

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MEXICO

Instituto Tecnológico de Culiacán



TITULACIÓN INTEGRAL

Opción:

TESIS PROFESIONAL

NOMBRE DEL PROYECTO:

Desarrollo e implementación de un sistema de control para regulación de temperatura y nivel de agua por goteo en una celda de combustible microbiana de sedimentos

ALUMNO:

Jordi Ariel Benítez Ibarra

CARRERA:

Ing. Mecatrónica

Num. De Control:

20170379

Culiacán, Sinaloa 2025



Instituto Tecnológico de Culiacán

DIVISION DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ASUNTO: **Autorización de Impresión**

Culiacán, Sinaloa, 12/08/2025 16:27

C. JORDI ARIEL BENITEZ IBARRA
PASANTE(S) DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
P R E S E N T E.

De acuerdo con fallo emitido por la Comisión Revisora Integrada por:

Cédula Profesional

Presidente:	Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (Tecnología Química)	
	Blenda Ramírez Pereda	12152006
Secretario:	Ingeniero Electrónico	
	José Angel Alcaraz Vega	3365548
Vocal:	Maestría en Informática Aplicada	
	Rogelio Prieto Alvarado	13976653

Y considerando que reúne los requisitos establecidos en la Opción: **TITULACIÓN INTEGRAL: TESIS PROFESIONAL "DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA REGULACIÓN DE TEMPERATURA Y NIVEL DE AGUA POR GOTEO DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA DE SEDIMENTOS"**, damos a usted nuestra autorización para que proceda a imprimir su trabajo profesional.

Sin otro particular, quedo de usted.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®

LIC. CONCEPCIÓN MENDOZA ROSALES
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

 **Educación** | 
Secretaría de Educación Pública
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CULIACÁN
DIRECCIÓN



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Juan de Dios Bátiz 310 Pte. Col. Guadalupe C.P. 80220
Culiacán, Sinaloa. Tel. 667-454-0100
tecnm.mx www.culiacan.tecnm.mx



SEP
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CULIACÁN



DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL
PARA REGULACIÓN DE TEMPERATURA Y NIVEL DE AGUA POR
GOTEO EN UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA DE
SEDIMENTOS

TESIS

PRESENTADA ANTE EL DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE METAL MECÁNICA.

POR:

JORDI ARIEL BENÍTEZ IBARRA

LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. BLENDIA RAMÍREZ PEREDA

CODIRECTOR DE TESIS:

DR. PETER LEPEJ

CULIACÁN, SINALOA

13 de agosto del 2025

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, María Esther Ibarra Lares y Ariel Antonio Benítez Zavala, quienes me han brindado su apoyo y cariño a lo largo de toda mi vida, acompañándome en los buenos y malos momentos. Muchas gracias por todo.

Agradecimientos

Agradezco a **mis padres y hermana** por su cariño y apoyo a lo largo de toda mi vida, especialmente en esta etapa.

Al **Instituto Tecnológico de Culiacán** por mi formación académica en licenciatura.

Al **Dr. Héctor Rodríguez Rangel** por su orientación y apoyo a lo largo del desarrollo de este trabajo.

A la **Dra. Blenada Ramírez Pereda** por su constante apoyo y amable atención en cada momento.

Al **Dr. Peter Lepej** por compartir su conocimiento y experiencia durante el desarrollo este proyecto.

Al **Mtro. Rogelio Prieto Alvarado** por su apoyo, guía y amabilidad brindada durante la elaboración de este trabajo.

A mis compañeros **Marco Antonio Aranda Sainz y Kassandra Velazquez Anaya** por su amistad y colaboración en este proyecto.

Resumen

Las celdas de combustible microbianas de sedimentos (CCMS) son una prometedora y sostenible alternativa para la generación de energía y el tratamiento de aguas. Ofrecen una fuente de energía limpia, en contraste con las fuentes tradicionales que dependen de combustibles fósiles. Sin embargo, para que estas celdas funcionen de manera eficiente, es necesario mantener ciertas condiciones operativas, en particular dos variables críticas: la temperatura y el nivel de electrolito. Actualmente, la regulación de estas variables se realiza de forma manual, una tarea que puede ser tediosa y susceptible a errores, afectando negativamente en la eficiencia del sistema.

En respuesta a esta problemática, esta tesis presenta el diseño e implementación de un sistema de control para regular tanto la temperatura como el nivel de electrolito en una CCMS, con el objetivo de garantizar condiciones de operación adecuadas. Para lograrlo, se seleccionaron rigurosamente los componentes físicos y se crearon algoritmos de control específicos. Cada subsistema fue probado individualmente antes de integrarse en la CCMS completa, donde se verificó el funcionamiento de todo el conjunto.

Los resultados mostraron que la regulación automática tanto del nivel de electrolito como de la temperatura logró mantener estas variables dentro de los rangos deseados. Este sistema permitió automatizar las funciones sin perjudicar la producción de voltaje de la celda. De este modo, el proyecto establece un método para mantener las condiciones de operación adecuadas en una CCMS a escala de laboratorio. Esto facilita su uso como plataforma para generar datos fiables sobre el comportamiento de estas celdas, información que actualmente es escasa y vital para el desarrollo de futuras investigaciones en el área.

Palabras Clave

- Sistemas de control
- Regulación de temperatura
- Regulación de nivel de electrolito
- Celda de combustible microbiana de sedimentos
- Sensores
- Actuadores
- Dispositivos de conmutación
- Controladores

Índice general

Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XI
1. Introducción	1
1.1. Definición del Problema	4
1.2. Hipótesis	6
1.3. Objetivo	6
1.4. Objetivos específicos	6
1.5. Preguntas de investigación	6
1.6. Justificación	7
2. Marco teórico	9
2.1. Celda de combustible microbiana	9
2.1.1. Celda de combustible microbiana de sedimentos	9
2.2. Sistemas de control automático	10
2.2.1. Variable controlada	10
2.2.2. Variable de control	10
2.2.3. Controladores	11
2.2.4. Sensores	11
2.2.5. Actuadores	12
2.2.6. Dispositivos de conmutación y control de potencia	12
2.2.7. Sistema de control en lazo cerrado	13
2.2.8. Sistema de control en lazo abierto	13
2.3. Acción de control	13
2.3.1. Control <i>on-off</i>	14
2.3.1.1. Control on-off con histéresis	15
2.3.2. Control proporcional (<i>P</i>)	16
2.3.3. Control proporcional-integral (<i>PI</i>)	18
2.3.4. Control proporcional-integral-derivativo (<i>PID</i>)	19
2.4. Sistema de control de temperatura	20
2.4.1. Importancia del control de temperatura en las CCMS	21
2.4.2. Controladores	21
2.4.2.1. Arduino Mega 2560	21
2.4.2.2. Esp32	22

2.4.2.3.	Raspberry Pi	22
2.4.3.	Sensores de temperatura	22
2.4.3.1.	PT100	22
2.4.3.2.	Termopar tipo k	23
2.4.3.3.	DS18B20	24
2.4.4.	Actuadores térmicos	25
2.4.4.1.	Bombilla incandescente	25
2.4.4.2.	Resistencia calefactora	26
2.4.4.3.	Placa calefactora	26
2.4.5.	Dispositivos de conmutación	26
2.4.5.1.	Relevador electromecánico	27
2.4.5.2.	Transistor	27
2.4.5.3.	Relevador de estado sólido (SSR)	28
2.5.	Sistema de control de nivel de agua	29
2.5.1.	Importancia del control de nivel de agua en las CCMS	29
2.5.2.	Sensores de nivel	30
2.5.2.1.	XKC – Y26	30
2.5.2.2.	Sensor flotador	30
2.5.2.3.	Sensor ultrasónico HC-SR04	31
2.5.3.	Actuadores para control de nivel	31
2.5.3.1.	Mini bomba de agua	32
2.5.3.2.	Electroválvula solenoide	32
2.5.3.3.	Válvula de esfera motorizada	32
3.	Estado del Arte	34
3.1.	Regulación de temperatura en celdas de combustible	34
3.2.	Regulación de electrolito en CCM	35
3.3.	Comparación y análisis de trabajos previos	38
3.4.	Discusión del estado del arte	40
4.	Metodología	42
4.1.	Selección de componentes eléctricos	44
4.1.1.	Selección de sensores	44
4.1.1.1.	Selección del sensor para el sistema de regulación de temperatura	44
4.1.1.2.	Selección del sensor para el sistema de llenado por goteo	45
4.1.2.	Selección de actuadores	46
4.1.2.1.	Selección del actuador para el sistema de regulación de temperatura	46
4.1.2.2.	Selección del actuador para el sistema de regulación de llenado por goteo	47
4.1.3.	Selección de dispositivos de conmutación	48
4.1.3.1.	Selección del dispositivo de conmutación para el sistema de regulación de temperatura	48

4.1.3.2.	Selección del dispositivo de conmutación para el sistema de regulación de llenado por goteo	49
4.1.4.	Selección del controlador	50
4.2.	Desarrollo del circuito eléctrico	50
4.2.1.	Desarrollo del circuito eléctrico del sistema de regulación de temperatura	50
4.2.2.	Desarrollo del circuito eléctrico del sistema de Llenado por goteo . . .	51
4.3.	Programación	52
4.3.1.	Comparativa de acciones de control y justificación de la acción de control seleccionada	52
4.3.2.	Desarrollo del algoritmo de control para el sistema de regulación de temperatura	54
4.3.3.	Desarrollo del algoritmo de control para el sistema de llenado automático por goteo	55
4.4.	Pruebas de cada sistema de control de manera individual	58
4.5.	Ensamblaje del sistema completo	62
4.6.	Integración del sistema completo en la CCMS	63
4.7.	Pruebas del sistema de control integrado a la CCMS	64
5.	Resultados	70
5.1.	Evaluación del sistema de regulación de nivel de electrolito en la CCMS . . .	70
5.2.	Evaluación del sistema de regulación de temperatura en la CCMS	71
6.	Conclusiones	76
6.1.	Conclusión	76
6.2.	Limitaciones o desafíos	77
6.3.	Aportaciones	77
6.4.	Recomendaciones futuras	78
	Bibliografía	80

Índice de figuras

2.1. Esquema de una CCMS. Fuente: Elaboración propia basado en (Feregrino-Rivas, Ramírez-Pereda & Estrada-Godoy, 2022).	10
2.2. Diagrama de los tipos de actuadores según el tipo de energía que utilizan. Fuente: Elaboración propia basado en (Ramírez et al., 2021).	12
2.3. Gráficas del comportamiento de la variable controlada y el actuador ante la acción de control on-off simple. Fuente: Elaboración propia.	14
2.4. Gráficas del comportamiento de la variable controlada y el actuador ante la acción de control on-off con histéresis. Fuente: Elaboración propia.	16
2.5. Gráfica del comportamiento de la variable controlada ante la acción de control proporcional. Fuente: Elaboración propia.	17
2.6. Gráfica del comportamiento de la variable controlada ante la acción de control proporcional-integral. Fuente: Elaboración propia.	19
2.7. Gráfica del comportamiento de la variable controlada ante la acción de control proporcional-integral-derivativo. Fuente: Elaboración propia.	20
2.8. Sensor PT100 (Commons, 2024a)	23
2.9. Sensor termopar con módulo amplificador (Commons, 2024b)	24
2.10. Sensor DS18B20 (Commons, 2024c)	25
2.11. Bombilla incandescente (Commons, 2023a)	25
2.12. : Resistencia calefactora (Commons, 2025)	26
2.13. Relevador electromecánico (Commons, 2023b)	27
2.14. Simbología del transistor Mosfet. Fuente: Elaboración propia basado en (Boylestad & Nashelsky, 2018)	28
2.15. : Relevador de estado sólido (SSR) (Commons, 2024d)	29
2.16. : Sensor ultrasónico HC-SR04 (Commons, 2023c)	31
4.1. Diagrama de la metodología desarrollada para la elaboración del proyecto. Fuente: Elaboración propia.	43
4.2. Diagrama del circuito eléctrico del sistema de regulación de temperatura. Fuente: Elaboración propia	51
4.3. Diagrama del circuito eléctrico del sistema de llenado automático por goteo. Fuente: Elaboración propia.	52
4.4. Diagrama de flujo de la lógica de programación del sistema de regulación de temperatura. Fuente: Elaboración propia.	55
4.5. Representación de la incorporación del sensor ultrasónico HC-SR04 en la CCMS. Fuente: Elaboración propia.	56

4.6.	Diagrama de flujo de la lógica de programación del sistema de llenado automático. Fuente: Elaboración propia.	57
4.7.	Pruebas individuales con el sistema de regulación de temperatura. Fuente: Elaboración propia.	58
4.8.	Pruebas individuales con el sistema de Llenado automático por goteo. Fuente: Elaboración propia.	60
4.9.	Nueva lógica de funcionamiento del sistema de llenado con el sensor XKC-Y26 Fuente: Elaboración propia.	61
4.10.	Representación del funcionamiento del sensor XKC Y26. Fuente: Elaboración propia.	62
4.11.	Esquema de la integración de los sistemas de control. Fuente: Elaboración propia.	62
4.12.	Integración del sistema de control general en la CCMS. Fuente: Elaboración propia.	63
4.13.	Integración del sensor XKC Y26 a la CCMS. Fuente: Elaboración propia. . .	64
4.14.	Integración del sensor XKC Y26 a la CCMS. Fuente: Elaboración propia. . .	66
5.1.	CCMS con el nivel indicado de electrolito posterior al llenado. Fuente: Elaboración propia.	71
5.2.	Gráfica de la temperatura en la CCMS a lo largo de un día entero. Fuente: Elaboración propia.	72
5.3.	Gráfica del voltaje producido por la CCMS a lo largo de un día entero. Fuente: Elaboración propia.	73
5.4.	Gráfica de la temperatura en la CCMS a lo largo de una semana. Fuente: Elaboración propia.	74
5.5.	Gráfica del voltaje en la CCMS a lo largo de una semana. Fuente: Elaboración propia.	74

Índice de tablas

2.1. Tabla de clasificación de sensores según el tipo de variable a medir. Fuente: Elaboración propia basada en (Ramírez et al., 2021).	11
3.1. Resumen de trabajos enfocados en sistemas de control y regulación de variables en aplicaciones relacionadas con CCM.	38

Capítulo 1

Introducción

A pesar de su carácter no renovable y del impacto ambiental que conlleva su uso, los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural siguen siendo, en la actualidad, las principales fuentes de energía utilizadas a nivel global. Su uso intensivo ha contribuido significativamente a la crisis climática, la contaminación del aire y la degradación de los ecosistemas (Feregrino-Rivas, Ramirez-Pereda et al., 2023). Ante este panorama, se han promovido fuentes de energía más sostenibles, entre las que destacan la solar, la eólica, la hidroeléctrica y la geotérmica, como alternativas viables frente al uso intensivo de combustibles fósiles (Leonard et al., 2020).

Entre las alternativas emergentes en el campo de las energías renovables se encuentran las celdas de combustible microbianas (CCM), sistemas bioelectroquímicos capaces de generar energía eléctrica mientras degradan materia orgánica. Estas celdas funcionan gracias a microorganismos que oxidan compuestos orgánicos, liberando electrones que son transportados a través de un circuito externo, generando corriente eléctrica (Rahimnejad, 2023).

