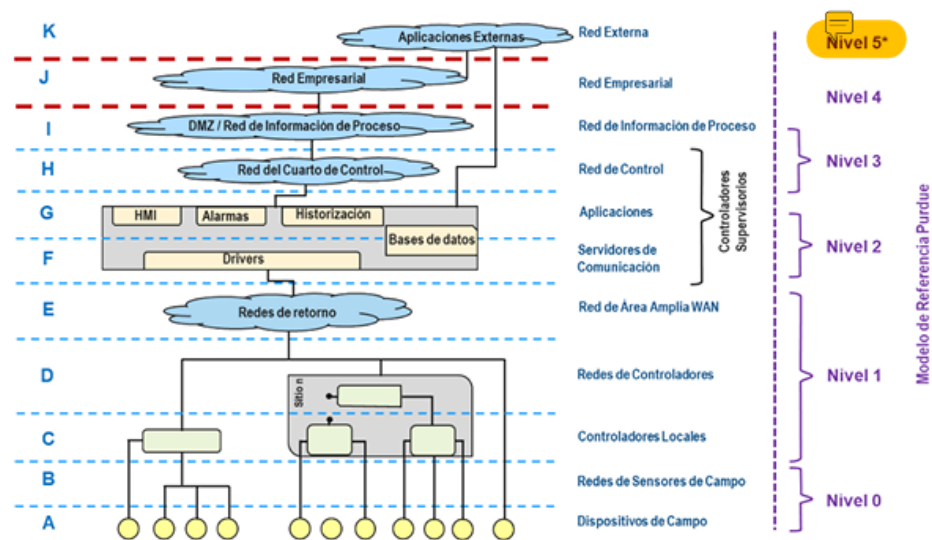


Figura N° 23. Diagrama de arquitectura del modelo SCADA - Norma ISA 112 [28].

Además, la norma ISA-112 contempla un enfoque estructurado basado en el ciclo de vida de un sistema SCADA, el cual se define como un proceso cronológico que abarca desde su concepción inicial hasta su eventual retiro o desmantelamiento. Este enfoque permite planificar, documentar y ejecutar todas las fases de manera organizada, mejorando la eficiencia, confiabilidad y mantenibilidad del sistema. ISA 112 ha desarrollado un borrador provisional del diagrama del ciclo de vida, el cual comprende ocho etapas principales:

1. Estándares del sistema: incluye la definición de la filosofía SCADA, selección de plataforma, normas de seguridad, etiquetado, cableado, criterios de programación, documentación de HMI (ISA-101), filosofía de alarmas (ISA 18.2), y estrategias de almacenamiento de datos.

2. Diseño: abarca la recolección de requerimientos, revisión de documentación existente, diseño conceptual y detallado del hardware, software y red, simulaciones, pruebas preliminares, y diseño de interfaces.

3. Desarrollo del sistema: contempla la creación de etiquetas de datos, programación del PLC y HMI, configuración de servidores y redes, validaciones funcionales y pruebas de aceptación en fábrica.

4. Desarrollo del sistema: contempla la creación de etiquetas de datos, programación del PLC y HMI, configuración de servidores y redes, validaciones funcionales y pruebas de aceptación en fábrica.

5. Fabricación y construcción de hardware: incluye la adquisición de componentes, fabricación de tableros, gabinetes y bastidores, así como las pruebas físicas de los equipos antes de su instalación.

6. Instalación y despliegue: se refiere a la instalación de hardware, cableado, configuración de instrumentos y despliegue del software en el sitio de operación.

7. Comisionamiento: consiste en verificar señales de entrada/salida, realizar pruebas en sitio (SAT y SIT), entrenar al personal, y validar que el sistema opere conforme a lo especificado.

8. Operación: etapa en la que el sistema se encuentra en servicio; incluye actividades de monitoreo, mantenimiento, soporte, actualizaciones y ajustes operativos.

9. Proceso de mejora continua: contempla acciones a largo plazo como planificación futura, auditorías, gestión del cambio (MOC), seguridad, documentación y revisión de desempeño para garantizar la evolución del sistema a lo largo del tiempo dentro de estas normas se contemplan las normas ISA 18.2 (Estándar de Gestión de Alarmas) e ISA 110 (HMI).

Norma ISA 18.2 (Estándar de Gestión de Alarmas).

La norma ANSI/ISA-18.2 establece un enfoque sistemático para el diseño y la gestión de sistemas de alarmas en instalaciones de proceso. Nace como respuesta a diversos incidentes industriales en los que se identificó que una gestión de alarmas (alarmas en exceso, prioridades mal definidas o mensajes poco claros) contribuyó a errores de operación y a situaciones inseguras. ISA-18.2 define una alarma como un medio audible y/o visible que indica al operador una desviación del proceso, una condición anormal o una falla de equipo que requiere una respuesta. Esta definición enfatiza que no toda notificación o evento del sistema debe considerarse una alarma: sólo aquellas señales que exigen una acción del operador para mantener el proceso dentro de condiciones seguras y aceptables [29].

1.4.8. Base de datos:

Una base de datos es una colección estructurada de datos. Puede contener desde una simple lista de elementos hasta grandes volúmenes de información con múltiples relaciones entre ellos. Para poder almacenar, consultar y procesar esa información de manera eficiente, es necesario contar con un sistema gestor de bases de datos (SGBD o DBMS, del inglés Database Management System). El SGBD actúa como intermediario entre el usuario o la aplicación y los datos almacenados, brindando herramientas para insertar, modificar, eliminar y consultar información de forma organizada y segura [30].

La necesidad de gestionar datos de manera eficiente es central en la computación moderna. En sistemas de supervisión y control como los SCADA, los datos generados por sensores, eventos del proceso y estados del sistema deben registrarse de forma persistente para poder ser consultados, analizados y visualizados en tiempo real o de manera histórica. Sin una base de datos, esta información se perdería al cerrar el programa o apagar el equipo.

El modelo relacional y el lenguaje SQL

En una base de datos relacional, los datos se organizan en tablas bidimensionales. Cada columna de la tabla define un atributo o campo, y cada fila representa un registro concreto con valores para cada uno de esos campos. Este modelo es la base sobre la que operan todos los sistemas gestores relacionales modernos, incluyendo MySQL [30].

La estructura tabular permite imponer restricciones sobre los datos, se puede definir que una columna no admita valores nulos (NOT NULL), que sus valores sean únicos (UNIQUE), o que una columna sea la clave primaria de la tabla (PRIMARY KEY), garantizando así la integridad de la información. Estas restricciones son fundamentales en aplicaciones de ingeniería donde un registro con datos faltantes o duplicados podría generar inconsistencias en el análisis histórico del sistema [30].

SQL (Structured Query Language, Lenguaje de Consulta Estructurado) es el lenguaje estándar para interactuar con bases de datos relacionales. Su estandarización por parte del Instituto Nacional Americano de Estándares (ANSI) desde 1986 garantiza que los comandos básicos sean compatibles entre los distintos sistemas gestores relacionales [30].

Las operaciones fundamentales de SQL se agrupan en cuatro categorías. Las instrucciones de definición (CREATE TABLE, ALTER TABLE, DROP TABLE) permiten crear y modificar la estructura de la base de datos. Las instrucciones de manipulación (INSERT,

UPDATE, DELETE) permiten agregar, modificar y eliminar registros. La instrucción de consulta (SELECT) permite recuperar datos aplicando filtros, ordenamientos y agrupaciones. Esta combinación hace de SQL una herramienta completa para gestionar el ciclo de vida completo de los datos en el sistema [30].

MySQL

MySQL es el sistema gestor de bases de datos relacionales de código abierto más utilizado del mundo. Es desarrollado, distribuido y mantenido por Oracle Corporation, siendo su software de código abierto [30].

Según el manual de referencia oficial de MySQL, el software es un sistema cliente/servidor compuesto por un servidor SQL multihilo que soporta distintos motores de almacenamiento (backends), un conjunto de programas y librerías cliente, herramientas de administración, y una amplia variedad de interfaces de programación (APIs). Esta arquitectura cliente/servidor es la que permite que múltiples aplicaciones se conecten simultáneamente al mismo servidor de base de datos y operen sobre los mismos datos [30].

MySQL soporta distintos motores de almacenamiento que determinan cómo se guardan físicamente los datos en el disco. El motor por defecto en las versiones actuales de MySQL es InnoDB. Esto significa que cada operación de escritura en la base de datos se completa en su totalidad o no se aplica, protegiendo la integridad de los datos ante fallos del sistema durante la escritura, lo que es especialmente relevante en aplicaciones de registro continuo de datos de sensores [30].

XAMPP: entorno de servidor local para el desarrollo

XAMPP es un paquete de software gratuito y de código abierto desarrollado por el proyecto Apache Friends, cuyo objetivo es proveer un entorno de servidor web completo, funcional y de fácil instalación en cualquier sistema operativo. Su nombre es un acrónimo que describe los componentes que incluye: X (para cualquier sistema operativo o cross-platform), Apache (servidor web), MariaDB/MySQL (sistema gestor de bases de datos), PHP (lenguaje de scripting del lado del servidor) y Perl (lenguaje de programación de propósito general) [31].

La idea central detrás de XAMPP es reunir en un único instalador todos los componentes necesarios para ejecutar un servidor web localmente, eliminando la necesidad de instalar y configurar cada componente por separado. Una vez instalado, el usuario puede gestionar los

servicios, iniciar o detener Apache y MySQL, desde un panel de control gráfico (XAMPP Control Panel) sin necesidad de interactuar con la línea de comandos [31].

El componente central para el almacenamiento de datos en XAMPP es el servidor MySQL. Al iniciar el servicio de base de datos desde el panel de control, XAMPP levanta una instancia del servidor MySQL que queda escuchando en el puerto configurado del equipo local, accesible desde cualquier aplicación que utilice el protocolo de comunicación de MySQL, incluyendo scripts en Python, PHP y otras herramientas de desarrollo [31].

El servidor web Apache, también incluido en XAMPP, se encarga de servir las páginas web locales y habilitar el acceso a phpMyAdmin, que es una interfaz gráfica web para administrar las bases de datos MySQL.

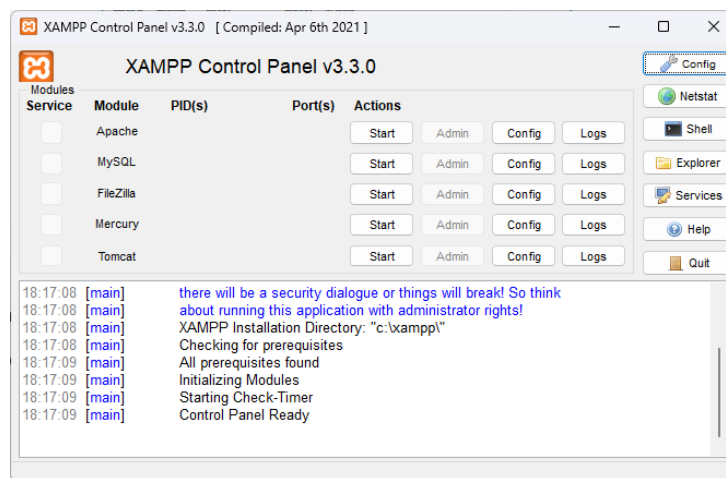


Figura N° 24. Panel de control de XAMPP.

A través de phpMyAdmin, accesible desde el navegador en la dirección localhost/phpmyadmin, el usuario puede crear bases de datos, definir tablas, insertar datos manualmente, ejecutar consultas SQL y visualizar el contenido de las tablas sin necesidad de usar la línea de comandos [31].

1.4.9. Protocolos de comunicación

Cualquier sistema que integre hardware y software necesita que sus partes intercambien información de manera ordenada. Un protocolo de comunicación es el conjunto de reglas que define cómo se envían, reciben e interpretan esos datos: sin un protocolo en común, dos dispositivos simplemente no pueden entenderse, aunque estén físicamente conectados.

A continuación, se detallan los protocolos de comunicación implementados en el proyecto de grado:

Protocolo I2C

I2C, cuyo nombre completo es Inter-Integrated Circuit (Circuito Inter-Integrado), es un protocolo de comunicación serial diseñado para conectar múltiples dispositivos electrónicos dentro de un mismo circuito, usando únicamente dos cables. Fue desarrollado por Philips Semiconductors (hoy NXP) a comienzos de los años ochenta, con la idea de que los chips de un mismo equipo pudieran comunicarse entre sí sin ocupar demasiados pines del microcontrolador [32,33].

El funcionamiento se basa en dos líneas compartidas: SCL (Serial Clock Line), que lleva la señal de reloj, y SDA (Serial Data Line), que lleva los datos. Ambas líneas son utilizadas por todos los dispositivos conectados al bus al mismo tiempo, pero sin que se produzcan conflictos, gracias a un sistema de direccionamiento: cada dispositivo tiene asignada una dirección única de 7 bits, lo que permite que distintos dispositivos convivan en el mismo par de cables sin interferirse entre sí. Siempre hay un dispositivo principal, llamado maestro, que es quien genera la señal de reloj y decide cuándo y con quién se comunica [32,33].

Para asegurar que los datos lleguen correctamente, I2C utiliza un bit de confirmación denominado ACK (Acknowledge): después de recibir cada byte de datos, el receptor responde con este bit indicando que lo recibió sin errores. Si no llega esa confirmación, el maestro sabe que algo falló. Además, el protocolo incluye un mecanismo llamado clock stretching: si un dispositivo esclavo necesita más tiempo para procesar un dato, puede mantener la línea de reloj en estado bajo hasta estar listo, evitando que el maestro le envíe más información antes de que pueda recibirla. Esta combinación de características hace a I2C especialmente robusto para conectar sensores, displays y periféricos que operan a velocidades moderadas [32].

USB

El Bus Serie Universal (USB, por sus siglas en inglés) es una de las interfaces o "cables" más comunes utilizados en el mundo para conectar todo tipo de componentes y dispositivos periféricos a las computadoras. Fue introducido al mercado en 1996 por un grupo de grandes empresas de tecnología (como Intel, Microsoft e IBM) con el objetivo de crear un estándar fácil de usar. Su diseño destaca por ofrecer una conexión sencilla, de bajo costo y dinámica para

transferir datos y energía entre computadoras, dispositivos móviles y otros aparatos electrónicos [33, 34].

Entre sus características principales se encuentran:

- Topología de estrella: Funciona como un árbol donde hay un "anfitrión" (la computadora principal) al que se le pueden conectar múltiples dispositivos a la vez. Mediante el uso de concentradores (hubs), un solo puerto principal puede llegar a soportar hasta 127 dispositivos. [34, 35].
- Comunicación bidireccional: Permite enviar y recibir datos al mismo tiempo, lo que agiliza el uso del dispositivo [34, 35].
- Diseño por capas: Internamente, la comunicación se organiza en tres "capas" (física, de enlace y de protocolo). Esto significa que el USB separa de forma inteligente las tareas: desde cómo viaja la electricidad por los cables hasta cómo se entregan los datos finales a los programas [33, 34].

Versiones y Velocidades de Transferencia:

A lo largo de los años, el protocolo USB ha evolucionado enormemente, logrando que las transferencias de datos pasen de ser muy básicas a increíblemente rápidas. Las velocidades se clasifican de la siguiente manera [34]:

- USB 1.0 (Low Speed y Full Speed): Fueron las primeras versiones y alcanzaban velocidades de 1.5 Megabits por segundo (Mbps) para dispositivos lentos (como mouses o teclados) y hasta 12 Mbps [33].
- USB 2.0 (High Speed): Lanzado en el año 2000, representó un gran salto tecnológico, alcanzando velocidades de hasta 480 Mbps, lo que permitía transferir fotos y documentos pesados mucho más rápido [33].
- USB 3.0 (SuperSpeed): Introducido en 2008, este estándar multiplicó la capacidad de transferencia diez veces más rápido respecto a su predecesor. Alcanza velocidades teóricas de hasta 5.0 Gigabits por segundo (Gbps) (en la práctica unos 400 Megabytes por segundo). Además de ser excepcionalmente veloz, el USB 3.0 se diseñó con un manejo avanzado de energía que permite a los dispositivos

gastar menos batería cuando no están transmitiendo información de forma activa [33, 34, 35].

- El protocolo TCP/IP no es un único protocolo, sino una familia compuesta por cientos de protocolos de comunicación de red que, organizados de forma jerárquica en cuatro capas (enlace, red, transporte y aplicación), permiten organizar la comunicación de datos [36].

TCP/IP

El protocolo TCP/IP no es un único protocolo, sino una familia compuesta por cientos de protocolos de comunicación de red que, organizados de forma jerárquica en cuatro capas (enlace, red, transporte y aplicación), permiten organizar la comunicación de datos [36].

El nombre de este estándar proviene de sus dos componentes principales:

- IP (Internet Protocol): Es el protocolo central de la capa de red. Su función principal es añadir un encabezado a los datos a enviar, empaquetarlos y utilizar las direcciones IP para enrutar o dirigir esa información hacia su destino correcto en la red [36].
- TCP (Transmission Control Protocol): Situado en la capa de transporte, es un protocolo orientado a la conexión que se encarga de ofrecer un flujo de datos confiable de extremo a extremo, incluso si la red por la que viajan no lo es [36].

La diferencia fundamental entre TCP y otros protocolos de transporte como UDP (User Datagram Protocol) radica en el nivel de garantía que ofrecen. Antes de enviar cualquier dato, TCP exige un estricto proceso de establecimiento de comunicación mediante un "saludo de tres pasos". Además de establecer la conexión, TCP incluye la confirmación de recepción de información y mecanismos de control de flujo [36].

Por el contrario, UDP no está orientado a la conexión; simplemente envía los paquetes de datos de un origen a un destino sin garantizar que la información llegue realmente al otro lado. La ventaja de UDP es que, al carecer de procesos estrictos de fiabilidad, tiene muy poca sobrecarga y es altamente eficiente, lo que a veces es ideal para sistemas con recursos limitados donde la confirmación de llegada se puede gestionar de otras formas [36].

1.4.10. Marco normativo: Higiene, seguridad y calidad aplicada

El diseño, montaje y validación experimental de sistemas mecatrónicos que integran conversión estática de potencia, generadores fotovoltaicos y entornos de supervisión computarizada deben concebirse bajo lineamientos normativos nacionales e internacionales, garantizando la integridad de los operadores, la confiabilidad funcional de los equipos y la mitigación del impacto ambiental.

A. Higiene, seguridad laboral e instalaciones eléctricas

- Ley Nacional N° 19.587 de Higiene y Seguridad en el Trabajo (351/79): Constituye el marco legal regulatorio en la República Argentina que rige sobre los entornos de trabajo y laboratorios de ensayo. Establece pautas obligatorias para el resguardo de las personas frente a riesgos de origen eléctrico, ventilación y orden del puesto de trabajo, y la obligatoriedad en el uso de elementos de protección personal (EPP) durante la manipulación de circuitos bajo tensión y fuentes de potencia [37].
- IRAM 2073 / Reglamentación AEA 90364: Conjunto normativo aplicable a la ejecución de instalaciones eléctricas en baja tensión. Define requerimientos de aislación galvánica, dimensionamiento y codificación cromática de conductores por capacidad de corriente admisible, vinculación a tierra de masas metálicas conductoras y protecciones de desconexión frente a sobrecorrientes y contactos directos o indirectos [38].
- ISO 45001: Norma internacional para los sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo. Provee lineamientos para la identificación proactiva de peligros y la evaluación de riesgos operacionales durante el conexionado de cargas, manipulación de bancos de acumulación eléctrica y accionamiento de mecanismos con partes móviles [39].

B. Estándares aplicados a sistemas y componentes fotovoltaicos

- IEC 62446: Estándar que fija los requisitos mínimos para ensayos, documentación y mantenimiento en sistemas fotovoltaicos. Establece los protocolos normalizados para pruebas de continuidad de conductores,

verificación de polaridad, medición de la tensión de circuito abierto y corriente de cortocircuito [40].

- IEC 61215 e IEC 61730: Normas internacionales que homologan la aptitud del diseño, la durabilidad mecánica y la seguridad eléctrica de los módulos fotovoltaicos comerciales. Los paneles implementados cuentan con certificaciones bajo normas IRAM/IEC (conforme se observa en sus hojas de especificaciones técnicas), asegurando una aislación Clase II ante rigores térmicos, radiación UV e intemperie.

1.5. Justificación

La implementación de sistemas de seguimiento solar surge como una solución para maximizar la eficiencia de los paneles fotovoltaicos (PV por sus siglas en inglés *photovoltaic*), superando las limitaciones de los sistemas fijos. Los paneles solares con sistema de seguimiento solar incrementan significativamente la captación de energía al minimizar el ángulo de incidencia entre los rayos solares y la superficie del panel, lo que optimiza la potencia generada [41]. Además, pruebas experimentales mencionan que un sistema de seguimiento solar con algoritmo MPPT aumenta la generación en un 57.55% respecto a sistemas estáticos [42]. Esto resuelve uno de los principales inconvenientes de los paneles solares comerciales: su baja eficiencia (<18% en condiciones estándar). El uso de técnicas MPPT mejora la eficiencia del sistema fotovoltaico entre un 30% y 40%, al garantizar que los paneles operen siempre en su punto de máxima potencia, incluso ante variaciones en la irradiación solar o la temperatura [43].

Además, al implementar un sistema de monitoreo SCADA se tiene un aumento en la eficiencia y vida útil de los paneles fotovoltaicos. Demostraron que la integración de un sistema SCADA en parques eólicos reduce los costos de operación y mantenimiento entre un 25% y 35%, gracias a la capacidad de monitoreo remoto y detección de anomalías, logrando optimizar el rendimiento energético. Aunque el estudio se centra en turbinas eólicas, los principios de SCADA (para el análisis de datos en tiempo real y la generación de alertas) son aplicables a sistemas fotovoltaicos, por lo que se esperan resultados igual de satisfactorios [44].

CAPÍTULO 2: Descripción del sistema seguidor solar

El sistema del seguidor solar, el cual puede verse en la figura 26, está constituido por 2 partes fundamentales:

Los paneles solares: En este capítulo se describen las características eléctricas de los paneles solares utilizados en el sistema fotovoltaico, presentando las especificaciones técnicas de los módulos empleados y los parámetros de operación más relevantes bajo condiciones estándar de prueba. Asimismo, se analiza el comportamiento del generador fotovoltaico mediante la obtención de las curvas características de corriente-voltaje (I-V) y potencia-voltaje (P-V) para distintos niveles de irradiancia. A partir de estas curvas se estudia la influencia de la radiación solar sobre las principales variables eléctricas del sistema, como la corriente, el voltaje y la potencia entregada por los paneles, permitiendo identificar su punto de máxima potencia bajo diferentes condiciones de operación. Los resultados obtenidos permiten caracterizar el desempeño del generador fotovoltaico y constituyen la base para el diseño, selección y adecuación de los componentes del convertidor de potencia desarrollado en este trabajo, garantizando que su operación sea compatible con las características eléctricas del sistema fotovoltaico.



Figura N° 25. Panel Solar LV-Energy [41].

Estructura del seguidor solar: El sistema implementado corresponde a un seguidor solar de un solo eje, desarrollado como trabajo final por un alumno de la facultad, el cual permite

modificar la inclinación de los paneles fotovoltaicos alrededor del eje horizontal. Los paneles se encuentran fijados a una estructura metálica solidaria al eje de rotación, permitiendo que ambos se desplacen como un único conjunto.

El movimiento del eje es realizado mediante un motorreductor, el cual proporciona el torque necesario para desplazar los módulos fotovoltaicos y posicionarlos según el ángulo requerido. La transmisión mecánica entre el motor y el eje permite realizar movimientos lentos y controlados, adecuados para el seguimiento de la trayectoria del sol durante el día.

El posicionamiento del seguidor es controlado por un microcontrolador ESP32, encargado de recibir el ángulo proveniente del sistema SCADA. A partir de este valor, el ESP32 genera las señales de control necesarias para accionar el motor y desplazar el eje hasta alcanzar la posición deseada. De esta manera, el sistema orienta continuamente los paneles solares para maximizar la captación de radiación solar.

La comunicación entre el sistema SCADA y el microcontrolador ESP32, así como el protocolo utilizado para el envío de la referencia angular, se describen detalladamente en el Capítulo 7.



Figura N° 26. Seguidor Solar utilizado en esta tesis.

2. Panel Solar

2.1. Descripción

Los paneles solares utilizados para este trabajo final de grado son de la marca LV-energy, más específicamente el modelo LVE60PS. En la figura 27 se presentan las especificaciones del panel solar bajo condiciones estándar de prueba (STC (Standard Test Conditions): irradiancia de 1000 W/m^2 y temperatura de 25°C).



Figura N° 27. Ficha técnica panel solar LV-Energy.

Debido a que la estructura del seguidor solar fue diseñada para operar con dos paneles solares de las mismas características; en la tabla N°2 se visualizan los valores correspondientes a una conexión en serie entre ellos.

Tabla N° 2. Valores del panel solar en una conexión en serie.

Parámetro	Símbolo	Valor
Voltaje de circuito abierto	V_{oc}	76 V
Corriente de cortocircuito	I_{cc}	9.28 A
Voltaje en MPP	V_{mpp}	60.8 V
Corriente en MPP	I_{mpp}	8.1 A
Potencia pico	P_{mpp}	520 W

2.2. Simulación de curvas

Con el objetivo analizar el comportamiento del panel solar para diferentes valores de irradiancia, se realizó una simulación en Simulink (Matlab) con los parámetros de la tabla anterior.

A partir de ello se obtuvieron las curvas de corriente-voltaje (figura 28) y potencia-voltaje (figura 29) para distintos valores de irradiancia: 1000, 900, 600 y 400 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$. Estas curvas permiten observar la variación de la corriente, voltaje y potencia máxima que puede entregar el panel solar en función de la irradiancia.

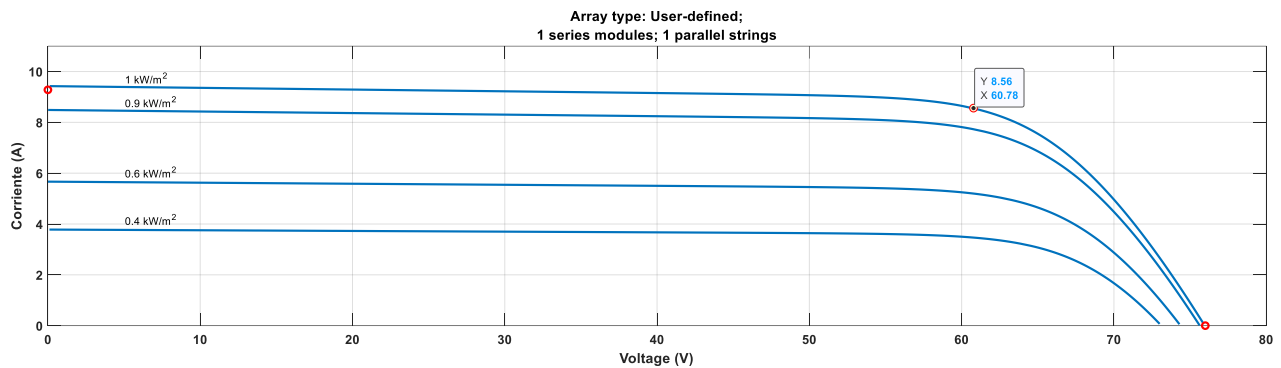


Figura N° 28. Curva de corriente-voltaje (Panel solar LV-Energy LVE60PS).

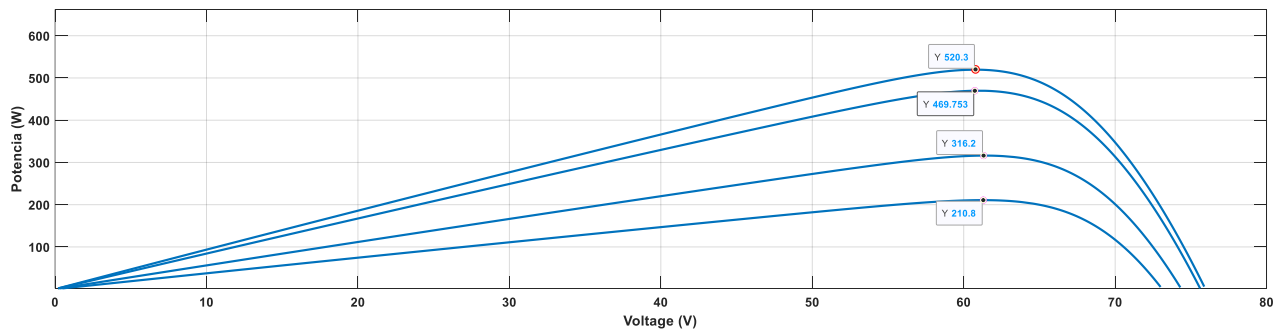


Figura N° 29. Curva de potencia-voltaje (Panel solar LV-Energy LVE60PS).

A continuación, en la tabla N°3 se detallan los valores de corriente, voltaje y potencia obtenidos.

Tabla N° 3. Valores obtenidos a partir de la simulación.

Irradiancia ($\frac{W}{m^2}$)	Corriente (I)	Voltaje (V)	Potencia (W)
1000	8.56	60.78	520.30
900	7.73	60.73	469.75
600	5.15	61.31	316.2
400	3.43	61.29	210.80

A partir de los resultados obtenidos puede observarse que la potencia generada por el panel solar disminuye de manera proporcional a medida que se reduce la irradiancia. Además, se aprecia que la corriente entregada por el sistema presenta una disminución significativa frente a la disminución de irradiancia, mientras que el voltaje se mantiene relativamente constante alrededor del punto de máxima potencia.

Los resultados obtenidos permiten evaluar el desempeño energético del sistema fotovoltaico y sirven como base para posteriores cálculos y análisis que se utilizarán en posteriores capítulos.

CAPÍTULO 3: Convertidor de potencia

En la práctica profesional supervisada (PPS) desarrollado por uno de los autores de esta tesis, se diseñó un convertidor de potencia, más precisamente un convertidor interleaved de 3 piernas (los planos esquemáticos se encuentran en el anexo A), que cuenta con la posibilidad de configurarse como convertidor buck. Esto se desarrolló en conjunto con el LCA, debido a que surgió la posibilidad de aprovechar un proyecto de investigación que estaban desarrollando, el cual presentaba especificaciones y criterios de diseño muy similares a los necesarios para este proyecto.

Este enfoque no solo permitió reutilizar avances técnicos ya validados, sino que también facilitó la integración de conocimientos y experiencias adquiridas. Además, la colaboración en conjunto permitió reducir costos, disminuyendo los tiempos de desarrollo y aportando mayor confiabilidad técnica.

El uso del convertidor de potencia resulta fundamental para adaptar la energía suministrada por los paneles fotovoltaicos a las condiciones de operación requeridas por el sistema. Asimismo, el convertidor permite implementar el algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), ya que mediante la variación de su ciclo de trabajo es posible modificar el punto de operación del generador fotovoltaico. De esta manera, el sistema puede ajustar continuamente las condiciones de funcionamiento de los paneles para aprovechar la potencia disponible en cada condición de operación.

Debido a que algunos de los componentes utilizados originalmente en el proyecto no eran los más adecuados para los requerimientos de esta tesis, en esta sección se realizaron los cálculos necesarios para seleccionar y reemplazar dichos componentes, adaptando el convertidor a las necesidades del proyecto de grado.

El convertidor está compuesto por tres etapas principales: una etapa de sensado, encargada de medir los voltajes y corrientes de entrada y salida; una etapa de potencia, conformada por inductores y capacitores; y una etapa de control, integrada por los drivers y los MOSFETs responsables de la regulación y conmutación del sistema.

En la figura 30 se observa el convertidor interleaved de tres piernas, constituido fundamentalmente por tres convertidores buck conectados en paralelo y operando desfasados. Esto resulta especialmente ventajoso para este trabajo, ya que al utilizar únicamente una de sus

piernas se obtiene un convertidor buck. Adicionalmente, al tratarse de un convertidor síncrono, se logra una mayor eficiencia debido a la reducción de pérdidas asociadas a los diodos tradicionales.

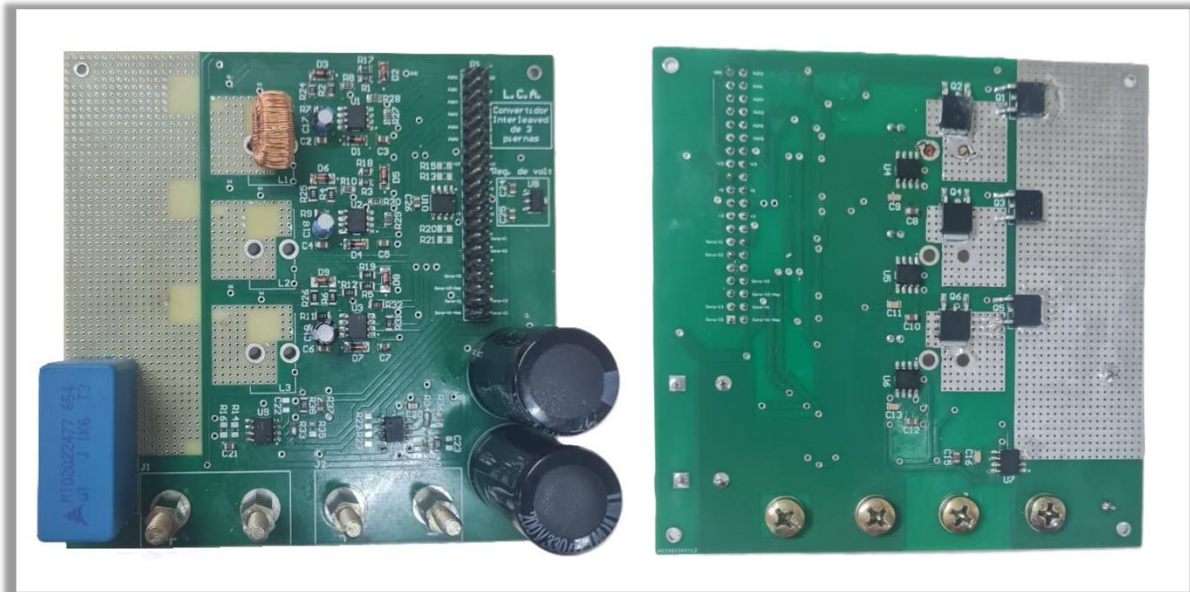


Figura N° 30. Convertidor Interleaved de 3 piernas.

3.1. Cálculos de componentes

En esta etapa se contempla la adaptación de los elementos correspondientes a las etapas de potencia y de sensado, de acuerdo con los requerimientos del proyecto. Las principales modificaciones realizadas se detallan a continuación:

- Etapa de sensado: La adquisición del voltaje se realiza mediante un divisor resistivo. Para la medición de corriente se utiliza el sensor ACS712 de 20 A. Asimismo, se implementa un divisor resistivo que permite limitar la tensión de salida a un valor máximo de 3,3 V, de manera que esta pueda ser medida correctamente mediante el convertidor analógico-digital (ADC) del microcontrolador.

Cabe aclarar que, en los planos esquemáticos correspondientes a las etapas de sensado, se observa la inclusión de un amplificador operacional. Sin embargo, este componente no fue utilizado en la implementación final del proyecto.

- Etapa de potencia: Los principales componentes de la etapa de potencia (el inductor toroidal y los capacitores electrolíticos), fueron seleccionados y adaptados de acuerdo con los requerimientos y las condiciones de operación específicas del proyecto.

3.1.1. Cálculo del divisor resistivo – voltaje

Para el cálculo del divisor resistivo se tuvo en cuenta el valor máximo de voltaje a circuito abierto entregado por el panel solar el cual es de 76V. A partir de este valor se calculan las resistencias que componen al divisor resistivo.

Para las mediciones de voltaje y corrientes se utilizó un microcontrolador STM32F03C8T6 cuyo valor máximo de entrada admitido por el ADC es de 3.3V, por lo tanto, se calculan las resistencias para que no superen dicho valor.

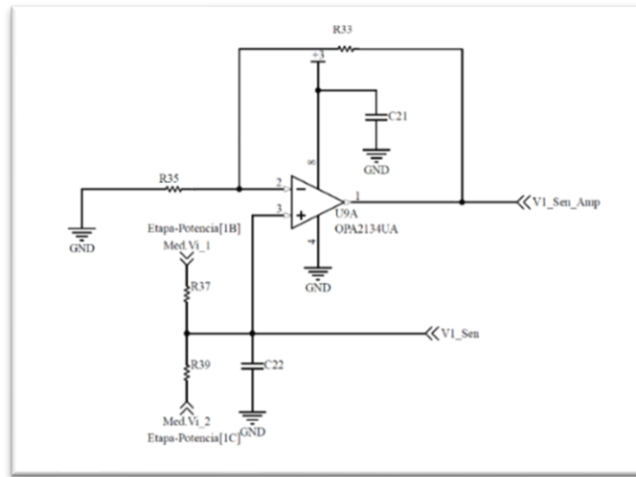


Figura N° 31. Circuito del divisor resistivo

A continuación, se detallan el procedimiento realizado:

$$V1_{sen} = V_{panel} \cdot \frac{R_{39}}{R_{37} + R_{39}} \quad (25)$$

$$\Rightarrow \frac{V1_{sen}}{V_{panel}} = \frac{3.3V}{76V} = 0.03947 = \frac{R_{39}}{R_{37} + R_{39}} \quad (26)$$

Suponiendo $R_{39} = 18k\Omega$ en (26)

$$\Rightarrow 0.03947 = \frac{18k\Omega}{R_{37} + 18k\Omega} \Rightarrow R_{37} \approx 18k\Omega ; R_{37} \approx 440k\Omega \quad (27)$$

Finalmente se verifica que con las resistencias calculadas no se superen los 3.3V de salida:

$$V_{1Sen} = 76 \cdot \frac{18k\Omega}{440k\Omega + 18k\Omega} = 2.986V \quad (28)$$

Verifica

Para el divisor resistivo de la salida se utilizaron los mismos valores de resistencia, con el objetivo que el convertidor de potencia pueda soportar el voltaje máxima en caso de que el ciclo de trabajo sea muy cercano o igual a uno.

3.1.2. Cálculo del divisor resistivo - Corriente

Para este caso tendremos que el valor máximo de voltaje entregado por el sensor de corriente es de 5V, como en el caso anterior al ser superior a los 3.3V soportados por el ADC se decide utilizar un divisor resistivo a la salida del sensor.

A continuación, se detallan los pasos para determinar sus valores.

$$I_{1Sen} = V_{I1} \cdot \frac{R_1}{R_2 + R_1} \quad (29)$$

$$\Rightarrow \frac{I_{1Sen}}{V_{I1}} = \frac{3.3V}{5V} = 0.66 = \frac{R_1}{R_2 + R_1} \quad (30)$$

Suponiendo $R_1 = 18k\Omega$ en (30)

$$\Rightarrow 0.66 = \frac{18k\Omega}{R_2 + 18k\Omega} \Rightarrow R_1 \approx 18k\Omega ; R_2 \approx 10k\Omega \quad (31)$$

Como en el caso anterior se verifica que con las resistencias calculadas no se superen los 3.3V de salida:

$$I_{1Sen} = 5V \cdot \frac{18k\Omega}{10k\Omega + 18k\Omega} = 3.214V \quad (32)$$

Verifica

3.1.3. Cálculo del inductor y capacitor.

Parámetros del convertidor

Para calcular el capacitor e inductor es necesario establecer los valores de operación los cuales se detallan a continuación en la tabla N°4.

Tabla N° 4. Valores de operación.

Parámetro	Símbolo	Valor
Voltaje de entrada (Vmpp)	V_{in}	60.8 V
Voltaje de salida deseada	V_o	24 V
Resistencia de carga	R	10 Ω
Frecuencia de conmutación	f_s	20.000 Hz
Período de conmutación	T_s	50 μs
Criterio de rizado de corriente (diseño)	$\Delta i_L \%$	10%
Criterio de rizado de voltaje (diseño)	$\Delta V_o \%$	1%

Dado que el objetivo de este trabajo de grado es que el convertidor de potencia se pueda utilizar, ya sea, para conectar una carga resistiva como así también para alimentar un banco de baterías, se decidió realizar los cálculos considerando una voltaje de salida de 24V.

Cálculo del convertidor

Para un convertidor Buck ideal en modo de conducción continua, la relación entre voltaje de salida y la entrada corresponde al ciclo de trabajo (D):

$$D = V_o / V_{in} = 24V / 60.8V = 0.3947 \rightarrow 39.47\% \quad (33)$$

Cálculo de potencia y corriente de salida

$$I_o = V_o / R = 24V / 10\Omega = 2.4 A \quad (34)$$

$$P_o = V_o^2 / R = 576W / 10\Omega = 57.6 W \quad (35)$$

Dimensionamiento del inductor

En modo de conducción continua, la corriente media del inductor es igual a la corriente de salida. Aplicando el balance de volt-segundos durante t_{on} :

$$\Delta i_L = 10\% \times I_o = 10\% \times 2.4 A = 0.24 A \text{ (pico a pico, criterio de diseño)} \quad (36)$$

$$L = (V_{in} - V_o) \times \frac{D}{(\Delta i_L \times f_s)} \quad (37)$$

$$\Rightarrow L = (60.8V - 24V) \cdot \frac{0.3947}{(0.24A \times 20.000Hz)} = 3.026 mH \quad (38)$$

Por lo tanto, utilizando un voltaje de salida de 24V el valor del inductor corresponde a 3.026 mH

Las corrientes límite en el inductor para un voltaje de salida de 24V son los siguientes:

$$I_{L_{max}} = 2.4A + \frac{0.24A}{2} = 2.52\text{ A} \quad (39)$$

$$I_{L_{min}} = 2.4A - \frac{0.24A}{2} = 2.28\text{ A} \quad (40)$$

Cálculo de inductancia crítica – límite CCM/DCM

La inductancia mínima para sostener CCM a plena carga con 24V a la salida es:

$$L_{crit} = (1 - D) \cdot \frac{R}{(2 \cdot f_s)} = 0.6053 \cdot \frac{10\Omega}{(2 \cdot 20000\text{Hz})} = 151.3\text{ }\mu\text{H} \quad (41)$$

Todo inductor con $L > 151.3\text{ }\mu\text{H}$ garantizará un modo de conducción continua utilizando una carga de $10\text{ }\Omega$.

Dimensionamiento del capacitor

Para un convertidor Buck en modo de conducción continua con capacitor ideal (sin ESR), el rizado de voltaje de salida es:

$$\Delta V_{o_c} = \frac{\Delta i_L}{(8 \cdot C \cdot f_s)} \quad (42)$$

Despejando C para $\Delta V_o = 1\% \cdot V_o = 0.24\text{ V}$:

$$C = \frac{\Delta i_L}{(8 \cdot \Delta V_o \cdot f_s)} = \frac{0.24A}{(8 \cdot 0.24\text{ V} \cdot 20\,000\text{Hz})} = 6.25\text{ }\mu\text{F} \quad (43)$$

Por lo tanto, para un voltaje de salida de 24V el capacitor debe tener un valor como mínimo de $C = 6.25\text{ }\mu\text{F}$

3.2. Componentes Utilizados

Los valores de diseño teórico del inductor y capacitor fueron obtenidos para un rizado de corriente del 10% y un rizado de voltaje del 1%. Sin embargo, los componentes disponibles para este trabajo final se visualizan en la tabla N°5, por la razón de disponibilidad.

Tabla N° 5. Valores de los componentes utilizados

Elemento	Valor real
Inductor	167 μH
Capacitor	430 μF

Como observación, si bien los cálculos y dimensionamiento se realizaron de forma teórica, debe aclararse que se utilizaron para las pruebas componentes que se encontraban a disposición en el laboratorio y que no coincidían con los óptimos requeridos, pero aceptables para las pruebas realizadas.

3.3. Ensayo experimental 1: Calibración de sensores

El objetivo de esta etapa es realizar la correcta adquisición de datos a través de los sensores de voltaje y corriente. Como se mencionó anteriormente para la medición de voltaje se utilizó un divisor resistivo capaz de soportar el voltaje proveniente del panel. En cuanto a la medición de corriente, se optó por utilizar el sensor ACS712 de 20A. Además, de implementar el divisor resistivo, el cual permite limitar el voltaje de salida a un máximo de 3,3 V, de modo que pueda ser medido con el ADC del microcontrolador.

En la figura 32 se visualiza el entorno de trabajo utilizado, para estas pruebas se decidió utilizar una resistencia variable, conectada a la salida del convertidor de potencia, se utilizaron tres fuentes regulables para alimentar la entrada, los sensores y drivers, además de un osciloscopio al cual se le conecto una pinza amperométrica y una sonda de voltaje, con el fin de medir y verificar los valores de corriente y voltaje obtenidos por los sensores del convertidor de potencia.

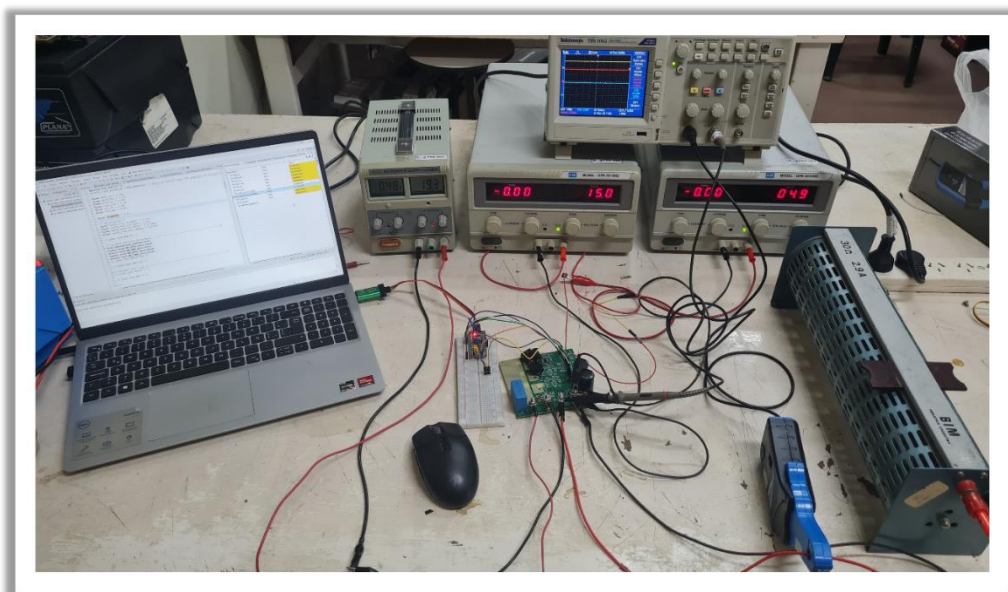


Figura N° 32. Entorno de trabajo – primer ensayo.

Se decidió utilizar un ciclo de trabajo del 50%, obteniendo de esta manera aproximadamente la mitad del voltaje de entrada en la salida y el doble de corriente, manteniendo la relación de potencia.

Con el fin de evaluar la exactitud de los sensores implementados se presentan las diferentes pruebas realizadas, en las cuales se compararon los valores de entrada proporcionados por la fuente de alimentación y los valores de salida medidos mediante el osciloscopio, con los valores registrados por los sensores del convertidor de potencia.

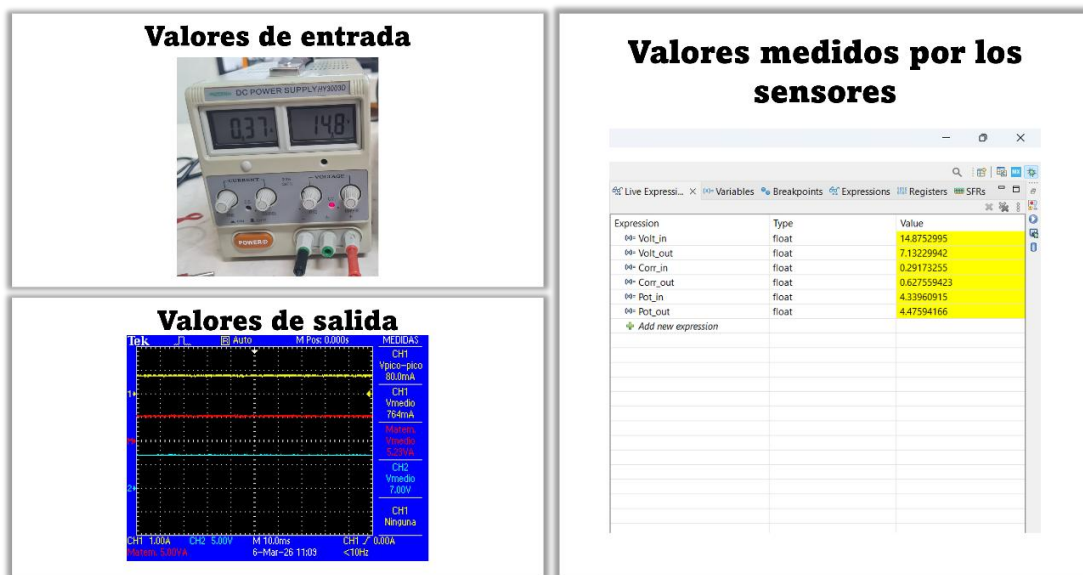


Figura N° 33. Prueba 1 - Voltaje de entrada 14.8V - CH1: corriente de salida [A]; CH2: voltaje de salida [V].

En las tablas 6,7,8,9, 10 y 11 se presentan los valores registrados, así como los errores absolutos y relativos calculados para cada magnitud medida

Tabla N° 6. Valores obtenidos en la prueba 1.

Prueba 1				
Magnitud	Valor de referencia	Sensor	Error absoluto	Error relativo
Voltaje de entrada [V]	14.80	14.87	0.08	0.47%
Corriente de entrada [A]	0.37	0.29	0.08	21.62%
Voltaje de salida [V]	7.00	7.13	0.13	1.85%
Corriente de salida [A]	0.76	0.62	0.14	18.42%

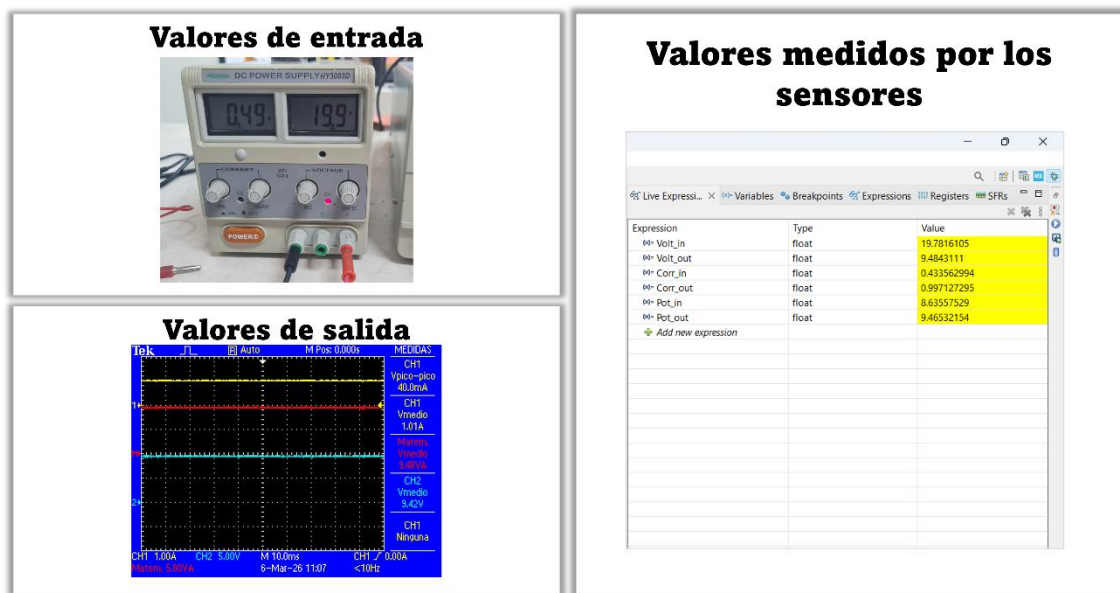


Figura N° 34. Prueba 2 – Voltaje de entrada 19.9V - CH1: corriente de salida [A]; CH2: voltaje de salida [V].

Tabla N° 7. Valores obtenidos en la prueba 2.

Prueba 2				
Magnitud	Valor de referencia	Sensor	Error absoluto	Error relativo
Voltaje de entrada [V]	19.90	19.78	0.12	0.60%
Corriente de entrada [A]	0.49	0.43	0.06	12.24%
Voltaje de salida [V]	9.42	9.48	0.06	0.63%
Corriente de salida [A]	1.01	0.99	0.02	1.98%

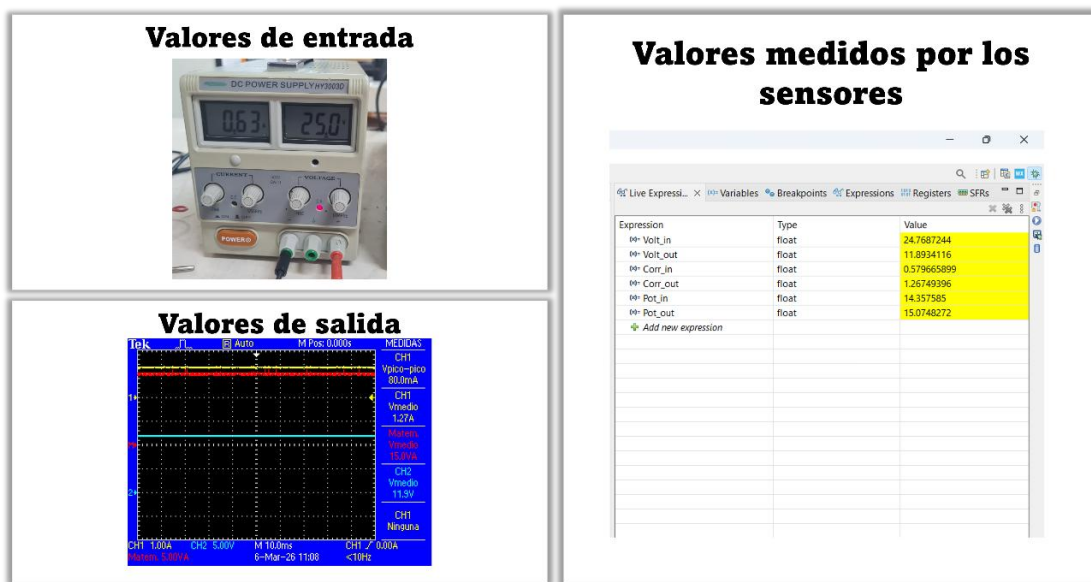


Figura N° 35. Prueba 3 - Voltaje de entrada 25V - CH1: corriente de salida [A]; CH2: voltaje de salida [V].

Tabla N° 8. Valores obtenidos en la prueba 3.

Prueba 3				
Magnitud	Valor de referencia	Sensor	Error absoluto	Error relativo
Voltaje de entrada [V]	25.00	24.76	0.24	0.96%
Corriente de entrada [A]	0.63	0.57	0.06	9.52%
Voltaje de salida [V]	11.9	11.89	0.01	0.08%
Corriente de salida [A]	1.27	1.26	0.01	0.78%

Luego, se decidió medir los valores de alimentación utilizando los elementos de medición conectados al osciloscopio, con el fin de contar con una referencia de comparación empleando los mismos sensores tanto en la entrada como en la salida, como se observa en las figuras 36, 37 y 38.

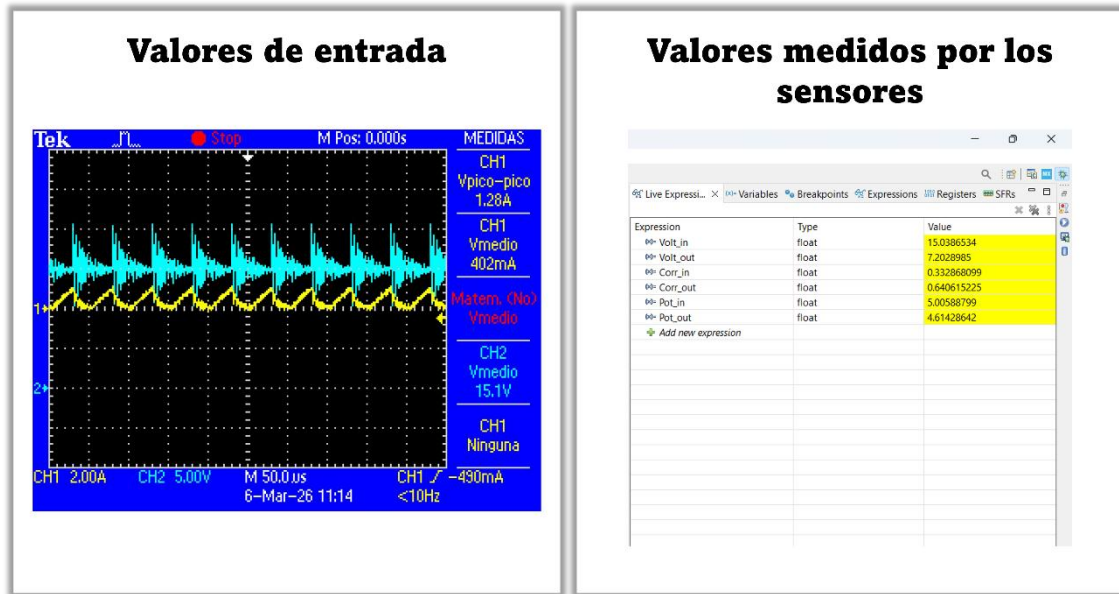


Figura N° 36. Prueba 4 - Voltaje de entrada 15.1V - CH1: corriente de salida [A]; CH2: voltaje de salida [V]

Tabla N° 9. Valores obtenidos en la prueba 4.

Prueba 4				
Magnitud	Valor de referencia	Sensor	Error absoluto	Error relativo
Voltaje de entrada [V]	15.10	15.03	0.07	0.46%
Corriente de entrada [A]	0.40	0.33	0.07	17.5%

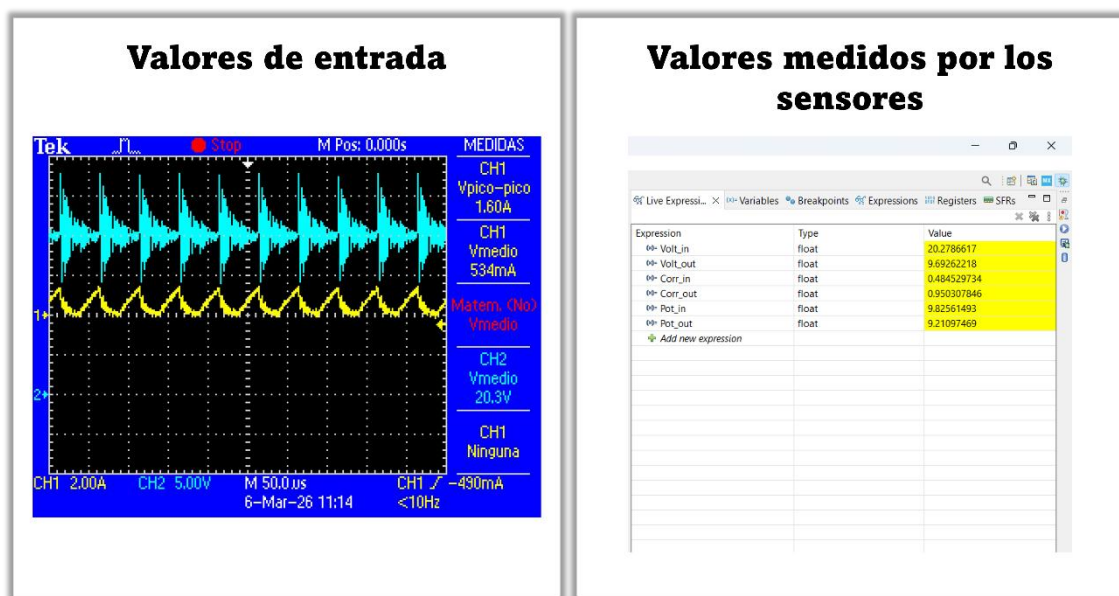


Figura N° 37. Prueba 5 - Voltaje de entrada 20.3V - CH1: corriente de entrada [A]; CH2: voltaje de entrada [V].

Tabla N° 10. Valores obtenidos en la prueba 5.

Prueba 5				
Magnitud	Valor de referencia	Sensor	Error absoluto	Error relativo
Voltaje de entrada [V]	20.30	20.27	0.03	0.14%
Corriente de entrada [A]	0.53	0.48	0.05	9.43%

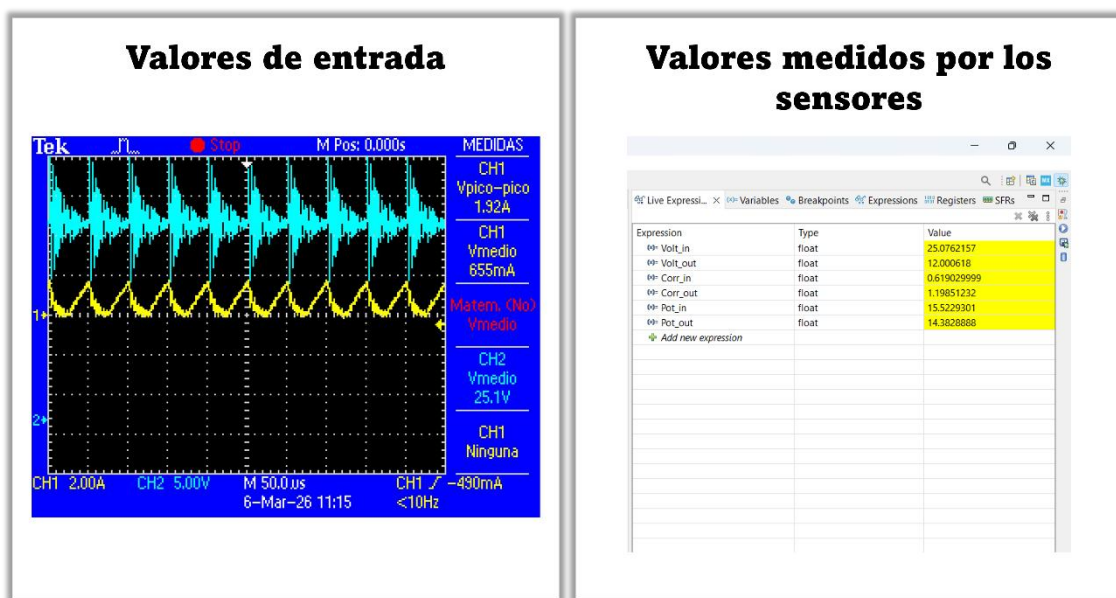


Figura N° 38. Prueba 6 – Voltaje de entrada 25.1V CH1: corriente de entrada [A]; CH2: voltaje de entrada [V].

Tabla N° 11. Valores obtenidos en la prueba 6.

Prueba 6				
Magnitud	Valor de referencia	Sensor	Error absoluto	Error relativo
Voltaje de entrada [V]	25.10	25.07	0.03	0.11%
Corriente de entrada [A]	0.65	0.62	0.03	4.61%

A partir de las pruebas realizadas, se verificó el funcionamiento de los sensores, tanto de entrada como de salida. Se pudo identificar que las mediciones de voltaje realizadas presentan valores muy cercanos a los medidos con los instrumentos de referencia. Por otro lado, los sensores de corriente presentan una mayor diferencia en valores bajos de corriente; sin embargo, a medida que esta aumenta, su exactitud mejora.

Con el fin de incrementar esta exactitud, posteriormente se incorporaron técnicas de filtrado sobre las señales provenientes de los sensores. Asimismo, se implementó un promediador de muestras, permitiendo atenuar el efecto del ruido y de las variaciones presentes en las mediciones. Dando como resultado, lecturas más estables y cercanas a los valores reales.

Verificado el correcto funcionamiento de los sensores, se procede a comprobar el funcionamiento del convertidor de potencia bajo condiciones similares a las de operación.

3.4. Ensayo experimental 2: Verificación de la adaptación del convertidor de potencia

El propósito de este ensayo es garantizar la correcta operación del convertidor de potencia al trabajar con valores de corriente y voltaje muy similares a los de operación.

Para ello se trabajó con 4 paneles conectados en serie con las características de la figura 39.



Figura N° 39. Especificaciones panel solar Kyocera.

Es importante mencionar que al trabajar con 4 paneles conectados en serie el voltaje se suma mientras que la corriente mantiene su valor, por lo tanto, los valores de operación son los siguientes:

Tabla N° 12. Parámetros del panel solar Kyocera.

Parámetro	Símbolo	Valor
Voltaje en el punto de máxima potencia	V_{mpp}	$16.9V \cdot 4 = 67.6 V$
Corriente en el punto de máxima potencia	I_{mpp}	$7.10 A$
Potencia en el punto de máxima potencia	P_{mpp}	$120 W \cdot 4 = 480 W$

A partir de ello se establece el entorno de trabajo (figura 40), donde se utilizaron 2 fuentes de alimentación regulables para alimentar los circuitos de activación de los MOSFET y los sensores de corriente, dos resistencias variables conectadas en paralelo, un osciloscopio y un multímetro para visualizar el voltaje y corriente de entrada, además del convertidor de potencia junto al microcontrolador STM32.

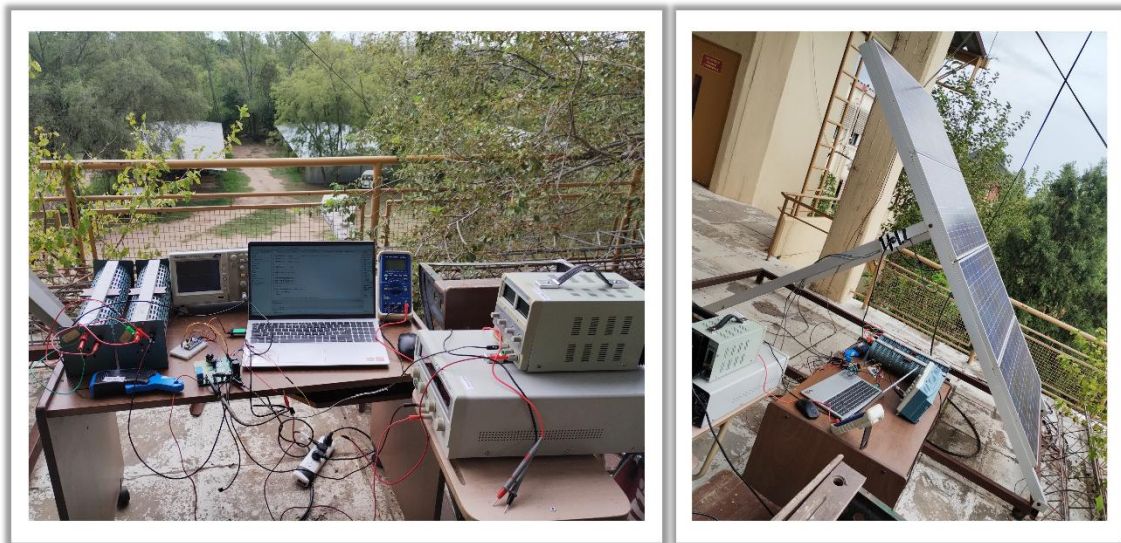


Figura N° 40. Entorno de trabajo

En la figura 41 se observan las resistencias variables conectadas en paralelo, se decidió utilizar esta configuración con el objetivo de dividir la corriente que circula por las mismas, ya que cada resistencia variable soporta 3 [A]. Se ajustó el valor de las resistencias a 5 [Ω] con el objetivo de trabajar con valores de corriente muy cercanos a los de cortocircuito.



Figura N° 41. Valor de resistencias variables.

A continuación, figura 42, se observan las condiciones de operación durante el ensayo. Utilizando un sensor de irradiancia Solar Power Meter modelo SM206, se obtuvo una irradiancia de $743 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ aunque esta fue variando a valores más bajos durante el ensayo realizado.

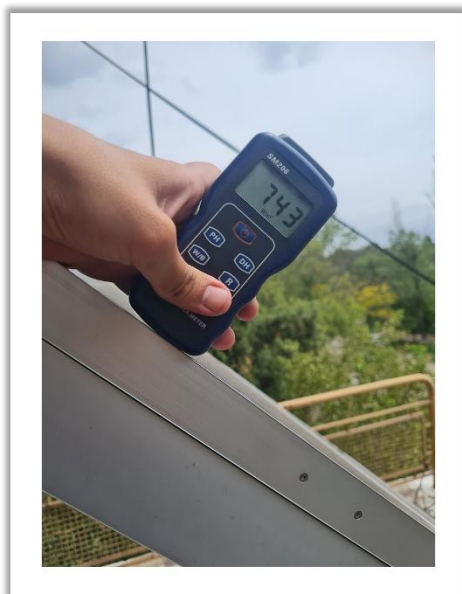


Figura N° 42. Valores de irradiancia.

Luego se obtuvieron los valores máximos del panel sin carga, es decir el voltaje a circuito abierto y la corriente de cortocircuito, con el objetivo de determinar los valores con los que se hará el ensayo como se observa a continuación.

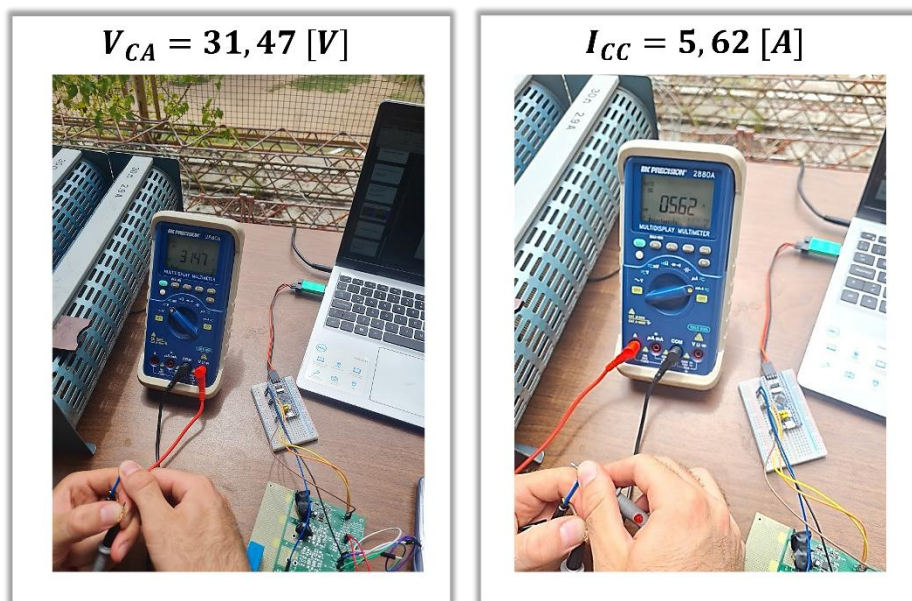


Figura N° 43. Voltaje de circuito abierto y corriente de cortocircuito.

Establecidos los rangos de operación se inicia con las pruebas correspondientes.

Prueba 1 – Carga conectada con un ciclo de trabajo del 20%

La primera prueba consistió en trabajar con un ciclo de trabajo bajo de forma que se obtenga un voltaje de entrada muy similar al voltaje de circuito abierto, con el fin de evaluar el correcto funcionamiento del convertidor de potencia con valores de voltaje altos.

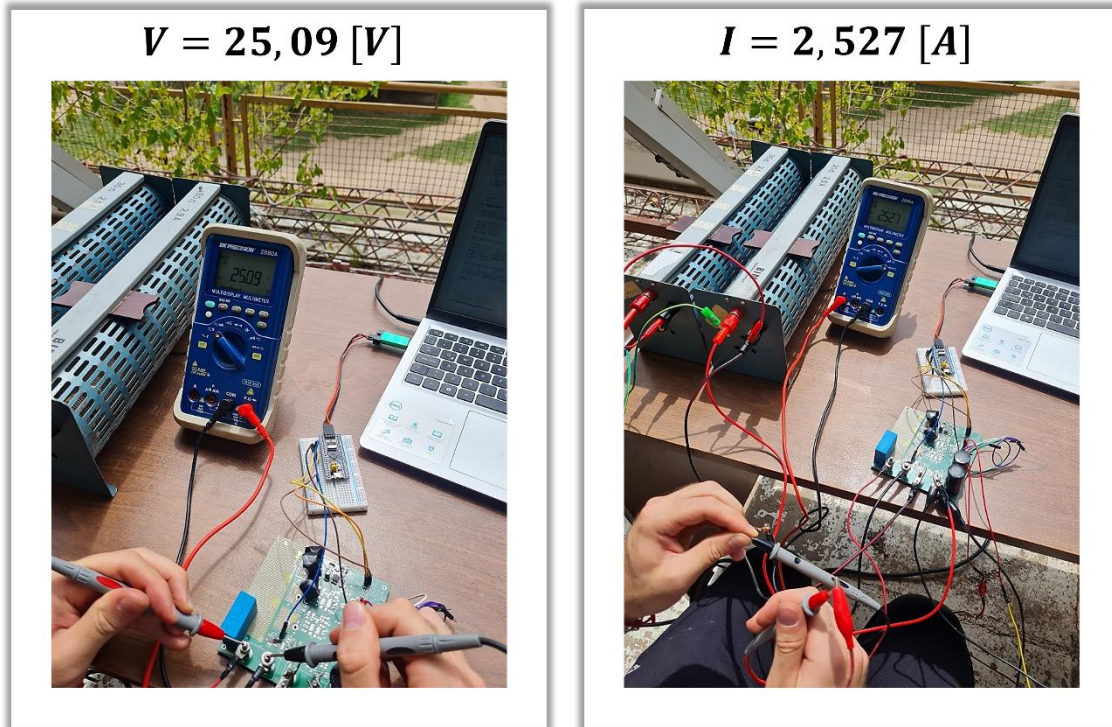


Figura N° 44. valores de voltaje y corriente con un ciclo de trabajo del 20%.

Prueba 2 - Carga conectada con un ciclo de trabajo del 90%

La segunda prueba consistió en trabajar con un ciclo de trabajo muy cercano a uno, de esta forma la corriente de entrada es muy próxima la de cortocircuito mientras que el voltaje disminuye, como se observa en la figura 45.

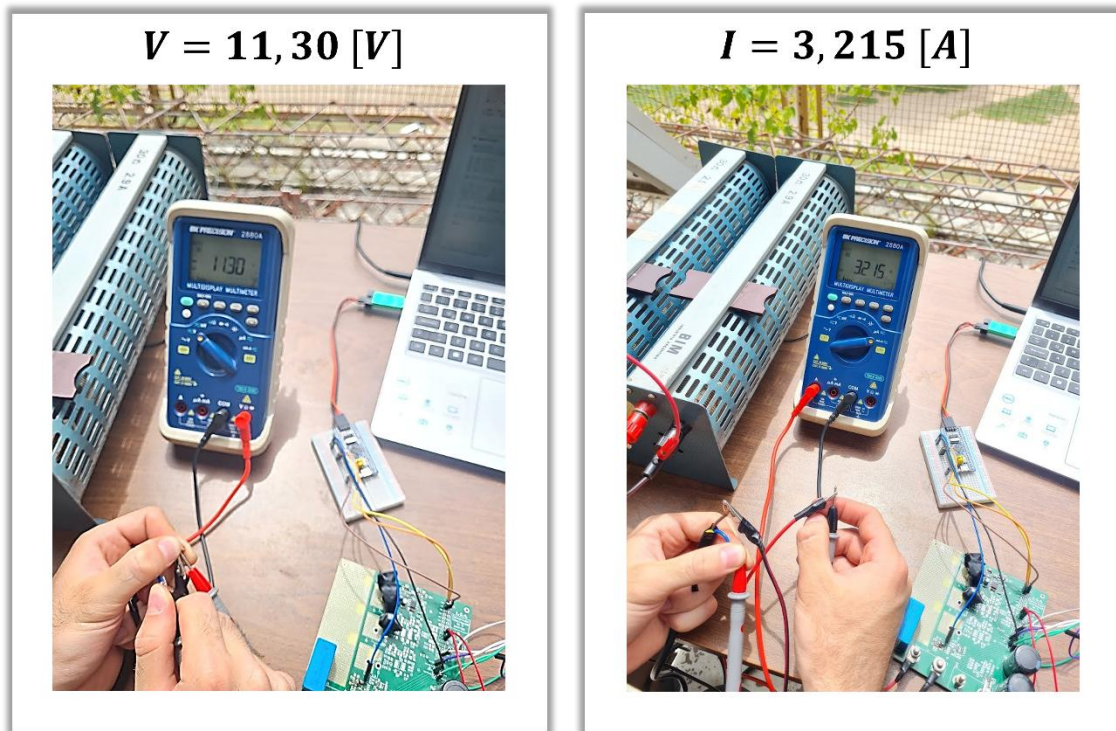


Figura N° 45. Valores de voltaje y corriente con un ciclo de trabajo del 90%.