Una de las variantes más prometedoras son las celdas de combustible microbianas de sedimentos (CCMS), las cuales han demostrado ser eficaces tanto en el tratamiento de aguas residuales como en la producción de bioelectricidad. Su funcionamiento se basa en un electrodo anódico enterrado en sedimentos anaeróbicos y un electrodo catódico sumergido en el electrolito, separados por un medio que permite el flujo de protones. Esta disposición permite que los electrones generados en el ánodo viajen por un circuito externo hacia el cátodo, generando electricidad (Rahimnejad, 2023).

En este tipo de sistema, la solución acuosa actúa como electrolito y facilita el transporte

de iones, desempeñando un papel fundamental en el cierre del circuito electroquímico necesario para la generación de corriente. El electrolito, junto con el ánodo y el cátodo, constituye uno de los tres elementos clave en la estructura funcional de una CCM. Las bacterias exoelectrógenas catalizan la oxidación del sustrato, transfiriendo electrones al ánodo y generando corriente (Logan & Regan, 2006).

Consideradas desde este enfoque, las CCMS se posicionan como una alternativa sostenible con gran potencial, especialmente cuando se comparan con tecnologías renovables más establecidas como la energía solar o la eólica. A diferencia de estas últimas, que dependen de condiciones ambientales específicas, como la radiación solar o la velocidad del viento, las CCMS pueden producir electricidad de forma constante mientras exista sustrato disponible en el electrolito. Además, requieren una infraestructura más compacta y de menor costo, ya que no precisan grandes superficies o instalaciones especializadas (Nadeem et al., 2019).

Según (Fuku et al., 2025), las CCMS han logrado reducir los costos operativos de tratamiento de aguas hasta un 9 % en comparación con sistemas convencionales como lodos activados o humedales artificiales. Este tipo de integración energética y ambiental convierte a las CCMS en una solución atractiva para entornos urbanos o rurales con limitaciones de acceso a la red eléctrica.

Adicionalmente, otro punto a favor de estas celdas es su capacidad de operación en un amplio rango térmico. Si bien estudios como el de (Litkahi & Dehnavi, 2024) indican que bacterias como *Geobacter* y *Shewanella* presentan una eficiencia óptima entre 35 y 40°C, otras investigaciones (Behera et al., 2011) han demostrado que las CCMS pueden seguir generando corriente incluso a temperaturas cercanas a los 20°C, aunque con menor eficiencia debido al aumento en la resistencia interna del sistema.

No obstante, las CCM no están exentas de desafíos. (Boas et al., 2022) señalan que la viabilidad económica de estas tecnologías aún enfrenta obstáculos importantes, ya que su eficiencia depende de múltiples factores como el diseño del sistema, la comunidad microbiana y la eficiencia en la transferencia de electrones. Estos aspectos exigen una integración interdisciplinaria entre la biotecnología, la electroquímica y la ciencia de materiales.

En términos de generación eléctrica, las CCM aún presentan limitaciones significativas. Por ejemplo, (Solares Basurto et al., 2024) reportan que los valores típicos de voltaje en

CCM rondan alrededor de 0.75 V por unidad, lo cual es insuficiente para aplicaciones de gran escala. Por ello, su uso actual se enfoca principalmente en aplicaciones de baja demanda energética, o bien, como tecnologías complementarias.

Además, se reconoce que la limitada disponibilidad de datos experimentales sobre variables críticas, como la temperatura, el nivel del electrolito y el voltaje, dificulta el desarrollo y la validación de modelos predictivos para optimizar su rendimiento.

Ante este panorama, el presente trabajo propone el diseño e implementación de un sistema de control automatizado que regule de forma precisa dos variables críticas en una CCMS: la temperatura del entorno y el nivel del electrolito. Esta regulación se realizará mediante estrategias de control, adecuadas para las condiciones de operación del sistema.

La propuesta no solo busca mantener condiciones estables que favorezcan la producción energética, sino también generar datos confiables para investigaciones futuras. Se espera que este trabajo contribuya al desarrollo de soluciones accesibles y replicables para mejorar la eficiencia de las CCMS, fortaleciendo su papel como tecnología emergente dentro del panorama de las energías renovables.

Cabe destacar que este proyecto fue desarrollado de forma paralela y complementaria a dos trabajos de investigación también centrados en el estudio de la CCMS.

El primero fue realizado por Marco Antonio Aranda Sainz en su tesis “Desarrollo de modelos predictivos para predicción del voltaje de una celda de combustible microbiana de sedimentos”, donde se realizaron diversos modelos de regresión para predecir el voltaje generado por la celda, empleando técnicas de aprendizaje automático a partir de variables experimentales recolectadas durante su operación.

El segundo, desarrollado por Kassandra Velázquez Anaya en su tesis “Sistema de monitoreo automatizado de la producción de energía de una celda de combustible microbiana de sedimentos”, abordó el diseño e implementación de un sistema de monitoreo de variables críticas (como temperatura, voltaje, conductividad, salinidad y oxígeno disuelto) cuyas lecturas alimentan tanto al modelo predictivo como al sistema de control implementado en el presente trabajo, particularmente en lo que respecta a la variable de temperatura.

Si bien los tres proyectos fueron ejecutados de forma independiente, se coordinaron experimentalmente en una misma plataforma física y compartieron recursos como sensores,

entorno de pruebas y la CCMS utilizada, permitiendo así una validación conjunta de los resultados.

1.1. Definición del Problema

Las celdas de combustible microbianas de sedimentos (CCMS) representan una alternativa sostenible y prometedora para la generación de energía, principalmente por su bajo impacto ambiental y su capacidad de operar en entornos remotos o sin conexión a la red eléctrica. No obstante, su eficiencia y estabilidad en la producción de voltaje dependen fuertemente de la conservación de ciertas condiciones operativas, particularmente el nivel del electrolito y la temperatura dentro del sistema.

En lo que respecta al nivel del electrolito en una CCMS, (Xu et al., 2015) destacan que la configuración del sistema debe garantizar una conexión efectiva entre el ánodo y el cátodo a través del electrolito, con el fin de asegurar la generación continua de corriente eléctrica. Por esta razón, el nivel del electrolito debe alcanzar la altura de ambos electrodos, permitiendo el cierre del circuito electroquímico necesario para el funcionamiento eficiente del sistema.

En la actualidad, la regulación de estas variables, especialmente el nivel del electrolito se lleva a cabo de forma manual. Esta práctica no solo resulta poco eficiente, sino que también puede introducir fluctuaciones no deseadas en el voltaje generado, debido a un suministro de líquido turbulento o poco preciso. De manera similar, en entornos fríos o refrigerados, la reducción de la temperatura afecta negativamente la actividad metabólica de las bacterias responsables de la generación de energía, lo que se traduce en un bajo rendimiento del sistema.

En relación con la variable de temperatura, (Ren et al., 2017) señalan que *Shewanella* y *Geobacter* son dos de las bacterias más ampliamente estudiadas en el contexto de las CCM, dado su elevado rendimiento en la producción de corriente y potencia eléctrica en comparación con otros exoelectrógenos. En este mismo estudio se establece el impacto significativo de la temperatura sobre el desempeño de estos microorganismos, identificando que el intervalo óptimo de operación se encuentra entre los 25°C y 30°C, especialmente en sistemas que emplean *Geobacter*. Mantener la temperatura dentro de este rango resulta fundamental para garantizar una producción de voltaje estable y eficiente en la celda.

Desde el punto de vista técnico, la automatización del sistema de regulación de temperatura implica diversos desafíos, como la selección adecuada del sensor térmico (que debe ser preciso, económico y resistente a ambientes húmedos), así como la elección del actuador térmico, cuya capacidad de disipación debe ser suficiente para mantener el entorno de la celda dentro de un margen de temperatura adecuado (25 a 30°C), sin generar picos térmicos que perjudiquen el medio microbiano. Adicionalmente, se requiere un sistema de control lo suficientemente eficiente como para operar de forma continua, sin comprometer el consumo energético ni la integridad del hardware.

En cuanto al sistema de control de nivel de electrolito, uno de los principales problemas técnicos radica en la elección del sensor de nivel. Muchos sensores convencionales requieren contacto directo con el líquido, lo cual representa una limitación importante en este tipo de sistemas, ya que la CCMS pueden contar con un espacio interno reducido que dificulta la instalación de dispositivos intrusivos. Por tanto, se requiere un sensor no invasivo, preciso y de bajo consumo. Además, el sistema de dosificación o llenado (actuador) debe ser capaz de suministrar el líquido de manera gradual y controlada para evitar perturbaciones en el sedimento y garantizar la estabilidad electroquímica. Estos requerimientos exigen una integración cuidadosa de sensores, actuadores y controladores, con énfasis en la confiabilidad del sistema ante posibles interferencias electromagnéticas, fallas de comunicación o condiciones ambientales adversas.

Frente a estas condiciones críticas, la solución integral consiste en el desarrollo de un sistema de control automatizado que regule, de manera precisa, tanto el nivel del electrolito como la temperatura en una CCMS. Este tipo de implementación contribuye a mantener condiciones óptimas de operación, favoreciendo la estabilidad electroquímica del sistema y la eficiencia en la generación de energía eléctrica.

Por otro lado, existe escasa disponibilidad de conjuntos de datos experimentales sobre variables críticas en este tipo de sistemas. La implementación del presente sistema, además de resolver un problema práctico, también contribuye a la generación de datos confiables sobre temperatura, nivel y voltaje en CCMS, lo cual puede beneficiar futuras investigaciones en temas de eficiencia energética, modelado matemático y optimización operativa de estas tecnologías bioelectroquímicas.

1.2. Hipótesis

La implementación de un sistema de regulación de temperatura y nivel de electrolito por goteo en una CCMS mejora su rendimiento eléctrico, al reducir la variabilidad de voltaje producido a lo largo del tiempo y favorecer su estabilización.

1.3. Objetivo

Diseñar e implementar un sistema de control automático de temperatura y nivel de agua por goteo en una celda de combustible microbiana de sedimentos.

1.4. Objetivos específicos

- Diseñar el circuito eléctrico del sistema de regulación de temperatura de una CCMS.
- Diseñar el circuito eléctrico del sistema de control de nivel de agua automático por goteo de una CCMS.
- Diseñar un sistema integral automático de regulación de temperatura y de control de nivel de agua de una CCMS.
- Implementar el sistema integral automático de regulación de temperatura y de control de nivel de agua de una CCMS.
- Validar el funcionamiento del sistema de regulación de temperatura y nivel de agua por goteo instalado en la CCMS.

1.5. Preguntas de investigación

¿Qué tipo de sistema de control se puede implementar para regular las variables de temperatura y nivel de electrolito en una CCMS?

¿Qué efecto tiene el control de temperatura en la producción de voltaje en una CCMS?

¿Qué efecto tiene el control por goteo del nivel de electrolito en la variabilidad del voltaje producido por la CCMS?

1.6. Justificación

Las celdas de combustible microbianas de sedimentos (CCMS) se han consolidado como una alternativa prometedora dentro del campo de las energías renovables, principalmente por su capacidad para generar electricidad a partir de residuos orgánicos y por su bajo impacto ambiental. A diferencia de los sistemas convencionales que dependen de combustibles fósiles, las CCMS ofrecen una opción sostenible para la producción energética en entornos donde el acceso a la red eléctrica es limitado o inexistente.

Sin embargo, su eficiencia operativa está estrechamente ligada a la estabilidad de ciertas condiciones internas, particularmente dos variables críticas: la temperatura y el nivel del electrolito. Estas variables influyen directamente en el comportamiento electroquímico del sistema y, por tanto, en su capacidad para generar voltaje de manera constante.

Por un lado, el nivel del electrolito debe mantenerse dentro de un rango adecuado para asegurar el contacto entre los electrodos y el medio líquido, facilitando así el transporte de iones. En la práctica, el suministro manual de electrolito puede resultar poco preciso y generar variaciones abruptas en el nivel, lo que afecta la estabilidad del voltaje. Además, la reposición excesiva puede agitar el sedimento microbiano o alterar la composición del medio, lo que repercute negativamente en la actividad bacteriana. Por ello, el método de llenado por goteo, al permitir una dosificación gradual y controlada, se presenta como una alternativa más efectiva, aunque poco práctica si depende exclusivamente de intervención humana.

Por otro lado, la temperatura del entorno tiene un impacto determinante en la actividad metabólica de las bacterias electrogénicas. En condiciones de baja temperatura (como ocurre en espacios refrigerados o durante temporadas frías) la velocidad de las reacciones bioquímicas disminuye, reduciendo la eficiencia en la generación de corriente. Mantener la temperatura dentro de un rango adecuado es por tanto esencial para garantizar un rendimiento adecuado del sistema.

La necesidad de regular ambas variables de forma automatizada se convierte así en una

condición clave para el funcionamiento estable de la CCMS. La implementación de un sistema de control que permita ajustar de forma precisa el nivel del electrolito y mantener la temperatura dentro del rango requerido no solo mejora el desempeño del dispositivo, sino que reduce la dependencia de procesos manuales y minimiza el margen de error en la operación.

Además, al operar bajo condiciones controladas, se facilita la integración de sistemas de monitoreo que registren datos en tiempo real. Esta información es valiosa no solo para validar el funcionamiento del sistema, sino también para alimentar modelos predictivos, optimizar estrategias de operación o estudiar el comportamiento de la celda ante diferentes condiciones ambientales.

En conjunto, el desarrollo de este sistema automatizado no solo aporta una solución práctica a la operación de las CCMS, sino que también sienta las bases para su replicabilidad en otros proyectos, ampliando su potencial de uso en aplicaciones reales y contribuyendo al avance del conocimiento en tecnologías bioelectroquímicas.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Celda de combustible microbiana

Las celdas de combustible microbianas (CCM) son sistemas electroquímicos en los que se encuentran presentes microorganismos capaces de realizar la conversión directa de energía química a energía eléctrica. Además, gracias a su viabilidad económica y enfoque ecológico, representan un gran potencial ante las fuentes convencionales de energía que utilizan desmedidas cantidades de combustible fósil y causan daños notables al medio ambiente (Rahimnejad, 2023).

2.1.1. Celda de combustible microbiana de sedimentos

Las celdas de combustible microbianas de sedimentos (CCMS) son un tipo de CCM en la cual los microorganismos presentes en los sedimentos de ecosistemas marinos y ribereños tienen la capacidad de generar energía eléctrica. La construcción de este dispositivo se basa principalmente en un ánodo conectado a un circuito externo, el cual se encuentra enlazado con un cátodo que puede estar completa o parcialmente sumergido en el electrolito (Figura 2.1). Para este último, suele emplearse agua recolectada de la misma zona de donde se obtuvo la muestra de sedimentos (Feregrino-Rivas, Ramírez-Pereda & Estrada-Godoy, 2022).

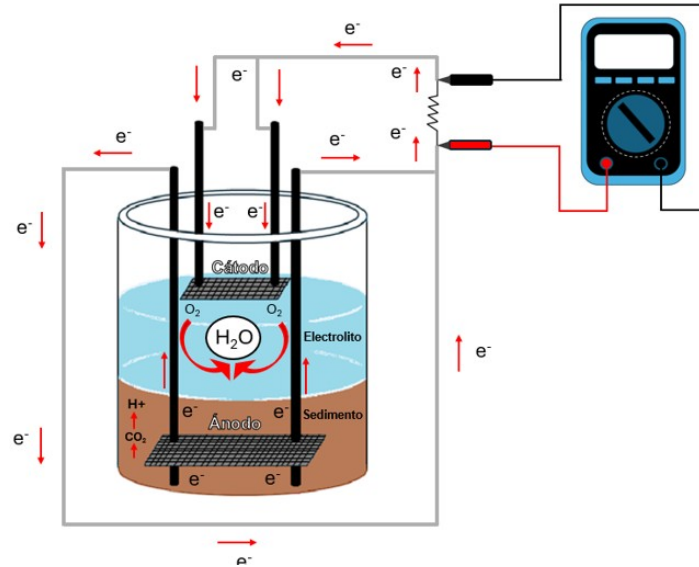


Figura 2.1: Esquema de una CCMS. Fuente: Elaboración propia basado en (Feregrino-Rivas, Ramírez-Pereda & Estrada-Godoy, 2022).

2.2. Sistemas de control automático

Los sistemas de control son un conjunto de elementos, tanto de hardware como de software, encargados de regular una o más variables en un proceso, con el propósito de que este tenga un comportamiento deseado. Este resultado se alcanza cuando la variable bajo control logra igualar el valor de referencia (*setpoint*) previamente definido como objetivo del sistema.

2.2.1. Variable controlada

La variable controlada es aquella magnitud que se desea regular dentro de un sistema. Un ejemplo de esto se puede observar en los aires acondicionados: estos sistemas regulan la temperatura acorde a un *setpoint* establecido. Por lo tanto, la magnitud que se regula en este sistema corresponde a la temperatura.

2.2.2. Variable de control

La variable de control es aquella magnitud modificada por el controlador con el propósito de influir sobre la variable controlada, de modo que esta se regule y permanezca dentro de

los parámetros establecidos. En el ejemplo de un aire acondicionado, se puede considerar a la potencia del compresor como la variable de control, dado que es directamente ajustada por el controlador e influye en el flujo de aire frío que se genera en el sistema, y, por consiguiente, en el cambio de temperatura.

2.2.3. Controladores

Son dispositivos que se encargan de realizar la acción necesaria para modificar el proceso y por lo tanto corregir la variable controlada. Para ello, se utilizan sensores que miden dicha variable, y estos valores son comparados con el setpoint. Con base en esta comparación, el controlador ajusta la variable de control con el fin de reducir la diferencia entre el valor medido y el valor deseado (Gutiérrez Hinojosa & Iturralde Kure, 2017).

2.2.4. Sensores

Según (Ramírez et al., 2021) los sensores o elementos primarios de control son instrumentos que se encargan de medir magnitudes físicas y cambiar su dominio; es decir, las convierte en señales eléctricas que puedan ser interpretadas por el controlador, de modo que la información captada resulte funcional dentro del sistema automatizado.

Actualmente existe una amplia variedad de sensores utilizados en la industria. Una forma común para clasificarlos es según el tipo de variable que miden .

Clasificación de los sensores según la variable a medir	Posición, velocidad y aceleración
	Nivel y proximidad
	Humedad y temperatura
	Fuerza y deformación
	Flujo y presión
	Color, luz y visión
	Gas y pH
	Biométricos
	Corriente

Tabla 2.1: Tabla de clasificación de sensores según el tipo de variable a medir. Fuente: Elaboración propia basada en (Ramírez et al., 2021).

2.2.5. Actuadores

Los actuadores son dispositivos que convierte un tipo de energía a otra, con el objetivo de producir un trabajo o efecto deseado sobre el sistema. Generalmente, se clasifican acorde al tipo de energía que utilizan —como actuadores neumáticos, hidráulicos y eléctricos (Figura 2.2) — o de acuerdo con el tipo de energía que generan, como actuadores lineales o rotatorios (Ramírez et al., 2021).

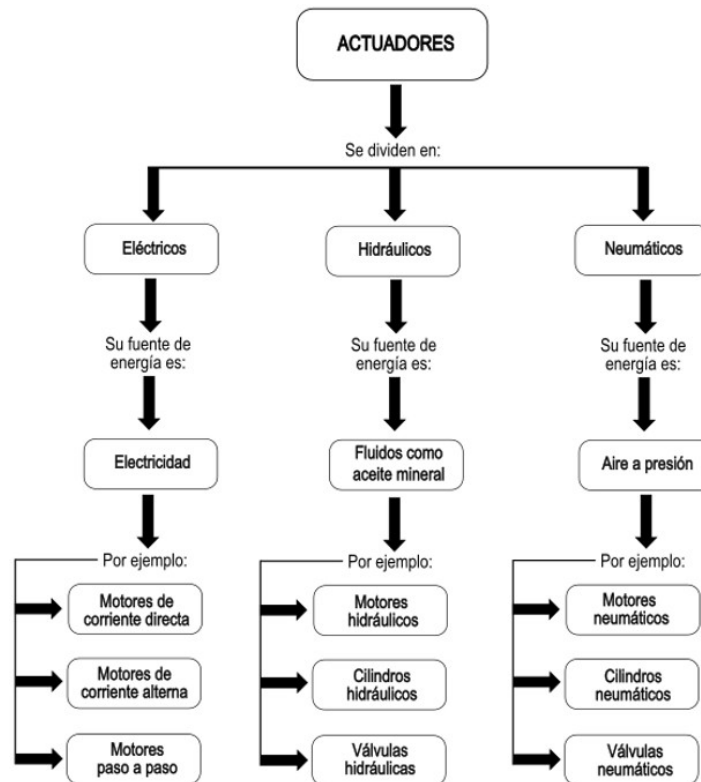


Figura 2.2: Diagrama de los tipos de actuadores según el tipo de energía que utilizan. Fuente: Elaboración propia basado en (Ramírez et al., 2021).

2.2.6. Dispositivos de conmutación y control de potencia

Los dispositivos de conmutación son componentes utilizados para permitir o interrumpir el paso de corriente eléctrica hacia el actuador. Estos elementos son manipulados directamente por el controlador permitiendo que este último (el cual trabaja con señales de baja potencia) pueda conmutar componentes que utilizan mayores cargas de voltaje o corriente.

El uso de dispositivos de conmutación, además de permitir el control de actuadores de alta

potencia también garantizan el aislamiento del circuito de carga y el controlador, protegiendo a este último en caso de posibles fallas eléctricas en el sistema.

2.2.7. Sistema de control en lazo cerrado

Los sistemas de control en lazo cerrado, también conocidos como sistemas retroalimentados, son aquellos en los que el controlador compara el valor de referencia establecido o setpoint con el valor de la variable controlada en tiempo real, el cual es recibido mediante un sensor o elemento primario de control. El resultado obtenido de esta comparación se denomina “error”, y es utilizado por el controlador para modificar la acción del actuador con el fin de influir sobre la variable controlada de tal forma que este alcance progresivamente el valor deseado.

2.2.8. Sistema de control en lazo abierto

Este tipo de sistemas de control se caracteriza porque el controlador no cuenta con información en tiempo real sobre la variable controlada, por esta razón, no se puede realizar una acción correctiva con base en un error obtenido.

Los sistemas de control de lazo abierto suelen emplearse en aquellos procesos en los que se conoce la relación causa-efecto entre la señal de entrada y la salida del sistema. Este tipo de configuración resulta adecuada cuando las influencias externas o internas que podrían alterar la variable controlada (conocidas como perturbaciones) son escasas o despreciables.

2.3. Acción de control

La acción de control corresponde al conjunto de reglas o procedimientos implementados en el controlador para determinar la respuesta del sistema ante una desviación entre el valor medido y el valor de referencia. Su propósito es minimizar esa diferencia, asegurando que la variable controlada permanezca dentro del rango establecido como óptimo para el proceso.

2.3.1. Control *on-off*

La acción de control on-off consiste en una de las técnicas más simples y comúnmente utilizadas en los procesos de automatización, la lógica de este tipo de control se basa en el encendido o apagado del actuador con el fin de regular la variable controlada dentro de un margen aceptable en relación con el setpoint requerido.

El funcionamiento del control on-off consiste en que, cuando el sensor detecta que la variable controlada se encuentra por debajo del setpoint, el controlador ordena el encendido del actuador. Como resultado, la variable empieza a incrementar en dirección a dicho valor de referencia (Eaton, 2024). Una vez que el valor de la variable coincide con el del setpoint, el controlador apaga el actuador. Este proceso se repite de tal forma que la variable de interés oscila alrededor de dicho setpoint (Figura 2.3).

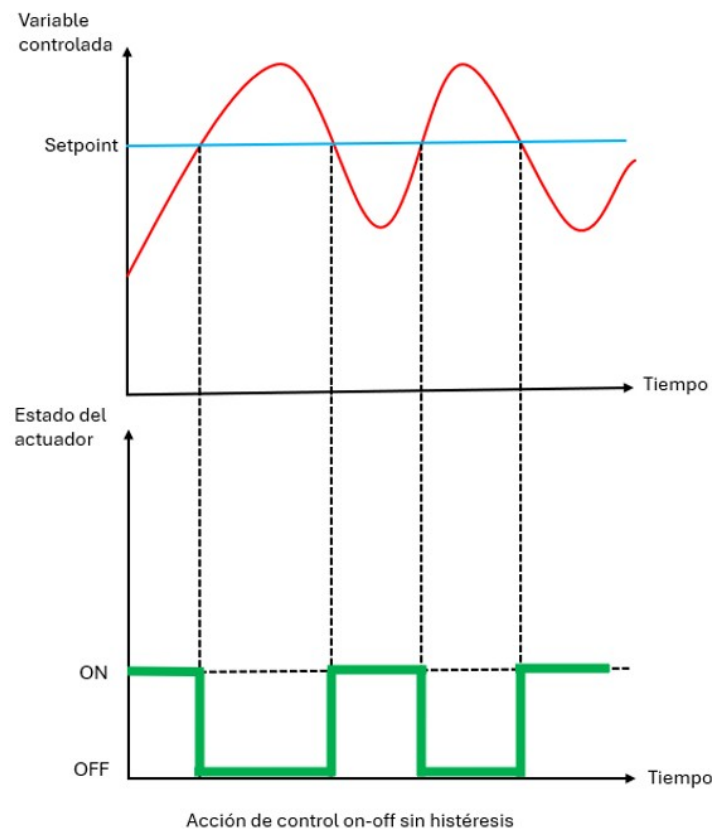


Figura 2.3: Gráficas del comportamiento de la variable controlada y el actuador ante la acción de control on-off simple. Fuente: Elaboración propia.

Gracias a su simplicidad, esta acción de control es una de las más implementadas en siste-

mas donde la precisión no es crítica. Sin embargo, por esta misma simplicidad también cuenta con una limitante importante, la cual es que la constante conmutación del actuador causa fluctuaciones que pueden sacrificar exactitud en el proceso. Además, el frecuente cambio de estado de los actuadores provoca desgaste prematuro de sus componentes, tanto mecánicos como eléctricos, acortando la vida útil del sistema.

2.3.1.1. Control on-off con histéresis

La acción de control *on-off* con histéresis conserva la estructura básica del control *on-off* convencional, pero introduce dos umbrales adicionales en torno al valor de referencia: uno por debajo y otro por encima del mismo. De esta manera, el actuador se enciende cuando el valor de la variable controlada desciende por debajo del límite umbral inferior y se apaga cuando supera el umbral superior (Figura 2.4).

Gracias a la adición de estos umbrales en la lógica de control, la frecuencia de la conmutación de los actuadores es reducida en comparación a como lo sería en un control *on-off* simple. Esto prolonga la vida útil tanto de los elementos de conmutación como de los actuadores.

Debido a su simplicidad y mayor estabilidad en la operación, el control *on-off* con histéresis representa una alternativa más adecuada para su implementación en sistemas donde la precisión no es crítica, pero se desea evitar fluctuaciones constantes y proteger los componentes del sistema.

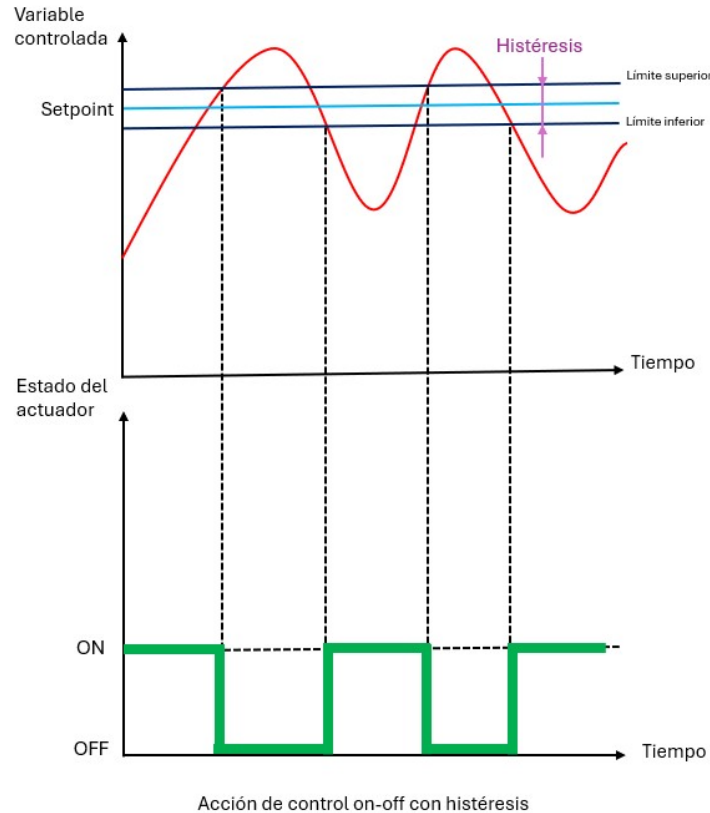


Figura 2.4: Gráficas del comportamiento de la variable controlada y el actuador ante la acción de control on-off con histéresis. Fuente: Elaboración propia.

2.3.2. Control proporcional (P)

De acuerdo con (Hernández Gaviño, 2010) La acción de control proporcional, también llamada control (P), es aquella en la que la señal de salida del controlador es directamente proporcional al error calculado, entendiendo este como la diferencia entre el *setpoint* y el valor de la variable controlada. Si el error es muy grande, el controlador produce una señal de salida “elevada”, esto se traduce en un mayor suministro de potencia al actuador con el fin de que la diferencia se corrija rápidamente. Por el contrario, si el error es pequeño, entonces la señal de salida será de menor magnitud, es decir, el nivel de potencia del actuador será menor. De esta manera se permite que el sistema responda gradualmente en función de la magnitud del error.

La acción de control (P) se representa matemáticamente de la siguiente forma:

$$u(t) = K_p \cdot e(t)$$

donde:

- $u(t)$ es la señal de salida del controlador en un determinado tiempo.
- K_p es la constante de ganancia proporcional.
- $e(t)$ es el error en un determinado tiempo.