Aunque inicialmente se esperaba trabajar con valores de voltaje más cercanos a los 60 [V] y 7 [A], valores cercanos al de operación, esto no pudo ser así debidos a las condiciones meteorológicas del día.

La realización de estos ensayos permite validar el correcto desempeño de los sensores y de los demás componentes del convertidor de potencia. Dicha validación constituye un requisito fundamental para el posterior desarrollo e implementación del controlador de voltaje, el algoritmo MPPT y del sistema SCADA.

CAPÍTULO 4: Diseño e implementación de controlador de voltaje

4. Controlador de voltaje

En este capítulo se presenta el diseño e implementación del controlador de voltaje utilizado para regular el voltaje de salida del convertidor reductor (Buck), el cual es alimentado por los paneles solares. Debido a que el voltaje suministrada por los paneles varía en función de las condiciones ambientales, principalmente la irradiancia y la temperatura, resulta necesario implementar una estrategia de control que permita mantener una salida estable frente a dichas variaciones y a los cambios de carga.

La utilización de un controlador de voltaje mejora el desempeño dinámico del convertidor, reduce el error en estado estacionario y garantiza que el voltaje de salida permanezca cercana al valor de referencia, proporcionando una alimentación adecuada para la etapa posterior del sistema. En este capítulo se obtendrá el modelado matemático del sistema, los criterios de diseño del controlador, su implementación y el análisis de su desempeño mediante simulaciones y resultados experimentales.

4.1. Modelo promediado del convertidor

Para poder controlar el voltaje de salida del convertidor buck a partir del ciclo de trabajo, debemos obtener la función de transferencia que representa la dinámica del sistema, para ello debemos entender el funcionamiento del convertidor buck representado en la figura 46.

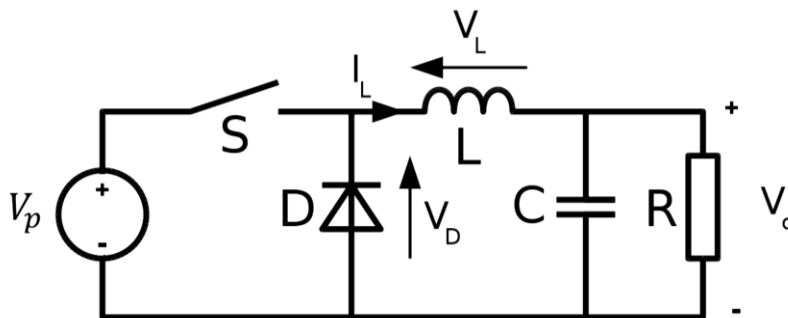


Figura N° 46. Circuito de un convertidor buck.

Definimos las variables en la tabla N°13:

Tabla N° 13. Variables del convertidor buck.

Variable	Símbolo	Variable	Símbolo
Voltaje de entrada	V_p	Inductor	L
Voltaje de salida	V_o	Interruptor (transistor)	S
Carga	R	Diodo	D
Capacitor	C		

El principio de funcionamiento consiste en un interruptor que puede tener dos estados, encendido (ON) o apagado (OFF), los cuales serán controlados por una señal PWM. Para el primer estado (ON) figura 47, cuando el interruptor conduce, el diodo esta polarizado en inversa, por lo que el voltaje en el inductor estará dada por la ecuación (44), mientras que la corriente por la ecuación (45)

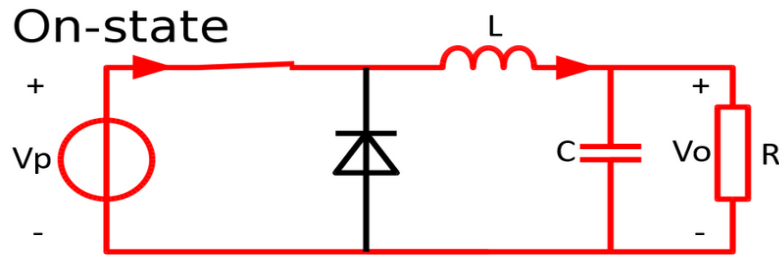


Figura N° 47. Estado encendido del interruptor.

$$V_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} = V_p - V_o \quad (44)$$

$$i_L = i_c + i_r \quad (45)$$

Para el segundo estado (OFF) figura 48, cuando el interruptor deja de conducir el voltaje en el inductor invierte su polaridad ecuación (46), de esta forma el diodo comienza a conducir ya que esta polarizado en directa, mientras que la corriente que circula por el capacitor esta dado por la ecuación (47).

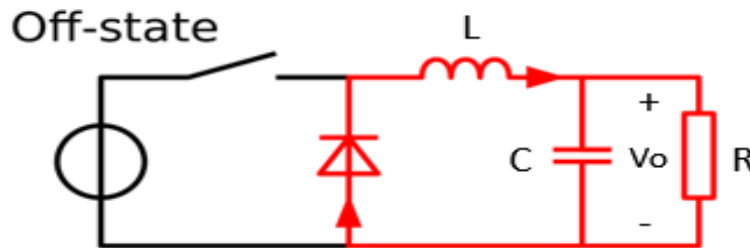


Figura N° 48. Estado apagado del interruptor.

$$V_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} = -V_o \quad (46)$$

$$i_c = C \cdot \frac{dV_o}{dt} = i_l - \frac{V_o}{R} \quad (47)$$

Obtenidas las ecuaciones de voltaje y corriente tanto del inductor como del capacitor, se combinan las mismas con el objetivo de obtener el modelo promediado que representa el comportamiento del sistema en un solo ciclo.

Por lo tanto, a partir de las ecuaciones (44, 45) y (46, 47) se obtiene el modelo promediado del voltaje en el inductor y la corriente en el capacitor como se puede observar en la ecuación 48 y 49 respectivamente.

$$V_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} = V_p \cdot u - V_o \quad (48) \quad i_c = C \cdot \frac{dV_o}{dt} = i_l - \frac{V_o}{R} \quad (49)$$

Donde el término u hace referencia al ciclo de trabajo, cuando su valor sea 1 la llave estará cerrada y cuando sea 0 la llave estará abierta.

Una vez obtenido el modelo promediado se aplica la transformada de Laplace a las ecuaciones 48 y 49 quedando las mismas de la siguiente manera.

$$V_L(S) = L \cdot I(S) = V_p \cdot U(S) - V_o \quad (50) \quad I_c(S) = C \cdot V_o(S) = I_L - \frac{V_o}{R} \quad (51)$$

Finalmente igualando las ecuaciones 50 y 51 se obtiene la función de transferencia que relaciona el voltaje de salida con el ciclo de trabajo.

$$\frac{V_o(S)}{U(S)} = \frac{\frac{V_p}{L \cdot C}}{S^2 + \frac{1}{R \cdot C} \cdot S + \frac{1}{L \cdot C}} \quad (52)$$

4.2. Diseño del controlador de voltaje

Conociendo la función de transferencia de nuestra planta es posible desarrollar un controlador, para ello resulta fundamental determinar la ubicación de los polos y ceros de nuestro sistema mediante el L.G.R. (Lugar geométrico de las raíces). Para el análisis, se adoptan los siguientes parámetros de la planta:

Tabla N° 14. Parámetros de la planta.

Parámetro	Símbolo	Valor
Voltaje del panel	V_p	60.78 V
Resistencia	R	10 Ω
Inductor	L	167 μH
Capacitor	C	430 μF

Reemplazando estos valores en la función de transferencia, la ecuación (53) queda de la siguiente manera:

$$G(s) = \frac{846.4 \times 10^6}{s^2 + 232.56 \cdot s + 13925.63 \times 10^3} \quad (53)$$

En la siguiente imagen se visualiza los polos de la F.T. en el L.G.R.:

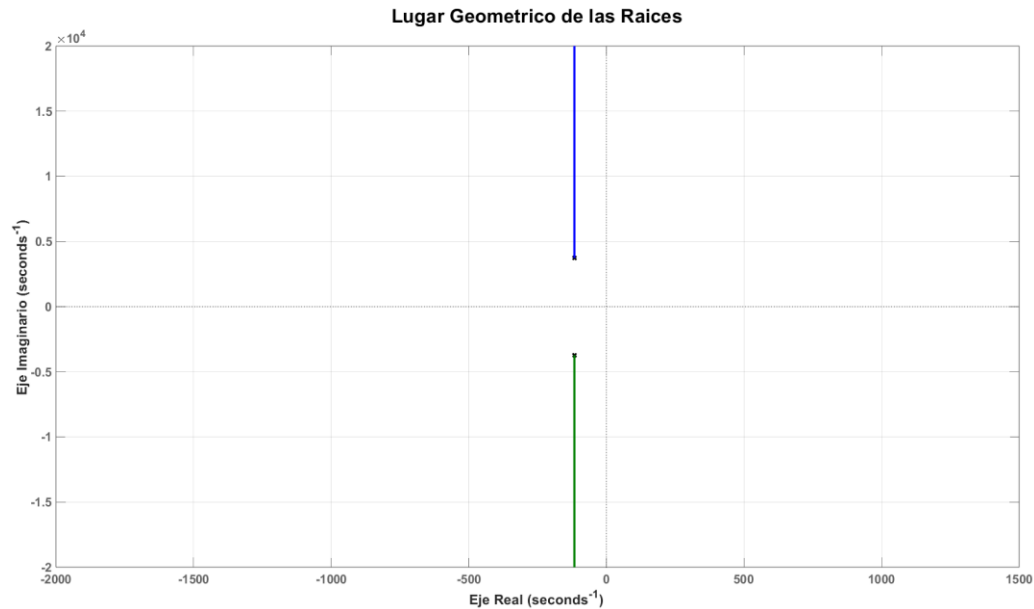


Figura N° 49. Lugar Geométrico de las Raíces.

Donde se observa que el sistema es estable en tiempo continuo debido a que los polos del sistema se ubican en el semiplano izquierdo. Dado que el controlador se implementa en un microcontrolador, el diseño debe realizarse en tiempo discreto. Por ello, se discretiza la planta $G(s)$ mediante la transformada Z (con período de muestreo T_s), obteniendo $G_{d(z)}$.

Utilizando la función c2d de Matlab se discretizo la planta, cuyos argumentos de entrada están formados por: la función de transferencia en tiempo continuo $G(s)$, el tiempo de muestreo T_s y el método de discretización (de forma predeterminada, se utiliza el método ZOH que es un retenedor de orden cero).

Para el caso del tiempo de muestreo T_s , se eligió un valor de $T_s = 0.00005 \text{ seg} = \frac{1}{20\text{kHz}}$, ya que una frecuencia de conmutación de 20 kHz se encuentra en el límite superior o ligeramente

por encima del rango de audición humana. De esta manera, las vibraciones mecánicas asociadas a la conmutación de los MOSFET y de los componentes magnéticos no generan ruido audible perceptible.

Además, esta frecuencia es comúnmente empleada en convertidores electrónicos de potencia porque representa un equilibrio adecuado entre velocidad de respuesta, pérdidas de conmutación y reducción del ruido acústico.

Por lo tanto, la ecuación nos queda de la siguiente manera:

$$G_d(z) = \frac{1.051 z + 1.047}{z^2 - 1.954 z + 0.9884} \quad (54)$$

Para comparar el modelo en tiempo continuo con su versión discreta, se aplica un escalón unitario a ambos y se analizan sus respuestas temporales bajo las mismas condiciones:

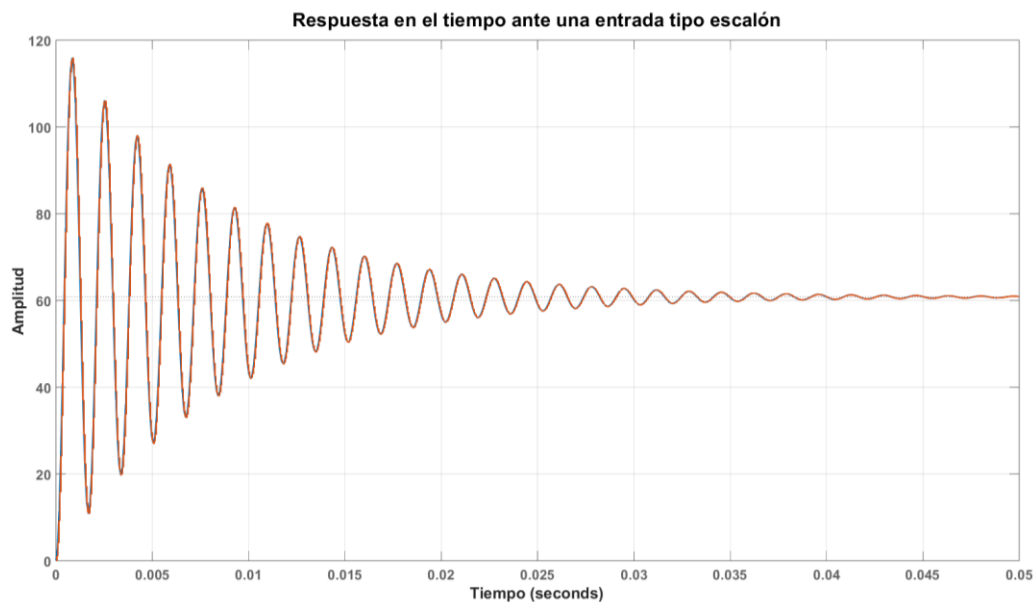


Figura N° 50. Respuesta en el tiempo ante una entrada tipo escalón.

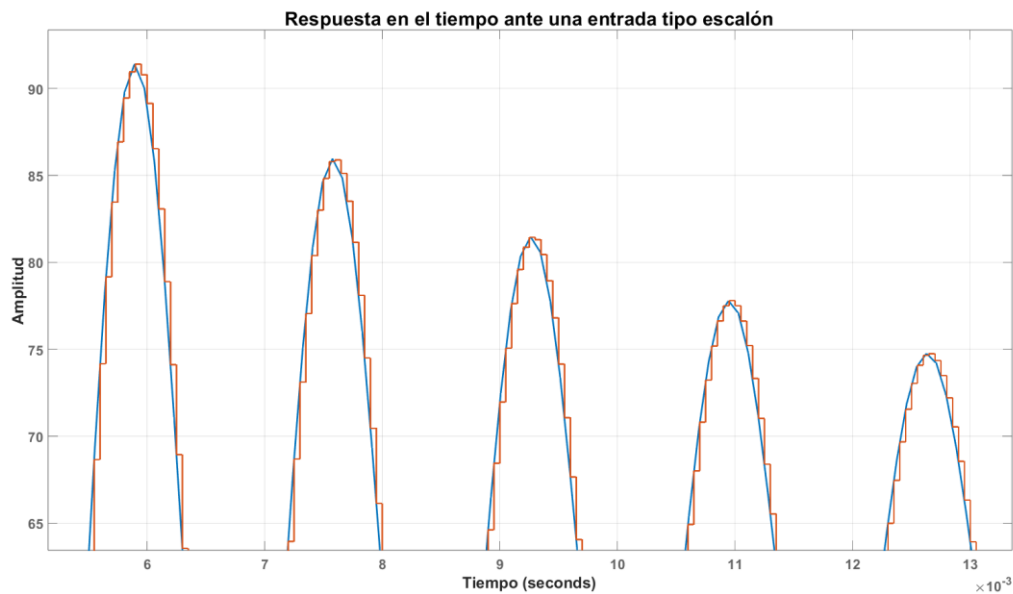


Figura N° 51. Respuesta en el tiempo ante una entrada tipo escalón ampliada.

Como se observa, ambas respuestas (continua y discreta) convergen a la referencia de 60.78 V. A partir de ello se adoptan los siguientes criterios de diseño:

- Sobrepaso: 0% (con la intención de evitar picos de voltaje).
- Error en estado estable del 0%
- Disminuir tiempo de asentamiento

Con estos criterios y empleando la herramienta Sisotool de MATLAB, se procede al diseño del controlador en el plano Z. En figura 52, 53 y 54 se visualizan la ubicación de los polos y ceros en el plano unitario del sistema sin controlar

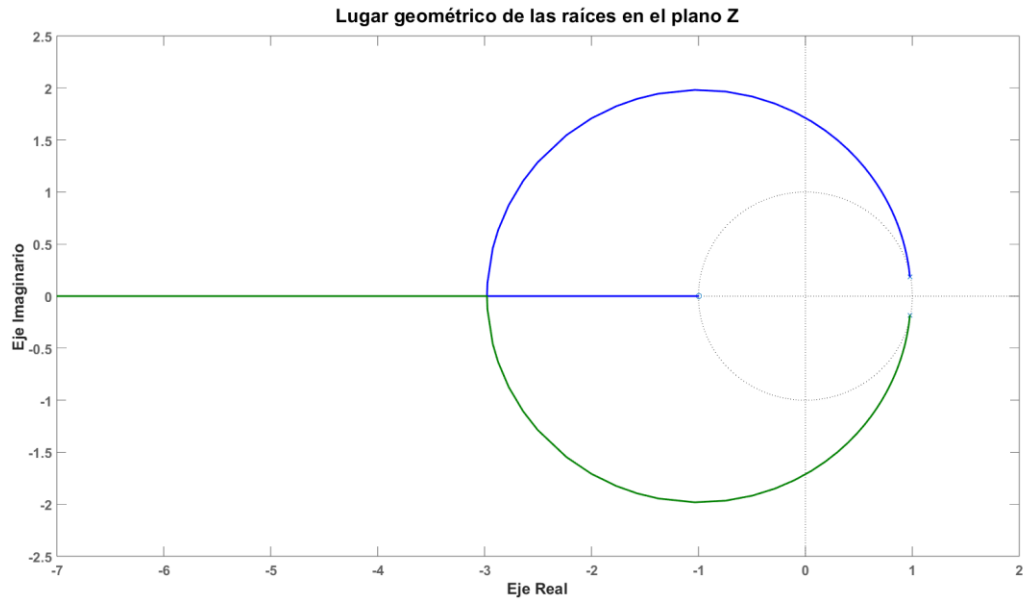


Figura N° 52. Lugar geométrico de las raíces en el plano Z.

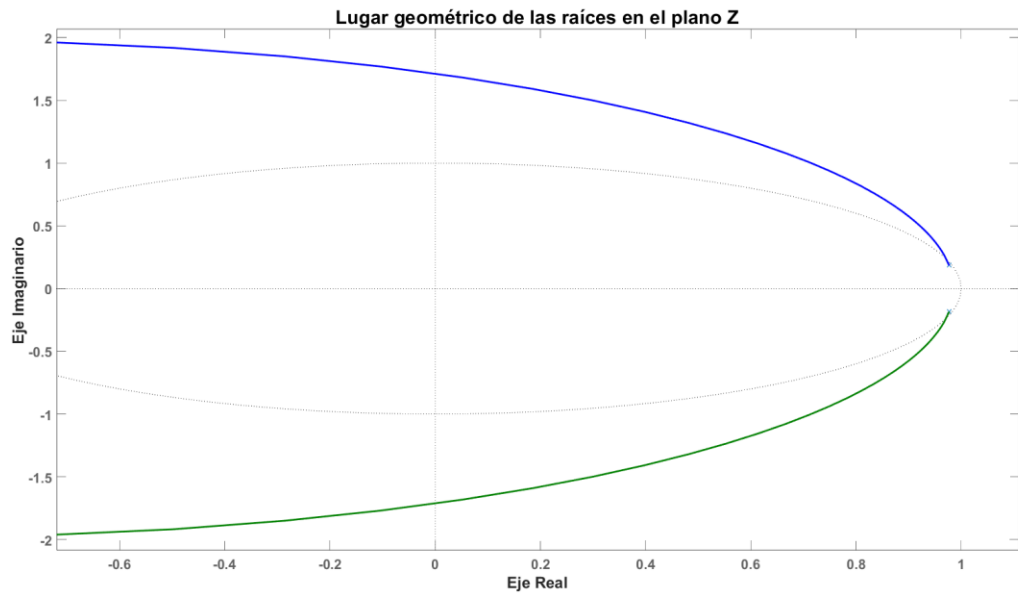


Figura N° 53. Lugar geométrico de las raíces en el plano Z ampliando en sus polos.

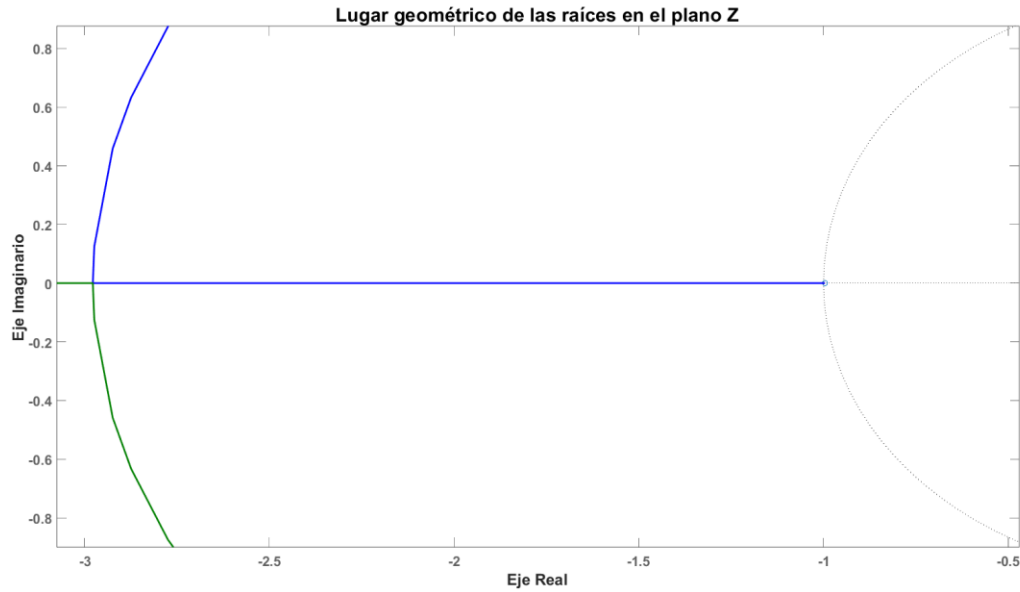


Figura N° 54. Lugar geométrico de las raíces en el plano Z ampliando en su cero.

Considerando los resultados anteriores, se lleva a cabo el diseño del controlador. Donde, la estrategia es atenuar el efecto de los polos complejos dominantes del sistema no controlado mediante la colocación de ceros complejos del controlador en el plano Z próximos (no exactamente coincidentes) a dichos polos. Además, se incorporó un integrador con el fin de eliminar el error en estado estable y cumplir con las especificaciones de diseño establecidas.

Antes de implementar el controlador, es imprescindible garantizar que sea realizable, es decir, que el orden del denominador de su función de transferencia sea igual o superior al del numerador, por lo tanto, se añadió un polo real adicional, cumpliendo de esta forma con la condición como se observa en la ecuación 56.

Recordando la expresión:

$$C_z = \frac{b_0 + b_0 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{a_0 + a_0 z^{-1} + \dots + a_n z^{-mn}} \text{ con } n \geq m \quad (55)$$

Se verifica el requisito de propiedad $n \geq m$:

$$C = \frac{0.0066177 \cdot (z^2 - 1.934 z + 0.9675)}{(z - 1)(z + 0.5)} \quad (56)$$

A continuación, en la figura 55, se visualiza el diseño del controlador:

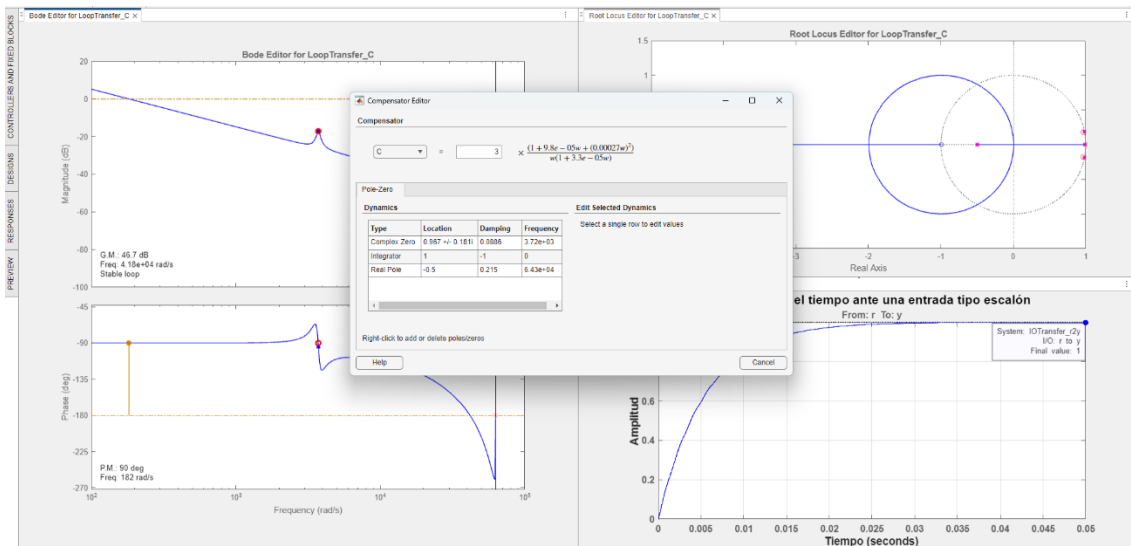


Figura N° 55. Diseño del controlador en Matlab.

La implementación y su efecto en el sistema se visualiza en las figuras 56 y 57.

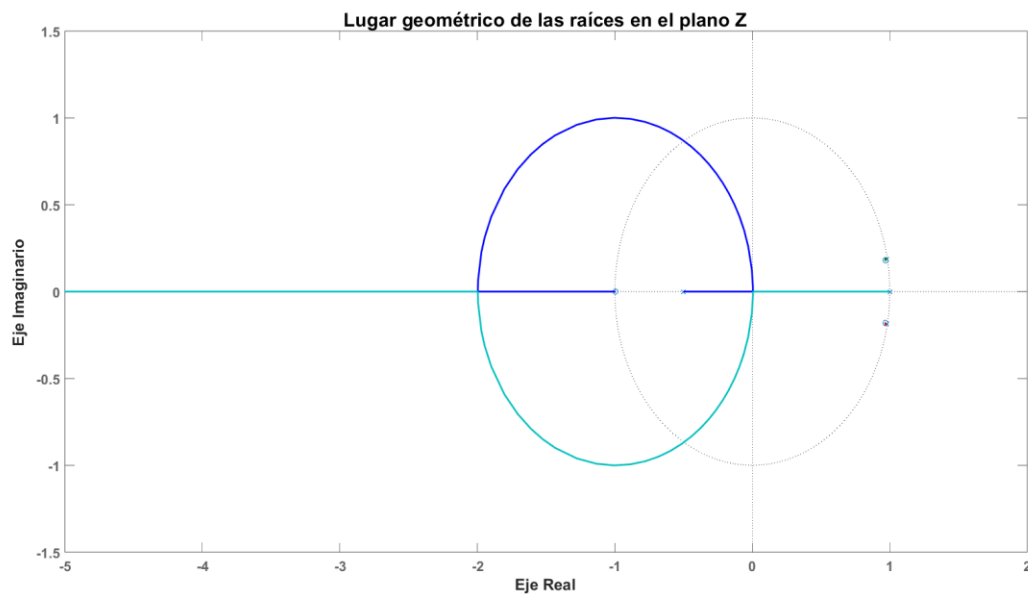


Figura N° 56. Efectos del controlador en el lugar geométrico de las raíces.

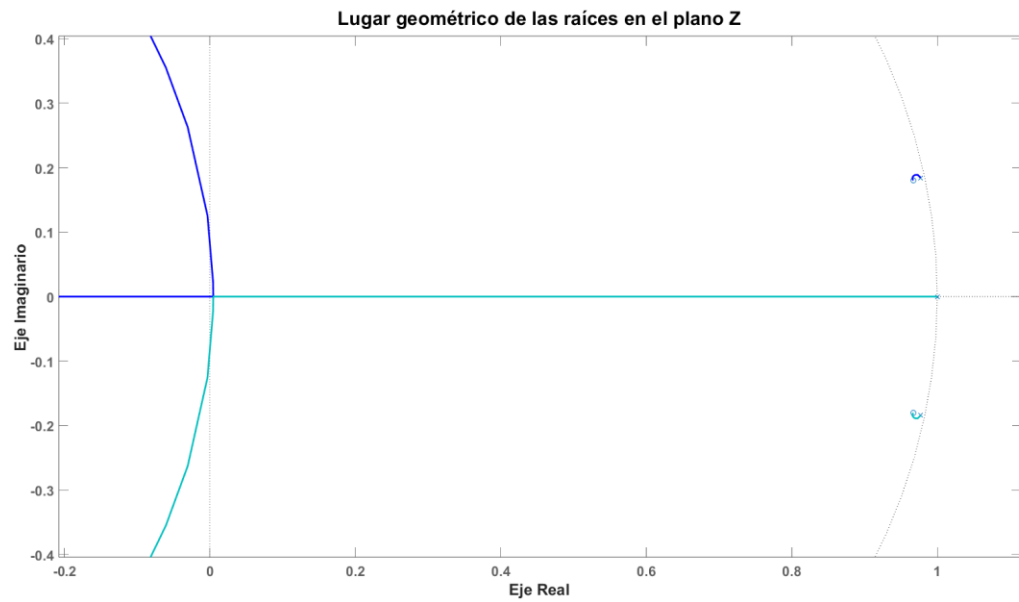


Figura N° 57. Efectos del controlador en el lugar geométrico de las raíces ampliado.

El controlador satisface los criterios de diseño definidos, como se observa en la figura 58.

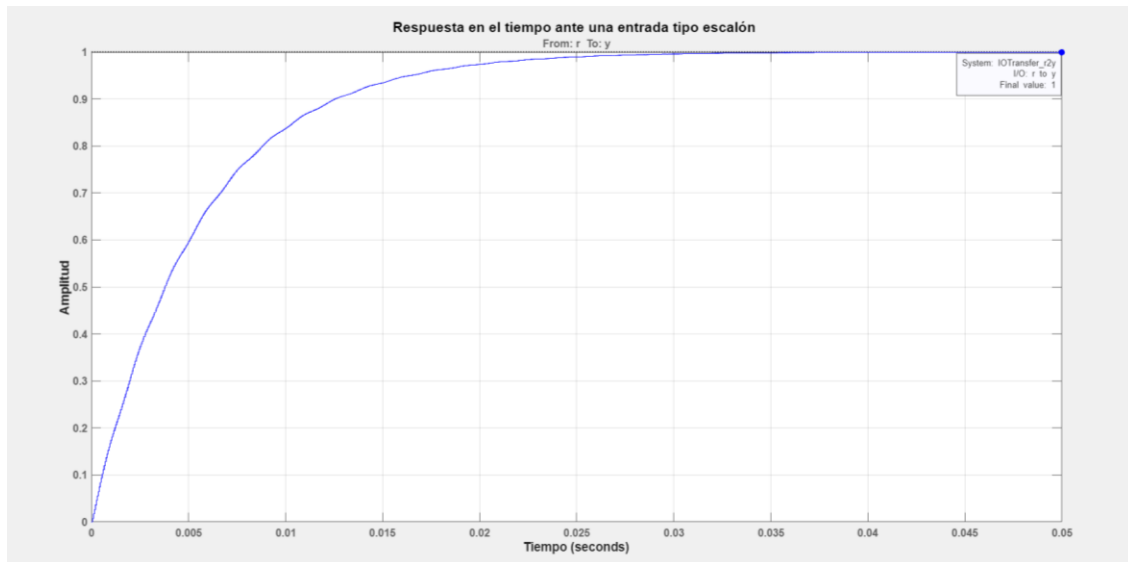


Figura N° 58. Efecto del controlador en la respuesta en el tiempo.

4.3. Controlador discreto en ecuaciones diferenciales.

Una vez obtenido el controlador es necesario pasarlo del dominio Z a ecuaciones en diferencias, de forma que pueda ser aplicado como bloque de función en Matlab para simularlo y a su vez para que este pueda ser implementado en el microcontrolador.

El controlador obtenido en el dominio Z está representado por la siguiente ecuación:

$$C(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{0.0066177 \cdot (z^2 - 1.934 \cdot z + 0.9675)}{z^2 - 0.5 \cdot z - 0.5} \quad (57)$$

Para poder pasarlo a ecuaciones en diferencias la FT debe tener la siguiente forma:

$$C(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{b_0 + b_1 \cdot z^{-1} + \dots + b_m \cdot z^{-m}}{a_0 + a_1 \cdot z^{-1} + \dots + a_n \cdot z^{-n}} \quad (58)$$

Por lo tanto, para llevarlo a esa forma se multiplica y divide la ecuación por z^{-2} :

$$C(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{0.0066177 \cdot (z^2 - 1.934 \cdot z + 0.9675)}{z^2 - 0.5 \cdot z - 0.5} \cdot \frac{z^{-2}}{z^{-2}} \quad (59)$$

$$\Rightarrow C(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{0.0066177 \cdot (1 - 1.934 \cdot z^{-1} + 0.9675 \cdot z^{-2})}{1 - 0.5 \cdot z^{-1} - 0.5 \cdot z^{-2}} \quad (60)$$

Siendo:

$$a = 0.0066177; \quad b = 1.934; \quad c = 0.9675; \quad d = 0.5; \quad e = 0.5$$

La ecuación anterior queda de la siguiente manera:

$$C(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{a - a \cdot b \cdot z^{-1} + a \cdot c \cdot z^{-2}}{1 - d \cdot z^{-1} - e \cdot z^{-2}} \quad (61)$$

El siguiente paso es despejar la acción de control U y aplicar la antitransformada z:

$$U(z) \cdot (1 - d \cdot z^{-1} - e \cdot z^{-2}) = E(z) \cdot (a - a \cdot b \cdot z^{-1} + a \cdot c \cdot z^{-2}) \quad (62)$$

Aplicando distributiva:

$$U(z) - d \cdot U(z) \cdot z^{-1} - e \cdot U(z) \cdot z^{-2} = a \cdot E(z) - a \cdot b \cdot E(z) \cdot z^{-1} + a \cdot c \cdot E(z) \cdot z^{-2} \quad (63)$$

Se aplica la antitransformada Z en base a la figura 59.

Función discreta	Transformada $\mathcal{Z}$
$x[k+3]$	$z^3X(z) - z^3x(0) - z^2x(1) - zx(2)$
$x[k+2]$	$z^2X(z) - z^2x(0) - zx(1)$
$x[k+1]$	$zX(z) - zx(0)$
$x[k]$	$X(z)$
$x[k-1]$	$z^{-1}X(z)$
$x[k-2]$	$z^{-2}X(z)$
$x[k-3]$	$z^{-3}X(z)$

Figura N° 59. Tabla de la transformada de Laplace.

De esta forma la ecuación anterior nos queda de la siguiente manera:

$$u_{[k]} - d \cdot u_{[k-1]} - e \cdot u_{[k-2]} = a \cdot e_{[k]} - a \cdot b \cdot e_{[k-1]} + a \cdot c \cdot e_{[k-2]} \quad (64)$$

Por último, queda despejar la acción de control $u_{[k]}$, obteniendo nuestro controlador en ecuaciones en diferencias:

$$u_{[k]} = a \cdot e_{[k]} - a \cdot b \cdot e_{[k-1]} + a \cdot c \cdot e_{[k-2]} + d \cdot u_{[k-1]} + e \cdot u_{[k-2]} \quad (65)$$

Recordando:

$$a = 0.0066177; \quad b = 1.934; \quad c = 0.9675; \quad d = 0.5; \quad e = 0.5$$

4.4. Resultados de simulación

Una vez obtenida la función de transferencia del convertidor buck y del controlador en ecuaciones en diferencias, se procede a simular el funcionamiento del circuito, para ello se realiza el mismo en Simulink, como se observa en la figura 60. Teniendo como objetivo cumplir con los requisitos de diseño previamente mencionados.

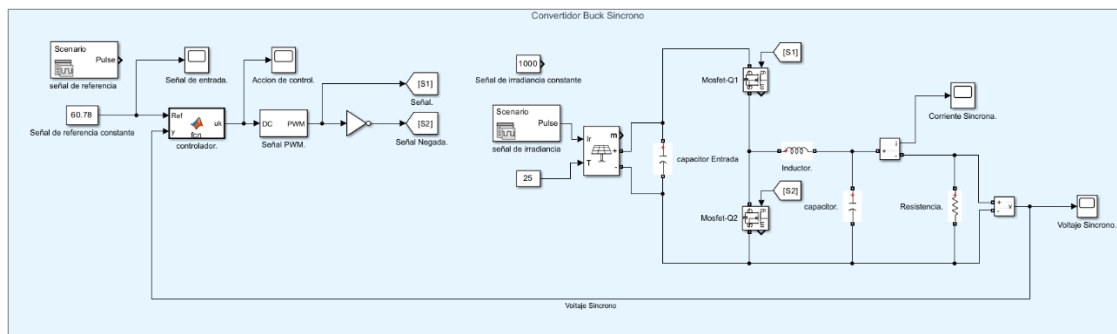


Figura N° 60. Convertidor buck síncrono alimentado por el panel solar. en Simulink.

El convertidor de potencia en su configuración Buck síncrono, es alimentado por un panel fotovoltaico. Para la simulación, se ajustaron los parámetros del modelo de manera que coincida con las características eléctricas del panel solar empleado. Esta configuración puede observarse en la figura 61.