Si bien el control (P) regula la potencia del actuador en función de la magnitud del error, con el fin de mantener al valor real de la variable controlada lo más cercano posible al *setpoint*, este último no es alcanzado completamente. Esto ocurre porque, conforme la diferencia entre el valor medido y el valor de referencia se reduce, la salida del controlador disminuye proporcionalmente. Por esta razón, existirá una diferencia persistente entre el valor de la variable controlada y el *setpoint*, lo que se conoce como error en estado estacionario, justo como se puede apreciar en la (Figura 2.5).

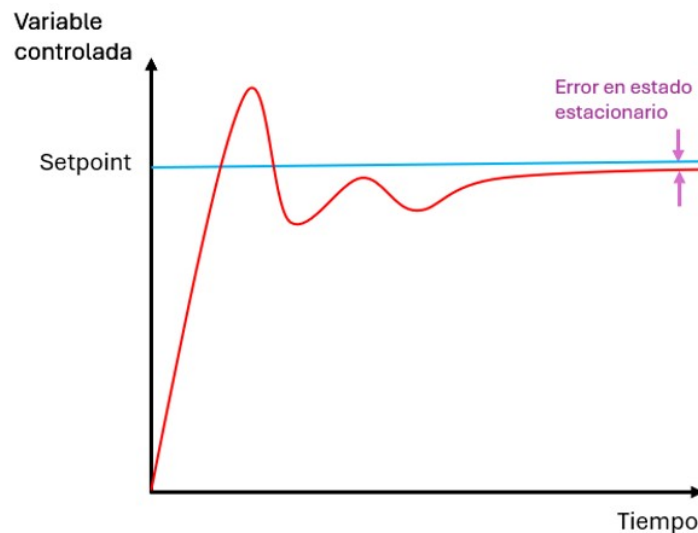


Figura 2.5: Gráfica del comportamiento de la variable controlada ante la acción de control proporcional. Fuente: Elaboración propia.

2.3.3. Control proporcional-integral (PI)

La acción de control proporcional-integral (PI) combina la respuesta inmediata del control proporcional con un término integral que acumula el error a lo largo del tiempo. Esta integración permite corregir el error en estado estacionario que no puede ser eliminado únicamente con la acción proporcional. De este modo, la acción integral ajusta progresivamente la señal de salida del controlador, incluso ante diferencias pequeñas entre la variable controlada y el valor de referencia, hasta lograr que ambas coincidan.

La acción de control (PI) se representa matemáticamente de la siguiente manera:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

donde:

- $u(t)$ es la señal de salida del controlador en un instante de tiempo específico.
- $K_p e(t)$ es el componente proporcional.
- K_i es la constante de ganancia integral.
- $\int_0^t e(\tau) d\tau$ es la suma acumulativa del error a lo largo del tiempo.

Aunque el control PI elimina el error en estado estacionario, una constante integral K_i pequeña provocará que la acumulación del error sea lenta, generando una respuesta igualmente lenta (Figura 2.6). Asimismo, cuando el sistema mantiene un error constante durante un intervalo prolongado, el término integral continúa sumando esa desviación, lo que puede derivar en una respuesta desproporcionada por parte del controlador y generar un sobreimpulso en la salida. Por esta razón, es importante hacer una correcta sintonización de las constantes K_i y K_p , de modo que el sistema mantenga un comportamiento lo más estable posible (Izquierdo Fernández, 2011).

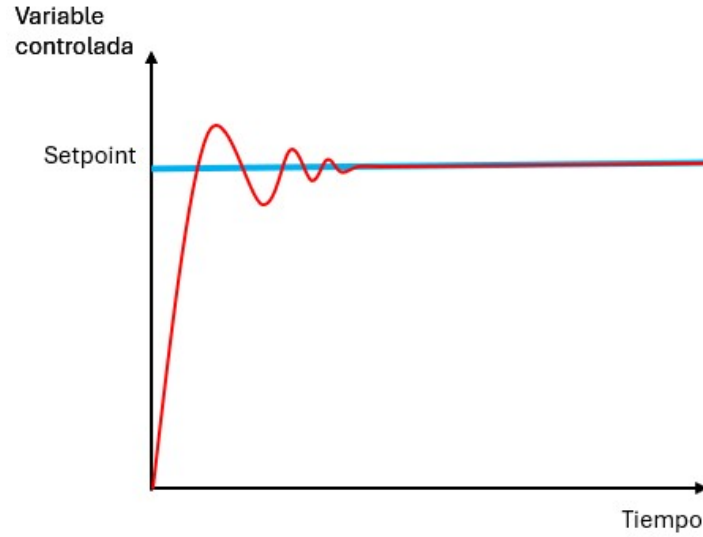


Figura 2.6: Gráfica del comportamiento de la variable controlada ante la acción de control proporcional-integral. Fuente: Elaboración propia.

2.3.4. Control proporcional-integral-derivativo (*PID*)

La acción de control proporcional-integral-derivativa (*PID*) es una de las más eficientes debido a los parámetros que la componen. Este tipo de control emplea la misma lógica que la acción Proporcional-Integrativa (*PI*), con la diferencia de que este añade un nuevo modo de control: la acción derivativa, la cual anticipa el error mediante la observación de su tasa de cambio (Corripio & Smith, 2014).

La acción de control *PID* se representa matemáticamente de la siguiente manera:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

donde:

- $u(t)$ es la señal de salida del controlador en un instante de tiempo específico.
- $K_p e(t)$ es el componente proporcional.
- $K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$ es el componente integral.
- K_d es la constante de ganancia derivativa.
- $\frac{de(t)}{dt}$ es la derivada del error respecto al tiempo.

La acción derivativa se encarga de medir que tan rápido cambia el error, calculando su derivada respecto al tiempo. De esta manera, el controlador puede anticipar hacia donde se dirige el error, por lo que, si detecta que este disminuye rápidamente y está próximo a alcanzar el setpoint, la señal de salida se ajusta anticipadamente. Esto permite reducir los sobreimpulsos en la respuesta del sistema, comúnmente asociados con el comportamiento de los controladores de tipo *PI*.

Una acción de control *PID* correctamente ajustada asegura una mayor estabilidad del sistema en un menor tiempo, reduciendo tanto los sobreimpulsos como el tiempo de asentamiento (Figura 2.7). Por estas razones, el control *PID* es una opción adecuada para procesos donde la precisión es crítica, ya que no mejora la exactitud y estabilidad del sistema, sino también corrige el error de forma rápida.

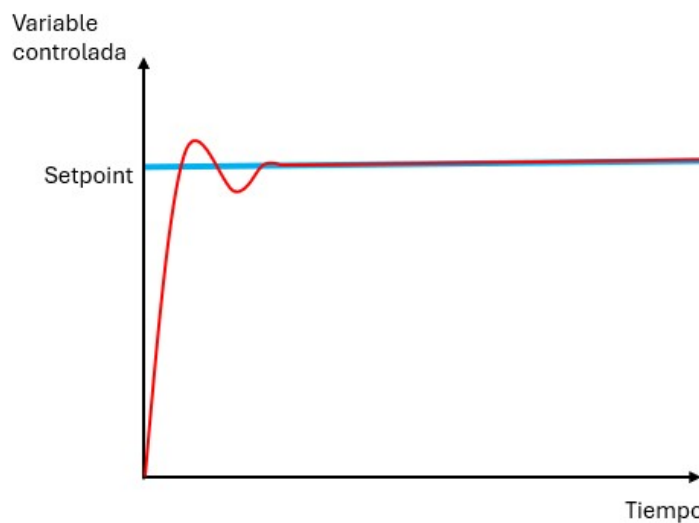


Figura 2.7: Gráfica del comportamiento de la variable controlada ante la acción de control proporcional-integral-derivativo. Fuente: Elaboración propia.

2.4. Sistema de control de temperatura

Los sistemas de regulación de temperatura son aquellos en los que la variable controlada es la temperatura del medio, la cual es regulada mediante la acción de un actuador manipulado por un controlador. Esta regulación se puede realizar de dos formas: a través de un proceso temporizado en el que no se mide la temperatura en tiempo real, lo que corresponde a un sistema de lazo abierto; o mediante una acción de control más precisa que emplea sensores

con el fin de monitorear constantemente esta variable, permitiendo estabilizarla con respecto a un valor de referencia, lo cual caracteriza a un sistema de control en lazo cerrado.

2.4.1. Importancia del control de temperatura en las CCMS

Se ha demostrado que las CCM presentan un mejor desempeño al operar a temperatura ambiente o ligeramente superior. Según (Larrosa-Guerrero et al., 2010) La eficiencia de las CCM empleadas en procesos de depuración de aguas y producción eléctrica tiende a aumentar conforme se eleva la temperatura, dentro del rango experimental comprendido entre 4 °C y 35 °C.

Por esta razón, la implementación un sistema de regulación de temperatura resulta fundamental para optimizar la eficiencia de las CCMS. Mantener la temperatura dentro de un rango adecuado mejora la producción de voltaje del sistema.

2.4.2. Controladores

Para este proyecto se optó por seleccionar un controlador económico, accesible y eficiente para llevar a cabo la acción de control requerida. Las opciones evaluadas fueron las siguientes:

2.4.2.1. Arduino Mega 2560

Arduino Mega 2560 es una placa de desarrollo orientada al desarrollo de aplicaciones en áreas como la robótica, electrónica y automatización. Entre sus características técnicas más destacadas se encuentran: 54 pines digitales de entrada/salida, 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos series de hardware), una conexión USB, un conector de alimentación, un botón de reinicio, entre otros (Arduino S.r.l., 2025).

Esta placa resulta adecuada para proyectos que requieren una gran cantidad de pines de entradas y salidas, así como una capacidad de procesamiento suficiente para el uso simultaneo de sensores y actuadores.

2.4.2.2. Esp32

Esp32 es una placa de desarrollo que integra conectividad wifi y Bluetooth, lo que convierte a este controlador en una opción ideal para proyectos relacionados con la domótica e internet de las cosas (IoT). A diferencia de otras placas como Arduino, las cuales cuentan con pines predefinidos para funciones específicas como UART, Esp32 cuenta con hasta 48 pines que pueden configurarse mediante software para desempeñar diversas funciones según las necesidades del proyecto (Espressif Systems, 2025).

Gracias a su versatilidad y capacidad de comunicación inalámbrica, Esp32 es una opción viable en sistemas de interacción remota.

2.4.2.3. Raspberry Pi

Raspberry es un ordenador mono placa, es decir, una computadora portátil construida sobre una placa de circuito impreso. Entre sus componentes principales se encuentran: 4 puertos USB, 1 puerto ethernet, 1 toma audiovisual, cuenta también con interfaz serie para cámara, conector de pantalla y 40 pines de uso general entrada/salida (Halfacree, 2024).

A diferencia de placas de desarrollo como Arduino o Esp32, Raspberry Pi cuenta con un sistema operativo completo, lo que permite realizar acciones más complejas como el procesamiento de imágenes o automatización avanzada.

2.4.3. Sensores de temperatura

Debido a que en el desarrollo de este proyecto se implementó una acción de control en lazo cerrado para el sistema de regulación de temperatura, la incorporación de un sensor de temperatura fue primordial, por esta razón se evaluaron las siguientes opciones para el desarrollo de este sistema:

2.4.3.1. PT100

El sensor PT100 es un dispositivo ampliamente utilizado para la medición de temperatura debido a su elevada precisión y excelente estabilidad frente a variaciones térmicas. El nombre se debe a que presenta una resistencia de 100 ohmios a 0 °C, la cual varía en función de la

temperatura. El funcionamiento de este sensor se basa en la propiedad de algunos materiales, como el platino, el cual es un estándar utilizado en la industria, para cambiar su resistencia eléctrica a medida que la temperatura varía (Figura 2.8) (SRC Sensores, s.f.).

No obstante, para que los valores de temperatura registrados por el sensor PT100 puedan ser leídos correctamente por microcontroladores como Arduino, es indispensable incorporar un circuito de acondicionamiento de señal. Este tipo de circuito cumple con el propósito de convertir los cambios de resistencia del sensor en una señal de voltaje que pueda ser interpretada de manera adecuada por el dispositivo de control.

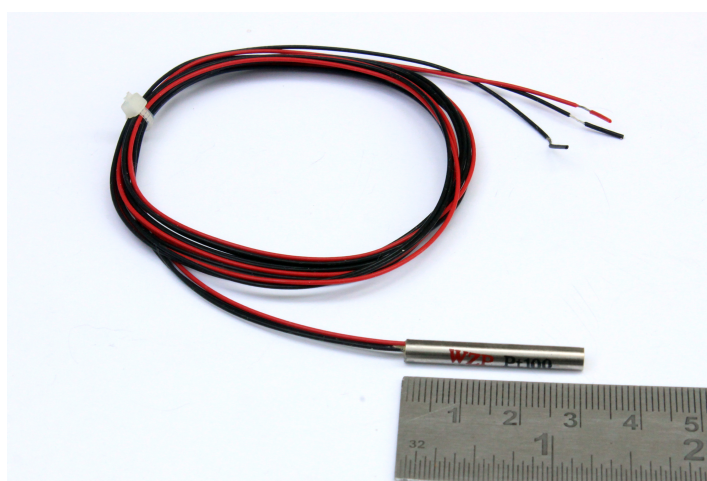


Figura 2.8: Sensor PT100 (Commons, 2024a)

2.4.3.2. Termopar tipo k

El termopar es un sensor formado por la unión de dos metales distintos, el término “tipo k” hace referencia a los materiales usados en la fabricación de este dispositivo, más específicamente, a las aleaciones de cromel y anumel, dos tipos de metal que se encuentran unidos por dos extremos llamados “punto frío” y “punto caliente”. El principio de operación de este sensor consiste en que, cuando se expone a una determinada temperatura, las uniones metálicas generan una señal de voltaje cuyo valor depende de las características fisicoquímicas propias de los materiales que conforman el termopar (SRC Sensores, s.f.).

Sin embargo, para que un termopar pueda comunicarse de manera correcta a un controlador como Arduino necesita un convertidor analógico a digital que pueda traducir la salida del sensor a datos digitales. Comúnmente, los kits de termopares para Arduino incluyen un

módulo MAX6675, o bien, módulos similares que cumplan con la función de convertidores analógico-digitales (AGE Electrónica, s.f.) (Figura 2.9).

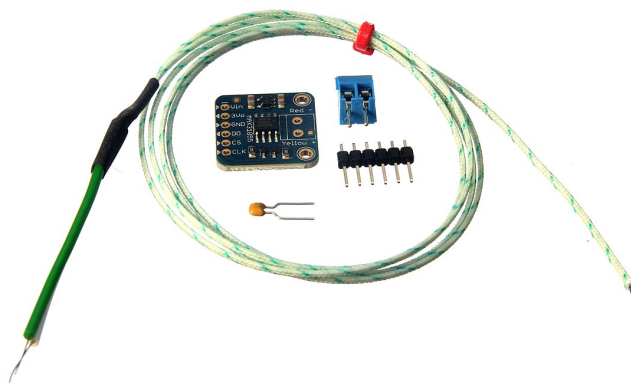


Figura 2.9: Sensor termopar con módulo amplificador (Commons, 2024b)

2.4.3.3. DS18B20

El sensor DS18B20 permite medir temperatura y transmite la información al microcontrolador mediante comunicación digital, lo que facilita su uso con plataformas como Arduino. Este sensor se caracteriza por utilizar el protocolo de comunicación OneWire, el cual permite recibir y enviar datos por medio de una sola línea o cable. Además, como detalle técnico de hardware, el DS18B20 cuenta con tres terminales: fase, neutro y data (LastMinuteEngineers.com, 2025).

A diferencia de sensores como el PT100 o el termopar tipo k, el DS18B20 no necesita integrar circuitos complejos externos para que funcione correctamente (Figura 2.10). En el caso particular de este sensor, su configuración requiere únicamente la colocación de una resistencia de $4.7\text{ k}\Omega$ entre las líneas de alimentación y datos. Asimismo, es habitual encontrar versiones comerciales del DS18B20 que incluyen un módulo adaptador con esta conexión preinstalada, lo que simplifica notablemente su integración en sistemas basados en microcontroladores como Arduino.



Figura 2.10: Sensor DS18B20 (Commons, 2024c)

2.4.4. Actuadores térmicos

Los actuadores térmicos son aquellos dispositivos que son manipulados por el controlador con el objetivo de modificar la temperatura y mantenerla dentro ciertos parámetros.

2.4.4.1. Bombilla incandescente

La bombilla incandescente es un tipo de lámpara que cuenta con un hilo de wolframio que, al calentarse por efecto del paso de corriente eléctrica, alcanza temperaturas tan elevadas que empieza a emitir luz visible. Para evitar que el hilo se caliente al entrar en contacto con el aire, es rodeado con una ampolla de vidrio a la que se le ha aplicado vacío o se ha llenado con gas (Figura 2.11) (Javier Garcia Fernández and Oriol Boix, s.f.).



Figura 2.11: Bombilla incandescente (Commons, 2023a)

2.4.4.2. Resistencia calefactora

Las resistencias térmicas son elementos utilizados para transformar la energía eléctrica en calor, permitiendo así el ajuste de la temperatura en distintos entornos. Cuando se aplican en medios líquidos, su funcionamiento suele basarse en el principio de inmersión directa, facilitando una transferencia térmica eficiente al fluido (Asturgo, s.f.) En cuanto a su construcción, están conformadas por elementos tubulares compuestos de acero por donde circula la corriente eléctrica (Figura 2.12).



Figura 2.12: : Resistencia calefactora (Commons, 2025)

2.4.4.3. Placa calefactora

Las placas calefactoras PTC son dispositivos que se encargan de modificar la temperatura de un cuerpo mediante la distribución uniforme de calor, esto se logra permitiendo el paso de corriente eléctrica a través de una resistencia interna, gracias a las propiedades de conductividad térmica del material que conforman a la placa (como lo puede ser aluminio, cobre o acero) el calor generado es distribuido uniformemente en el ambiente (HORST GmbH, 2025).

2.4.5. Dispositivos de conmutación

En términos generales, los elementos de conmutación son componentes que habilitan o bloquean el flujo de corriente desde la fuente de alimentación hacia un subsistema, como puede ser un actuador. Su accionamiento puede realizarse de manera manual o automática mediante un controlador.

Para este proyecto se evaluaron las siguientes opciones como posibles dispositivos de conmutación:

2.4.5.1. Relevador electromecánico

Un relé electromecánico combina mecanismos eléctricos y mecánicos (Figura 2.13). Su estructura se basa en una bobina que, al recibir energía, genera un campo magnético capaz de mover uno o varios contactos, abriendo o cerrando el circuito. En consecuencia, según la bobina permanezca excitada o desenergizada, los contactos móviles cambian de posición y permiten o interrumpen la circulación de corriente (Sánchez, 2012).

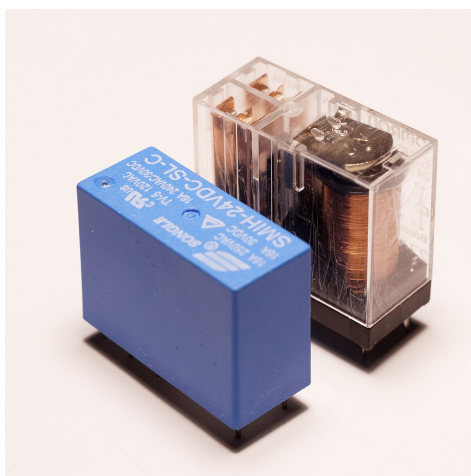


Figura 2.13: Relevador electromecánico (Commons, 2023b)

2.4.5.2. Transistor

Los transistores son dispositivos que, al igual que los relevadores, tienen la característica de que pueden funcionar como interruptores al igual que estos, sin embargo, los transistores cuentan con la ventaja de que no necesitan partes físicas que hagan contacto para llevar a cabo la conmutación en el circuito. Estos están hechos de materiales semiconductores, los cuales tienen la propiedad de actuar como aislantes o conductores dependiendo de condiciones del ambiente como, por ejemplo, la presencia de campos eléctricos.

Los transistores cuentan con 3 terminales, el nombre de estas puede variar dependiendo del tipo, pero el principio de funcionamiento es el mismo para todos. Utilizando como ejemplo un transistor tipo Mosfet canal n (el cual es muy utilizado en proyectos de electrónica)

cuyas terminales son: compuerta, drenaje y fuente (Figura 2.14). Se puede decir que su principio de funcionamiento se basa en que, cuando recibe una señal eléctrica en su compuerta, permite el paso de corriente entre sus terminales de fuente y drenaje, logrando de esta forma energizar una carga conectada en entre estas dos terminales (Boylestad & Nashelsky, 2018).

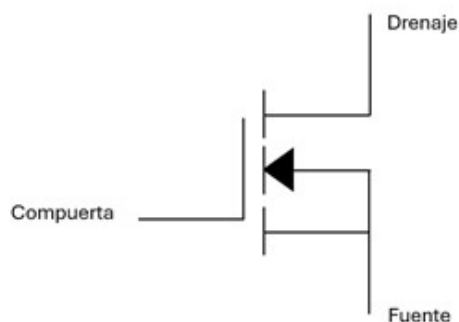


Figura 2.14: Simbología del transistor Mosfet. Fuente: Elaboración propia basado en (Boylestad & Nashelsky, 2018)

2.4.5.3. Relevador de estado sólido (SSR)

Los relevadores de estado sólido (SSR, por sus siglas en inglés) son componentes electrónicos diseñados para controlar el flujo de corriente eléctrica hacia una carga, ya sea permitiendo su paso o interrumpiéndolo (Figura 2.15). Básicamente se podría decir que funciona como un interruptor que es accionado cuando recibe un impulso o señal de control. A diferencia de los relevadores electromecánicos, los SSR no cuentan con partes móviles, debido a que, este mecanismo presente en los relés convencionales no es necesario para realizar la conmutación característica de estos dispositivos. Por el contrario, los SSR utilizan componentes electrónicos de semiconductores como transistores para llevar a cabo la conmutación, esto también implica que, no hay desgaste mecánico entre piezas a diferencia de como ocurre con los relevadores electromecánicos (Novus Automation, s.f.).



Figura 2.15: : Relevador de estado sólido (SSR) (Commons, 2024d)

2.5. Sistema de control de nivel de agua

Los sistemas de control orientados al nivel de líquido tienen como objetivo principal regular la cantidad de una solución contenida en un depósito. Para lograr esta regulación, es posible emplear esquemas de control con retroalimentación, que incorporan sensores para monitorear en tiempo real el comportamiento de la variable, o bien, implementar estrategias basadas en temporización, donde el actuador opera durante intervalos de tiempo definidos para ajustar el nivel del líquido en el recipiente.

2.5.1. Importancia del control de nivel de agua en las CCMS

La importancia de mantener el nivel de agua en una CCMS radica en que este fluido es el medio por el cual se lleva a cabo el transporte de iones entre electrodos. De acuerdo con (Naha et al., 2023) los electrolitos funcionan como un entorno favorable para la presencia de iones libres, los cuales son fundamentales para llevar a cabo procesos de electrólisis. En el contexto de las CCM, el electrolito presente en el anolito funciona como un medio de cultivo enriquecido con nutrientes que favorecen el transporte eficiente de electrones dentro del sistema. Por esta razón, mantener un nivel de agua adecuado influye en la actividad microbiana presente en las CCMS y, por lo tanto, en la eficiencia de estas.

2.5.2. Sensores de nivel

Los sensores de nivel son dispositivos que permiten detectar la presencia o medir la altura de cierta sustancia, como lo puede ser agua u otro líquido. En el desarrollo del sistema de llenado, se consideraron diversas alternativas con el propósito de identificar el sensor más conveniente, tomando en cuenta las características particulares de la CCMS.

2.5.2.1. XKC – Y26

El sensor XKC – Y26 es un tipo de sensor no invasivo que detecta la presencia de líquido en un contenedor realizando lo que se conoce como detección capacitiva, es decir, detecta la variación de la constante dieléctrica de cierto material o sustancia en un contenedor. Esto último hace referencia a que, cada material tiene la capacidad de almacenar energía eléctrica (algunos más que otros), por lo tanto, si en un contenedor no hay agua o esta se encuentra en un nivel inferior que pueda ser detectado por el sensor, este último detectará cierto valor de constante dieléctrica, el cual cambiará cuando dicho líquido alcance una altura lo suficientemente alta para que pueda ser detectado (Shenzhen XingKeChuang Technology Co., Ltd., s.f.).

Una vez ocurra el cambio de capacitancia en el sensor, el cual sobrepase cierto umbral establecido en el dispositivo, este interpretará que hay presencia de líquido, enviando al mismo tiempo una señal digital de tipo 1 o 0 que puede ser recibida por un controlador con el fin de realizar una acción requerida con base en este tipo de información.

2.5.2.2. Sensor flotador

Los sensores flotadores son dispositivos que emplean componentes mecánicos para llevar a cabo su función de detectar cierto nivel de líquido en un contenedor. Su principio de funcionamiento se basa en que cuentan con un interruptor unido a un elemento flotante. A medida que el nivel de líquido aumenta o disminuye, dicho componente flotante se desplaza, provocando de esta forma el encendido o apagado del interruptor. Es decir, a medida que el nivel de líquido sobrepasa cierta altura, activa una señal de encendido que puede ser procesada por un controlador, para llevar a cabo una acción de regulación en el nivel de dicho fluido (E-Ceica,

s.f.).

2.5.2.3. Sensor ultrasónico HC-SR04

Los sensores ultrasónicos funcionan a partir del principio de ecolocalización, el cual permite medir distancias y detectar objetos dentro de un área determinada. Este mecanismo consiste en la emisión de una onda sonora que, al encontrar un obstáculo, se refleja y regresa al sensor. Si esta señal de retorno es recibida correctamente, se confirma la presencia de un objeto cercano. El modelo HC-SR04 (Figura 2.16) incorpora dos transductores: uno actúa como emisor y el otro como receptor. Cuando la onda ultrasónica enviada rebota en una superficie y es detectada por el receptor, el sistema calcula la distancia en función del tiempo que tarda la onda en hacer el recorrido de ida y vuelta, considerando la velocidad del sonido en el medio (HandsOn Tech, s.f.).

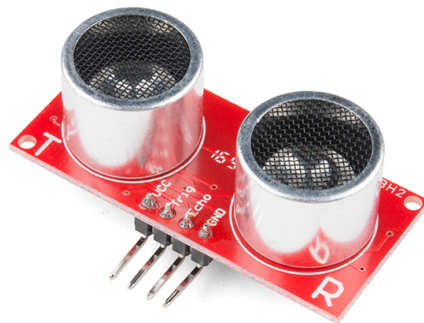


Figura 2.16: : Sensor ultrasónico HC-SR04 (Commons, 2023c)

2.5.3. Actuadores para control de nivel

En los sistemas de llenado, el dispositivo que se encarga de realizar la acción que permite el ingreso o salida del líquido en cuestión es el actuador. Existen distintos tipos de actuadores diseñados con el fin de modificar la cantidad de cierta sustancia en un sistema de control de nivel. Para el caso de la acción de llenado automático en la CCMS se evaluaron las siguientes opciones, tomando en cuenta que dicho suministro de agua debe realizarse por medio de goteo y no mediante un flujo continuo y turbulento:

2.5.3.1. Mini bomba de agua

Las mini bombas de agua son actuadores electromecánicos que funcionan con corriente directa, por lo general en un rango de 3-6 VCD (Soldered Electronics, s.f.). Cuando la bomba es energizada su mecanismo de succión interno empieza a trabajar, transportando el agua del medio hacia el interior del actuador, para después, ser dirigida hacia la salida de la bomba, la cual se encuentra conectada comúnmente a una tubería con el fin de direccionar el fluido hacia un destino en específico (Topsflo, 2023).

2.5.3.2. Electroválvula solenoide

Las electroválvulas solenoides son actuadores que permiten u obstruyen el paso de líquido a través de un ducto o tubería. En lo que respecta a los sistemas de llenado automático, lo más común es que estos actuadores se encuentren instalados junto con otros dispositivos como bombas de agua, esto con el fin, de que estas realicen la tarea de transportar cierta cantidad de líquido por una tubería, mientras que la electroválvula simplemente permite o bloquea el paso del fluido.

Acorde a su posición normal, las electroválvulas solenoides se clasifican en: normalmente abiertas y cerradas. En el caso de estas últimas, el principio de funcionamiento se basa en que, cuando es energizada con cierta cantidad de voltaje, se realiza la activación de una bobina interna que, al ser alimentada eléctricamente, genera un campo magnético capaz de desplazar un émbolo o vástago. Este elemento, que en condiciones normales bloquea el flujo del fluido, es entonces retirado de su posición de reposo, permitiendo así que el líquido circule libremente hacia la salida del sistema. En el caso de las electroválvulas normalmente abiertas el principio de funcionamiento es similar, con la única diferencia de que la lógica se invierte, de manera que, para detener el paso de fluido el actuador debe ser energizado (Valworx, s.f.).

2.5.3.3. Válvula de esfera motorizada

Las válvulas de esfera motorizada cuentan con un principio de funcionamiento similar al de las electroválvulas solenoides en el aspecto de que, ambas permiten u obstruyen el paso

de agua al recibir una señal eléctrica, sin embargo, la principal diferencia entre estos dos actuadores radica en que, mientras la válvula solenoide simplemente se abre o cierra completamente, la válvula de esfera motorizada no solo se limita a conmutar entre dos estados, sino que, realiza una apertura gradual, logrando de esta forma regular la cantidad de líquido que pasa por el sistema. Este tipo de válvula utiliza un motor eléctrico, el cual permite que el actuador pueda abrirse o cerrarse de forma gradual con el fin de lograr un control preciso sobre el caudal (RIFT Actuators Ltd., 2023).