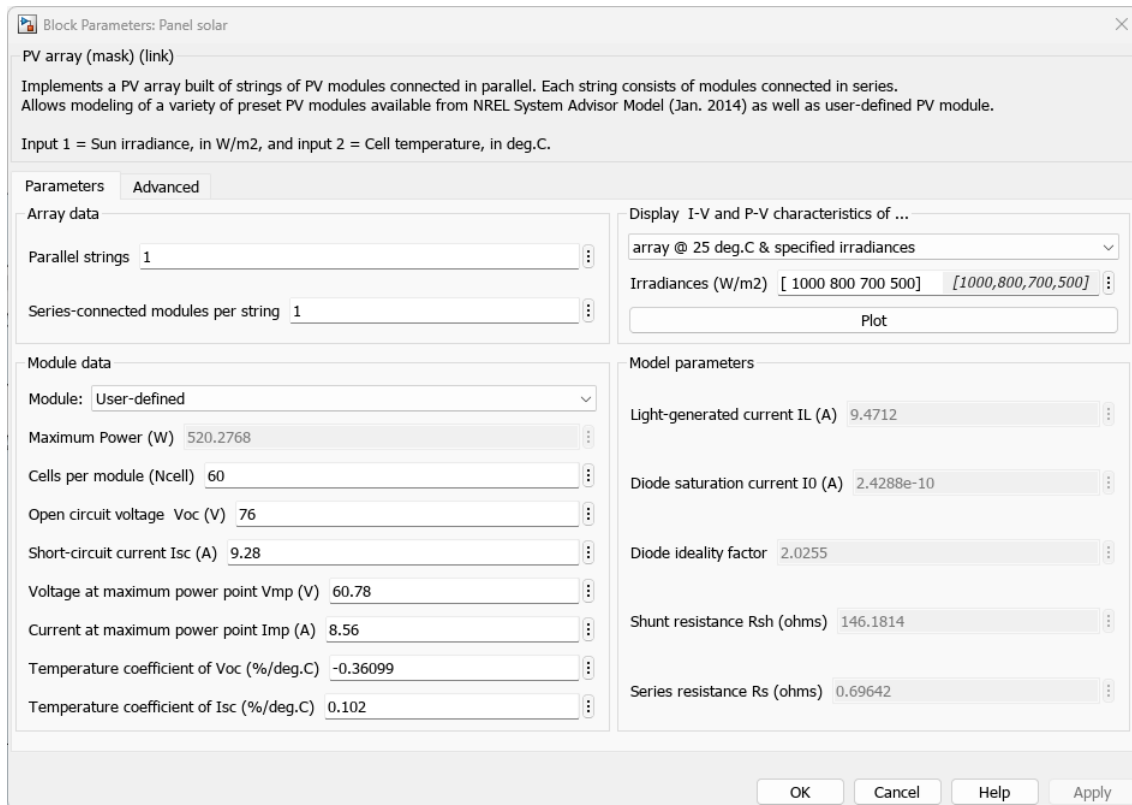


Figura N° 61. Parámetros del panel solar implementado en Simulink.

Una vez configurado el entorno de simulación, se realizaron dos pruebas para evaluar el desempeño del sistema. La primera consistió en aplicar una señal de voltaje de referencia variable (figura 62), manteniendo constante la irradiancia del panel fotovoltaico en un valor de 1000 W/m^2 .

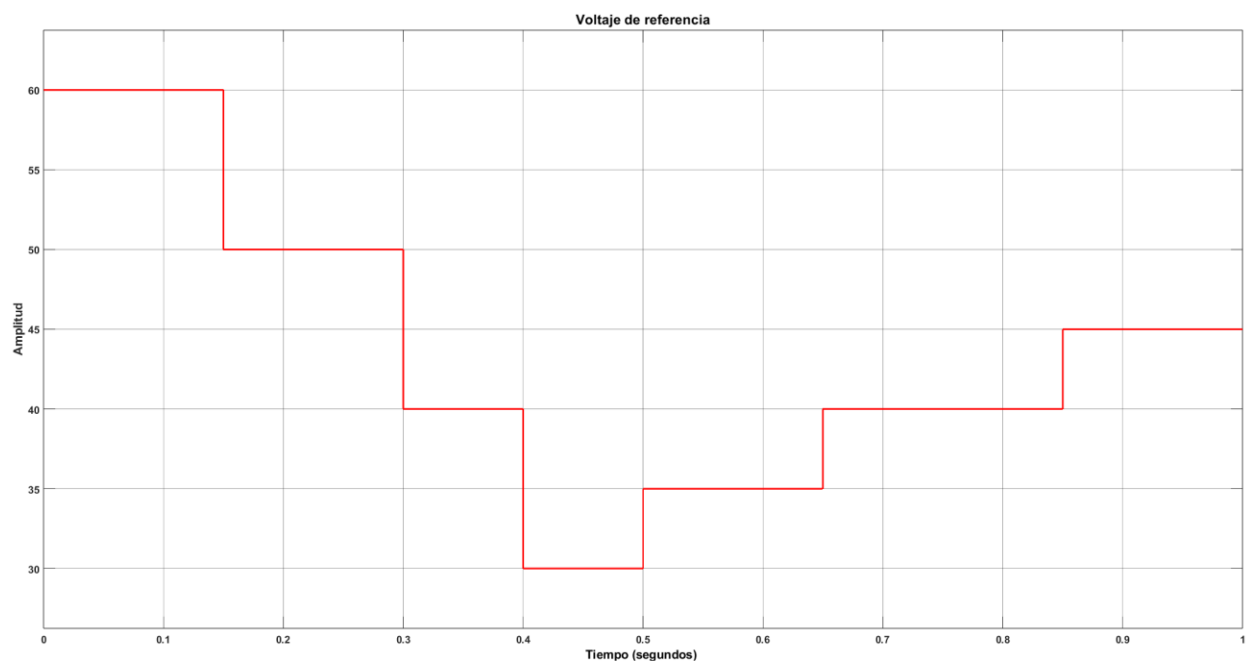


Figura N° 62. Voltaje de referencia.

Al realizar la simulación, con el voltaje de referencia variable, se comprobó que al variar la señal el controlador responde de una manera correcta, sin presentar oscilaciones.

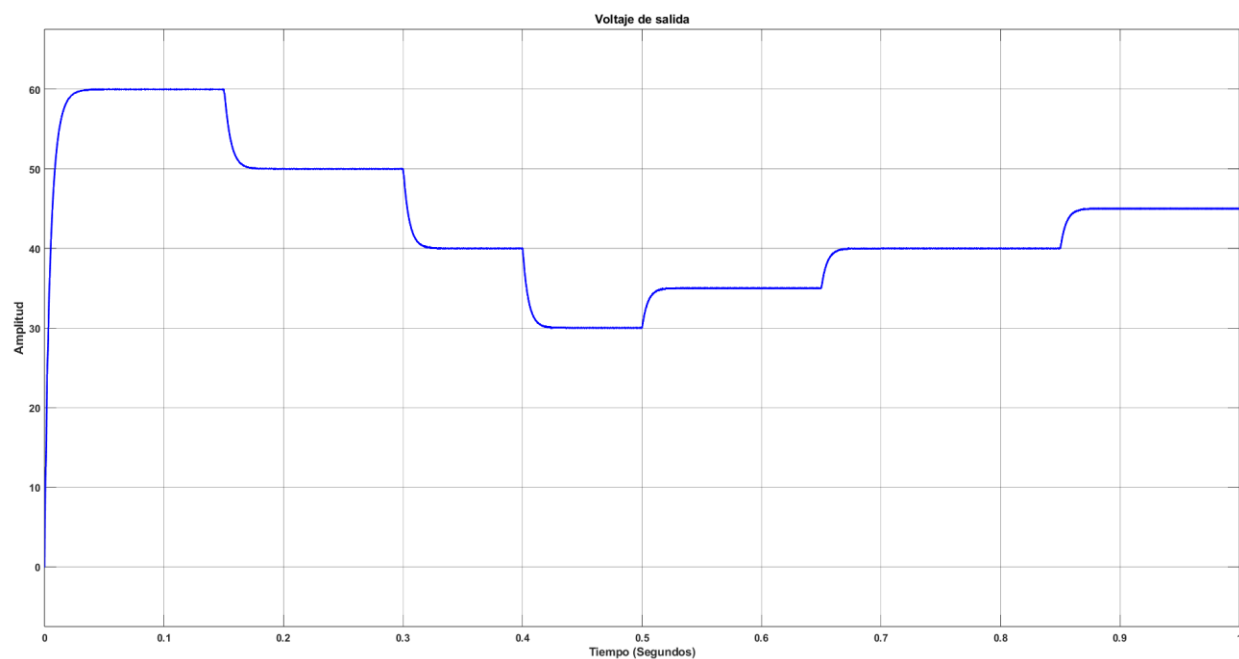


Figura N° 63. Voltaje obtenido a la salida, variando el voltaje de referencia.

La segunda prueba consistió en mantener el voltaje de referencia en un valor constante de 60,78 V, correspondiente al punto de máxima potencia del panel fotovoltaico. En este caso, la señal de irradiancia varía con el objetivo de reproducir las condiciones de operación que se presentan en un entorno real (figura 64).

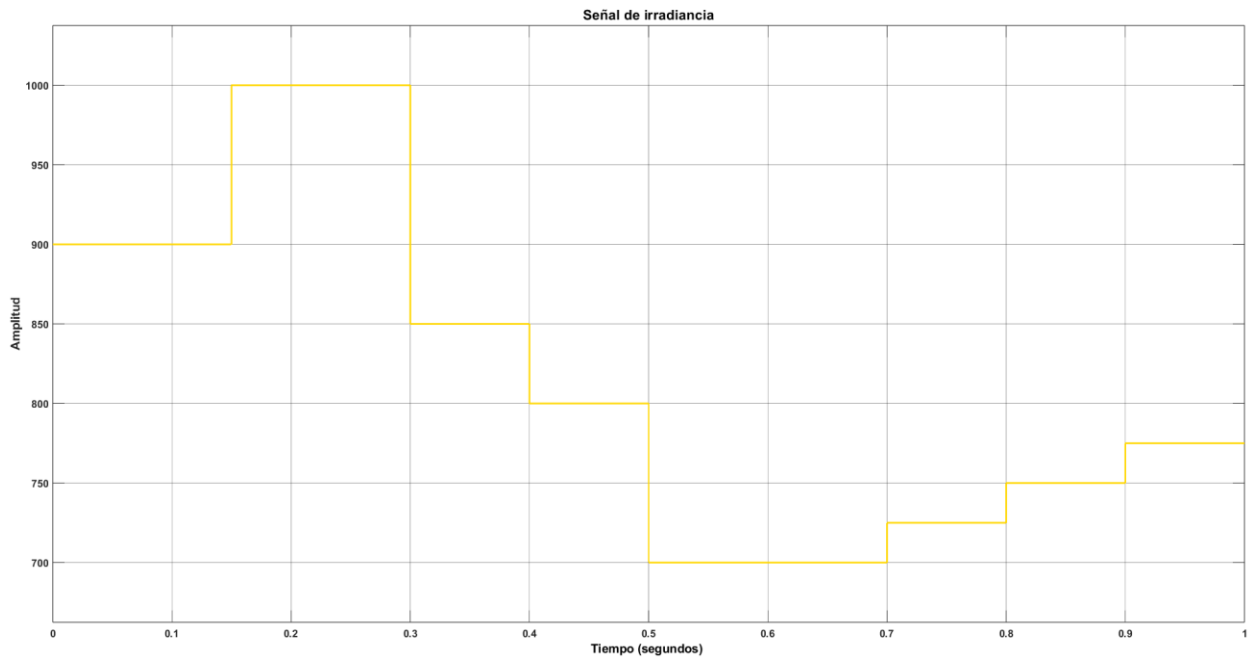


Figura N° 64. Señal de irradiancia variable.

Como se observa en la figura 65, al variar la irradiancia el voltaje aumenta o disminuye, pero el controlador corrige esta variación y vuelve al voltaje de referencia dado.

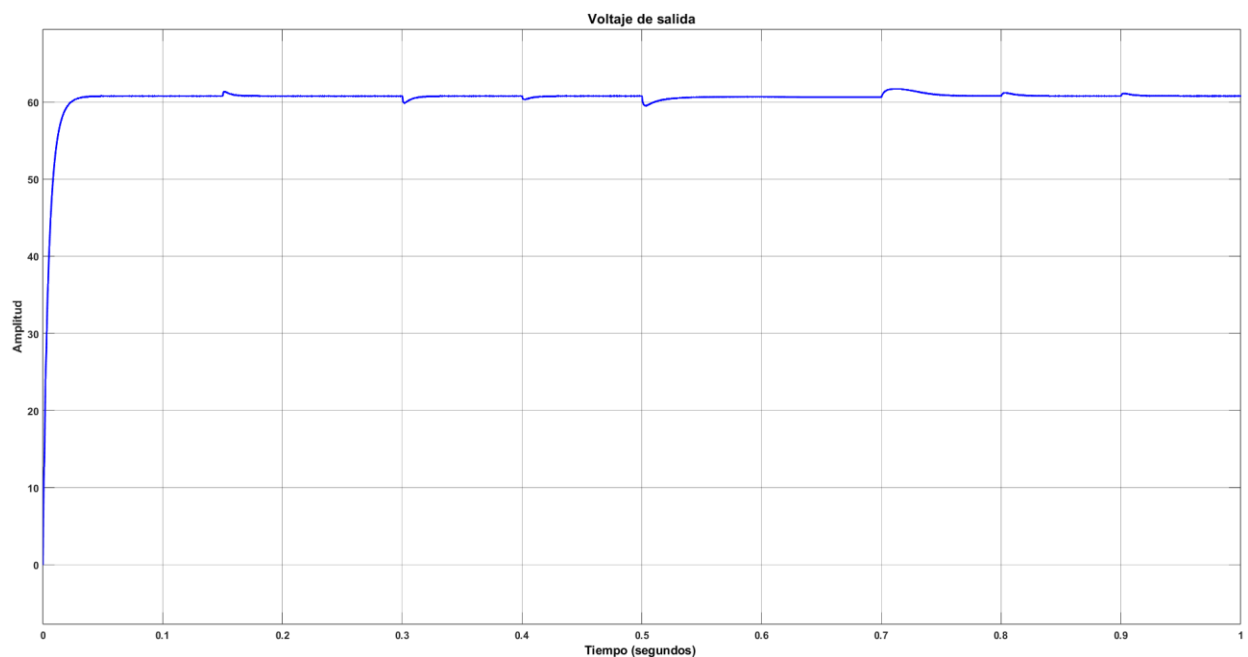


Figura N° 65. Voltaje obtenido a la salida, variando la señal de irradiancia.

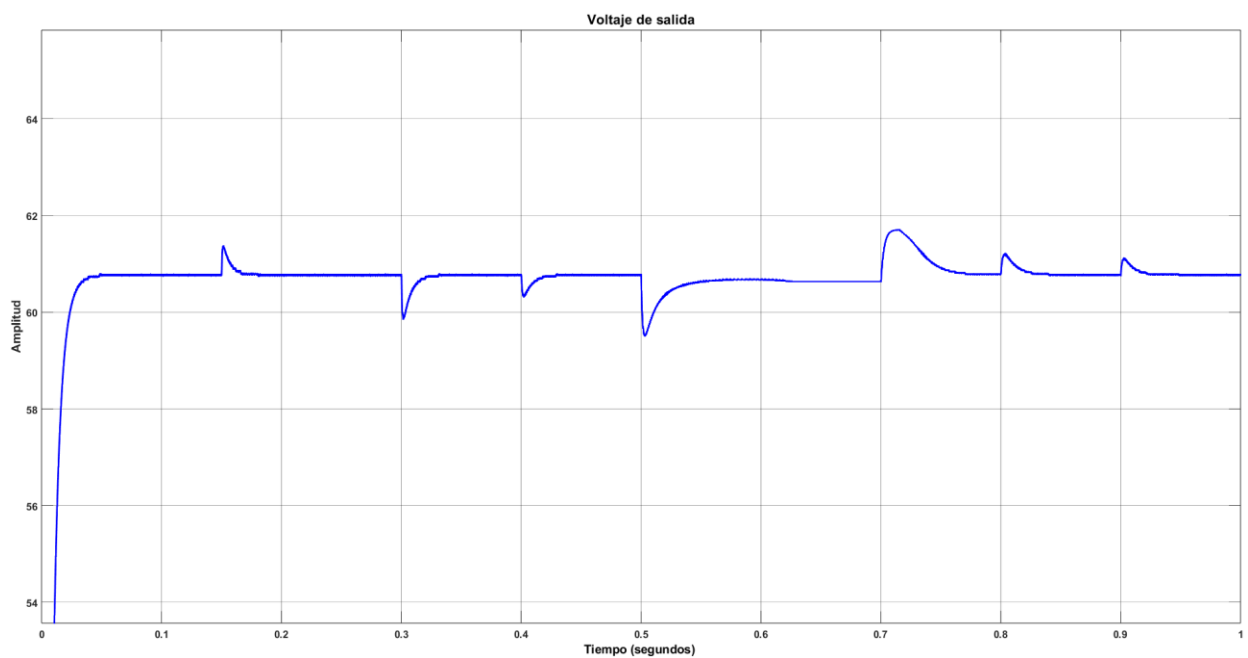


Figura N° 66. Voltaje obtenido a la salida, variando la señal de irradiancia ampliado.

En las simulaciones realizadas se utilizó una carga resistiva de 10Ω . Para el caso correspondiente a la prueba 2, se estableció un voltaje de referencia fijo de 60,78 V, lo que implica un consumo máximo de aproximadamente 370 W.

Considerando que los valores de irradiancia evaluados se encuentran entre 700 y 1000 W/m², la potencia entregada por el panel se mantiene a lo requerido por la carga. De esta manera, se cumple en todo momento la condición de que la potencia disponible del panel sea mayor o igual a la potencia demandada por la carga.

Por lo tanto, el controlador no alcanza una condición de saturación, ya que la potencia solicitada por la carga se encuentra dentro de la capacidad de generación disponible del panel. En consecuencia, el controlador no requiere demandar una potencia superior a la que el panel puede proporcionar bajo las condiciones de irradiancia consideradas.

De esta manera, se verifica que el controlador diseñado presenta un comportamiento esperado, logrando seguir la señal de referencia sin presentar sobrepasos, oscilaciones y eliminando el error en estado estable

Además, en las pruebas se realizaron variaciones en la señal de referencia y cambios en la irradiancia incidente sobre el panel fotovoltaico. Permitiendo evaluar el desempeño del controlador frente a las principales perturbaciones y condiciones de operación a las que estará sometido durante su funcionamiento. Los resultados obtenidos ante variaciones de la señal de referencia son fundamentales, ya que el algoritmo MPPT actúa ajustando dicho valor con el objetivo de maximizar la potencia extraída del panel, mientras que la irradiancia varía de forma natural debido a las condiciones meteorológicas.

Por lo tanto, se demuestra que el controlador mantiene un desempeño estable y robusto frente a ambos tipos de variaciones, asegurando un seguimiento preciso de la referencia incluso ante variaciones.

Una vez verificado el correcto funcionamiento, se sigue con el siguiente paso, que consiste en la implementación e integración del controlador al sistema fotovoltaico.

4.5. Ensayo experimental 3: Verificación del controlador de voltaje.

El objetivo de este ensayo consiste en verificar el correcto funcionamiento del controlador, para ello se aplicaron diferentes valores de voltajes de referencia con el fin replicar la simulación realizada anteriormente.

Se decidió utilizar el entorno de trabajo que se ve en la figura 67, ya que el mismo es muy similar a las condiciones de operación para el cual se desarrolló.

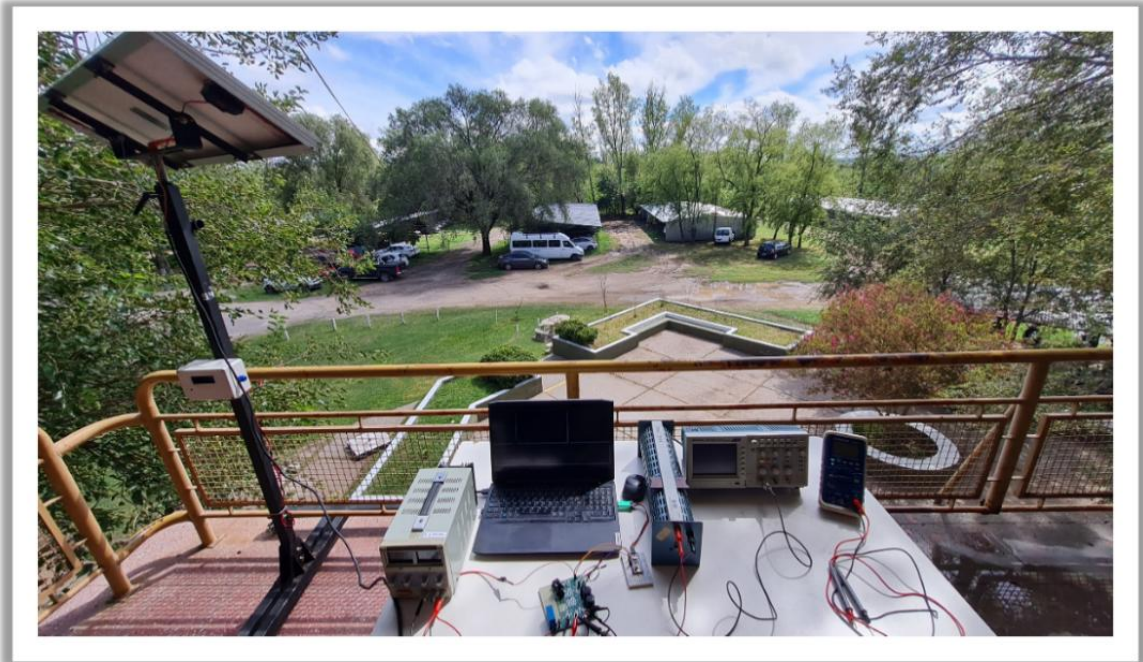


Figura N° 67. Entorno de trabajo utilizado.

En la figura 68 se aprecia en detalle cada uno de los elementos que lo componen.

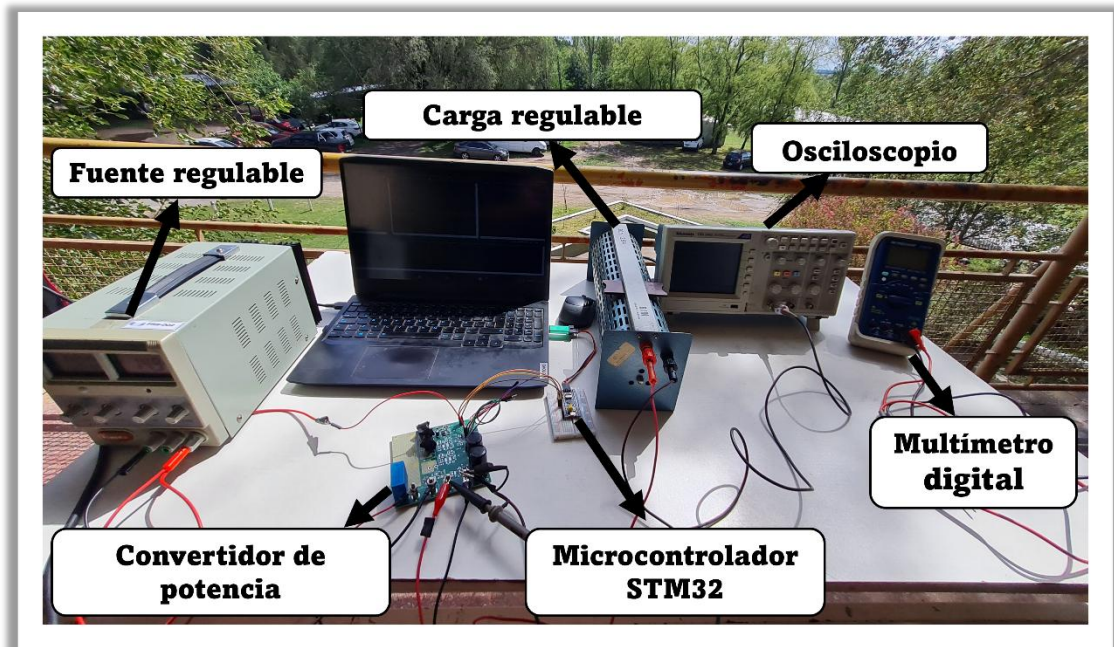


Figura N° 68. Elementos del entorno de trabajo.

Con el fin de trabajar con valores de corriente bajos, ya que no son necesarios para este ensayo, se decidió ajustar la carga a un valor de $10\ [\Omega]$ la cual está conectada a la salida del convertidor de potencia, la misma se puede observar en la siguiente figura.

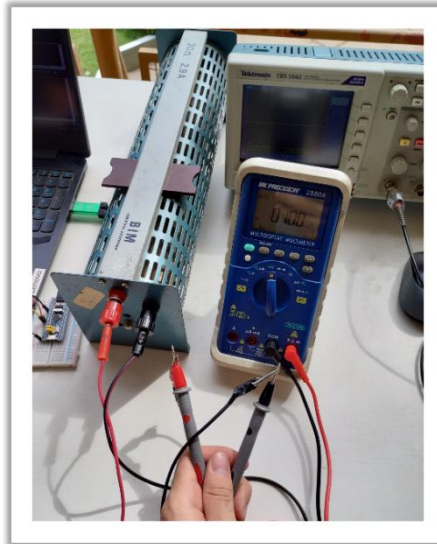


Figura N° 69. Medición del valor de la resistencia variable.

Esta configuración permite evaluar el comportamiento del sistema sin someter el convertidor a condiciones de operación exigentes.

Debido a las condiciones climáticas presentes durante la realización del ensayo (baja irradiancia y la mayor parte del tiempo nublado) el voltaje de alimentación obtenido del panel solar

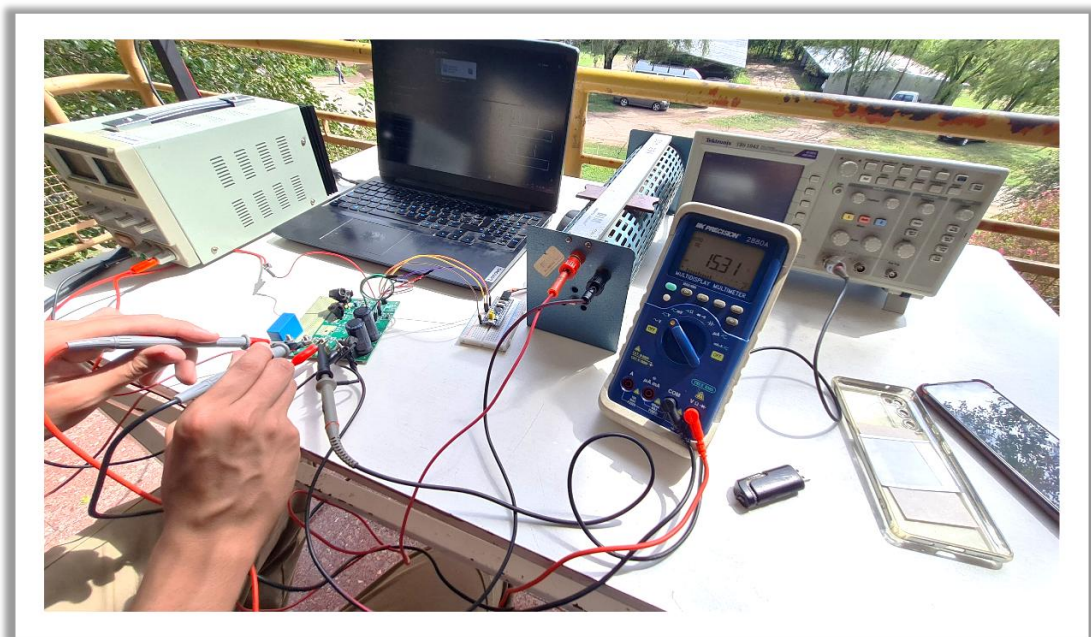


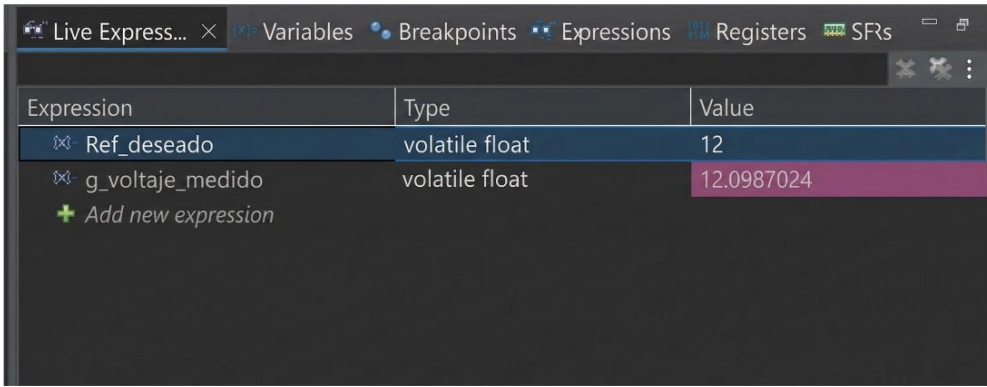
Figura N° 70. Medición del voltaje de entrada proveniente del panel solar.

no supero valores mayores a 15 [V] (figura 70), por lo tanto, se buscó que en la salida se obtengan valores de entre 12 [V] a 8 [V].

A partir de ello, se definieron variables globales dentro del código, con el objetivo de poder manipular manualmente el valor del voltaje de referencia.

Para comprobar el funcionamiento de controlador se modificó la referencia para que vaya de 8 [V] a 12 [V] como se observa en la figura 71.

Voltaje de referencia 12V



Expression	Type	Value
Ref_deseado	volatile float	12
g_voltaje_medido	volatile float	12.0987024
+ Add new expression		

Figura N° 71. Voltaje de referencia y voltaje medido por los sensores del convertidor buck.

Utilizando el osciloscopio se obtuvo la respuesta en el tiempo, la cual dio un valor de 72ms, coincidiendo con los valores de simulación como se aprecia en la siguiente figura.

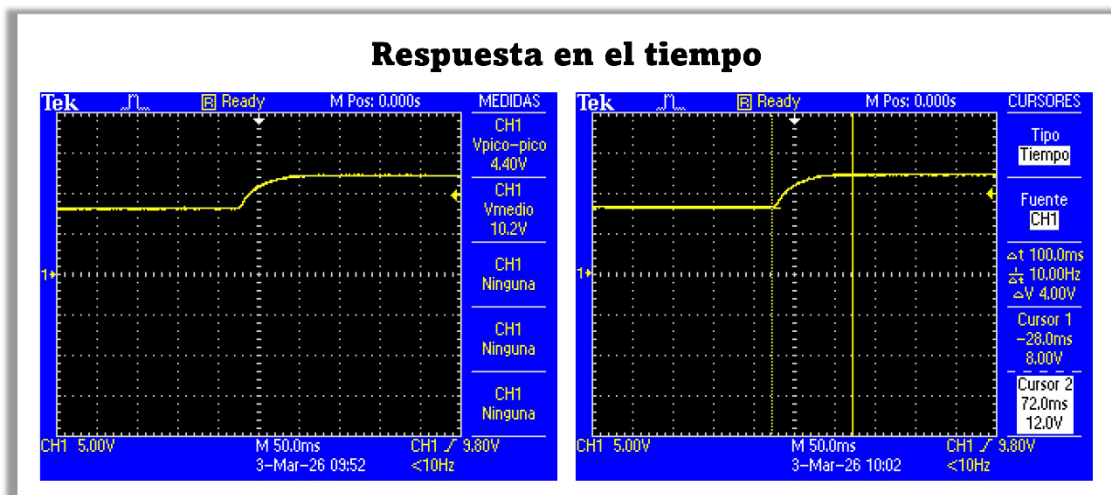


Figura N° 72. Respuesta en el tiempo del voltaje ante cambio de referencia de 8 [V] a 12 [V].

Además, se obtuvo el valor del voltaje de salida, el cual se mantuvo estable en 12,14V.

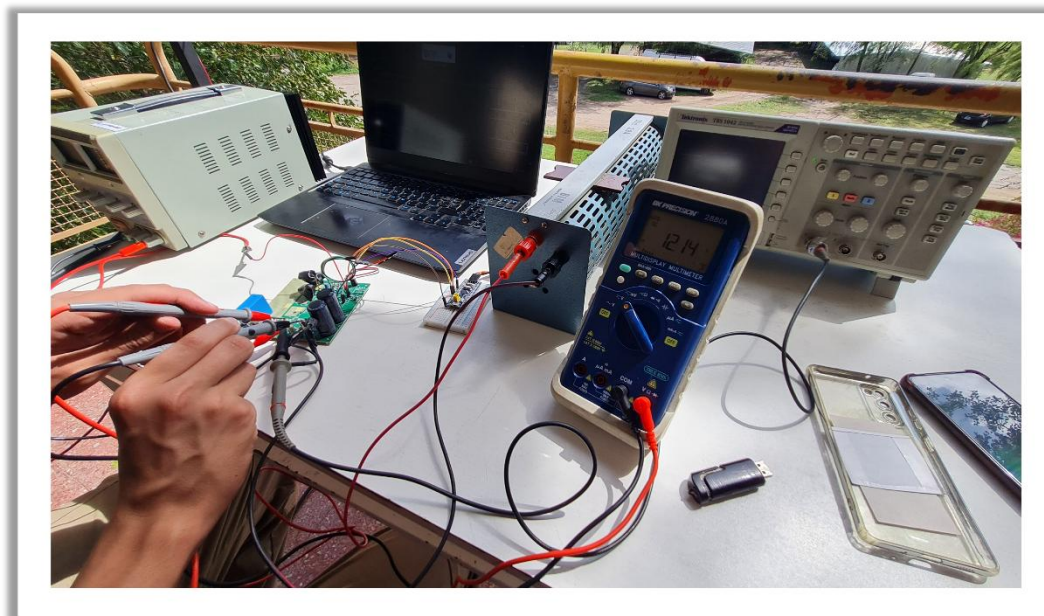


Figura N° 73. Medición del voltaje de salida ante una referencia de 12 [V].

Luego se modificó el voltaje de referencia de 12 [V] a 8[V] como se observa en la figura 73.

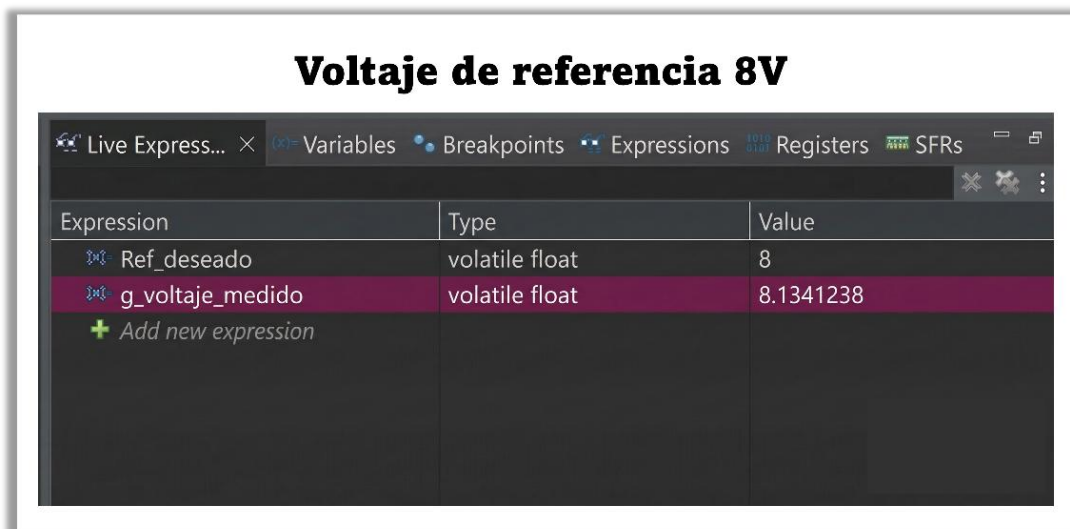


Figura N° 74. Voltaje de referencia y voltaje medido por los sensores del convertidor buck.

Obteniendo de esta manera la respuesta en el tiempo que se observa a continuación.



Figura N° 75. Respuesta en el tiempo del voltaje ante cambio de referencia de 12 [V] a 8 [V].

Como en el caso anterior se obtuvo el voltaje de salida, el cual dio un valor de 8,12V.

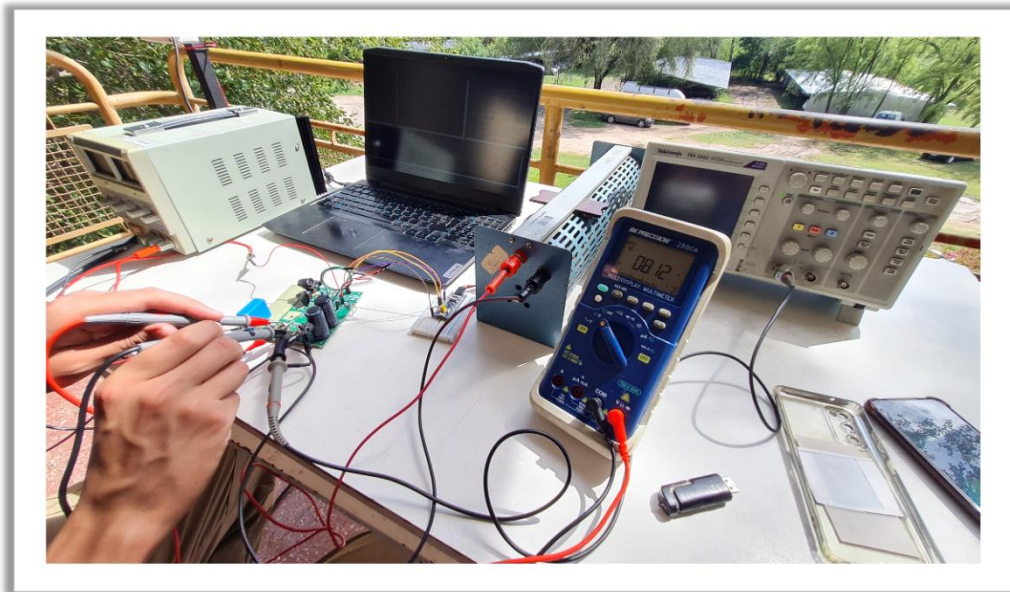


Figura N° 76. Medición del voltaje de salida ante una referencia de 8 [V].

Se observa de las figuras 72 y 75, obtenidas en el ensayo, que los tiempos de asentamiento son similares a los obtenidos en la simulación: 72 ms cuando se incrementa V_{ref} de 8 V a 12 V, y de 70 ms cuando se reduce V_{ref} de 12 V a 8 V, mientras que en la simulación se obtuvo un tiempo de 50 ms para ambos casos, como se observó en la figura 58.