Capítulo 3

Estado del Arte

Tal como se explicó en el marco teórico (ver Sección 2.1) , las CCM, y en particular sus variantes tipo CCMS, constituyen una opción sostenible para producir energía eléctrica a partir de materia orgánica. Sin embargo, su desempeño puede verse afectado si no se mantienen ciertas condiciones bajo control, especialmente la temperatura del medio y el nivel de líquido. Si estas variables se desestabilizan, el rendimiento del sistema puede disminuir notablemente.

Por esta razón, diferentes investigaciones han desarrollado soluciones para automatizar el control de estas variables. En este apartado se revisan varios estudios que han abordado estas problemáticas, analizando las estrategias de control empleadas, los dispositivos que utilizan y los resultados que han obtenido. Todo esto permite justificar, con base en experiencias previas, las decisiones técnicas que se tomaron para el desarrollo del sistema propuesto en este proyecto.

3.1. Regulación de temperatura en celdas de combustible

La temperatura es una variable crítica que influye de manera considerable en el correcto funcionamiento de las CCM. De acuerdo con la investigación de (Larrosa-Guerrero et al., 2010) el desempeño de las CCM utilizadas en aplicaciones como el tratamiento de aguas y la producción de energía se ve favorecido al aumentar la temperatura, siempre que esta se mantenga dentro del rango evaluado, que fue de 4 a 35 °C.

Asimismo, el estudio realizado por (L. H. Li et al., 2013) respalda la influencia directa que ejerce la temperatura de operación sobre la eficiencia energética de una CCM, eviden-

ciendo que esta variable incide significativamente en su capacidad de generación eléctrica, permitiéndole generar electricidad en un rango de 10 a 55 °C, no obstante, al alcanzar este último valor de temperaturas la producción de electricidad dejó de ser estable.

Frente a esta situación, regular la temperatura en las CCM resulta fundamental para poder analizar adecuadamente su comportamiento. Actualmente en la literatura sobre celdas de combustible se encuentra la investigación realizada por (Shen et al., 2025) quienes desarrollaron un sistema mediante una estrategia de control predictivo diseñada para gestionar simultáneamente varias celdas de combustible. En su estudio, los autores consiguieron mantener la temperatura de operación con una desviación inferior a ± 1.5 K y lograron tiempos de estabilización menores a 180 segundos. Si bien el sistema desarrollado no fue aplicado directamente en CCM, sus resultados proporcionan un referente importante respecto al nivel de precisión que puede obtenerse al implementar estrategias de control más avanzadas.

3.2. Regulación de electrolito en CCM

Tal como se mencionó en la Sección 2.5.1 la relevancia de conservar un nivel adecuado de agua en las CCM se debe a que este fluido actúa como el medio que permite el transporte de iones entre los electrodos. De acuerdo con (Mahadevan et al., 2014) cuando la resistencia interna es elevada, se produce una pérdida significativa de carga en el sistema, lo que reduce la tensión efectiva que llega a la terminal de salida. Por lo tanto, un nivel bajo de electrolito que restrinja el contacto iónico entre el ánodo y el cátodo puede aumentar la resistencia interna del sistema, lo que repercute negativamente en la generación de voltaje.

Ante esta problemática, diversas investigaciones se han desarrollado con el propósito de mejorar el rendimiento eléctrico de las CCM, particularmente en función de variables en las que el electrolito desempeña un papel clave. Un ejemplo representativo es el estudio de (C. Wang et al., 2024) quienes, mediante simulaciones en el entorno Simulink, diseñaron un sistema de control (*PID*), cuyos parámetros fueron optimizados mediante un algoritmo mejorado de enjambre de partículas (GSCPSO), con el objetivo de regular el voltaje de salida de una CCM.

El control se implementó mediante el ajuste directo de la tasa de dilución, entendida

como la velocidad a la que se introduce sustrato fresco (fluido) en la celda, en relación con el volumen total del reactor. Esta estrategia permitió una regulación eficiente del voltaje de salida, logrando que la CCM alcanzara el valor deseado en un tiempo reducido, sin presentar sobreimpulsos significativos y manteniendo la estabilidad del sistema a lo largo del tiempo. Estas características hacen que el esquema de control propuesto sea viable para aplicaciones prácticas.

De manera similar, el trabajo desarrollado por (Lian et al., 2021) se centra en el diseño de un método de control para ajustar la tasa de dilución con el objetivo de regular el voltaje generado por una CCM. En contraste con la estrategia planteada por (C. Wang et al., 2024), los autores de este trabajo adoptaron un enfoque distinto: un control por modo deslizante integral al que se incorporó una etapa de ajuste mediante lógica difusa, en lugar de un controlador (*PID*).

El diseño del método de control propuesto por (Lian et al., 2021) fue desarrollado con el apoyo del software Simulink, mediante el cual se comprobó que dicha técnica fue capaz de estabilizar el voltaje en torno al valor deseado. Además, demostró ser especialmente eficaz en la reducción de las oscilaciones rápidas y de alta frecuencia en la señal de control, fenómeno común en sistemas de modo deslizante; las cuales pueden afectar negativamente la durabilidad y el rendimiento de los actuadores en aplicaciones prácticas.

Ambos trabajos constituyen aportaciones relevantes al campo del control aplicado en CCM. Mientras que el enfoque basado en un controlador (*PID*) optimizado resulta más directo y accesible desde el punto de vista computacional, el método de control difuso integral en modo deslizante ofrece una respuesta más robusta y estable ante las incertidumbres inherentes al sistema. La revisión de estos estudios permite evidenciar cómo distintas estrategias de control pueden aplicarse exitosamente sobre una misma variable manipulada (la tasa de dilución) para regular el comportamiento eléctrico en las CCM y, a la vez, ofrece un marco de referencia consistente para el diseño de estrategias de control capaces de adecuarse a variados grados de complejidad y a diferentes restricciones de recursos disponibles.

Una aportación significativa en cuanto al suministro controlado de líquido en CCMS es la presentada en el estudio de (Dziegielowski et al., 2023), donde se analizó la evolución del voltaje y el comportamiento electroquímico de CCMS operadas en distintos tipos de suelo.

En ese trabajo, en lugar de instalar un circuito de recirculación del sustrato, se optó por un riego por goteo de baja presión. El sistema estaba formado por un depósito de 25 L, un temporizador electrónico y un conjunto de mangueras de riego por gravedad (modelo Yikaich), encargado de aportar humedad de forma periódica. Este sistema suministraba aproximadamente 0.7 litros de agua cada dos días, con el objetivo de mantener condiciones constantes de humedad en el lecho del suelo, lo que permitió preservar la actividad microbiana y favorecer la generación continua de voltaje en las CCMS.

Este caso evidencia que el uso de técnicas de goteo periódico y dosificado resulta eficaz en sistemas bioelectroquímicos donde la humedad y la estabilidad del entorno microbiano son factores determinantes para el rendimiento del sistema.

Otra aplicación del suministro por goteo en CCM fue presentada por (Yadav et al., 2020), quienes desarrollaron un sistema integrado de hidroponía por goteo y CCM orientado al tratamiento de aguas residuales. En su propuesta, cada unidad estaba conformada por un lecho de cultivo con cocopeat, electrodos de grafito, plantas (*Cymbopogon citratus*) y un sistema de riego por goteo encargado de distribuir agua residual parcialmente tratada.

La integración de este fluido en el sistema de goteo permitió alimentar de forma controlada a las plantas y al mismo tiempo sostener la actividad microbiana, lo que contribuyó simultáneamente al proceso de depuración del agua y a la producción de electricidad en el sistema. El diseño, basado en unidades modulares de pequeño tamaño, resultó eficiente para la eliminación de contaminantes, con bajo consumo energético, fácil mantenimiento y escasa producción de lodos. Además, el sistema se caracteriza por su bajo costo, la ausencia de olores desagradables, el no uso de productos químicos y el secuestro parcial de CO₂ gracias a la acción de las plantas.

Este estudio respalda la idea de que incorporar técnicas de microgoteo en sistemas de CCM o CCMS puede constituir una estrategia eficiente y sostenible, especialmente en aplicaciones reales donde se busca vincular la producción de energía con un manejo más eficiente y controlado del suministro de líquido.

Un enfoque más reciente en el suministro hídrico aplicado a CCM es el propuesto por (D. Li et al., 2025), quienes desarrollaron un sistema híbrido PEC-MFC (celda de combustible microbiana acoplada a un fotoelectrocatalizador), diseñado para lograr una remoción

eficiente de trimetilamina gaseosa. En este diseño, el reactor incorpora un sistema de riego tipo aerosol (*sprinkler-water cycle*), que funciona mediante un rociado periódico, asegurando una distribución uniforme y continua del líquido sobre el electrodo biológico.

El sistema cuenta con un cátodo basado en Co–Fe/g–C₃N₄/ACF, el cual mejora significativamente la eficiencia de remoción del contaminante gaseoso y permite, de forma simultánea, la generación de electricidad. Esto se logra gracias a la disolución del gas en el medio líquido, que luego es dirigido hacia la superficie del ánodo y del fotoelectrocatalizador para su procesamiento.

Este estudio no solo amplía las estrategias de suministro líquido en sistemas bioelectroquímicos, sino que también refuerza la viabilidad de utilizar técnicas de humidificación o riego controlado (como el microgoteo o el *spray* discontinuo) para optimizar la transferencia de masa, evitando perturbaciones hidráulicas. Además, demuestra cómo este tipo de mecanismos puede integrarse con otras funciones, como el tratamiento simultáneo de contaminantes gaseosos, sin comprometer la estabilidad electroquímica del sistema.

3.3. Comparación y análisis de trabajos previos

En la Tabla 3.1 se presenta una comparativa de diversos trabajos cuyo enfoque se centra en el desarrollo de sistemas orientados a la regulación de variables críticas, como la temperatura o el nivel de electrolito, en CCM. Dicha tabla resume las principales aportaciones de cada estudio, así como las tecnologías implementadas en los sistemas analizados previamente.

Tabla 3.1: Resumen de trabajos enfocados en sistemas de control y regulación de variables en aplicaciones relacionadas con CCM.

Autor (Referencia)	Título	Aportación	Tecnologías utilizadas
(C. Wang et al., 2024)	<i>Design of a PID Controller for Microbial Fuel Cells Using Improved Particle Swarm Optimization</i>	Propuesta de un sistema de control PID para la regulación de voltaje producido por una CCM.	■ Simulink. ■ Controlador (<i>PID</i>).

(Lian et al., 2021)	<i>Fuzzy Integral Sliding Mode Control Based on Microbial Fuel Cell</i>	Propuesta de un sistema de control difuso por modo deslizante integral para la regulación de voltaje producido en una CCM.	■ Simulink. ■ Control de modo deslizante integral difuso.
(Dziegielowski et al., 2023)	<i>Voltage evolution and electrochemical behaviour of Soil microbial fuel cells operated in different quality soils</i>	Estudio del rendimiento de CCMS en diferentes tipos de suelo.	■ Sistema electrónico de riego por microgoteo Yikaich.
(Yadav et al., 2020)	<i>Integrated drip hydroponics-microbial fuel cell system for wastewater treatment and resource recovery</i>	Desarrollo de un sistema eficiente de tratamiento de aguas residuales mediante CCM integradas con un sistema hidropónico por goteo.	■ Tubos de PVC. ■ Bomba de agua sumergible. ■ Válvulas de goteo ajustable.
(D. Li et al., 2025)	<i>A sprinkler-water cycle PEC-MFC system with bimetallic monatomic Co-Fe/g-C₃N₄/ACF cathode achieves efficient removal of gas trimethylamine</i>	Desarrollo de un sistema de CCM con un módulo de aspersión y reciclado de agua que elimina eficazmente compuestos orgánicos volátiles.	■ Sistema PEC-MFC. ■ Sistema de riego por aerosol. ■ Cátodo basado en Co-Fe/g-C₃N₄/ACF.

(Shen et al., 2025)	<i>A Multi-Objective Temperature Control Method for a Multi-Stack Fuel Cell System with Different Stacks Based on Model Predictive Control</i>	Desarrollo de un sistema de regulación térmica mediante control predictivo (MPC) aplicado a pilas de combustible multicelda.	■ Módulo de suministro de hidrógeno. ■ Módulo de suministro de aire. ■ Módulo de suministro de refrigerante. ■ Ordenador.
---------------------	--	--	--

3.4. Discusión del estado del arte

Distintas investigaciones han explorado el control de variables fundamentales en las CCM. Un ejemplo representativo es el estudio de (C. Wang et al., 2024), quienes propusieron un sistema de control basado en lógica PID enfocado en ajustar la tasa de dilución como estrategia para estabilizar la salida de voltaje. Cabe destacar que dicha propuesta fue evaluada exclusivamente a través de simulaciones desarrolladas en el entorno Simulink. En contraste, (Lian et al., 2021) emplearon un sistema de control difuso por modo deslizante integral para regular la tasa de dilución y, consecuentemente, el voltaje generado por la CCM. Al igual que el estudio de (C. Wang et al., 2024), esta investigación también propuso un sistema de control; la diferencia radica en el uso de métodos y algoritmos más complejos, buscando un diseño más robusto. No obstante, el sistema desarrollado también fue validado únicamente en un entorno simulado.

En cuanto a aplicaciones físicas de sistemas de control dirigidos a variables críticas en dispositivos tipo CCM o CCMS, la cantidad de estudios disponibles es escasa. Un ejemplo de estos es el trabajo de (Shen et al., 2025), en el cual se diseñó un sistema de control predictivo para regular con alta precisión la temperatura en pilas de combustible. Aunque esta investigación logró una implementación práctica, cabe señalar que no se llevó a cabo específicamente en una CCM. No obstante, los resultados obtenidos

en dicho estudio aportan un precedente valioso que puede tomarse como guía para futuros desarrollos aplicados en biobaterías.

En lo que respecta al control del electrolito en las CCM, los trabajos de (Yadav et al., 2020) y (D. Li et al., 2025) describen sistemas de irrigación y recirculación del líquido orientados a evaluar, de manera conjunta, la generación de voltaje y la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales y depuración de compuestos volátiles. Sin embargo, ninguna de estas propuestas incorpora estrategias automáticas de regulación del electrolito ni se concentra exclusivamente en optimizar el desempeño eléctrico de CCMS.

Por su parte, (Dziegielowski et al., 2023) analizaron rendimiento eléctrico en CCMS valiéndose de un riego temporizado, pero lo hicieron sobre celdas de gran escala (≈ 6 kg cada una). El sistema hidráulico resultante (de gran capacidad) se vuelve poco apropiado cuando se pretende trasladar la tecnología a prototipos de menor tamaño.

Aunque estas propuestas aportan enfoques valiosos, presentan ciertas limitaciones significativas. Principalmente, estos estudios no abordan la implementación práctica de estrategias de control multivariable en CCM. Adicionalmente, si bien existen investigaciones como las de (Shen et al., 2025) y (Dziegielowski et al., 2023), que implementaron sistemas de regulación de temperatura y cantidad de líquido, estos resultaron ser robustos y poco prácticos para su aplicación en CCM de pequeña escala.

Ante este escenario, el proyecto desarrollado plantea un sistema automatizado y validado experimentalmente, capaz de mantener una CCMS a nivel laboratorio en condiciones adecuadas de temperatura y nivel de electrolito mediante la supervisión y ajuste de estas variables.