A partir de los resultados del ensayo, se observó que el controlador diseñado e implementado en Simulink cumplió satisfactoriamente con las especificaciones establecidas. Este logró eliminar el sobrepaso y reducir los tiempos de asentamiento, permitiendo que el sistema opere de manera más estable y con menor exigencia. Asimismo, el error en estado estacionario se mantuvo dentro de valores aceptables para la aplicación, validando el diseño del controlador.

Además, se observa una pequeña diferencia entre el tiempo de asentamiento real del sistema y el obtenido en la simulación.

La principal razón de esta diferencia es que la función de transferencia se obtuvo a partir de un modelo idealizado, en el cual se utiliza un interruptor que representa los comportamientos de encendido y apagado. En cambio, en los ensayos prácticos, el convertidor Buck diseñado emplea dos MOSFET, lo que hace que su respuesta sea diferente a los resultados obtenidos en simulación. Además, es necesario considerar las variaciones en los valores de los componentes electrónicos, así como las resistencias internas presentes en el propio circuito.

CAPÍTULO 5: Selección e implementación del algoritmo del MPPT.

En este capítulo se presenta el algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia implementado en el sistema fotovoltaico. Este algoritmo tiene como objetivo maximizar la energía extraída de los paneles solares mediante el ajuste continuo del punto de operación del convertidor *Buck*, permitiendo que el generador fotovoltaico opere en las cercanías de su punto de máxima potencia, aun cuando las condiciones de irradiancia y temperatura experimenten variaciones. La implementación de esta estrategia incrementa el aprovechamiento energético del sistema, mejora su eficiencia y permite adaptar dinámicamente el funcionamiento del convertidor a las condiciones ambientales.

5.1. Elección del MPPT

En base al análisis comparativo presentado en el marco teórico, el algoritmo seleccionado es el de conductancia incremental. Su elección se basa en las ventajas que presenta el mismo en comparación con el algoritmo perturbar y observar.

Además, se decidió utilizar este algoritmo con la mejora de paso variable ya que esto permite que se llegue más rápido al punto de máxima potencia, obteniendo una mayor eficiencia.

A continuación, en la figura 77, se visualiza el diagrama de bloques del sistema implementado en Simulink.

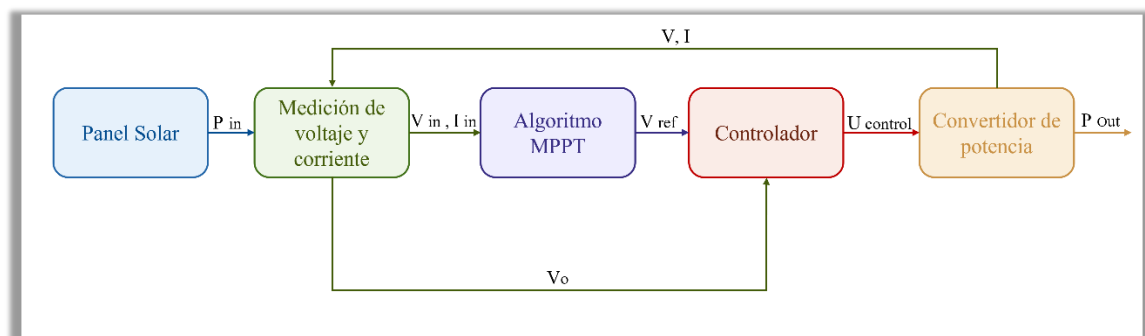


Figura N° 77. Diagrama de bloques del sistema con controlador y algoritmo MPPT.

5.2. Resultados de simulación: MPPT + Controlador de voltaje

A partir del algoritmo seleccionado se decidió simular el funcionamiento del sistema, realizando una comparativa con MPPT y sin el mismo. El objetivo de esta comparativa es determinar cómo se comporta el sistema ante cambios de irradiancia, simulando condiciones normales de funcionamiento. En la figura 78 se observa el sistema implementado en Simulink.

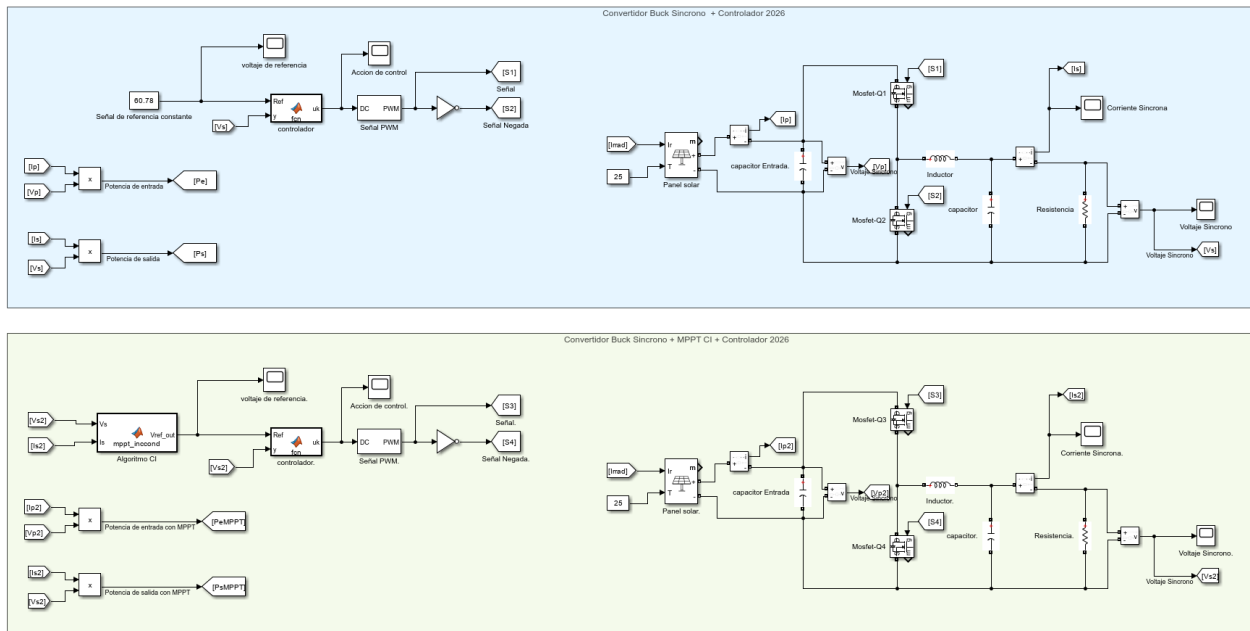


Figura N° 78. Circuitos implementados en Simulink, con voltaje de referencia fijo y con algoritmo MPPT.

Para el caso del sistema sin MPPT se decidió utilizar un voltaje de referencia de 60.78V ya que este corresponde al voltaje de máxima potencia para una irradiancia de 1000W/m² y una temperatura de 25°C.

Mientras que en el sistema con MPPT, el voltaje de referencia es el obtenido por el algoritmo MPPT a partir de las mediciones de corriente y voltaje provenientes del panel solar.

Con el fin de simular el comportamiento climático, al cual estarán expuestos los paneles solares, se definieron distintos valores de irradiancia como se observa en la figura 79.

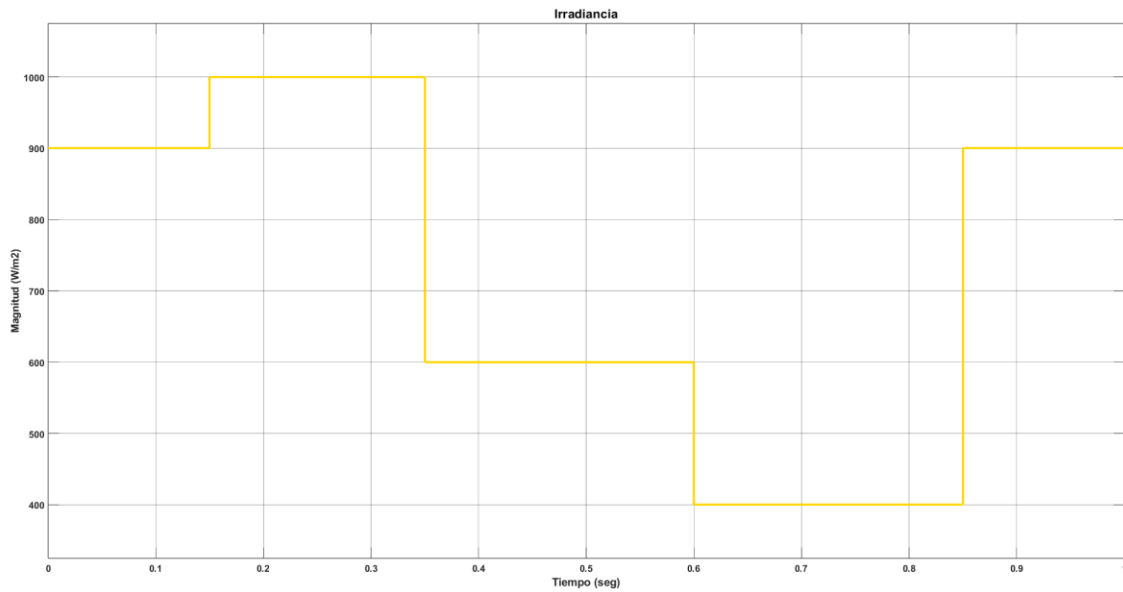


Figura N° 79. Señal de irradiancia variable.

A partir de ello se simuló el sistema obteniendo las curvas de potencia que se visualizan en la figura 80.

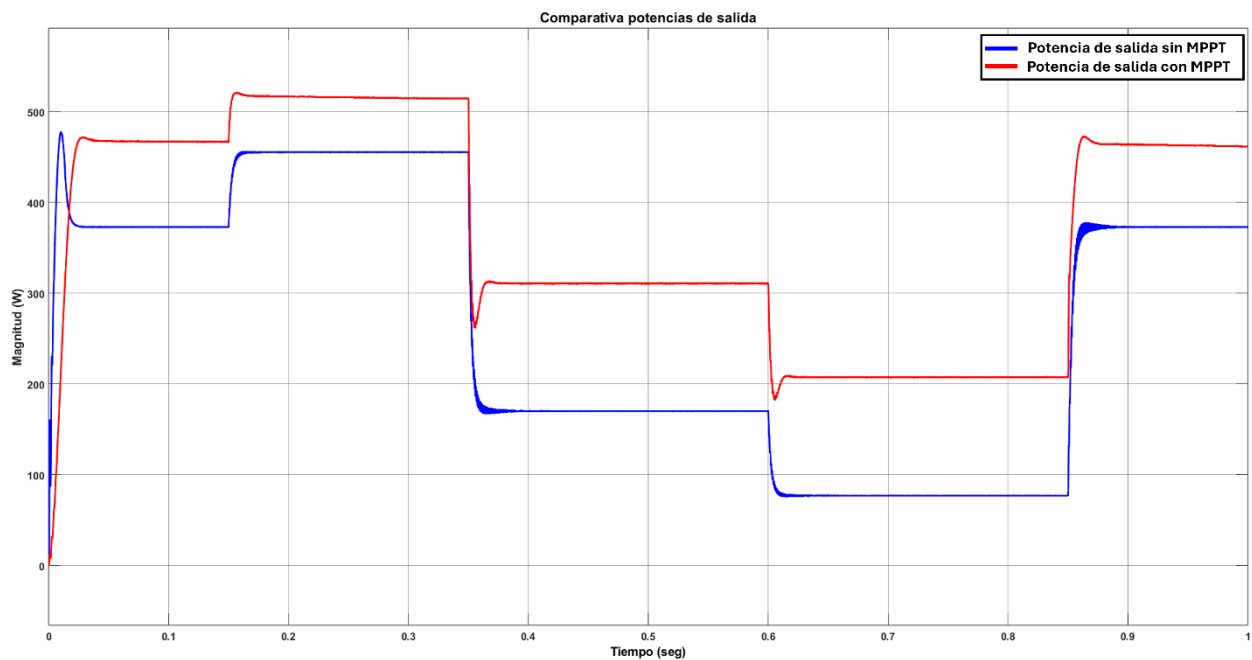


Figura N° 80. Comparativa entre las potencias de salida.

Se observa en ellas que se obtiene una mayor potencia tanto de entrada como de salida, para diferentes valores de irradiancia, gracias al algoritmo MPPT.

Con el fin de comparar la eficiencia de seguimiento del sistema con y sin MPPT se dividió la potencia real entregada por el panel, por la potencia máxima teórica que puede entregar el panel según las condiciones de irradiancia de cada intervalo de tiempo, mediante la siguiente expresión:

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{PV}}{P_{PPT}} \cdot 100\% \quad (66)$$

A partir de ello se obtuvo el grafico de la figura 81, en él se puede visualizar la eficiencia en cada instante de tiempo.

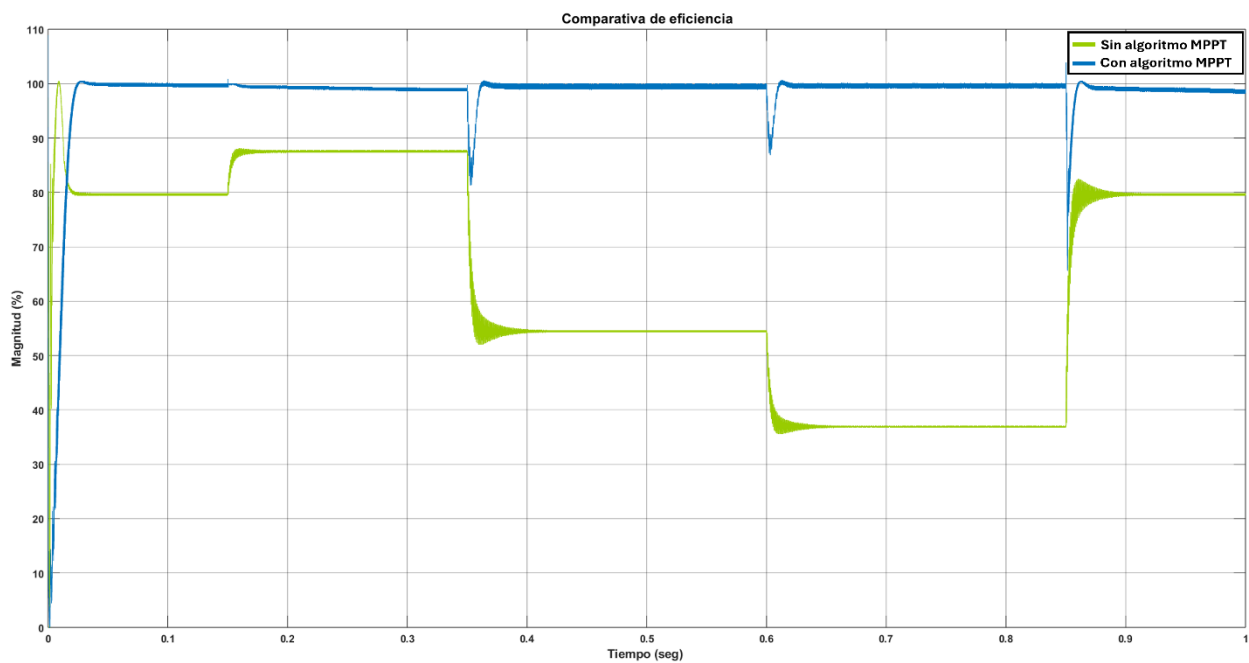


Figura N° 81. Comparativa de la eficiencia del sistema con y sin MPPT.

Donde se observa que ante variaciones de irradiancia el sistema sin MPPT presenta una menor eficiencia, alcanzando valores cercanos a 37% cuando la irradiancia es baja, además de nunca alcanzar el 100% de eficiencia, en contraparte el sistema con MPPT mantiene una eficiencia muy cercana o igual al 100% ante variaciones de irradiancia, como se observa en la tabla 15.

Es importante mencionar que la evaluación del algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia, la metodología adoptada se corresponde con la establecida por la norma EN 50530:2010, la cual define el procedimiento para medir la exactitud del seguimiento del punto de

máxima potencia y distingue entre la eficiencia estática, evaluada bajo irradiancia constante, y la eficiencia dinámica, evaluada ante variaciones de irradiancia. Cabe aclarar que el alcance de la norma comprende inversores conectados a la red, por lo que se la adopta como referencia metodológica.

Tabla N° 15. Comparativa de la eficiencia del sistema.

Intervalo de tiempo (s)	Irradiancia ($\frac{W}{m^2}$)	Eficiencia sin MPPT	Eficiencia con MPPT
0 - 0.15	900	80%	100%
0.15 - 0.35	1000	87%	98.5%
0.35 - 0.6	600	55%	99%
0.6 - 0.85	400	37%	99%
0.85 - 1	900	80%	98.5%

De esta manera se evidencia la necesidad de incorporar un algoritmo MPPT al sistema, aumentando de manera significativa el rendimiento del sistema.

5.3. Ensayo experimental 4: MPPT + Controlador de voltaje

El objetivo de este ensayo es verificar el correcto funcionamiento del algoritmo de MPPT y del controlador de voltaje. Una vez seleccionado el algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) a implementar, se procedió a realizar su validación experimental utilizando un panel solar de prueba de la marca Solartec, modelo M-75.

Debido a que no se cuenta con las principales características eléctricas del panel, estas se obtuvieron a partir de la medición de voltaje y corriente sin carga:

- Voltaje de circuito abierto: 20 [V]
- Corriente de cortocircuito: 3 [A]

Luego se estimaron los valores correspondientes al punto de máxima potencia (MPP) utilizando aproximaciones típicas del comportamiento de paneles fotovoltaicos:

- Voltaje en MPP $\approx$ 80 % del voltaje de circuito abierto
- Corriente en MPP $\approx$ 90 % de la corriente de cortocircuito

$$V_{MPP} = V_{CA} \cdot 0,8 = 20[V] \cdot 0,8 = 16 [V] \quad (66)$$

$$I_{MPP} = I_{CC} \cdot 0,9 = 3[A] \cdot 0,9 = 2,7 [A] \quad (67)$$

Se presentan en la tabla 16, los valores obtenidos.

Tabla N° 16. Valores del panel solar Solartec M-75

Parámetro	Símbolo	Valor
Voltaje de circuito abierto	V_{oc}	20 V
Corriente de cortocircuito	I_{cc}	3 A
Voltaje en MPP	V_{mpp}	16 V
Corriente en MPP	I_{mpp}	2.7 A

Con estas relaciones se determinó la resistencia equivalente de carga necesaria para operar en dicho punto, obteniéndose un valor aproximado de $6[\Omega]$, como se observa a continuación.

$$R = \frac{V_{MPP}}{I_{MPP}} = \frac{16 [V]}{2,7 [A]} = 6[\Omega] \quad (68)$$

Una vez obtenido el valor de resistencia correspondiente al punto de máxima potencia, se decidió utilizar un valor menor con el objetivo de obtener de esta forma menor potencia y poder comprobar el funcionamiento del algoritmo MPPT.

Posteriormente se preparó el entorno experimental, tal como se muestra en la figura 82.

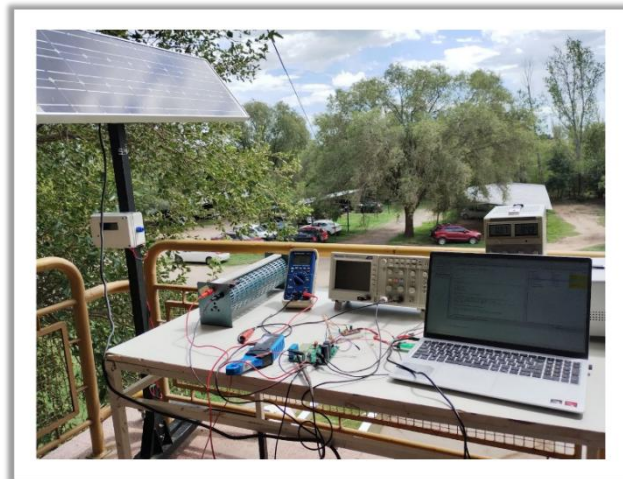


Figura N° 82. Entorno de trabajo para ensayo de MPPT y controlador de voltaje.

A partir de las condiciones ambientales registradas y presentadas en la Tabla 17, se procedió a realizar las mediciones iniciales. Cabe destacar que las condiciones climáticas registradas durante la jornada de ensayo experimentaron variaciones significativas a lo largo del período de medición.

Tabla N° 17. Valores de temperatura registrada el día 25 de febrero.

Fecha	Temperatura	Fecha	Temperatura
25/2/2026 12:00	20,2	25/2/2026 13:10	21,8
25/2/2026 12:10	20,4	25/2/2026 13:20	22,5
25/2/2026 12:20	20,9	25/2/2026 13:30	23,2
25/2/2026 12:30	21,2	25/2/2026 13:40	23,1
25/2/2026 12:40	21,6	25/2/2026 13:50	22,4
25/2/2026 12:50	21,5	25/2/2026 14:00	22,7
25/2/2026 13:00	21	-	-

Para ello, se realizaron ensayos con diferentes niveles de irradiancia con el fin de comprobar el correcto funcionamiento del algoritmo MPPT para distintas condiciones. Los valores de corriente y voltaje se obtuvieron utilizando una pinza amperométrica y una sonda de voltaje conectados al osciloscopio como se puede apreciar en el entorno de trabajo.

Prueba 1: Condiciones de baja irradiancia

La primera prueba se realizó a las 11:52 h. Durante el ensayo, la irradiancia incidente sobre el panel fotovoltaico fue medida mediante el sensor de irradiancia, obteniéndose un valor de $118 \left[\frac{W}{m^2} \right]$, tal como se muestra en la figura 83.



Figura N° 83. Medición de irradiancia para la prueba 1.

A partir de ello se obtuvieron los valores máximos de voltaje y corriente sin carga.

Tabla N° 18. Valores de voltaje y corriente sin carga para una irradiancia de $118 \left[W/m^2 \right]$.

Parámetro	Valor
Voltaje circuito abierto	17,58 [V]
Corriente cortocircuito	0,304 [A]

A continuación, en la figura 84, se presenta la comparación de la potencia obtenida con el algoritmo MPPT deshabilitado (se configuró el convertidor buck con un ciclo de trabajo igual a uno, lo que equivale a una conexión directa del panel solar con la carga) y habilitado, permitiendo

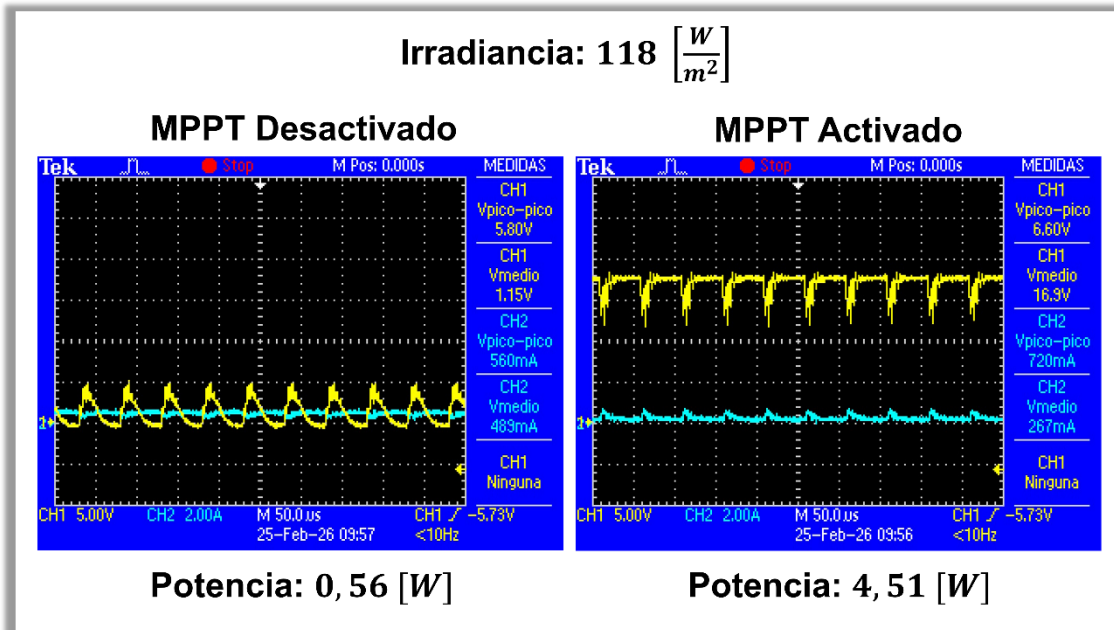


Figura N° 81. Valores de corriente voltaje y potencia activando y desactivando MPPT-Prueba 1. evaluar su incidencia sobre la extracción de energía del panel fotovoltaico.

Prueba 2: Condición de irradiancia media

La segunda prueba se realizó a las 12:03 h. En esta oportunidad, el sensor registró una irradiancia de $617 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ (Figura 85), representando una condición intermedia de operación.



Figura N° 82. Medición de irradiancia para la prueba 2.

Obteniendo los valores de la tabla 19.

Tabla N° 19. Valores de voltaje y corriente sin carga para una irradiancia de 617 $[W/m^2]$.

Parámetro	Valor
Voltaje circuito abierto	12,07 [V]
Corriente cortocircuito	2,447 [A]

Como en el caso anterior, en la figura 86, se observa la respuesta del sistema con el algoritmo MPPT habilitado y deshabilitado, permitiendo analizar el incremento de potencia obtenido bajo condiciones de irradiancia media.

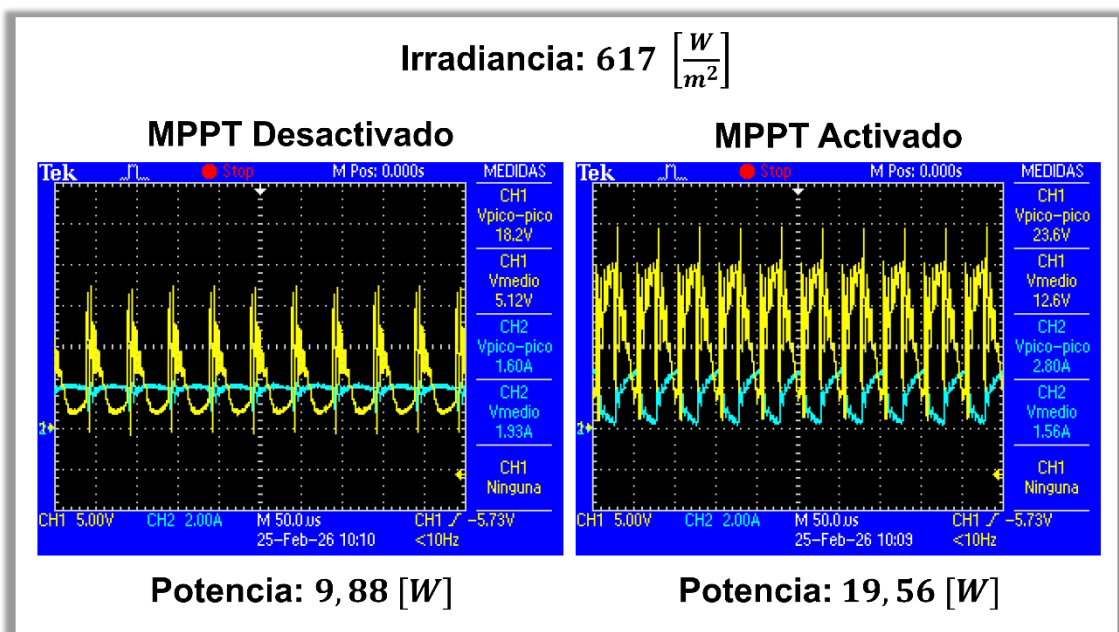


Figura N° 83. Valores de corriente voltaje y potencia activando y desactivando MPPT-Prueba 2.

Prueba 3: Condición de alta irradiancia

En la última prueba realizada (12:44 h) el valor de irradiancia obtenida por el sensor fue de $1349 \left[\frac{W}{m^2} \right]$, correspondiente a las condiciones de mayor radiación solar medida durante los ensayos.

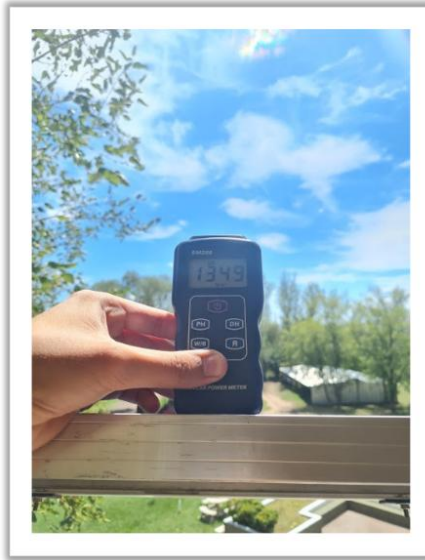


Figura N° 84. Medición de irradiancia para la prueba 3.

Los valores obtenidos del panel solar se visualizan en la tabla 20.

Tabla N° 20. Valores de voltaje y corriente sin carga para una irradiancia de $1349 \left[W/m^2 \right]$

Parámetro	Valor
Voltaje circuito abierto	17,85 [V]
Corriente cortocircuito	2,85 [A]

Finalmente, en la figura 88, se observa como varia la potencia al activar y desactivar el algoritmo MPPT, permitiendo verificar su desempeño bajo condiciones de alta irradiancia.

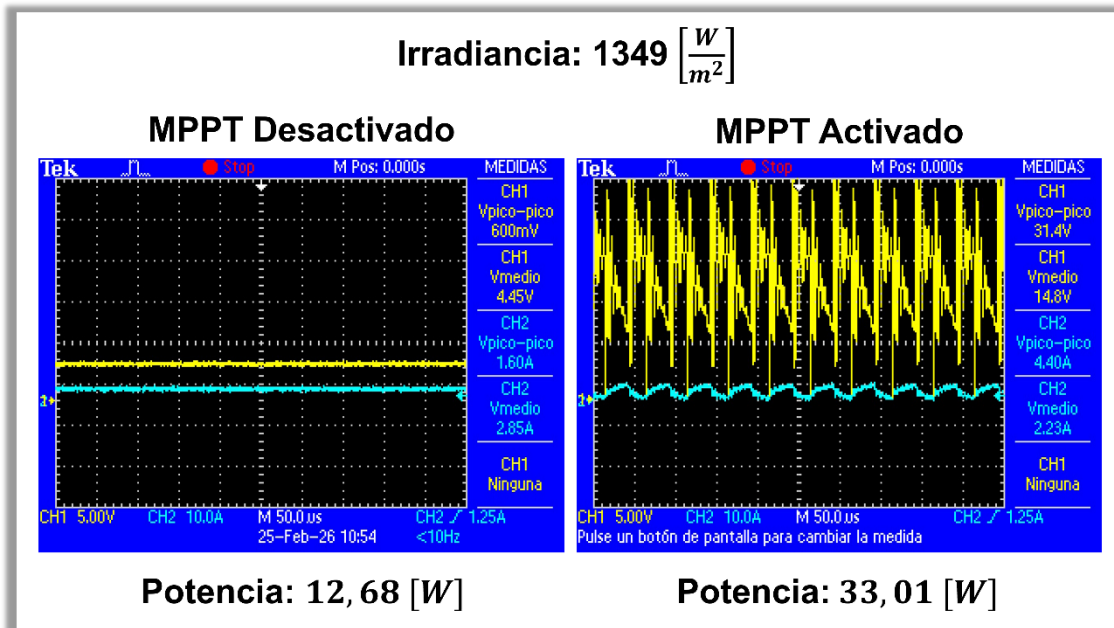


Figura N° 85. Valores de corriente voltaje y potencia activando y desactivando MPPT- Prueba 3.

Análisis del rizado y oscilaciones observadas en el control de voltaje de entrada:

En las capturas de voltaje y corriente del generador PV (Figuras 84, 86 y 88) se observan oscilaciones en la señal de voltaje. Este comportamiento se debe, principalmente, a que las mediciones se realizaron directamente en la entrada del convertidor de potencia, la cual se encuentra alimentada por el panel solar.

Además, la presencia de inductancias parásitas y la baja capacitancia del capacitor de desacople ubicado en la entrada del convertidor limitan la capacidad de filtrado del circuito. Como consecuencia, la conmutación del convertidor a una frecuencia de 20 kHz genera un rizado de voltaje significativo en los bornes del panel solar. Este rizado se manifiesta como las oscilaciones observadas en las figuras mencionadas.

Comparación de resultados

Una vez realizados los tres ensayos, se observó que al activar el algoritmo MPPT se incrementó la potencia extraída del panel fotovoltaico bajo diferentes condiciones climáticas. Esto permitió verificar el correcto funcionamiento del algoritmo MPPT implementado.

Tabla N° 21. Resultados obtenidos en el ensayo.

Ensayo	Irradiancia [W/m^2]	Potencia sin MPPT [W]	Potencia con MPPT[W]	Incremento [W]
Baja Irradiancia	118	0.56	4.51	3.95
Media Irradiancia	617	9.88	19.56	9.68
Alta Irradiancia	1349	12.68	33.01	20.33

A partir de la realizado hasta aquí se comprobaron que las diferentes partes relacionadas con la extracción de la máxima potencia del panel solar funcionan correctamente, por lo tanto, en el siguiente capítulo, se procede a realizar las modificaciones necesarias para poder implementar el sistema SCADA al seguidor solar.

CAPITULO 6: Sistema SCADA

6.1. Elección del Sistema SCADA

Se decidió implementar un sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA), ampliamente utilizado en entornos industriales. Este tipo de sistema permite visualizar información en tiempo real y centralizar la gestión del seguidor solar.

La elección se basa en la necesidad de mejorar la eficiencia operativa, ya que el sistema SCADA facilita una respuesta rápida ante variaciones en las condiciones meteorológicas, ajustando el panel para mantenerlo en el ángulo óptimo y maximizar la captación de irradiancia.

Su implementación ofrece las siguientes ventajas clave para el proyecto:

- Supervisión y control en tiempo real: Permite una visibilidad constante de los parámetros críticos de operación (corriente, voltaje y potencia de entrada/salida). Esto facilita la detección inmediata de cualquier anomalía en la generación, como caídas de voltaje o desconexiones del panel.
- Automatización y optimización: Al integrar algoritmos que utilizan valores históricos de irradiancia, el sistema automatiza el posicionamiento del seguidor sin intervención humana constante, aumentando la precisión y la producción energética total.
- Gestión de alertas y seguridad: La configuración de alertas mejora la seguridad industrial del equipo. El sistema puede notificar situaciones de riesgo y registrar estas actividades para prevenir fallos mecánicos o eléctricos.
- Reducción de costos y mantenimiento: La capacidad de monitorear el rendimiento de forma remota y almacenar datos históricos reduce la necesidad de inspecciones físicas frecuentes, permitiendo un mantenimiento preventivo basado en el análisis de datos reales.
- Generación de informes gráficos: A través de paneles visuales y el almacenamiento de históricos, es posible realizar un análisis detallado del rendimiento energético, lo cual es fundamental para validar la viabilidad técnica y económica del seguidor solar.

6.2. Descripción del entorno del sistema SCADA

El sistema SCADA que se muestra en la figura 89 fue desarrollado por uno de los integrantes del trabajo final de grado en su práctica profesional supervisada (PPS). Para su implementación se eligió el lenguaje de programación Python, principalmente por la amplia disponibilidad de librerías que facilitan la integración entre hardware y software.

Se utilizó la librería Tkinter, que permitió diseñar una interfaz gráfica con las funcionalidades requeridas. Su flexibilidad hizo posible incorporar distintas características y adaptar el sistema a las necesidades del proyecto.

Además, al tratarse de herramientas de código abierto, el desarrollo no implicó costos de licencias, lo que representó una ventaja significativa.

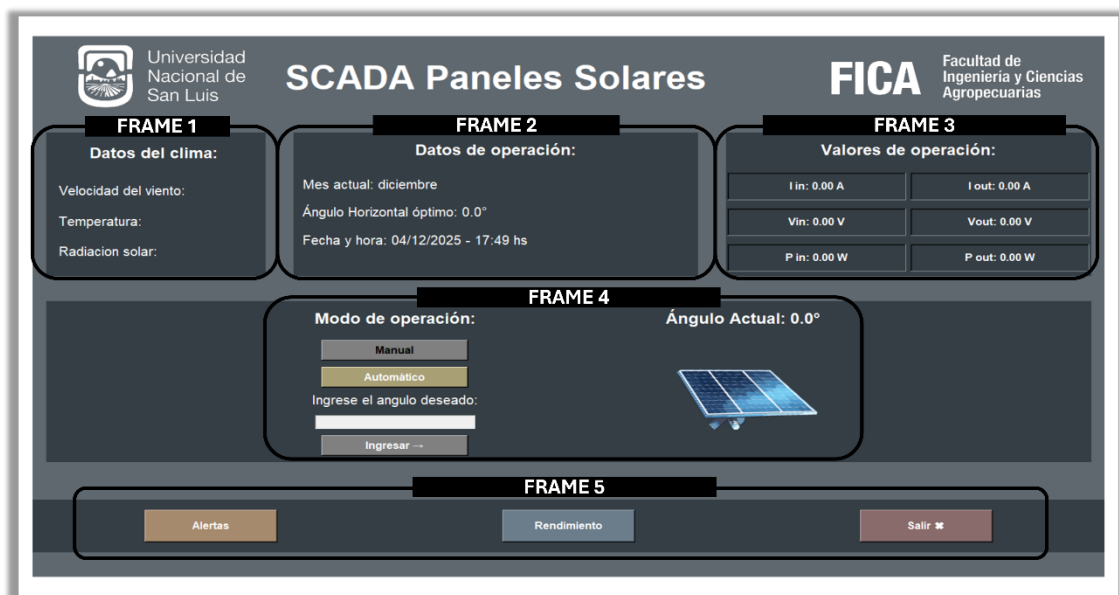


Figura N°89. Pantalla principal del sistema SCADA antes de las modificaciones.

Como se mencionó el diseño de la interfaz gráfica se realizó utilizando la librería Tkinter de Python, siguiendo criterios de usabilidad y claridad operativa. La ventana principal se ejecuta en modo pantalla completa y se encuentra dividida en cinco bloques funcionales o frames, tal como se observa en la figura del sistema implementado:

Datos Climáticos (Frame 1): ubicado a la izquierda, prepara la visualización de variables ambientales (viento, temperatura, radiación).

Datos de Operación (Frame 2): muestra la fecha y hora actual, y, a partir de la lectura de un archivo de Excel, indica el ángulo horizontal óptimo correspondiente al mes en curso.

Valores Eléctricos (Frame 3): Panel derecho dedicado al panel de telemetría. Muestra en tiempo real las lecturas de I_{in} (corriente de entrada), I_{out} (corriente de salida), V_{in} (voltaje de entrada), V_{out} (voltaje de salida), P_{in} (potencia de entrada), P_{out} (potencia de salida).

Control de Modos (Frame 4): permite seleccionar entre modo Manual y Automático. Incluye un campo de entrada para ingresar el ángulo deseado cuando el sistema se encuentra en modo Manual, y una representación gráfica dinámica que modifica la imagen del panel según el ángulo de inclinación actual.

- Modo Manual: Habilita un campo de entrada para que el operador ingrese un ángulo específico (0° - 90°), enviando el comando directo al actuador.
- Modo Automático: Deshabilita la entrada manual y ajusta el seguidor solar basándose en las tablas de radiación óptima pre-cargadas en el sistema. Este panel incluye una representación gráfica dinámica que cambia la imagen del panel según el ángulo de inclinación actual.

Barra de Navegación (Frame 5): Botonera inferior para acceso rápido a ventanas emergentes (Pop-ups) de Alertas y Rendimiento, además del cierre seguro de la aplicación.

6.3. Nuevas adaptaciones

El sistema SCADA desarrollado durante la PPS se utilizó como base, a partir del mismo se realizaron las modificaciones que se consideraron necesarias, a continuación, se visualiza en la tabla 22 un pequeño resumen de estas modificaciones, las cuales luego serán explicadas en detalle.

Tabla N° 22. Comparativa de las modificaciones realizadas en el sistema SCADA.

Aspecto	SCADA — PPS	SCADA — Tesis
Acceso al sistema	Cualquier persona puede abrirlo y usarlo	Requiere usuario y contraseña para ingresar
Tipos de usuario	No hay distinción entre usuarios	Hay tres perfiles: administrador, operador y solo lectura
Dónde se guardan las mediciones	En un archivo Excel	En una base de datos local
Dónde se guardan las alarmas	En el archivo Excel	En la base de datos, con seguimiento de cuándo empiezan y cuándo se resuelven
Configuración de las alarmas	Los valores límite están escritos dentro del código Python	Se pueden modificar desde la pantalla, sin necesidad de acceder al código
Ángulo óptimo del panel	Se lee de una planilla de Excel	Se consulta desde la base de datos
Obtención de datos	Llegan directamente desde el microcontrolador al programa	Se leen desde la base de datos
Manejo de las conexiones	Abre y cierra archivos cada vez que necesita guardar	Usa una conexión permanente y optimizada con la base de datos
Registro de quién hizo qué	No queda constancia	Cada acción queda asociada al usuario que la realizó
Consulta de históricos	Muestra todo el archivo completo	Permite filtrar por rango de fechas
Seguridad de la información	Sin mecanismos de protección	Contraseñas encriptadas y base de datos protegida contra manipulación

6.4. Creación de base de datos

Con el fin de poder realizar las modificaciones descritas en la tabla 22, se decidió reemplazar el almacenamiento y lectura de datos desde un archivo Excel por una bases de datos, utilizando MySQL.

A continuación, se detalla cómo está conformada la base de datos.

6.4.1. Base de datos MySQL

Para poder realizar la operación, supervisión y trazabilidad del seguidor solar a través del sistema SCADA desarrollado en Python, se diseñó una base de datos relacional implementada en MySQL, denominada `scada_db`. Esta base de datos cumple un rol central dentro de la arquitectura del sistema, ya que centraliza tanto la información de configuración (usuarios, umbrales de alarma, ángulos óptimos por mes) como los datos de proceso generados durante la operación (mediciones eléctricas, modos de operación, eventos de alarma y registros de sesión).

Arquitectura general de datos

La base de datos scada_db se organiza en siete tablas que pueden agruparse, según su función dentro del sistema, en tres categorías:

- **Tablas de configuración y seguridad:** usuarios, config_alarmas y angulos_optimos. Contienen información estática o que se actualiza con baja frecuencia, estas definen el comportamiento del sistema y los permisos de acceso.
- **Tablas de operación:** modo_operacion y registro_usuarios. Reflejan las decisiones del operador y la trazabilidad de las sesiones de trabajo.
- **Tablas de proceso y eventos:** mediciones y alarmas. Almacenan en forma continua las variables eléctricas adquiridas y los eventos anómalos detectados durante la operación.

Las relaciones entre tablas (figura 90) se establecen mediante claves foráneas que vinculan los registros de actividad con la tabla usuarios, garantizando que toda acción operativa o evento de alarma pueda ser asociado al usuario responsable en el momento de su ocurrencia.

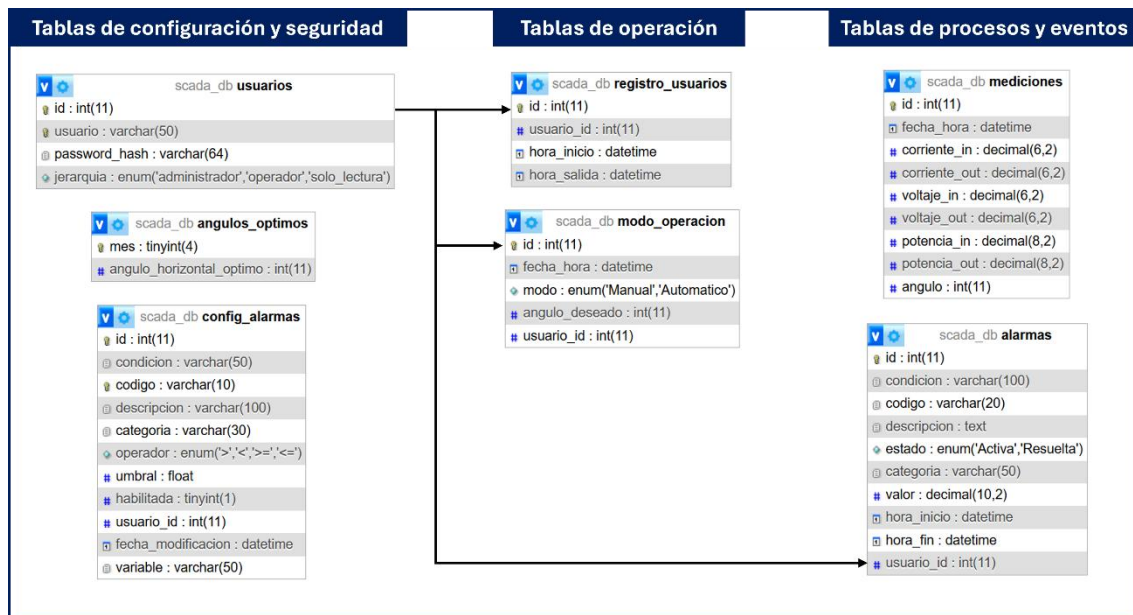


Figura N° 90. Relaciones entre tablas de la base de datos.

Descripción de tablas

Tabla usuarios:

Es la tabla central del esquema de seguridad. En ella se almacenan los usuarios habilitados para operar el SCADA, sus contraseñas en forma de hash SHA-256 y su nivel de

jerarquía. Se definieron tres niveles de acceso, los cuales determinan las acciones permitidas dentro de la aplicación:

- administrador: posee permisos completos. Puede crear, modificar y eliminar usuarios, configurar las alarmas (operadores, umbrales y habilitación) y operar el seguidor solar modificando su posición desde el SCADA.
- operador: puede operar el sistema y modificar la posición del panel solar (modo manual o automático), pero no puede gestionar usuarios ni reconfigurar alarmas.
- solo_lectura: cuenta con acceso únicamente a la visualización de variables, históricos y alarmas, sin capacidad de realizar cambios sobre el sistema.

Tabla N° 23. Estructura de la tabla usuarios.

Campo	Tipo	Descripción
id	INT	Identificador único del usuario, autoincremental.
usuario	VARCHAR	Nombre de usuario, con restricción UNIQUE para evitar duplicados.
password_hash	VARCHAR	Contraseña almacenada como hash SHA-256 (64 caracteres hexadecimales).
jerarquia	ENUM	Nivel de acceso: 'administrador', 'operador' o 'solo_lectura'.

El almacenamiento de contraseñas se realiza siempre en forma hasheada; el SCADA nunca guarda ni transmite la contraseña en texto plano. Al momento del login, la contraseña ingresada se procesa con la función `hash_password()` del SCADA, que aplica el algoritmo SHA-256, y el resultado se compara directamente con el campo `password_hash` de la tabla.

Tabla registro_usuarios

Esta tabla cumple la función de registro de sesiones. Cada vez que un usuario inicia sesión en el SCADA, se inserta un nuevo registro con su identificador y la marca de tiempo de inicio. Cuando ese mismo usuario cierra sesión se actualiza el campo `hora_salida` del mismo registro. De esta manera se obtiene la trazabilidad completa de quién operó el sistema y durante qué intervalo.

Tabla N° 24. Estructura de la tabla registro_usuarios.

Campo	Tipo	Descripción
id	INT	Identificador único del registro de sesión.
usuario_id	INT	Referencia al usuario que inició sesión.
hora_inicio	DATETIME	Hora del momento de ingreso al sistema.
hora_salida	DATETIME	Hora del cierre de sesión; queda en NULL mientras la sesión está activa.

Tabla angulos_optimos

Contiene los valores de ángulo horizontal óptimo del seguidor solar para cada mes del año, expresados en grados. Estos valores fueron obtenidos a partir de datos históricos de irradiancia provistos por la base de datos de la NASA (POWER – Prediction Of Worldwide Energy Resources), correspondientes a la ubicación geográfica del sistema. La tabla constituye una referencia estática que el SCADA consulta cuando opera en modo automático para determinar el ángulo deseado en función del mes en curso.

Tabla N° 25. Estructura de la tabla angulos_optimos.

Campo	Tipo	Descripción
mes	TINYINT	Número de mes del año, de 1 a 12.
angulo_horizontal_optimo	INT	Ángulo horizontal óptimo, en grados, para ese mes.

Tabla modo_operacion

Registra los cambios de modo de operación del sistema. El SCADA permite trabajar en dos modos: Manual, donde el operador ingresa el ángulo deseado del panel; y Automatico, en el cual el ángulo deseado se obtiene de la tabla angulos_optimos en función del mes en curso. Cada cambio de modo, junto con el ángulo asociado y el usuario que lo modifico, queda almacenado para fines de trazabilidad y auditoría.

Tabla N° 26. Estructura de la tabla modo_operacion.

Campo	Tipo	Descripción
id	INT	Identificador único del registro.
fecha_hora	DATETIME	Momento exacto del cambio de modo.
modo	ENUM	Modo seleccionado: 'Manual' o 'Automático'.
angulo_deseado	INT	Ángulo de consigna aplicado al sistema, en grados.
usuario_id	INT	Usuario que realizó el cambio.

Tabla mediciones

Esta tabla almacena periódicamente las variables eléctricas, así como el ángulo actual del seguidor, lo que permite armar el histórico de funcionamiento.

Tabla N° 27. Estructura de la tabla mediciones.

Campo	Tipo	Descripción
id	INT	Identificador único de la medición, autoincremental.
fecha_hora	DATETIME	Hora de la medición.
corriente_in	DECIMAL	Corriente a la entrada (A).
corriente_out	DECIMAL	Corriente a la salida (A).
voltaje_in	DECIMAL	Voltaje a la entrada (V).
voltaje_out	DECIMAL	Voltaje a la salida (V).
potencia_in	DECIMAL	Potencia calculada a la entrada (W).
potencia_out	DECIMAL	Potencia calculada a la salida (W).
angulo	INT	Ángulo actual del seguidor solar (grados).

Los valores de corriente y voltaje a la entrada del convertidor son los empleados por el algoritmo MPPT con control de voltaje para localizar el punto de máxima potencia, mientras que las variables de salida permiten cuantificar la potencia entregada a la carga y evaluar la eficiencia de conversión.

Tabla config_alarmas

Contiene la configuración de las alarmas del sistema. Únicamente los usuarios con jerarquía de administrador pueden insertar, modificar o eliminar registros en esta tabla desde el SCADA. Cada registro define una condición evaluable sobre una variable de proceso (por ejemplo, voltaje_in o potencia_out), un operador de comparación, un umbral numérico y un código identificadorio. Mientras la alarma se encuentre habilitada, el SCADA evalúa la condición sobre las mediciones más recientes y, ante su cumplimiento, genera un evento en la tabla alarmas.

Tabla N° 28. Estructura de la tabla config_alarmas

Campo	Tipo	Descripción
id	INT	Identificador único de la configuración de alarma.
condicion	VARCHAR	Nombre descriptivo de la condición (p. ej. 'Voltaje alta').
codigo	VARCHAR	Código identificadorio único (p. ej. 'V-001').
descripcion	VARCHAR	Descripción extendida del evento.
categoria	VARCHAR	Categoría: 'Voltaje', 'Corriente', 'Potencia', etc.
operador	ENUM	Operador relacional: '>', '<', '>=' o '<='.
umbral	FLOAT	Valor de comparación con el cual se evalúa la variable.
habilitada	TINYINT	Indicador de habilitación de la alarma (1 = activa, 0 = inactiva).

variable	VARCHAR	Nombre de la variable de proceso a evaluar.
usuario_id	INT	Usuario que realizó la última modificación.
fecha_modificacion	DATETIME	Registra la hora de la última modificación.

Tabla alarmas

Almacena los eventos de alarmas ocurridos durante la operación del sistema. Cuando una condición definida en config_alarmas se cumple, el SCADA inserta un nuevo registro con estado 'Activa', el código y descripción correspondientes, el valor que disparó la alarma y la marca de hora de inicio. Al normalizarse la condición, el mismo registro se actualiza fijando el estado en 'Resuelta' y la marca de hora_fin. Adicionalmente se almacena el usuario que se encontraba en sesión al momento del evento, lo que permite relacionar la actividad del operador con los incidentes del sistema.

Tabla N° 29. Estructura de la tabla alarmas.

Campo	Tipo	Descripción
id	INT	Identificador único del evento de alarma.
condicion	VARCHAR	Nombre de la condición disparada.
codigo	VARCHAR	Código identificador (proveniente de config_alarmas).
descripcion	TEXT	Descripción del evento.
estado	ENUM	Estado del evento: 'Activa' o 'Resuelta'.
categoria	VARCHAR	Categoría de la alarma.
valor	DECIMAL	Valor de la variable que disparó la alarma.
hora_inicio	DATETIME	Hora del inicio del evento.
hora_fin	DATETIME	Hora de la normalización (NULL mientras está activa).
usuario_id	INT	Usuario en sesión al momento del evento.

6.4.2. Adaptación del SCADA a la nueva base de datos

Conexión entre el SCADA y la base de datos

La comunicación entre la aplicación SCADA, desarrollada en Python y la base de datos MySQL se realiza mediante la librería oficial mysql.connector. además, para optimizar el acceso concurrente y minimizar la latencia por la apertura repetida de conexiones, se implementó un pool de conexiones (MySQLConnectionPool) que se inicializa una única vez al iniciar del sistema.

Cada operación sobre la base solicita una conexión, si la conexión inicial falla, el SCADA aborta su ejecución mostrando un mensaje de error crítico al usuario, evitando que la aplicación opere en un estado inconsistente sin acceso a la base de datos.

Autenticación y control de acceso

El proceso de autenticación se inicia desde la ventana de login del SCADA. La contraseña ingresada por el usuario se transforma mediante la función `hash_password()` (SHA-256) y se compara con el campo `password_hash` de la tabla `usuarios`. Si la verificación es correcta, se recuperan el `id` y la jerarquía del usuario, y este último valor es el que controla la habilitación o deshabilitación de los distintos elementos de la interfaz: botones de configuración de alarmas, gestión de usuarios y comandos de movimiento del seguidor. De esta forma, los permisos definidos en la base de datos se reflejan directamente en las acciones disponibles dentro del SCADA.

Registro de sesiones

Inmediatamente después de un login exitoso, la función `registrar_login(user_id)` inserta un registro en la tabla `registro_usuarios` con la marca de tiempo actual y conserva en memoria el `id` de ese registro. Al cerrarse la sesión se ejecuta una sentencia `UPDATE` sobre el mismo registro para fijar el campo `hora_salida`. Esto provee un registro completo de las sesiones de operación del sistema.

Selección del modo de operación

Cuando el operador cambia el modo del sistema, se inserta un registro en `modo_operacion` indicando el modo seleccionado, el ángulo deseado y el `id` del usuario que realizó la acción. Si el modo es Automático, el ángulo deseado no es ingresado por el usuario, sino que se obtiene mediante una consulta `SELECT` a la tabla `angulos_optimos` utilizando como clave el mes en curso:

El valor recuperado se utiliza tanto como referencia para el control de posición del seguidor como para almacenarse en el campo `angulo_deseado` de `modo_operacion`.

Adquisición y registro de mediciones

El SCADA realiza la adquisición periódica de las variables eléctricas (corrientes, voltajes y potencias de entrada y salida del convertidor Buck) y del ángulo actual del seguidor. Cada conjunto de muestras se inserta en la tabla `mediciones`, conformando el histórico que alimenta los gráficos de tendencia, los reportes y el motor de evaluación de alarmas. Para la actualización de los indicadores en tiempo real, el SCADA consulta el último registro disponible.

Gestión de alarmas

El subsistema de alarmas se apoya en dos tablas complementarias. La tabla `config_alarmas` contiene las condiciones definidas por el administrador (variable, operador, umbral, código, descripción y estado de habilitación), mientras que `alarmas` registra los eventos efectivos. En cada ciclo de evaluación, el SCADA recupera todas las configuraciones habilitadas mediante una consulta `SELECT` a `config_alarmas` y verifica cada condición sobre la última medición disponible. Cuando una condición se cumple y aún no existe una alarma activa con el mismo código, se inserta un nuevo registro en `alarmas` con estado 'Activa', el valor disparador, la `hora_inicio` y el `id` del usuario en sesión. Cuando la condición se normaliza, se ejecuta un `UPDATE` sobre el registro abierto para fijar el estado en 'Resuelta' y completar el campo `hora_fin`. La modificación de las configuraciones (alta, baja o cambio de umbrales) está restringida por la lógica del SCADA a usuarios con jerarquía de administrador, en base con el esquema de permisos descripto.

Aspectos de seguridad y diseño

- Hashing de contraseñas: las contraseñas se almacenan exclusivamente como hash SHA-256, evitando su exposición ante eventuales accesos no autorizados a la base.
- Pool de conexiones: el uso de `MySQLConnectionPool` reduce la latencia de acceso y permite que múltiples hilos de la aplicación (adquisición, evaluación de alarmas y eventos de la GUI) accedan a la base sin bloquearse mutuamente.
- Integridad referencial: las claves foráneas de `alarmas`, `modo_operacion` y `registro_usuarios` hacia `usuarios` garantizan que todo evento o acción quede asociado a un usuario válido.
- Trazabilidad: la combinación de las tablas `registro_usuarios`, `modo_operacion` y `alarmas` permite reconstruir la línea de tiempo completa de la operación del sistema, identificando qué usuario realizó cada acción y qué eventos se produjeron en cada intervalo.

6.5. Diseño final del sistema SCADA

A continuación, se visualiza un diagrama de bloques de como quedó conformado el sistema SCADA (en el anexo B, se adjuntan cada una de las imágenes que conforman el diagrama).

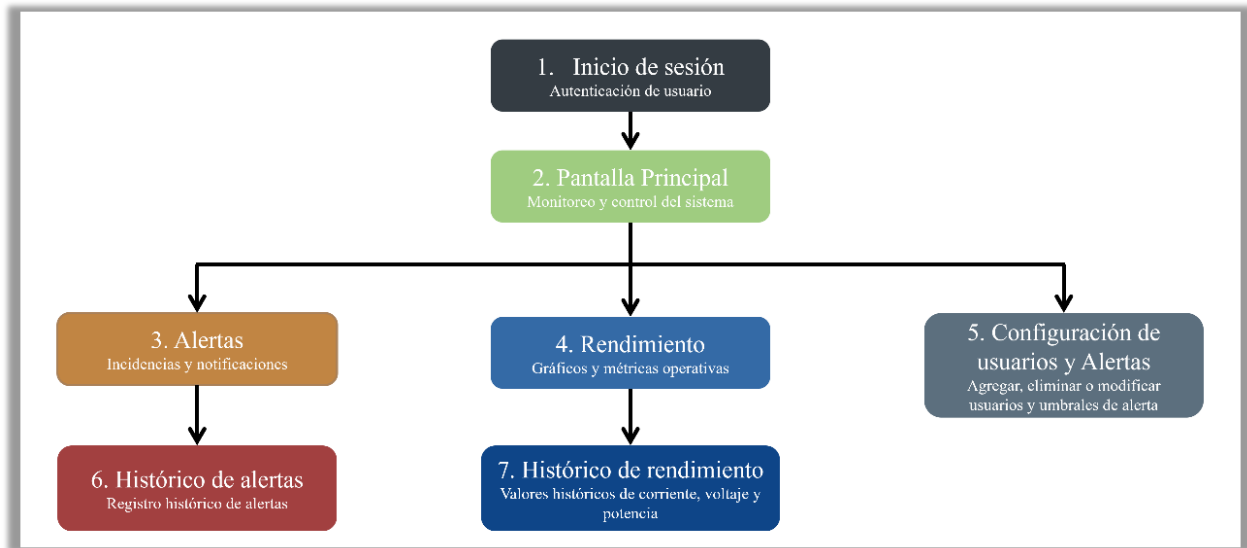


Figura N° 91. Diagrama de bloques del sistema SCADA.

En el cual, al abrir el sistema aparece a la pantalla de inicio de sesión, donde el usuario ingresa sus datos.

Una vez autenticado, se despliega la pantalla principal, la cual permite visualizar en tiempo real las variables climáticas, las mediciones de voltaje, corriente y potencia tanto de entrada como de salida, el estado operativo del sistema y la posición actual del panel solar. Además, de poder modificar el modo de operación (manual o automático) cargando el ángulo deseado.

Desde la pantalla principal se puede acceder a los siguientes popup del sistema:

- **Alertas:** en ella se visualizan las incidencias y notificaciones generadas durante la operación del sistema.
- **Histórico de alertas:** almacena el registro histórico de las alertas ocurridas, incluyendo información sobre su estado, categoría, hora y el usuario activo al momento de activación.
- **Rendimiento:** presenta indicadores de desempeño energético mediante gráficos de corrientes, voltajes y potencias tanto de entrada como de salida.

- **Históricos de rendimiento:** podremos consultar y analizar los valores registrados de las variables eléctricas como así también el ángulo para cada medición.
- **Configuración de usuarios:** permite la creación, modificación y eliminación de usuarios (solo siendo administrador).
- **Configuración de alertas:** en ella podremos definir condiciones de alarma y gestionar las alertas existentes según los requerimientos de operación (solo siendo administrador).

Finalmente, el sistema incorpora la opción de cierre de sesión, finalizando la interacción del usuario con la aplicación.

A partir de las modificaciones realizadas anteriormente, se sigue con la comunicación del SCADA con el sistema del seguidor solar, con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento.

6.6. Ensayo experimental 5: Verificación de la comunicación del sistema

El objetivo de esta prueba consiste en verificar la correcta comunicación entre las diferentes partes que componen al sistema, las cuales se visualizan en la figura 92.

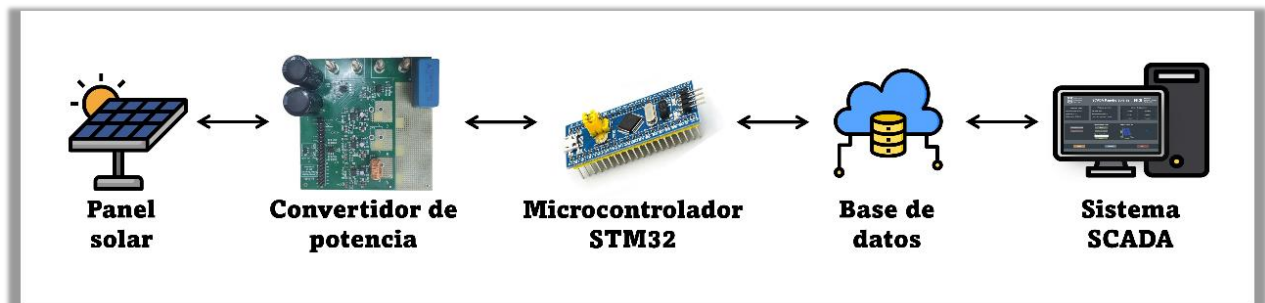


Figura N°92. Diagrama de bloques de la comunicación de parte del sistema.

Para esta etapa no es necesaria el algoritmo MPPT, por lo que el convertidor de potencia operó con un ciclo de trabajo fijo. De esta manera, es posible evaluar la comunicación y la adquisición de datos sin que las variaciones del algoritmo afecten las mediciones realizadas.

Prueba sin carga

Como primer paso se organizó el entorno de trabajo, como se visualiza en la figura 93, utilizando el panel fotovoltaico, el convertidor de potencia, una carga variable, además de los instrumentos necesarios para la medición de las variables y fuentes para la alimentación de los componentes.

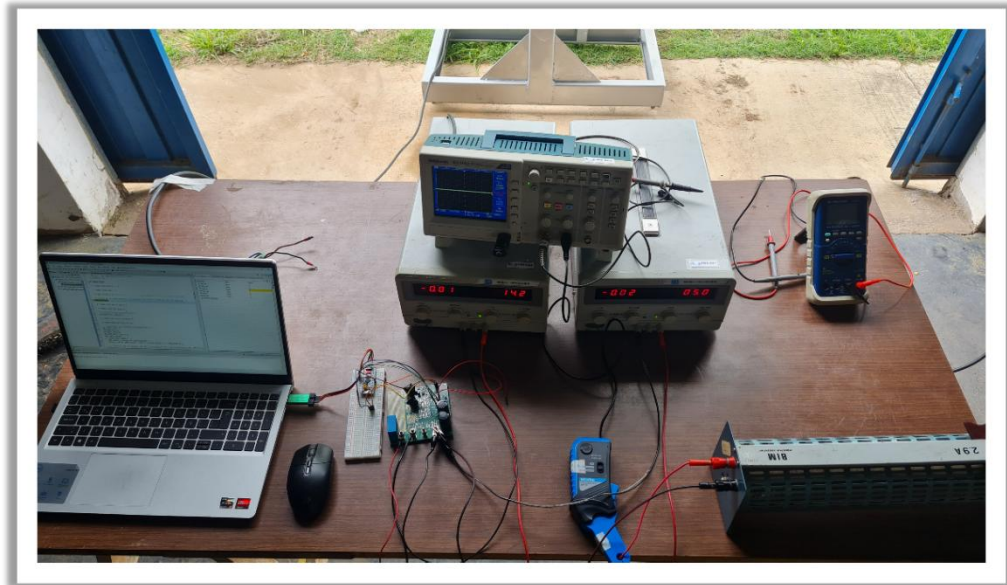


Figura N°93. Entorno de trabajo para el ensayo de verificación de la comunicación del sistema.

A continuación, se visualiza el panel solar utilizado, como así también el valor de la carga resistiva conectada al mismo. Para este caso como no es necesario trabajar con valores de corrientes altos se la ajusto a un valor de $30\ [\Omega]$, de esta forma el valor de corriente máximo no superara los $2,5\ [A]$.

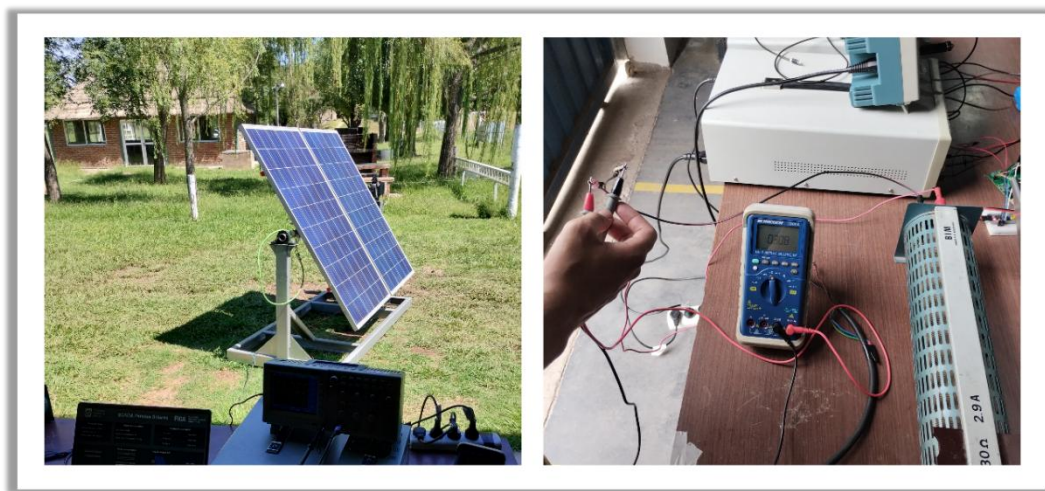


Figura N° 94. Panel solar utilizado y medición de la resistencia variable.

Una vez establecido el entorno de trabajo, se realizó una prueba con la carga desconectada, permitiendo medir el voltaje de circuito abierto del panel fotovoltaico, bajo estas condiciones, la corriente entregada por el sistema fue prácticamente nula, mientras que el voltaje alcanzó su valor máximo de operación, esto puede observarse en la figura 95.

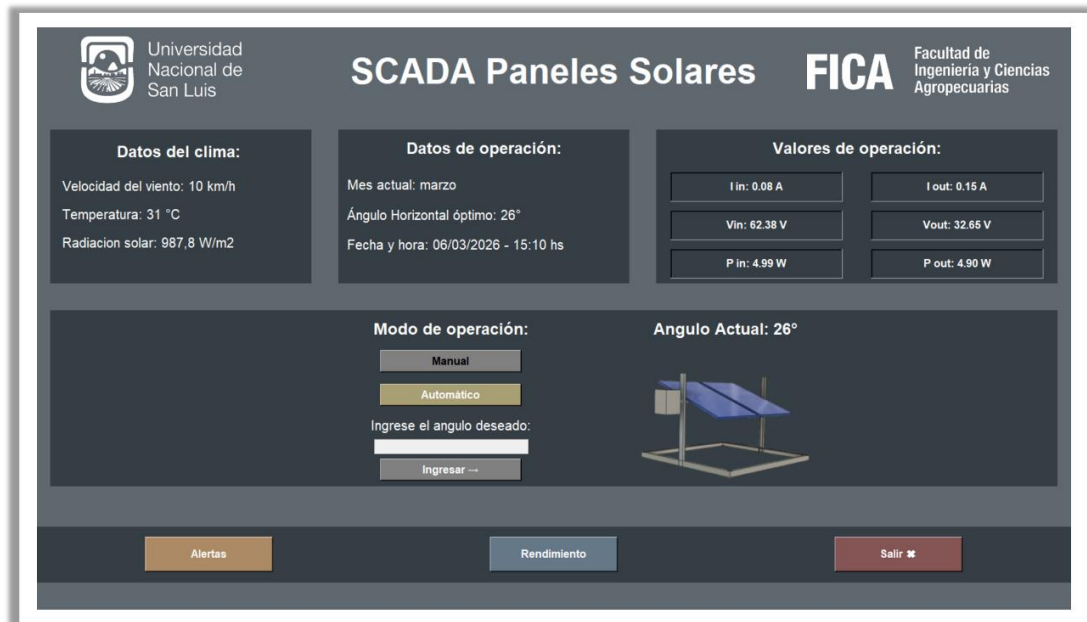


Figura N° 95. Visualización de las variables al desconectar la carga en el sistema SCADA.

Los valores de voltaje de entrada y salida mostrados por el sistema SCADA fueron contrastados mediante un multímetro digital de referencia.



Figura N° 96. Medición de voltajes de entrada y salida sin carga.

Los resultados obtenidos evidenciaron una alta concordancia entre ambas mediciones, verificando el correcto funcionamiento de la adquisición de datos, la transmisión de información y la visualización de las variables eléctricas en el sistema SCADA

Prueba con carga

La segunda prueba consistió en conectar la carga, obteniendo los valores de corriente, voltaje y potencia que se observan en la siguiente figura 98 del sistema SCADA.



Figura N° 97. Visualización de las variables al conectar la carga en el sistema SCADA

Como en el caso anterior se compararon los valores de los voltajes de entrada y salida utilizando un multímetro digital.



Figura N° 98. Medición de voltajes de entrada y salida con carga.

Además, las corrientes de entrada y salida fueron verificadas utilizando una pinza amperométrica conectada al osciloscopio.

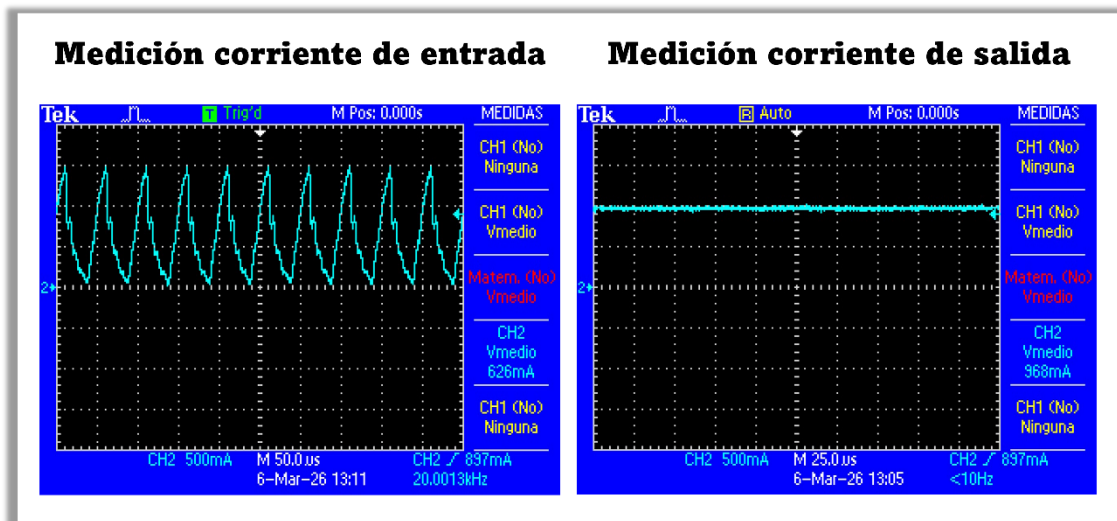


Figura N° 99. Medición de la corriente de entrada y salida utilizando un osciloscopio.

Los resultados obtenidos mostraron una buena concordancia entre los valores medidos por los instrumentos de referencia y los registrados por los sensores del convertidor de potencia. Si bien se observaron pequeñas diferencias en algunas variables, estas se encuentran dentro de los márgenes esperables considerando las tolerancias de los sensores, los instrumentos de medición y el proceso de adquisición de datos.

A partir de las pruebas realizadas, se comprobó el correcto funcionamiento entre las diferentes partes, verificando que los datos adquiridos por los sensores son transmitidos, almacenados y visualizados adecuadamente en el sistema SCADA. Además, se validó la capacidad del sistema para supervisar en tiempo real las principales variables eléctricas del convertidor fotovoltaico, constituyendo una etapa fundamental para la posterior automatización e integración con el seguidor solar.

CAPÍTULO 7: Programación de microcontroladores y ensayos de comunicación

En este capítulo se presenta la implementación del software desarrollado para los microcontroladores que conforman el sistema, así como la integración de estos con el sistema SCADA. En primer lugar, se describe la comunicación establecida con el microcontrolador ESP32 encargado del posicionamiento del seguidor solar, detallando la arquitectura de comunicación, el protocolo utilizado y los ensayos realizados para validar el correcto intercambio de información. Posteriormente, se desarrolla la configuración del microcontrolador STM32, responsable del control del convertidor Buck, la adquisición de las variables eléctricas y la comunicación con el sistema SCADA.

7.1. Comunicación entre sistema SCADA y seguidor solar

En este apartado se describe la comunicación establecida entre el sistema SCADA y el seguidor solar. Como se mencionó anteriormente, este último forma parte de un proyecto de grado desarrollado por otro estudiante. En dicho proyecto, el control de la posición del seguidor solar se realiza mediante un microcontrolador ESP32, el cual recibe y procesa las señales necesarias para orientar adecuadamente el sistema fotovoltaico.

Por lo tanto, en esta sección se busca establecer una comunicación estable con el microcontrolador, de manera que el sistema SCADA pueda enviar una señal de referencia y el ESP32 ejecute la acción correspondiente, según lo implementado en el proyecto del otro estudiante.

Objetivos:

- Establecer comunicación confiable entre el sistema SCADA y el ESP32.
- Implementar protocolo de comunicación robusto.
- Proporcionar visualización en tiempo real en display LCD.
- Garantizar funcionamiento automático y manual del posicionador.
- Registro de eventos.

A partir de ello se realizó el siguiente diagrama de comunicación de cómo está conformado el sistema, donde se utilizó un protocolo de comunicación TCP además de un enlace de comunicación en Python:

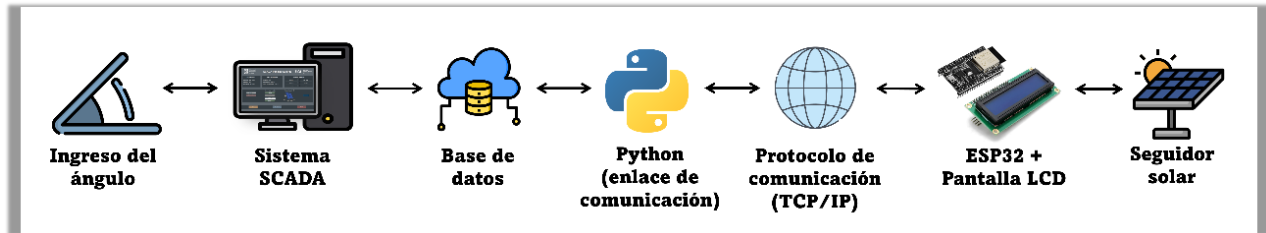


Figura N° 100. Diagrama de bloques de la comunicación entre el SCADA y el seguidor solar.