Capítulo 4

Metodología

Este apartado detalla la metodología y las actividades esenciales llevadas a cabo para la elaboración del proyecto. La Figura 4.1 ilustra la secuencia de fases implementadas para desarrollar el sistema de control dedicado a la regulación de la temperatura y la administración por goteo del electrolito en la Celda de Combustible Microbiana de Sedimentos (CCMS). Es relevante destacar que esta celda fue fabricada empleando sedimentos obtenidos directamente del río Culiacán, la misma fuente de la que se recolectó el electrolito utilizado en la fase final del proceso de llenado.

El proceso de desarrollo se inició con la identificación y selección de los componentes críticos para la funcionalidad del sistema, incluyendo sensores, actuadores, dispositivos de conmutación y controladores. Basándose en esta selección preliminar, se procedió a la elaboración de los diagramas eléctricos correspondientes a cada subsistema: uno concebido para el control térmico y otro diseñado para la regulación precisa del nivel del electrolito mediante un sistema de goteo.

Una vez definidos los componentes esenciales del sistema, se procedió a desarrollar de forma individual la lógica de operación correspondiente a cada subsistema, garantizando que cada uno ejecutara su función conforme a los objetivos establecidos. Durante esta etapa, se realizaron pruebas iniciales, tanto de hardware como de software, con el propósito de identificar posibles anomalías o comportamientos imprevistos que pudieran comprometer el rendimiento. Los resultados de estas pruebas fueron cruciales para llevar a cabo los ajustes necesarios, tanto en la arquitectura física del sistema como en la lógica de control implementada.

Tras completar este proceso de validación individual, ambos módulos fueron integrados en una arquitectura coordinada, logrando la capacidad de regular simultáneamente la temperatura y el nivel del electrolito. Finalmente, el sistema integrado fue instalado sobre la CCMS y sometido a ensayos bajo condiciones operativas reales. Las observaciones derivadas de estas pruebas permitieron efectuar las correcciones finales, resultando en un sistema de control funcional.

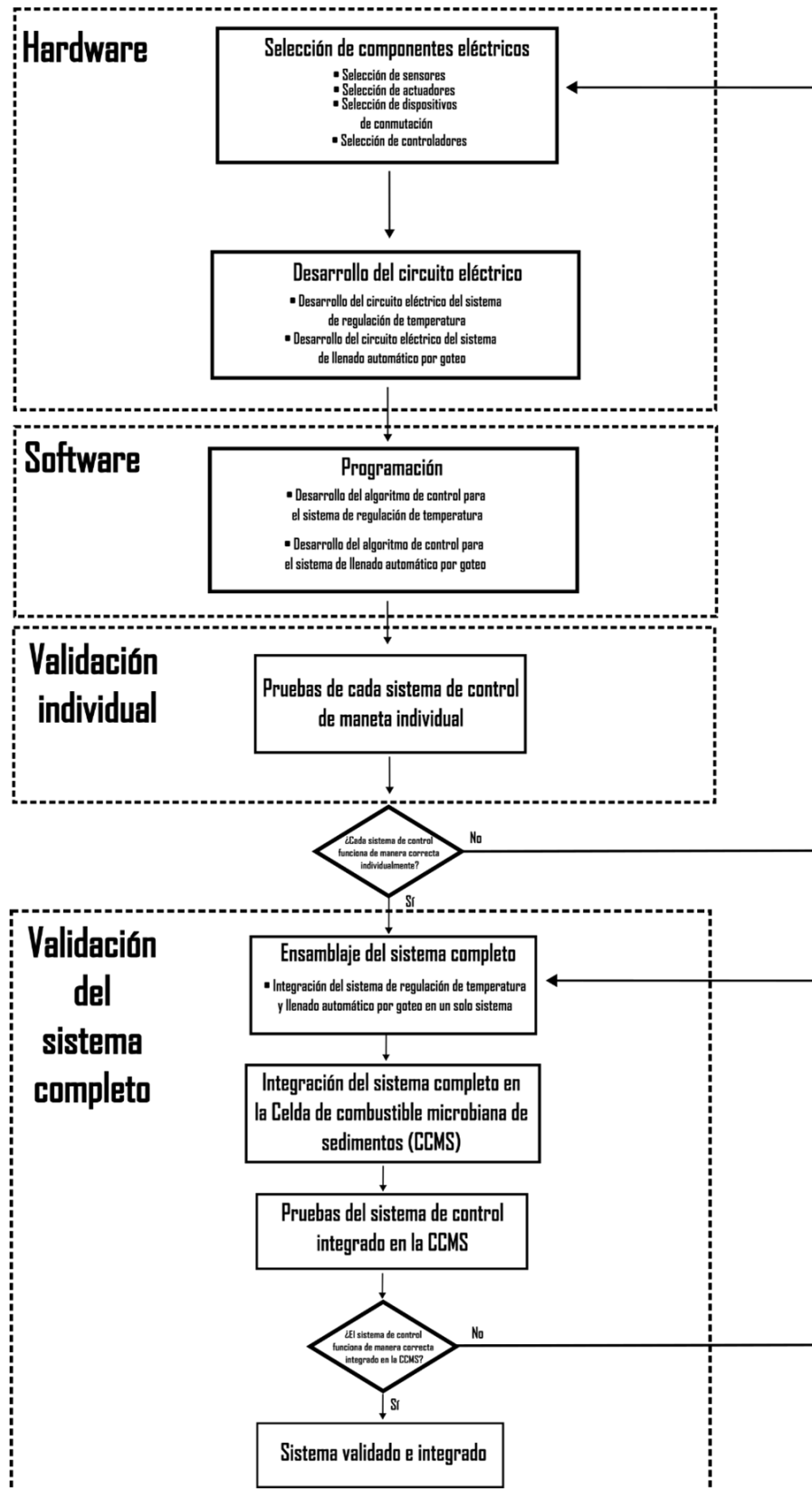


Figura 4.1: Diagrama de la metodología desarrollada para la elaboración del proyecto. Fuente: Elaboración propia.

4.1. Selección de componentes eléctricos

Antes de poner en marcha el diseño e implementación de los sistemas de control propuestos, fue necesario realizar un proceso de selección cuidadoso de los componentes eléctricos que los conformarían. El objetivo principal de esta etapa fue asegurar que las variables críticas pudieran regularse de manera efectiva y confiable. Para ello, se tomaron en cuenta diversos factores, entre ellos, las características técnicas de cada componente, su costo y su disponibilidad en el mercado. Este análisis permitió determinar qué elementos resultaban más apropiados para construir el sistema completo de control de temperatura y llenado de agua por goteo en CCMS.

4.1.1. Selección de sensores

En cualquier sistema de control en lazo cerrado, los sensores cumplen un papel clave, ya que son los encargados de proporcionar al controlador la información necesaria sobre el estado del sistema. En este proyecto, los sensores se seleccionaron considerando tanto el tipo de variable a medir como las condiciones de operación de cada subsistema. A continuación, se describe el criterio seguido para su elección, dividiendo el análisis en función de los sistemas desarrollados por separado.

4.1.1.1. Selección del sensor para el sistema de regulación de temperatura

Como se mencionó anteriormente en el marco teórico (ver Sección 2.4.3), la medición de la temperatura en el sistema se basó en la consideración de tres opciones principales de sensores: el PT100, el termopar tipo K y el DS18B20 con módulo adaptador. Aunque cada uno de estos sensores se basa en un principio de funcionamiento distinto y presenta diferencias importantes en cuanto a precisión, rango de medición, costo y facilidad de integración, todos ellos permiten obtener una lectura confiable de la temperatura del medio. La selección final se basó no solo en criterios técnicos, sino también en aspectos prácticos, como la simplicidad del montaje y la disponibilidad del componente al momento de desarrollar el prototipo.

El sensor PT100 si bien es una opción confiable por su precisión y ser muy utilizado en la industria, los precios de este dispositivo con su respectivo circuito de acondicionamiento de señal son elevados en comparación con los termopares y sensores DS18B20 disponibles para Arduino.

En términos económicos, el termopar tipo K se presenta como una alternativa más rentable que el PT100, especialmente al considerar que a menudo se incorpora su respectivo módulo convertidor.

Además, dicho precio es muy similar al del sensor DS18B20, el cual también incluye su respectivo adaptador.

En cuanto a la precisión de la medición en este sensor, esta suele tener un error de $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Maxim Integrated Products, Inc., 2021). Un valor mucho más elevado si se compara con la precisión del DS18B20, la cual es de $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (LastMinuteEngineers.com, 2025).

Con base en los argumentos presentados, se decidió utilizar el sensor DS18B20, debido a que, en comparación con el PT100, es una opción más económica. Además, el desarrollo del circuito externo es mucho menos complejo que el de este último en caso de ser necesaria la elaboración de este arreglo. Por otro lado, si bien los precios del termopar y el DS18B20 son muy cercanos, la mayor precisión en las mediciones por parte de este último fue el criterio decisivo para considerarlo como la opción más adecuada en el desarrollo del sistema de regulación de temperatura.

4.1.1.2. Selección del sensor para el sistema de llenado por goteo

Conforme a lo detallado en la Sección 2.5.2, se llevó a cabo la evaluación de tres alternativas para la implementación del sistema de llenado por goteo. Estas opciones incluyeron el sensor capacitivo XKC Y26, un sensor de nivel tipo flotador y el sensor ultrasónico HC-SR04. Aunque todos estos dispositivos son funcionalmente aptos para la detección del nivel de líquido y poseen capacidades comparables en un sentido amplio, sus características técnicas específicas jugaron un papel determinante en la decisión final. Esta evaluación permitió discernir cuál de ellos se ajustaba de manera óptima a los requerimientos del proyecto.

En primer lugar, el sensor de flotador es una opción común en aplicaciones donde se requiere detectar niveles puntuales de agua. Sin embargo, este tipo de sensor necesita instalarse dentro del recipiente, lo que representó una dificultad en el caso de la CCMS. La celda cuenta con un espacio físico limitado en su interior y ya alberga otros componentes necesarios para su operación. La integración del sensor de nivel tipo flotador resultó inviable, principalmente debido a restricciones de espacio y al riesgo de interferencia con otros componentes ya presentes en el sistema.

En contraste, el sensor ultrasónico HC-SR04 se evaluó como una alternativa prometedora, aprovechando su capacidad para medir la distancia al nivel del líquido mediante ultrasonido. Una ventaja notable de este dispositivo es su instalación no invasiva, ya que puede ubicarse externamente, eliminando la necesidad de contacto directo con el contenido del sistema.

No obstante, para que sus lecturas sean confiables, debe estar firmemente sujeto y alineado de forma perpendicular a la superficie del agua. Esta condición es crítica, ya que cualquier desviación puede

comprometer la precisión de la medición. A pesar de estas limitaciones, este sensor fue la primera opción utilizada en el prototipo inicial, ya que se disponía de él desde el comienzo del proyecto.

4.1.2. Selección de actuadores

Los actuadores son componentes indispensables en los sistemas de control, ya que estos son los que se encargan de influir sobre la variable de interés con el fin de que se mantenga dentro de los valores deseados. En este proyecto se seleccionaron los actuadores dependiendo del tipo de variable a controlar, los cuales se presentan a continuación.

4.1.2.1. Selección del actuador para el sistema de regulación de temperatura

Como se detalló en la Sección 2.4.4, la implementación del sistema de control térmico consideró inicialmente tres posibles actuadores: una bombilla incandescente, una resistencia calefactora y una placa calefactora.

Inicialmente, se decidió trabajar con la bombilla incandescente, principalmente por su disponibilidad inmediata al inicio de las pruebas. Esta elección permitió llevar a cabo una serie de ensayos preliminares sin necesidad de adquirir nuevos componentes, lo que facilitó el progreso inicial del proyecto. Durante estas pruebas, se confirmó que la bombilla era capaz de mantener el rango de temperatura requerido dentro de la CCMS, validando su funcionalidad dentro del sistema.

A pesar de contar ya con un actuador térmico, se evaluó la posibilidad de reemplazar la bombilla por alguno de los otros dispositivos previstos. La resistencia calefactora fue una de las opciones analizadas, dado su eficiencia en el calentamiento directo de líquidos. No obstante, su integración al sistema presentaba desafíos significativos. Su tamaño incrementaría la robustez y complejidad del diseño, incluso si se ubicaba externamente a la CCMS. Además, su instalación interna no era factible debido a las limitaciones de espacio impuestas por otros componentes electrónicos ya integrados en la celda, dificultando considerablemente su incorporación.

Asimismo, se consideró el empleo de una placa calefactora, caracterizada por su distribución uniforme del calor, flexibilidad y tamaño compacto en comparación con una resistencia tradicional. Sin embargo, este tipo de actuador implicaba un costo considerablemente mayor. De hecho, el precio de una placa calefactora podía ser hasta cuatro veces superior al de la bombilla incandescente, la cual ya había demostrado ser eficaz en las pruebas realizadas.

Otro factor relevante que apoyó la decisión de emplear una bombilla incandescente fue la eviden-

cia presentada en el estudio de (Misali et al., 2024). Su investigación demostró que la luz artificial contribuye a la producción de bioelectricidad en las CCMS, e incluso puede mejorar su rendimiento eléctrico cuando la exposición a dicha luz es continua.

Considerando la simplicidad del diseño, la disponibilidad, el bajo costo y el desempeño satisfactorio, se determinó que la bombilla incandescente era la opción más idónea para funcionar como actuador térmico en el sistema de regulación de temperatura de la CCMS.

4.1.2.2. Selección del actuador para el sistema de regulación de llenado por goteo

Retomando lo expuesto en la Sección 2.5.3, en este proyecto se consideraron tres opciones de actuadores para el sistema de llenado por goteo: una mini bomba de agua, una electroválvula solenoide y una válvula de esfera motorizada. La elección del actuador se basó en criterios como la compatibilidad con el tipo de flujo requerido (goteo), la facilidad de integración al sistema y el costo.

La mini bomba de agua resultó ser una opción viable desde varios frentes. Es un componente de fácil acceso en el mercado local y su precio es considerablemente menor en comparación con los otros actuadores evaluados. Además, su capacidad para operar con caudales moderados la hace adecuada para lograr un suministro por goteo bajo condiciones controladas. A esto se suma su versatilidad de conexión, ya que puede ser controlada mediante distintos elementos de potencia como relevadores o transistores.

En contraste, la electroválvula solenoide, aunque común en sistemas de control de fluidos, presenta ciertas limitaciones para esta aplicación. Su precio puede llegar a ser tres veces el de una mini bomba, y su funcionamiento está basado únicamente en abrir o cerrar el paso del líquido, permitiendo un flujo constante y relativamente elevado. Esto haría necesario incorporar un sistema adicional que reduzca el caudal para lograr un goteo, lo cual incrementaría la complejidad general del diseño.

Por su parte, las válvulas de esfera motorizadas ofrecen un mayor control sobre el caudal, pero su alto costo representa una desventaja significativa. Además, su implementación requeriría diseñar una estructura adicional que no solo soporte el actuador, sino que también garantice el direccionamiento adecuado del fluido hacia la CCMS, lo que añadiría dificultades tanto en la instalación como en el mantenimiento del sistema.