Descripción General del Sistema

Como se observa en el diagrama de bloques de la figura 101, el ángulo ingresado en el sistema SCADA se almacena en una base de datos. Posteriormente, mediante un programa desarrollado en Python (implementado con el objetivo de desacoplar ambas partes del sistema) se obtiene dicho valor y, a través de un protocolo de comunicación Wi-Fi TCP/IP, se envía al microcontrolador ESP32. De esta manera, el seguidor solar puede posicionarse en el ángulo deseado u óptimo.

Además, el ángulo seleccionado puede visualizarse en tiempo real mediante un display LCD conectado al microcontrolador, lo que proporciona una realimentación continua del sistema.

El desacoplamiento entre el sistema SCADA y el controlador permite mejorar la flexibilidad y la escalabilidad de la arquitectura, además de facilitar las tareas de mantenimiento y depuración (debugging).

Protocolo de Comunicación TCP/IP

El protocolo de comunicación implementado entre la aplicación desarrollada en Python y el microcontrolador ESP32 utiliza un esquema síncrono del tipo request/response, basado en TCP/IP sobre una red Wi-Fi. Este protocolo garantiza una transmisión confiable de los datos, asegurando que la información llegue en el orden correcto y sin pérdidas durante la comunicación.

La arquitectura adoptada sigue un modelo cliente-servidor, donde la aplicación en Python actúa como cliente y el ESP32 como servidor. Además, los datos se transmiten en formato de texto ASCII, permitiendo una implementación simple y eficiente.

En la tabla 30, se presentan las principales características y parámetros de configuración del protocolo de comunicación implementado.

Tabla N° 30. Características del protocolo de comunicación.

Aspecto	Especificación
Protocolo	TCP/IP (confiable, en orden, sin pérdidas)
Modelo	Cliente-Servidor (Python = cliente, ESP32 = servidor)
Puerto	Configurable
Formato	ASCII texto
Rango	0 a 90 grados

7.2. Ensayo experimental 6: Comunicación del sistema SCADA al microcontrolador del seguidor solar

Esta prueba tiene como objetivo verificar la correcta comunicación entre el sistema SCADA y el microcontrolador ESP32, el cual es el encargado de enviar el ángulo de posicionamiento al seguidor solar.

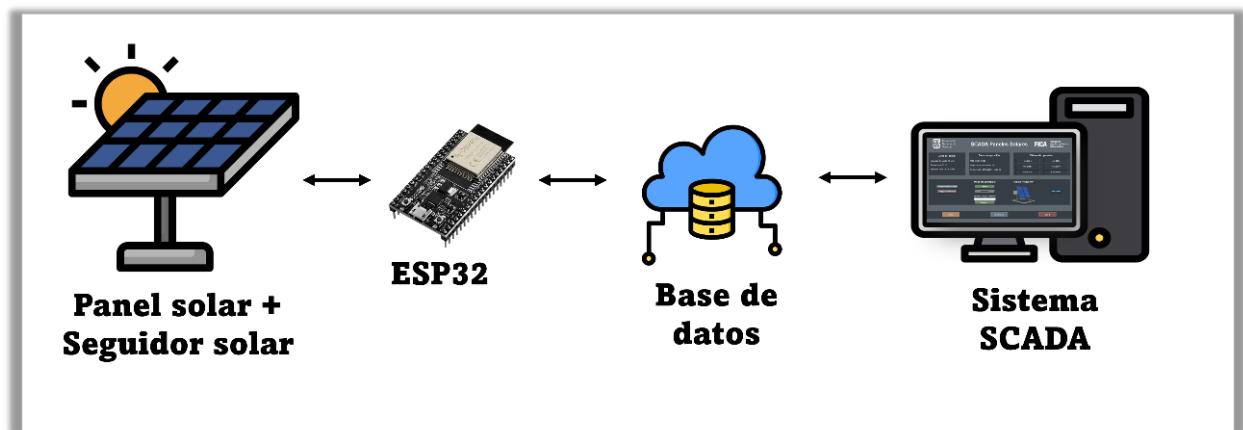


Figura N° 101. Diagrama de bloques de la comunicación entre el sistema SCADA y el seguidor solar.

Para ello, se desarrolló un programa en Python que obtiene el último valor de ángulo almacenado en la base de datos y lo envía al ESP32 mediante comunicación Wi-Fi. En la figura 102, se muestra el entorno de trabajo utilizado para la realización de esta prueba.

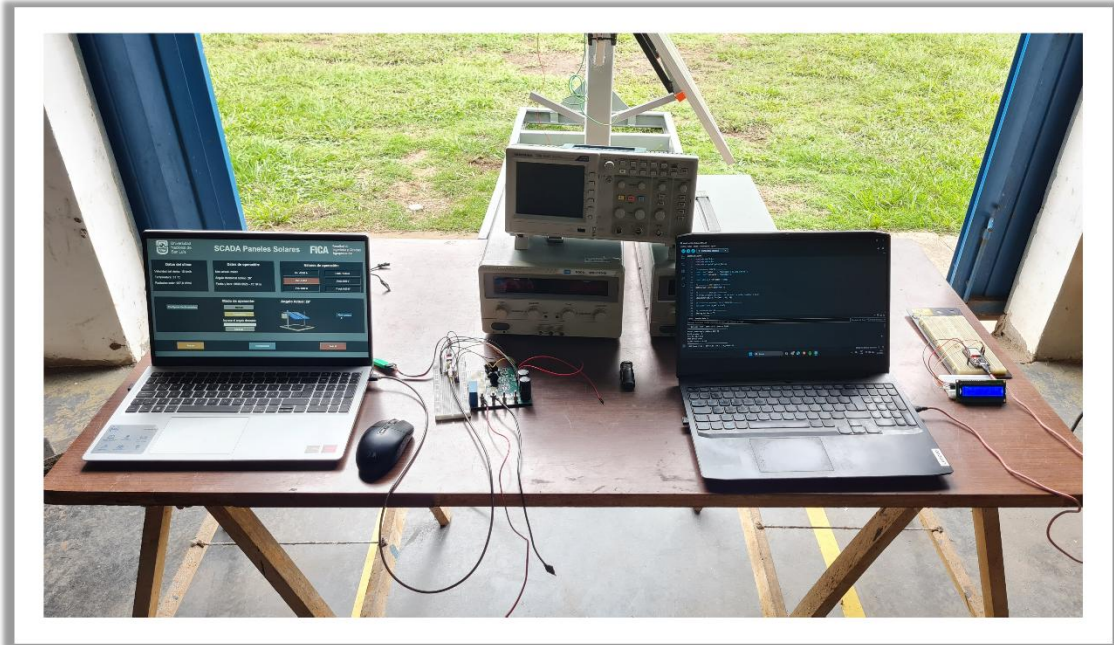


Figura N° 102. Entorno de trabajo utilizado para el ensayo de comunicación.

La cual consiste en una computadora que está corriendo el sistema SCADA y el programa realizado en Python y otra en la cual está conectado el ESP32, es importante mencionar que ambas computadoras deben estar conectadas a la misma red para que la comunicación sea posible.

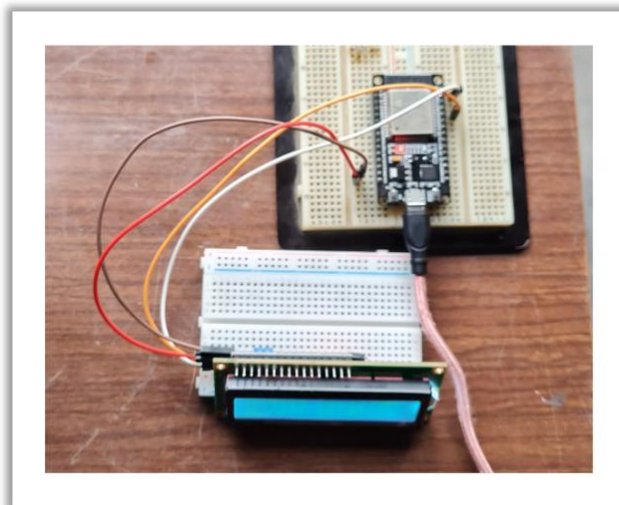


Figura N° 103. Conexión entre el microcontrolador ESP32 y la pantalla LCD.

Se observa en la figura 103, que al microcontrolador se le ha conectado una pantalla, esta tiene por objetivo que se pueda visualizar el valor del ángulo recibido.

Se observa en las figuras 104 y 105. El ángulo enviado por el sistema SCADA y el ángulo recibido en el microcontrolador ESP32, el cual coincide, verificando de esta manera el correcto funcionamiento entre ambas partes.

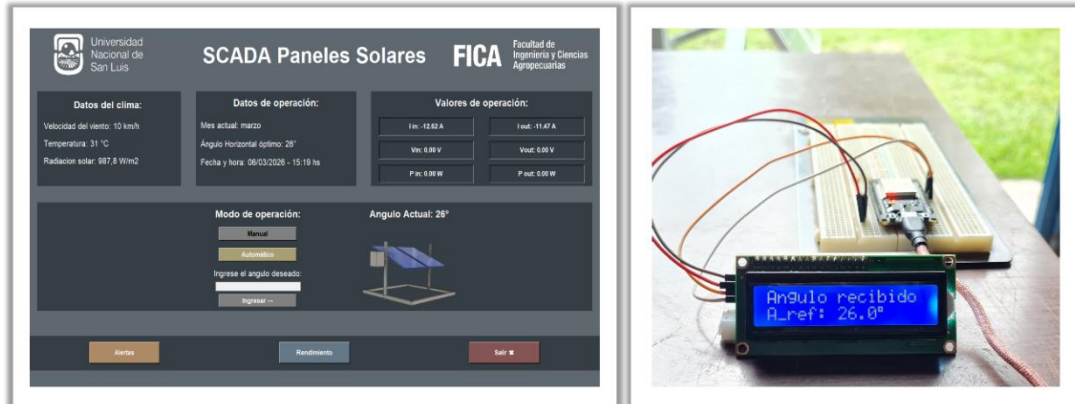


Figura N° 104. Visualización del sistema SCADA y en ángulo recibido de 26.0°.

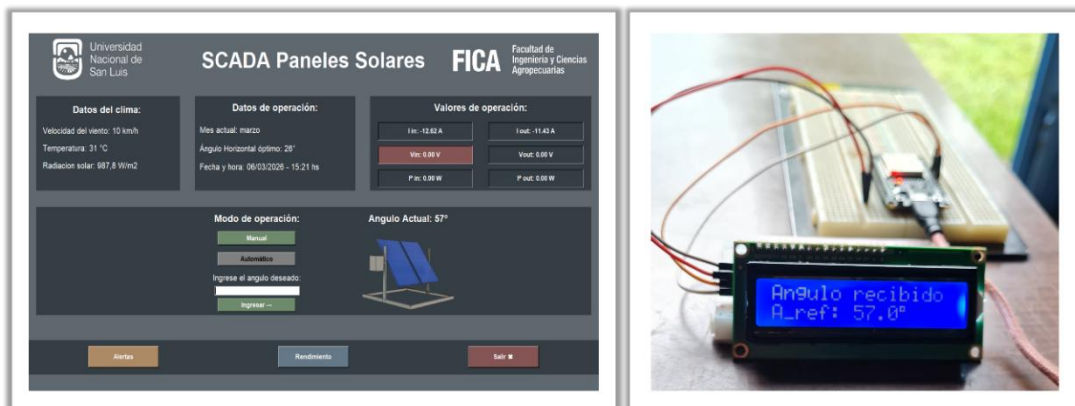


Figura N° 105. Visualización del sistema SCADA y en ángulo recibido de 57.0°.

7.3. Configuración y programación del microcontrolador STM32

En esta apartado se explica la configuración realizada en el microcontrolador, el cual es el encargado del disparo de las llaves, la lectura de las variables eléctricas, como así también de enviar los datos obtenidos al sistema.

7.3.1. Configuración del entorno Cubelde

La implementación se basa en configurar cuatro periféricos del microcontrolador:

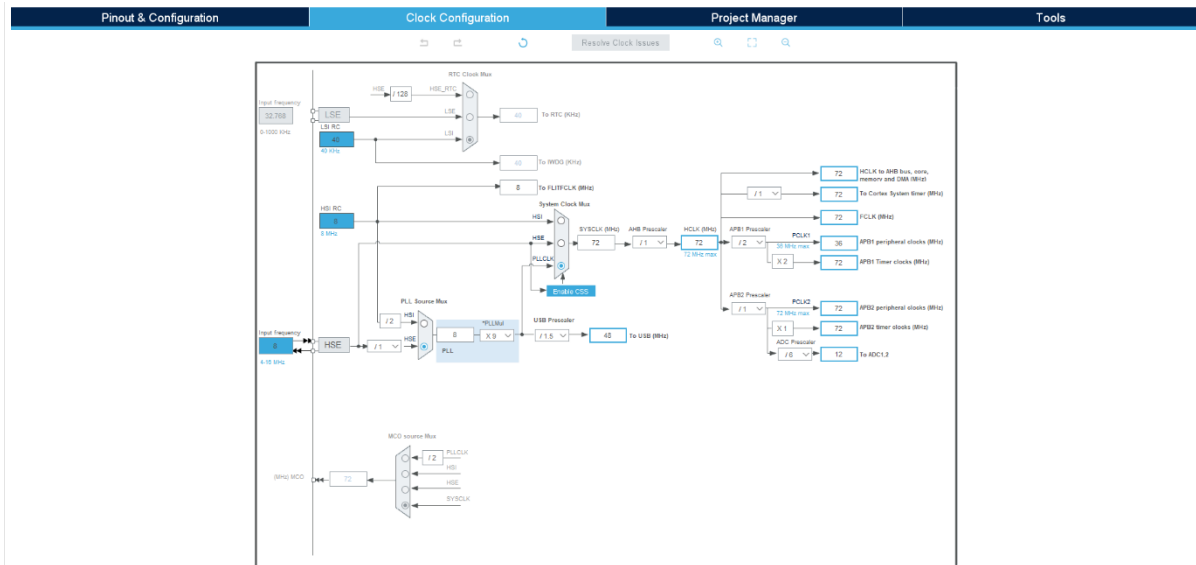


Figura N° 86. Configuración del CLOCK del entorno CUBEIDE.

Luego se configuró el ADC1 en los pines PA0, PA1, PA2 y PA3 (canales IN0 a IN3) en modo Scan, de modo que en cada disparo se realice un barrido completo de los cuatro canales. El disparo se obtiene del evento de comparación del canal 2 del TIMER 2 (TIM2_CH2). De esta forma, el ADC toma simultáneamente las muestras de las voltajes y corrientes del convertidor en el instante preciso definido por el PWM.

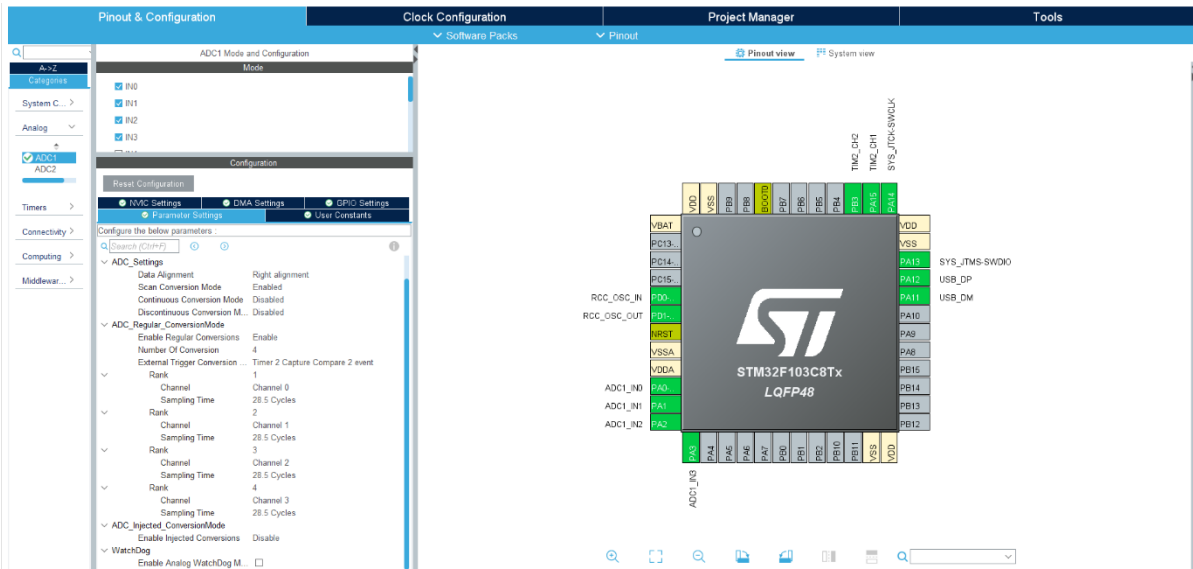


Figura N° 87. Configuración del ADC1 en el entorno CUBEIDE.

Para que no sea interrumpida la captura, se habilitó el DMA1 (canal 1) asociado al ADC1, configurado en modo circular. El DMA llena automáticamente un buffer de 200 posiciones organizado como 50 muestras por los 4 canales, y al completarse el llenado dispara la interrupción donde se procesan los datos.

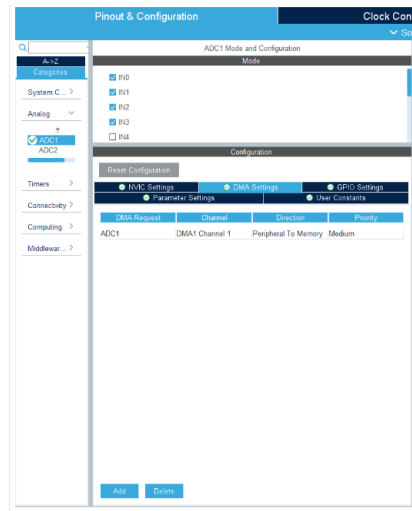


Figura N° 88. Configuración de la pestaña DMA en el entorno CUBEIDE.

Luego se siguió con la configuración del TIMER 2 a 20 kHz, implementando dos canales que cumplen las siguientes funciones:

- Canal 1 (TIM2_CH1) en modo PWM1: genera la señal física que controlan los MOSFET del Buck. Su ciclo de trabajo es modificado por el controlador.
- Canal 2 (TIM2_CH2) en modo PWM2 (sin salida física): se utiliza únicamente como disparo interno del ADC. Su valor de comparación se mantiene en la mitad del valor del canal 1, de modo que el muestreo del ADC ocurre exactamente en el centro del pulso de conducción del MOSFET, que es el instante de menor ruido conmutado.

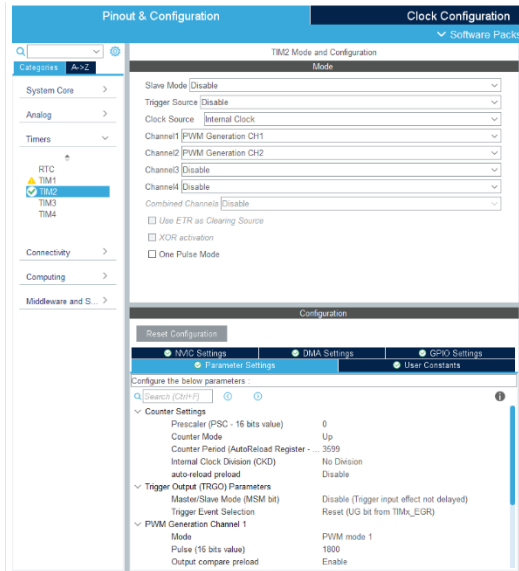


Figura N° 89. Configuración TIMER 2 en el entorno CUBEIDE.

Finalmente, los parámetros del TIMER 2 se ajustaron para obtener una frecuencia de PWM de 20 kHz a partir del reloj de 72 MHz, con un prescaler nulo y un período de auto-recarga de 3599. El registro de comparación del Canal 1 (CCR1) se inicializa en 1800, lo que corresponde a un ciclo de trabajo inicial del 50 %.

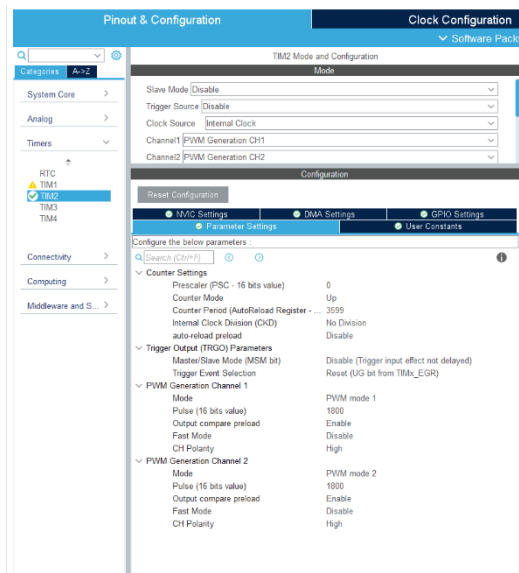


Figura N° 90. Configuración de los parámetros del Timer 2 dentro del entorno CUBEIDE.

Adicionalmente, en la pestaña Connectivity se habilitó el periférico USB en modo "Device (FS)", y en Middleware se agregó la clase USB CDC (Communication Device Class), que genera un puerto serie virtual.

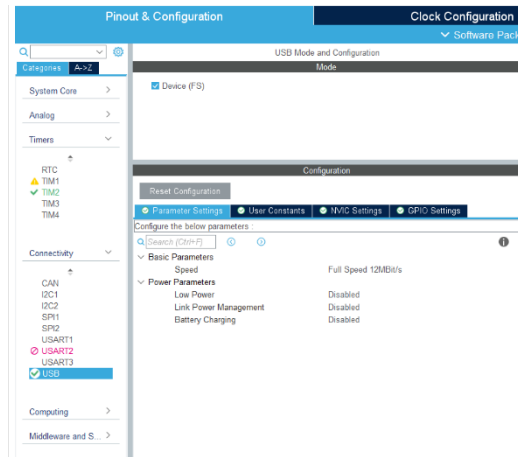


Figura N° 91. Configuración del USB en modo CDC dentro del entorno CUBEIDE.

A continuación, se visualiza un diagrama de bloques explicando la interacción del sistema:

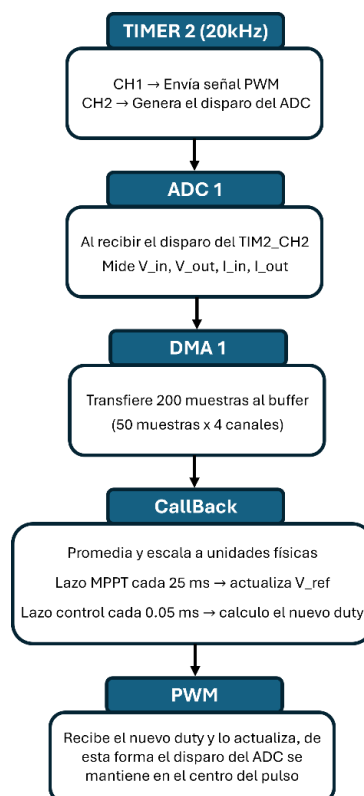


Figura N° 92. Diagrama de bloques de la interacción entre periféricos.

7.3.2. Implementación del controlador digital en código C

Mediante un diagrama de bloques, figura 114, se visualiza el funcionamiento del código C realizado para el microcontrolador, donde se puede observar cómo están relacionadas las diferentes partes que componen el programa. El código incorpora dos controladores de que se ejecutan dentro de la misma interrupción: un controlador que regula el voltaje de entrada del convertidor Buck, y un algoritmo MPPT que actualiza periódicamente el voltaje de referencia para mantener al panel solar en su punto de máxima potencia.

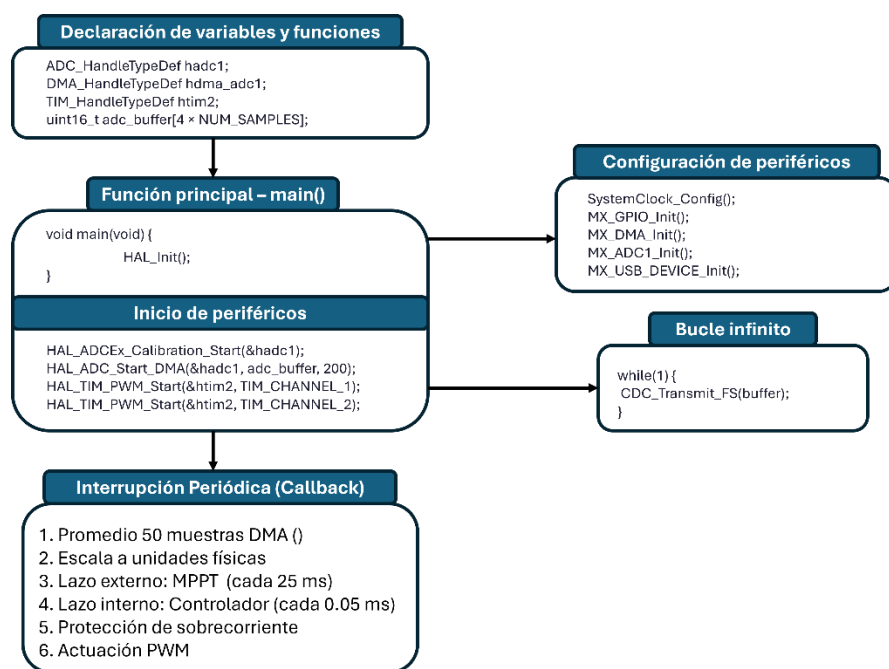


Figura N° 93. Diagrama de bloques del código C.

En la figura 115 se observa la función del controlador, que regula el voltaje de entrada del Buck siguiendo la referencia entregada por el algoritmo MPPT.

```

// =====
// 2. CONTROLADOR DE VOLTAJE
// =====
float calcular_controlador(float Ref, float y) {
    static float ek_1 = 0.0f, ek_2 = 0.0f;
    static float uk_1 = 0.0f, uk_2 = 0.0f;

    const float a = 0.0066177f;
    const float b = 1.034f;
    const float c = 0.0675f;
    const float d = 0.5f;
    const float e = 0.5f;

    float ek = Ref - y;

    // --- CALCULO DEL CONTROLADOR ---
    float uk_raw = ek*a - ek_1*a*b + ek_2*a*c + uk_1*d + uk_2*e;

    // --- SATURACION ---
    float uk;
    if (uk_raw > 0.95f) {
        uk = 0.95f;
    } else if (uk_raw < 0.05f) {
        uk = 0.05f;
    } else {
        uk = uk_raw;
    }

    // --- ACTUALIZACION DE ESTADOS ---
    ek_2 = ek_1;
    ek_1 = ek;
    uk_2 = uk_1;
    uk_1 = uk;

    return uk;
}

```

Figura N° 94. Controlador implementado en código C.

En la figura 116 se observa la función del controlador, que regula el voltaje de entrada del Buck siguiendo la referencia entregada por el algoritmo MPPT y la función del algoritmo Conductancia Incremental con paso variable, que se ejecuta cada 25 ms (una de cada diez interrupciones del ADC). Esta función entrega como salida la nueva referencia de voltaje que el controlador seguirá durante los próximos 25 ms, además incorpora un filtro pasa-bajo de primer orden sobre las mediciones para suavizar el ruido.

```

// =====
// 1. ALGORITMO MPPT (Conductancia Incremental con paso variable)
// =====
float mppt_incond(float V, float I) {
    // Parametros
    float alpha = 0.2f;
    float epsV = 1e-3f;
    float Vmin_oper = 1.0f;
    float delta_min = 0.005f;
    float delta_max = 0.05f;
    float Kstep = 0.1f;
    float MPP_tol = 0.05f;
    float Vref_min = 45.0f;
    float Vref_max = 75.0f;

    // Variables de estado persistentes
    static float V_prev = 0.0f, I_prev = 0.0f;
    static float Vf_prev = 0.0f, If_prev = 0.0f;
    static float Vref_prev = 60.0f; // Punto de inicio
    static uint8_t Init_done = 0;

    if (!Init_done) {
        V_prev = V; I_prev = I;
        Vf_prev = V; If_prev = I;
        Vref_prev = 60.0f;
        Init_done = 1;
    }

    // Filtro pasa bajo
    float Vf = alpha * V + (1.0f - alpha) * Vf_prev;
    float If = alpha * I + (1.0f - alpha) * If_prev;

    float dV = Vf - V_prev;
    float dI = If - I_prev;
    float Vref_new = Vref_prev;

    // Logica MPPT
    if (Vf >= Vmin_oper) {
        if (fabs(dV) < epsV) {
            if (fabs(dI) < 1e-6f) {
                Vref_new = Vref_prev;
            } else if (dI > 0.0f) {
                Vref_new = Vref_prev + delta_min;
            } else {
                Vref_new = Vref_prev - delta_min;
            }
        } else {
            float slope = dI / dV;
            float target = -1f / Vf;
            float denom = (fabs(target) > 1e-6f) ? fabs(target) : 1e-6f;
            float err = (slope - target) / denom;

            float delta = Kstep * fabs(err);
            if (delta < delta_min) delta = delta_min;
            if (delta > delta_max) delta = delta_max;

            if (fabs(err) < MPP_tol) {
                Vref_new = Vref_prev;
            } else if (slope > target) {
                Vref_new = Vref_prev + delta;
            } else {
                Vref_new = Vref_prev - delta;
            }
        }
    }

    // Saturacion
    if (Vref_new < Vref_min) Vref_new = Vref_min;
    if (Vref_new > Vref_max) Vref_new = Vref_max;

    // Actualizar estados
    V_prev = Vf; I_prev = If;
    Vf_prev = Vf; If_prev = If;
    Vref_prev = Vref_new;

    return Vref_new;
}
// =====

```

Figura N° 95. Algoritmo MPPT implementado en código C.

Finalmente, ambas funciones se llaman dentro de la rutina de interrupción del ADC. El controlador MPPT se ejecuta cada diez llamadas (25 ms) actualizando la referencia, mientras que el controlador de control se ejecuta en cada llamada (0.05 ms) calculando el nuevo ciclo de trabajo. Antes de escribir el duty en el registro del temporizador se aplica una protección por sobrecorriente: si cualquiera de las corrientes medidas supera los 6 [A], el PWM se fuerza al valor mínimo de seguridad. El cierre de la sincronización del ADC con el PWM se realiza escribiendo en el registro CCR2 la mitad del valor de CCR1, manteniendo así el muestreo del ADC en el centro del nuevo pulso.

Los archivos utilizados en esta tesis para la configuración del sistema se encuentran en el siguiente repositorio: [Códigos del sistema SCADA y de los microcontroladores](#)

CAPÍTULO 8: Implementación de un sistema automatizado para un seguidor solar con integración SCADA y control para la máxima extracción de potencia.

Una vez verificado el correcto funcionamiento de cada uno de los subsistemas mediante los ensayos realizados en las etapas anteriores, se procedió a la integración completa. Esta etapa tuvo como objetivo validar la operación conjunta del sistema fotovoltaico, el convertidor de potencia, el algoritmo MPPT en conjunto con el controlador de voltaje, el sistema SCADA y la estructura del seguidor solar, como se visualiza en el diagrama de la figura 117.

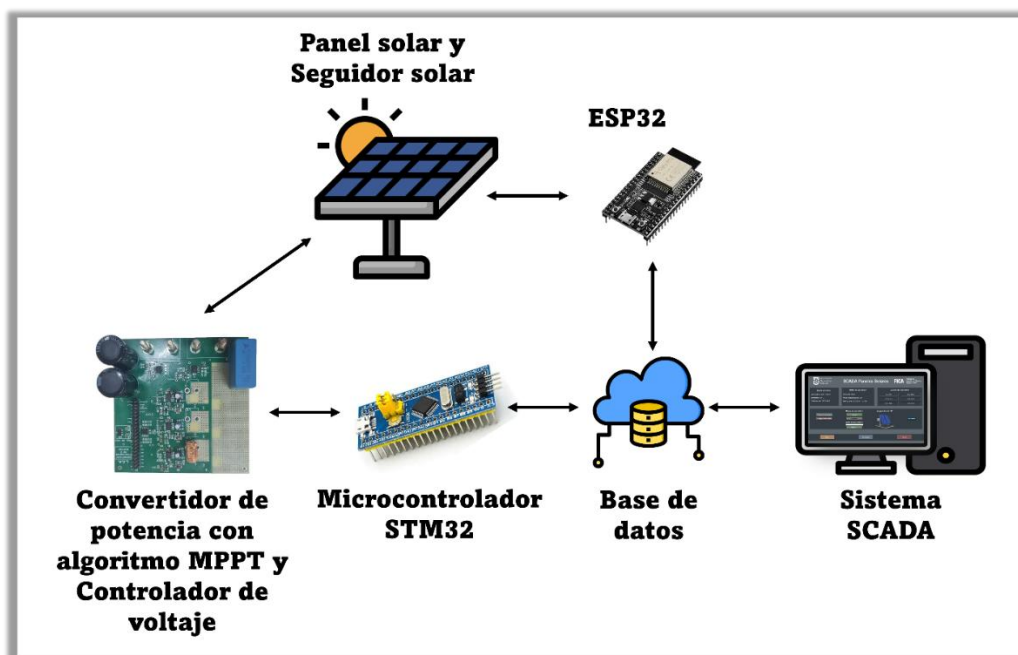


Figura N° 96. Diagrama de bloques del sistema completo.

La figura 118 muestra el entorno experimental utilizado durante la puesta en marcha del sistema, donde se integraron todos los elementos necesarios para su funcionamiento.

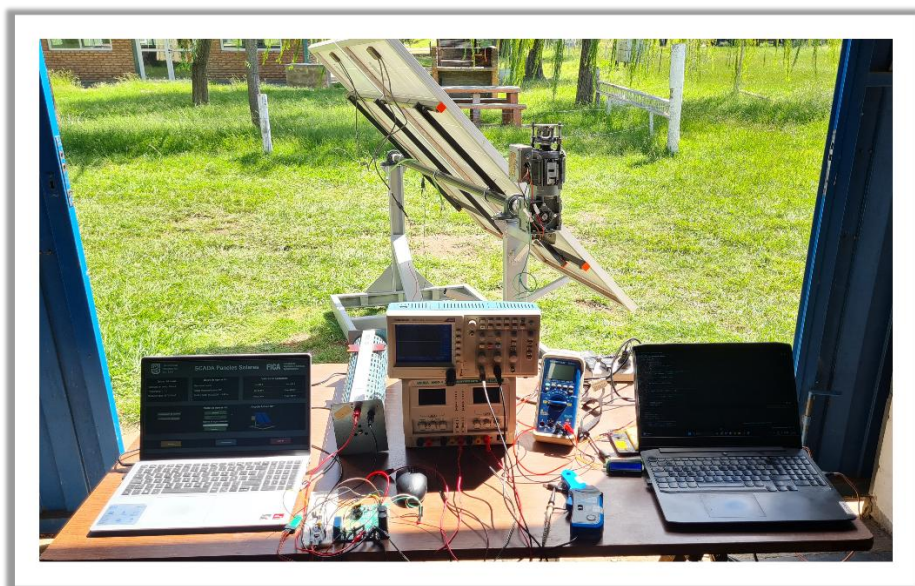


Figura N° 97. Entorno de trabajo del sistema completo.

Durante el ensayo, la irradiancia incidente sobre el panel fotovoltaico fue medida mediante el sensor de irradiancia, registrándose un valor de 1335 W/m^2 (figura 119).

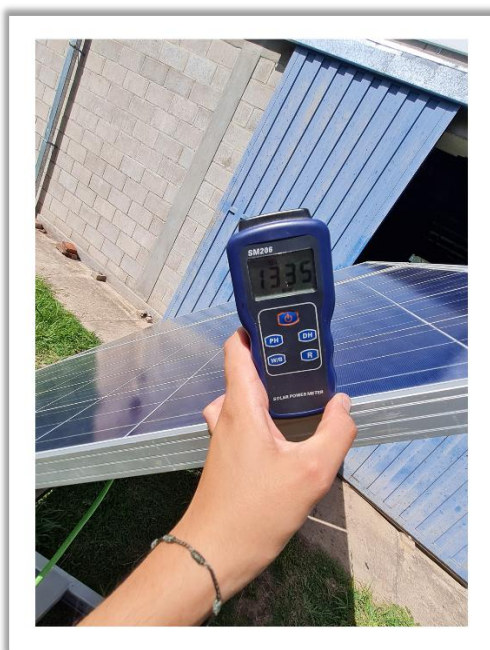


Figura N° 98. Medición de irradiancia.

Bajo estas condiciones ambientales se obtuvieron los valores de voltaje a circuito abierto ($66.9 [V]$) y la corriente de cortocircuito ($9.08 [A]$) presentados en las figuras 120, los cuales fueron adquiridos mediante un multímetro digital.

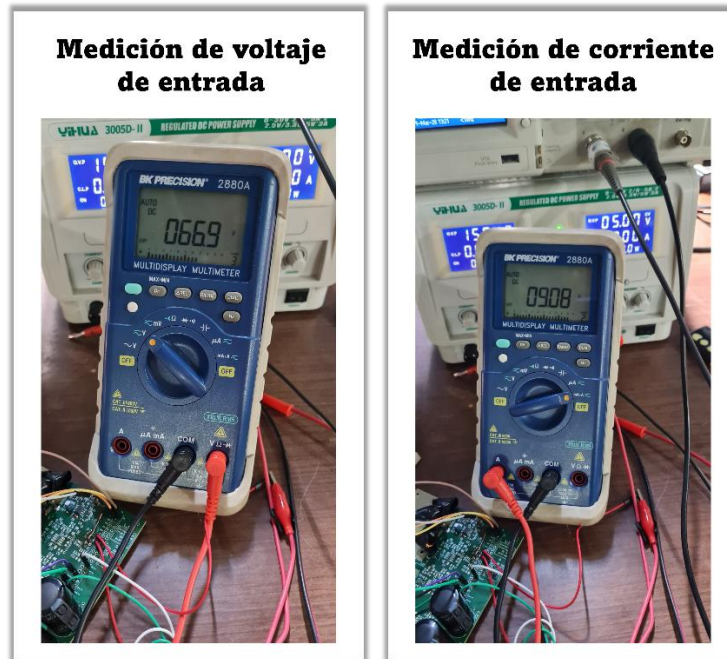


Figura N° 99. Medición del voltaje a circuito abierto y de la corriente de cortocircuito.

La configuración final implementada consistió en un panel fotovoltaico conectado a la entrada del convertidor Buck, mientras que la carga resistiva se conectó a la salida del mismo. El microcontrolador STM32 ejecutó el algoritmo MPPT y las estrategias de control desarrolladas, generando las señales de disparo necesarias para los MOSFET del convertidor con el fin de maximizar la potencia extraída del panel fotovoltaico.

Se observa en la figura 121 los datos obtenidos en el sistema SCADA, como así también el ángulo enviado al ESP32, utilizando una conexión wifi, para el primer caso el ángulo enviado fue de 35° .

Asimismo, se verificó la comunicación entre el sistema SCADA y el controlador del seguidor solar mediante la red Wi-Fi implementada. Para ello, se enviaron diferentes referencias angulares desde la interfaz SCADA. Inicialmente se estableció una referencia de 35° , observándose en el display LCD la correcta recepción por parte del microcontrolador.

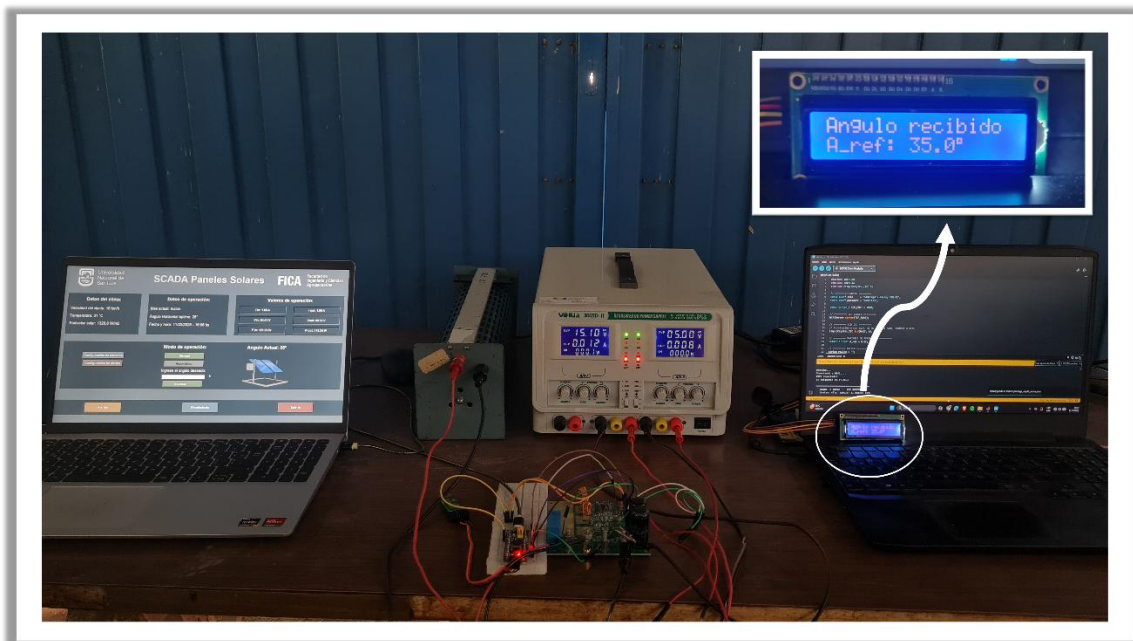


Figura N° 100. Envío de ángulo de referencia de 35 ° a través del sistema SCADA.

Posteriormente, se modificó la referencia a 75°, verificándose nuevamente la recepción del ángulo por medio de la pantalla LCD conectada al microcontrolador ESP32 (figura 122).



Figura N° 101. Envío de ángulo de referencia de 75 ° a través del sistema SCADA.

Los resultados obtenidos demostraron el correcto funcionamiento de la arquitectura de comunicación implementada, así como la adecuada integración entre el sistema de monitoreo, el

convertidor de potencia y el seguidor solar. Además, se comprobó que las variables adquiridas por los sensores fueron transmitidas, almacenadas y visualizadas correctamente, mientras que las referencias angulares generadas desde el sistema SCADA lograron transmitirse de forma correcta al microcontrolador.

De esta manera, se logró la implementación y puesta en marcha de un sistema automatizado para un seguidor solar con integración SCADA y estrategias de control orientadas a la máxima extracción de potencia, cumpliendo los objetivos planteados para el presente trabajo final de grado.

CAPÍTULO 9: Conclusiones

El presente trabajo final tuvo como objetivo el diseño e implementación de un sistema automatizado para un seguidor solar de un eje, integrando un sistema SCADA, un convertidor de potencia y estrategias de control orientadas a la máxima extracción de potencia. A partir de los resultados obtenidos, se concluye que el objetivo general planteado fue alcanzado satisfactoriamente, logrando la puesta en marcha de un sistema funcional capaz de supervisar, controlar y optimizar el funcionamiento de una instalación fotovoltaica.

En una primera etapa, se logró integrar el convertidor de potencia previamente desarrollado con los paneles fotovoltaicos y adaptarlo a los requerimientos específicos del proyecto. Asimismo, se verificó mediante el ensayo 1 (calibración de sensores) el correcto funcionamiento de los sensores de corriente y voltaje utilizados para la adquisición de datos, obteniendo las mediciones necesarias para las estrategias de monitoreo y control implementadas.

Los ensayos experimentales realizados permitieron demostrar el correcto funcionamiento del convertidor Buck y del sistema desarrollado, alcanzándose una potencia de 330 W, con un voltaje de 60 V y una corriente de 5.5 A. Estos resultados validan la arquitectura propuesta, el desempeño del controlador, el algoritmo MPPT y la integración con el sistema de supervisión. Cabe destacar que el diseño teórico contemplaba una capacidad de operación superior; sin embargo, la implementación experimental se realizó con componentes de potencia disponibles en el laboratorio, cuyas especificaciones eléctricas eran inferiores a las determinadas durante la etapa de diseño.

Por otra parte, se desarrolló el modelo matemático del convertidor de potencia y se realizaron simulaciones en simulink que permitieron analizar su comportamiento bajo distintas condiciones de operación. A partir del modelo obtenido se diseñó e implementó un controlador de voltaje, ensayo 3 (verificación del controlador de voltaje), que garantizó una respuesta deseable del sistema frente a perturbaciones y cambios en las condiciones de irradiancia.

Posteriormente, se implementó un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), obteniendo una mayor potencia de acuerdo los ensayos realizados. Los resultados obtenidos en el ensayo 4 (Controlador de voltaje + MPPT) evidenciaron que el sistema es capaz de adaptarse a las variaciones de irradiancia y operar en condiciones cercanas al punto de máxima potencia.

Respecto al sistema SCADA, se realizaron las modificaciones necesarias para su integración con el sistema fotovoltaico, incorporando nuevas interfaces de usuario, mecanismos de almacenamiento de datos y herramientas de supervisión en tiempo real. Además, se desarrolló una base de datos que permite registrar las variables relevantes del proceso, facilitando el análisis histórico de la información y la detección de posibles eventos mediante alertas previamente definidas.

En relación con la comunicación entre los distintos subsistemas, se seleccionó e implementó un protocolo basado en TCP/IP sobre red Wi-Fi, permitiendo el intercambio de información entre el sistema SCADA, el convertidor de potencia y el controlador del seguidor solar. Las pruebas realizadas demostraron la robustez de la comunicación y su capacidad para operar de manera estable durante los ensayos efectuados.

Finalmente, se logró la integración completa entre el sistema SCADA, el convertidor de potencia y el seguidor solar, obteniéndose una plataforma automatizada capaz de supervisar variables eléctricas, almacenar información histórica, generar referencias de posicionamiento y maximizar la extracción de energía solar.

Como trabajo futuro, se propone incorporar mejoras en:

- Implementar elementos adecuados para el convertidor de potencia para evitar inconveniente y poder usar de forma más prolongado el uso del seguidor solar.
- Para no depender de valores históricos de irradiancia es aconsejable implementar un sensor de irradiancia al sistema.
- Implementar fuentes de alimentación para los Drivers y sensores de 15V y 5V respectivamente.
- Generar avisos de falla o de diagnóstico por posibles errores de bugs en el código u otros eventos perjudiciales.
- Implementar acceso de forma remota al SCADA implementando las medidas de ciberseguridad necesarias.

Glosario

ADC	Conversor Analógico Digital
CDC	Communication Device Class
ANSI	American National Standards Institute
CCM/DCM	Modo de Conducción Continuo/Discontinuo
CDC	Communication Device Class
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INC	Conductancia Incremental
ISA	International Society of Automation
ISC	Corriente de cortocircuito
MPP	Maximum Power Point (Punto de Máxima Potencia)
MPPT	Maximum Power Point Tracking (Seguimiento del Punto de Máxima Potencia)
P&O	Perturbar y Observar
PMAX	Potencia máxima
PPS	Práctica Profesional Supervisada
PWM	Modulación por Ancho de Pulso
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SGBD	Sistema Gestor de Bases de Datos
SQL	Structured Query Language
STC	Condiciones Estándar de Prueba
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
UDP	User Datagram Protocol
USB	Universal Serial Bus
VOC	Voltage Open Circuit (Voltaje de circuito abierto)

Referencias Bibliográficas

- [1] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, E. R. Filho, "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 5, pp. 1198-1208, May 2009.
- [2] B. O. Oyebola y S. I. O. Awofodu, "Energy Generation Factor during Raining Season in Nigeria: A Study on 75 Watt Solar Collectors "International Journal of Recent Trends in Electrical & Electronics Engg, Vol 6, no. 1, pp 24-32, diciembre, 2017.
- [3] R. L. Boylestad, L. Nashelsky, Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos, 10th ed. Naucalpan de Juárez, México: Pearson Educación, 2009.
- [4] E. C. Canafoglia, C. A. Valdivia Alcántara, "La producción de silicio como posibilidad de la industria fotovoltaica en Argentina: aplicaciones y limitaciones," Revista de Economía y Estadística, vol. LXIII, no. 1, pp. 11-35, 2025.
- [5] F. D. Linares Rojo, "Efecto de la temperatura en paneles solares fotovoltaicos y tecnologías de refrigeración para el mejoramiento de la eficiencia – Una revisión," Trabajo de Grado, Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), Medellín, Colombia, 2022.
- [6] Tellkes, "Mitigando la Pérdida de Energía en Paneles Solares con el Método Four Pyramid Sudoku Bajo Sombreamiento Parcial," Tellkes. [En línea]. Disponible en: <https://tellkes.com/mitigando-la-perdida-de-energia-en-paneles-solares-con-el-metodo-four-pyramid-sudoku-bajo-sombreamiento-parcial/>
- [7] A. Onrubia Moñux, "Caracterización de módulos fotovoltaicos mediante sus curvas I-V," Trabajo Fin de Máster, Universidad de Valladolid, Soria, España, 2019.
- [8] Ingelibre, "Influencia de la irradiación y temperatura sobre una placa fotovoltaica," Ingelibre, nov. 09, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/11/09/influencia-de-la-irradiacion-y-temperatura-sobre-una-placa-fotovoltaica/>
- [9] L. Cristaldi, M. Faifer, C. Laurano, R. Ottoboni y S. Toscani, "Experimental comparison of MPPT algorithms," IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2016.
- [10] S. Saravanan y N. Ramesh Babu, "Maximum power point tracking algorithms for photovoltaic system – A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 57, pp. 192-204, 2016.
- [11] D. A. Mejía Bugallo, I. Torres Chávez, and J. L. Díaz Rodríguez, "Comparación de algoritmos MPPT aplicados a un conversor SEPIC en sistemas fotovoltaicos," ResearchGate, dic. 2014. [En

línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Figura-18-Diagrama-de-flujo-del-metodo-P-O-disenado-en-este-trabajo_fig6_363737415

[12] M. Rodríguez Pérez, "Diseño y simulación de un convertidor Flyback con implementación de diferentes algoritmos MPPT," ResearchGate, jul. 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Figura-7-4-flujograma-del-algoritmo-de-conductancia-incremental_fig9_344490172

[13] E. Lodhi, Z. Lodhi, R. N. Shafqat y F. Chen, "Performance analysis of 'Perturb and Observe' and 'Incremental Conductance' MPPT algorithms for PV system," IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 220, no. 1, 2017.

[14] D. Sera, L. Mathe, T. Kerekes, S. V. Spataru y R. Teodorescu, "On the Perturb-and-Observe and Incremental Conductance MPPT Methods for PV Systems," IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 3, no. 3, pp. 1070-1078, Julio 2013.

[15] D. Menniti, A. Burgio, N. Sorrentino, A. Pinnarelli y G. Brusco, "An Incremental Conductance Method with Variable Step Size for MPPT: Design and Implementation," 10th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, Lodz, Poland, 2009.

[16] A. F. Delgado Flórez, "Construcción de un convertidor CC-CC tipo reductor orientado a la enseñanza," Proyecto de grado, Ingeniería Electrónica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, 2016.

[17] C. I. Rueda Panchano, K. Y. Simisterra Quiñonez, G. I. Rueda Salazar, L. F. Palacios García y N. F. Mina González, "Modelación de un convertidor DC-DC reductor en modo de conducción continua," Sapienza: International Journal of Interdisciplinary Studies, vol. 3, no. 4, pp. 250-260, 2022.

[18] M. H. Rashid, Electrónica de potencia, [3era] ed. México: Pearson, 2014.

[19] Dr. Ing. M. Asensio, Ing. G. Frías, Ing. F. Mezzano y Ing. M. Tello, "Apuntes de cátedra: Control Digital de Sistemas Mecatrónicos", Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de San Luis, 2023-2024.

[20] STMicroelectronics, "Introduction to USB with STM32". [En línea]. Disponible en: https://wiki.st.com/stm32mcu/wiki/Introduction_to_USB_with_STM32

[21] STMicroelectronics, "STM32F103C8," STMicroelectronics. [En línea]. Disponible en: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103c8.html>

[22] Transmission Control Protocol (TCP) - ESP32-C3 Wireless Adventure: A Comprehensive Guide to IoT <https://espressif.github.io/esp32-c3-book-en/introduction.html>

- [23] Botland, "ESP32 WiFi + BT 4.2 - platform with ESP-WROOM-32 module - compatible with ESP32-DevKit," Botland. [En línea]. Disponible en: <https://botland.store/esp32/8893-esp32-wifi-bt-42-platform-with-esp-wroom-32-module-compatible-with-esp32-devkit-5904422337438.html>
- [24] G. Serrano Cabarcas, "Análisis del Efecto de la Aplicación de Seguidores Solares de Uno y Dos Ejes en Sistemas Fotovoltaicos Dentro de la Zona Tórrida Latinoamericana" Ingeniería en energía, Universidad Autónoma de Bucaramanga, Colombia, pp. 168-171, 2016.
- [25] N. Machado Toranzo, A. Lussón Cervantes, L. Leysdian Oro Carralero, J. Bonzon Henríquez, O. Escalona Costa " Seguidor Solar, optimizando el aprovechamiento de la energía solar ", vol. 36, no. pp.190-199, Mayo/Agosto, 2015.
- [26] Greening-e, "La importancia de la orientación de los paneles solares: Seguidores solares," Greening Solutions, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://greening-e.com/seguidores-solares/>
- [27] E. D. Bohórquez, E. A. Prado y M. F. Ramirez, "Implementación de la norma ISA 101, sobre las HMI, pertenecientes a los módulos de instrumentación de la Universidad ECCI" Seminario Internacional, vol. III, no. XX, Bogotá, Colombia, 2019.
- [28] A. Morales Sánchez y E. O. Martínez Aguirre, "Introducción al Estándar ISA 112 SCADA," Revista In-Tech, enero-marzo.
- [29] B. Hollifield, "Understanding and Applying the ANSI/ISA 18.2 Alarm Management Standard," PAS White Paper, Houston, Texas, 2010.
- [30] Oracle Corporation, "MySQL Reference Manual - Overview of the MySQL Database Management System," MySQL 9.6 Reference Manual. [En línea]. Disponible en: <https://dev.mysql.com/doc/refman/9.6/en/what-is-mysql.html>
- [31] Apache Friends, "XAMPP Installers and Downloads," Sitio oficial del proyecto XAMPP. [En línea]. Disponible en: <https://www.apachefriends.org/>
- [32] J. Lázaro, A. Astarloa, A. Zuloaga, U. Bidarte y J. Jiménez, "I2CSec: A secure serial Chip-to-Chip communication protocol," Journal of Systems Architecture, vol. 57, no. 2, pp. 206-213, 2011.
- [33] N. Akshaykumar, S. Adhikari, and L. S. Singh, "A review on bus protocols and conversion/translator between different protocols," Journal of Information and Optimization Sciences, vol. 40, no. 8, pp. 1665-1682, 2020.
- [34] K. Jha, A. B. Patil y D. S. Khurge, "Design and Verification of LTSSM in USB 3.0," Fourth International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA), Pune, India, 2018.
- [35] Adithya Rangan C.K., Vikas Kulkarni y Shashidhara H. R., "A Theoretical Proposition To Characterize Speed Based Performance of Bulk Transaction in Universal Serial Bus 3.0

SuperSpeed Protocol," 2nd International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT), pp. 49-54, 2016.

[36] H. RiLi, "Research and Application of TCP/IP Protocol in Embedded System," IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks, Xi'an, China, pp. 584-587, 2011.

[37] Congreso de la Nación Argentina, "Ley N° 19.587 de Higiene y Seguridad en el Trabajo", Decreto Reglamentario 351/79, Buenos Aires, 1979.

[38] Asociación Electrotécnica Argentina (AEA), "Reglamentación para la Ejecución de Instalaciones Eléctricas en Inmuebles - AEA 90364 (concordante con IEC 60364 e IRAM 2073)", Buenos Aires, 2006.

[39] International Organization for Standardization, "ISO 45001: Occupational health and safety management systems - Requirements with guidance for use", Ginebra, 2018.

[40] International Electrotechnical Commission, "IEC 62446: Photovoltaic (PV) systems - Requirements for testing, documentation and maintenance", Ginebra, 2016.

[41] S. Racharla and K. Rajan, "Solar tracking system - a review," International Journal of Sustainable Engineering, 2017

[42] T. Tudorache, C. D. Oancea, and L. Kreindler, "Performance evaluation of a solar tracking PV panel," Bucharest Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering, vol. 74, no. 1, pp. 3–10, 2012.

[43] J. López, S. Seleme Jr., and L. Morais, "Comparison of the performance of MPPT methods applied in converters Buck and Buck-Boost for autonomous photovoltaic systems," Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, 2021.

[44] R. Pandit and J. Wang, "A comprehensive review on enhancing wind turbine applications with advanced SCADA data analytics and practical insights," 2023.

[45] LV-Energy, "Ficha Técnica LVE Energy 270Wp". [En línea]. Disponible en: [Ficha Técnica LVE Energy](#)

Anexo/s

10.1. Anexo A: Planos esquemáticos del convertidor de potencia.

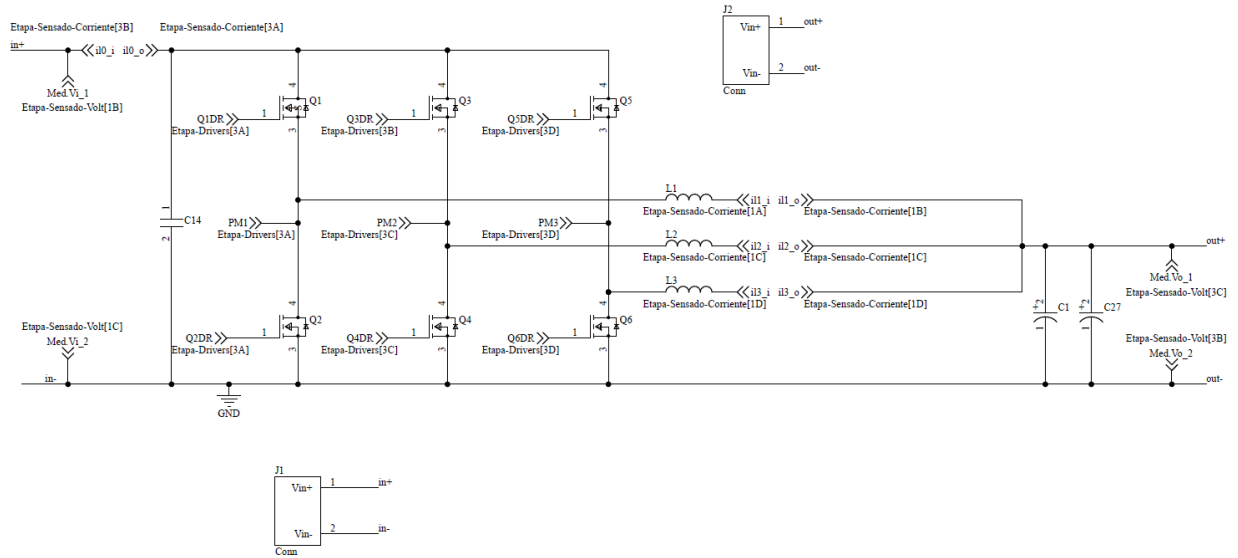


Figura N° 102.Circuito de potencia del convertidor Interleaved

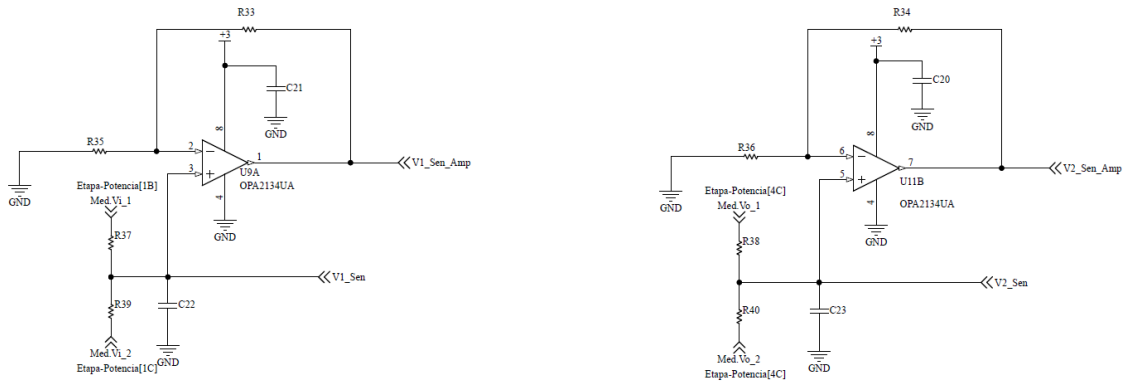


Figura N° 103. Circuito de sensado de voltaje del convertidor Interleaved

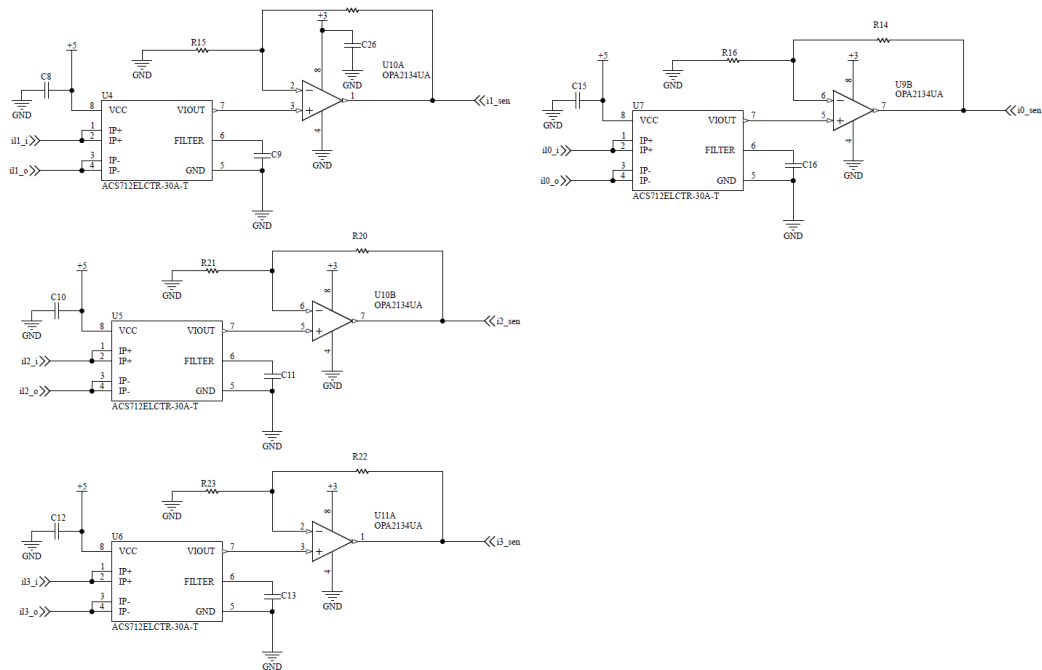


Figura N° 104. Circuito de sensado de corriente del convertidor Interleaved

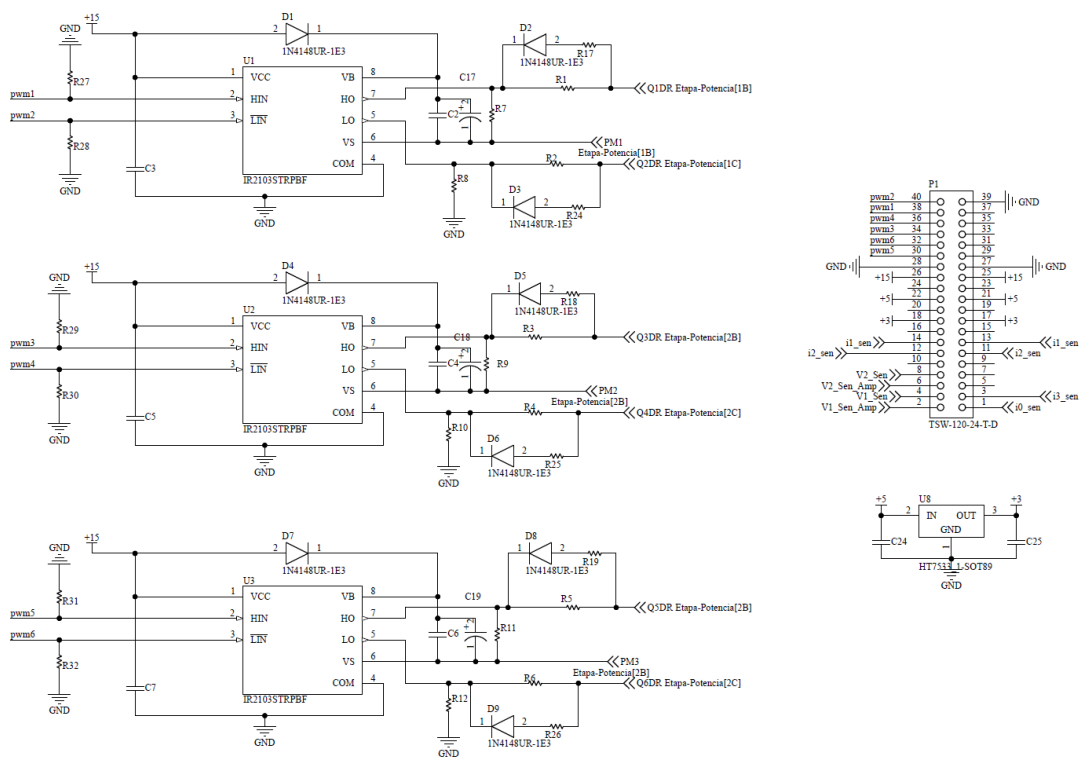


Figura N° 105. Circuito de control del convertidor Interleaved

10.2. Anexo B: Pantallas del sistema SCADA



The screenshot shows the login interface for the SCADA system. At the top, there is a header with the Universidad Nacional de San Luis logo, the text "SCADA - Paneles Solares", the FICA logo, and the text "Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias". The main area contains a dark gray box with the title "Ingrese su usuario y contraseña". Inside this box, there are two input fields labeled "Usuario:" and "Contraseña:", followed by two buttons labeled "Ingresar" and "Salir".

Figura N° 106. Pantalla de inicio de sesión.



The screenshot shows the main dashboard of the SCADA system. At the top, there is a header with the Universidad Nacional de San Luis logo, the text "SCADA Paneles Solares", the FICA logo, and the text "Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias". The dashboard is divided into several sections:

- Datos del clima:** Velocidad del viento: 16 km/h, Temperatura: 26 °C, Radiación solar: 1328,8 W/m2.
- Datos de operación:** Mes actual: junio, Ángulo Horizontal óptimo: 55°, Fecha y hora: 05/06/2026 - 12:51 hs.
- Valores de operación:** I in: 0.00 A, I out: 0.00 A, Vin: 0.00 V, Vout: 0.00 V, P in: 0.00 W, P out: 0.00 W.
- Modo de operación:** Manual, Automático, Ingrese el ángulo deseado: [input field], Ingresar →.
- Angulo Actual: 55°** with a 3D illustration of solar panels.
- Configuración de usuarios** and **Configuración de alertas** buttons.
- Alertas**, **Rendimiento**, and **Salir *** buttons at the bottom.

Figura N° 107. Pantalla principal.

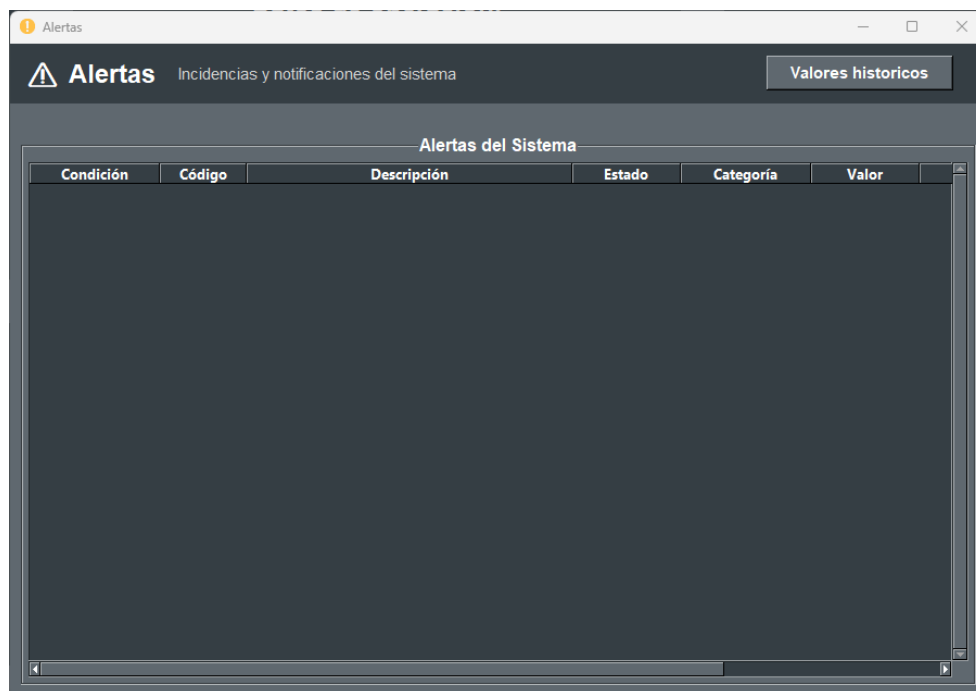


Figura N° 108. PopUp alertas.



Figura N° 109. PopUp de rendimiento.

Configuración de alertas

Gestión de alertas

Configuración de alertas del sistema

Alertas existentes

id	Condición	Código	Descripción	Categoría	Operador	Umbral	Habilitada
14	Corriente Baja	I-001	Baja corriente de entrada	Corriente	<	2.0	0
16	Corriente baja	I-003	Baja corriente de salida	Corriente	<	0.5	1
4	Potencia baja	P-001	Baja potencia de salida	Potencia	<	120.0	0
13	Potencia Baja	P-003	Baja potencia de salida	Potencia	<	80.0	0

Eliminar alerta

Modificar alerta

Operador

Umbral

☒
Habilitada

Guardar cambios

Nueva alerta

Condición

Código

Descripción

Categoría

Operador

Umbral

☒
Habilitada

Agregar alerta

Figura N° 110. Pantalla de configuración de alertas.

Configuración de usuarios

Gestión de usuarios

Configuración de acceso al sistema

Alta de usuario

Usuario:

Contraseña:

Jerarquía:

operador

Crear usuario

Usuarios existentes

Usuario	Jerarquía
admin	administrador
visor3	solo_lectura
visor	solo_lectura
operador	operador

Eliminar usuario seleccionado

Figura N° 111. Pantalla de configuración de usuarios.

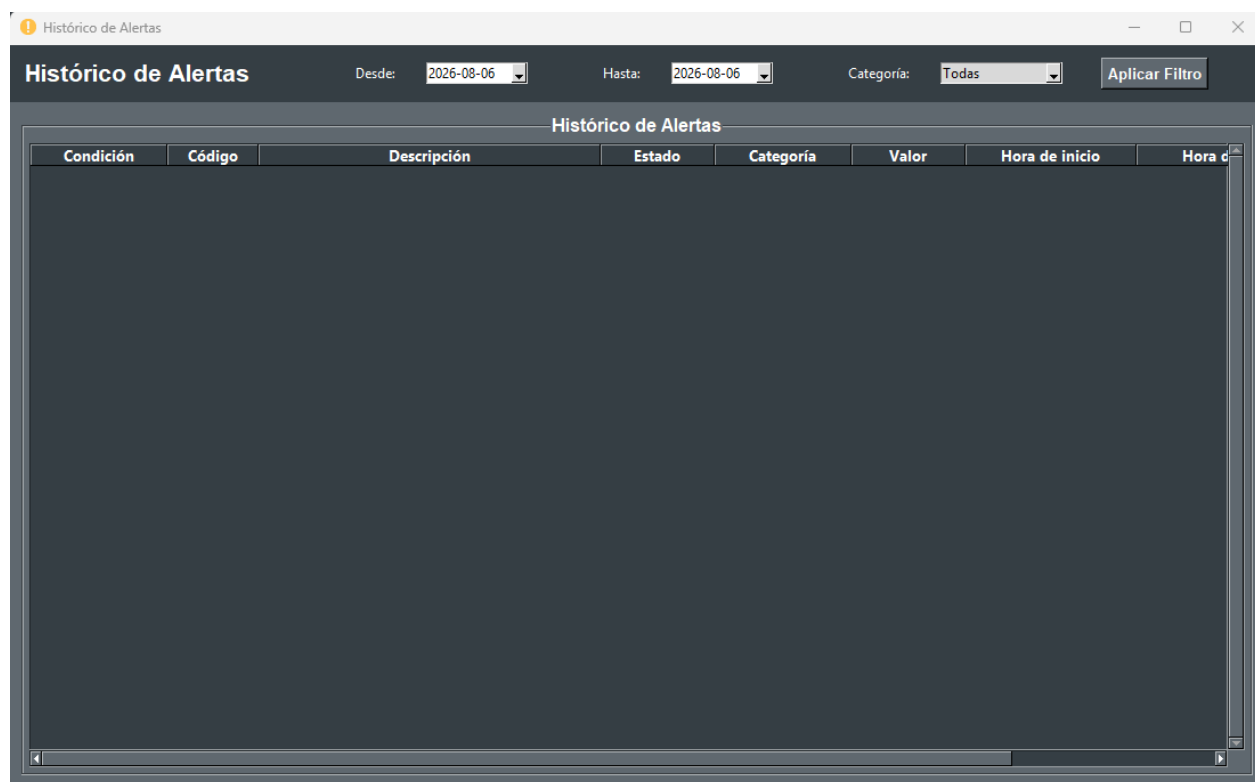


Figura N° 112. PopUp histórico de alertas.

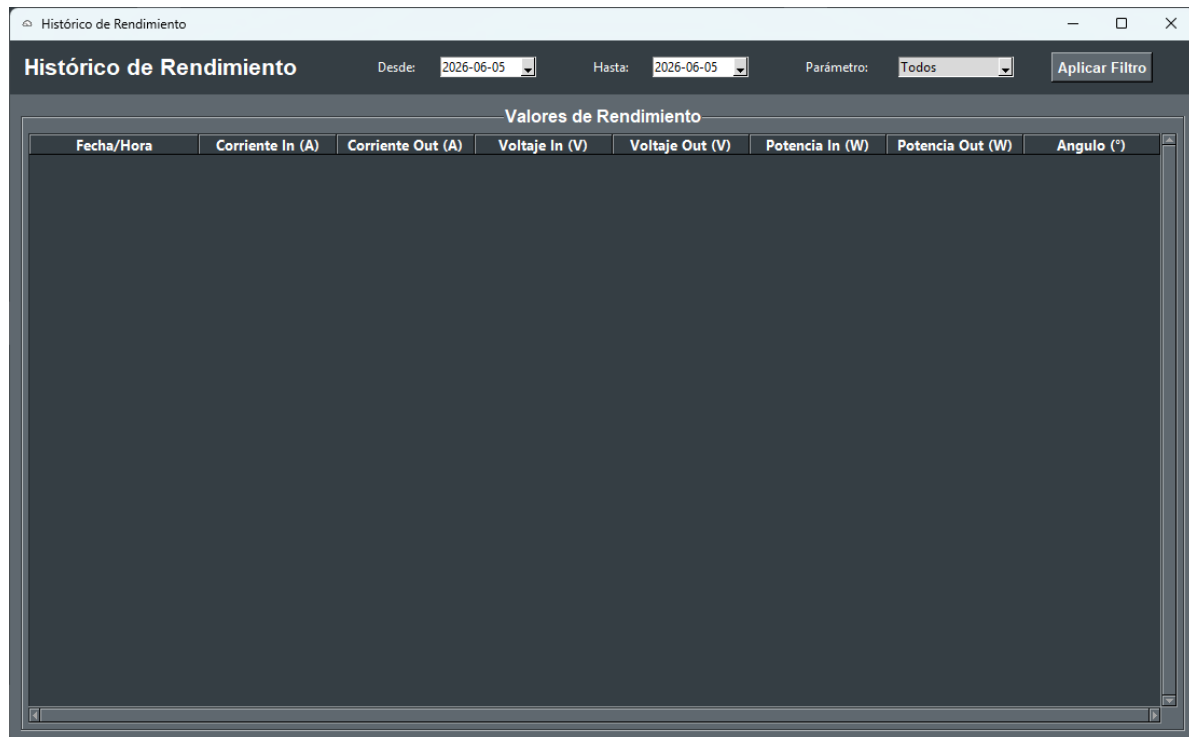


Figura N° 113. PopUp histórico de rendimiento.