En función de estos aspectos, se optó por utilizar la mini bomba de agua como actuador del sistema de llenado, ya que representa una solución práctica, económica y eficiente para lograr el suministro de electrolito por goteo necesario en la CCMS.

4.1.3. Selección de dispositivos de conmutación

Los dispositivos de conmutación son elementos muy importantes en sistemas que utilizan actuadores, esto debido a que, permiten o impiden el paso de corriente en actuadores eléctricos, haciendo posible el funcionamiento requerido del actuador para regular variables de interés.

4.1.3.1. Selección del dispositivo de conmutación para el sistema de regulación de temperatura

Conforme a lo presentado en la Sección 2.4.5, se llevó a cabo la evaluación de tres tipos de dispositivos de conmutación para el sistema: un relevador electromecánico, un transistor y un relevador de estado sólido (SSR). Si bien los tres poseen la capacidad de controlar el flujo de corriente hacia el actuador (ya sea permitiéndolo o interrumpiéndolo), el SSR se destacó como la mejor opción, justificándose su elección por las siguientes razones clave:

1. Minimización del Desgaste Mecánico

Una ventaja distintiva de los SSR, a diferencia de sus contrapartes electromecánicas, radica en su ausencia de partes móviles. Esta característica les confiere una vida útil considerablemente superior, puesto que la operación no implica el contacto físico entre componentes internos. Esto, a su vez, elimina por completo el desgaste inherente a la fricción que típicamente ocurre durante la conmutación en relevadores mecánicos.

2. Compatibilidad directa con corriente alterna

Tanto los relevadores de estado sólido como los transistores tienen en común que permiten realizar la conmutación eléctrica sin necesidad de contacto físico entre sus componentes. No obstante, una diferencia clave entre ambos dispositivos radica en el tipo de corriente que pueden manejar eficientemente: mientras que el SSR utilizado está específicamente diseñado para operar con corriente alterna, la mayoría de los transistores comerciales están optimizados para aplicaciones en corriente directa. Además, muchos de estos transistores no manejan los valores de tensión necesarios para activar de forma segura el actuador empleado en este sistema. Por lo tanto, la utilización de un transistor para la conmutación de corriente alterna habría implicado un sistema más complejo.

3. Facilidad de integración y disponibilidad

Otro aspecto determinante fue que el SSR ya se encontraba disponible dentro del inventario de componentes. Durante las fases iniciales de prueba, el desempeño del SSR fue completamente satisfactorio para los requisitos del sistema. Esta validación inicial permitió descartar la búsqueda de otras

alternativas que pudieran acarrear un mayor riesgo de desgaste mecánico o exigir procedimientos de instalación más complejos.

4.1.3.2. Selección del dispositivo de conmutación para el sistema de regulación de llenado por goteo

Para el sistema de llenado automático, se consideraron los mismos dispositivos de conmutación analizados en el apartado correspondiente al sistema de regulación de temperatura: relé electromecánico, transistor y relé de estado sólido (SSR) (Ver Sección 2.4.5). Sin embargo, en este sistema se utilizó un elemento de conmutación diferente al seleccionado en el de regulación de temperatura.

En lo que respecta al sistema de llenado automático por goteo, se seleccionó el relevador electromecánico para realizar la acción de conmutación, el hecho de que estos dispositivos cuentan con la capacidad de manejar cargas en corriente directa, son fáciles de implementar, además de que ya se contaba con él, facilitaron su implementación en el sistema, logrando realizar la conmutación necesaria sobre la bomba de agua para realizar el suministro por goteo.

Si bien los SSR ofrecen una gran durabilidad y conmutación silenciosa, el único con el que se contaba ya había sido utilizado para el sistema de regulación de temperatura, además, considerando que dicho dispositivo opera exclusivamente con cargas de corriente alterna, la integración de un SSR para corriente directa se descartó para evitar gastos adicionales innecesarios, dada la baja potencia de la bomba de agua a conmutar.

Por otro lado, si bien los transistores ofrecen ventajas importantes en términos de vida útil y velocidad de conmutación, se optó por utilizar un relevador electromecánico debido a consideraciones prácticas y de integración con el sistema existente. En la CCMS ya se encontraba instalado un módulo de 4 relevadores, los cuales incorporaban circuitos de protección integrados. Este módulo formaba parte de un sistema de recuperación ante fallos, encargado de interrumpir o restablecer el suministro eléctrico hacia los controladores, a través de comandos enviados remotamente desde una plataforma web.

Dicho sistema permitía reiniciar los dispositivos de control en caso de detectar fallos en la parte de monitoreo por sensores. Cabe destacar que esta funcionalidad pertenece a una etapa independiente del sistema de control desarrollado en este trabajo, ya que forma parte de un sistema de monitoreo de variables críticas asociado a un proyecto paralelo.

Entonces, con el fin de aprovechar la disponibilidad de dispositivos de conmutación presentes en el módulo de relevadores, los cuales tenían componentes de protección integrados, y, dado que el

suministro de agua por goteo solo se realiza una cantidad relativamente pequeña de veces al día que no compromete la vida útil de los relevadores, junto con el hecho de que la velocidad de conmutación no es un aspecto crítico, el uso de estos dispositivos de conmutación resultó ser una opción adecuada.

4.1.4. Selección del controlador

Como se mencionó anteriormente en la Sección 2.4.2 del marco teórico, el Arduino Mega 2560 es una placa de desarrollo especialmente útil en proyectos que requieren una amplia cantidad de pines de entrada y salida, así como una capacidad de procesamiento adecuada para gestionar múltiples sensores y actuadores de forma simultánea. Debido a estas características, en una primera etapa del proyecto se consideró utilizar este controlador tanto para la regulación de temperatura como para la operación del sistema de llenado.

4.2. Desarrollo del circuito eléctrico

Una vez seleccionados los componentes eléctricos para cada sistema de control, se procedió a realizar el ensamblaje de estos con el fin de efectuar pruebas preliminares de funcionamiento de manera individual. Esta etapa permitió verificar el comportamiento de cada sistema de forma aislada y asegurar que cumplieran adecuadamente con sus funciones antes de integrarlos en el sistema completo.

4.2.1. Desarrollo del circuito eléctrico del sistema de regulación de temperatura

Para el armado del sistema de regulación de temperatura, se integraron los siguientes elementos: una placa Arduino Mega 2560, un sensor de temperatura DS18B20 con su respectivo módulo adaptador, un SSR y una bombilla incandescente utilizada como fuente de calor.

El circuito fue diseñado interconectando dichos componentes, asignando al Arduino la función de unidad central de control. En este esquema, se utilizaron pines digitales específicos tanto para monitorear la temperatura mediante el sensor como para activar el sistema de calefacción. La lámpara fue alimentada con una fuente de corriente alterna de 110V, mientras que el sensor recibió alimentación directamente desde el pin de 5 V del Arduino.

La Figura 4.2 presenta el esquema del circuito con mayor detalle, donde se observa la disposición de los componentes y su conexión funcional dentro del sistema.

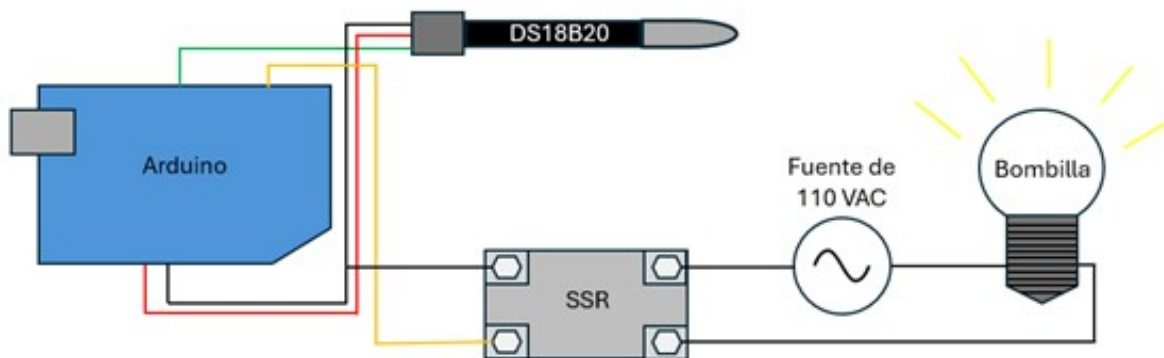


Figura 4.2: Diagrama del circuito eléctrico del sistema de regulación de temperatura. Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Desarrollo del circuito eléctrico del sistema de Llenado por goteo

Para la implementación del sistema eléctrico del llenado automático por goteo, se utilizaron los siguientes componentes: una placa Arduino Mega 2560, un sensor ultrasónico HC-SR04, un relevador electromecánico de 5 VCD, una mini bomba de agua y un módulo de reloj en tiempo real DS3231, el cual se encontraba conectado a la placa ESP32 utilizado en el sistema de monitoreo mencionado en la introducción del presente trabajo.

El diseño del circuito consistió en la conexión de estos dispositivos, donde el Arduino actuó como unidad central de control. Se destinaron pines digitales específicos para la lectura de las señales procedentes del sensor HC-SR04 y para la activación del relevador, el cual gestionaba la conmutación de la bomba. Es importante destacar que la bomba recibió su alimentación de una fuente externa de 5 VCD, completamente independiente de la placa principal.

La Figura 4.3 ilustra el diagrama del circuito eléctrico correspondiente a la primera versión del sistema de llenado por goteo.

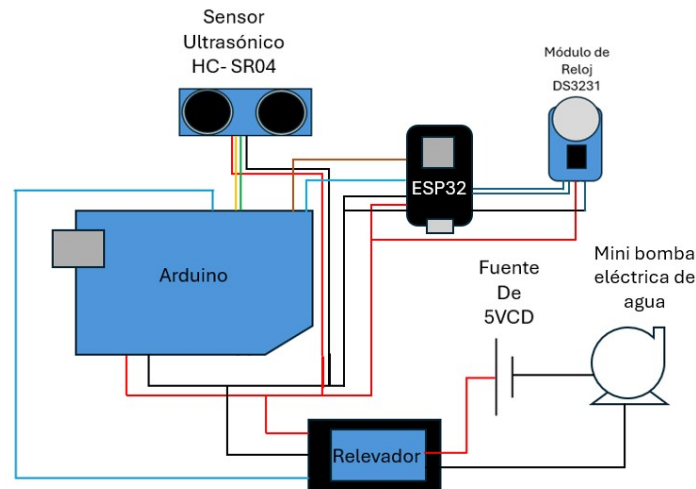


Figura 4.3: Diagrama del circuito eléctrico del sistema de llenado automático por goteo. Fuente: Elaboración propia.

4.3. Programación

Para el desarrollo de los sistemas de control, se empleó la plataforma de programación Arduino IDE. Se desarrollaron dos programas independientes: uno correspondiente al sistema de regulación de temperatura y otro para el sistema de llenado de electrolito por goteo. Esta separación tuvo como propósito facilitar las pruebas individuales de cada sistema, permitiendo validar su funcionamiento por separado antes de realizar la integración final.

4.3.1. Comparativa de acciones de control y justificación de la acción de control seleccionada

Para el desarrollo del presente proyecto se tomaron en consideración cuatro algoritmos de control: proporcional (*P*), proporcional-integral (*PI*), proporcional-integral-derivativo (*PID*) y control on-off con histéresis, todos ellos descritos previamente en la sección 2.3. Es importante destacar que se implementaron dos sistemas de control independientes: uno destinado a regular la temperatura y otro orientado a mantener el nivel de electrolito en una CCMS. Ambos sistemas comparten como base la lógica de control *on – off*, seleccionada por su simplicidad y por ofrecer una respuesta eficaz dentro de los márgenes de operación requeridos.

Como se mencionó en la sección 1.1 para la variable de temperatura se tuvo que considerar que, la CCMS opera de forma adecuada cuando esta se encuentra en el rango de los 25 a 30 °C. Según

(Durna Pişkin & Genç, 2024), la temperatura es una variable de gran importancia tanto en las CCM como en cualquier sistema en el cual se encuentren microorganismos. Las altas temperaturas no son recomendables en este tipo de celdas debido a que benefician el crecimiento de metanógenos, los cuales pueden inhibir la transferencia de electrones. Sin embargo, el hecho de que las bacterias electroquímicamente activas sean las especies dominantes a temperatura ambiente (25 a 30 °C) hace que las CCM presenten la ventaja de operar de forma adecuada en ese rango.

Por esta razón decidió emplear una acción de control *on – off* con histéresis. Esta lógica permite reducir la conmutación frecuente del actuador y una oscilación controlada de la variable sin afectar el rendimiento del sistema. Dado que el objetivo principal era mantener la temperatura dentro del rango de 25 a 30 °C, la acción de control *on – off* resulta ser suficiente para cumplir con este propósito. Por lo tanto, implementar una estrategia de mayor precisión, como el control *P,PI,o PID* resulta innecesaria para los fines específicos de este proyecto.

En el caso del sistema de llenado, se optó por implementar una acción de control *on – off* con lógica temporizada. Dicho sistema fue diseñado de tal forma que realiza el llenado mediante goteo y no por medio de un flujo constante, debido a que el suministro continuo y turbulento de líquido produce perturbaciones en el medio, lo que afecta negativamente la producción de voltaje de la CCMS. Según (C.-T. Wang, 2014) se ha demostrado que aplicar métodos de control de flujo en las CCM mejora su rendimiento energético. Investigaciones relacionadas se han centrado en aplicar dichos métodos a gran escala, como el tratamiento de aguas residuales, sin embargo, un reto potencial para tener en cuenta es su aplicación a pequeña escala.

Además, de acuerdo con (Hamed et al., 2020) al aplicar altas velocidades en el transporte de fluido en una CCM, la turbulencia asociada a estas impulsa la formación de burbujas de aire hacia la superficie del electrodo. Esto provoca colisiones entre este y dichas burbujas. La presencia de estas cerca de la superficie aumenta la resistencia eléctrica y, por tanto, la disminución de corriente.

Por esta razón, el llenado por goteo representa la alternativa más adecuada para mantener la estabilidad en la CCMS. Tomando en cuenta esto, la acción de control *on – off* presentó una opción viable para gestionar el suministro del goteo. Esto se logró mediante la activación del actuador durante un intervalo de tiempo predeterminado y preciso, en el cual la cantidad de líquido suministrado es lo suficientemente pequeña como para permitir suministrar el paso de una gota. Una vez transcurrido dicho intervalo, el actuador se apaga y el ciclo se repite.

4.3.2. Desarrollo del algoritmo de control para el sistema de regulación de temperatura

Tal como se explicó en la Sección 4.3.1, se decidió realizar la regulación de la temperatura a través de la acción de control *on – off* con histéresis. Esta elección sirvió de base para el desarrollo de la lógica de programación, cuya implementación se visualiza en el diagrama de flujo presente en la Figura 4.4.

El sistema opera a partir de la predefinición de un setpoint para la temperatura, junto con un valor de histéresis. El sensor de temperatura realiza mediciones de forma continua, y basándose en estas lecturas, el Arduino decide si el actuador debe ser activado o desactivado.

En el momento en que el sensor registra que la temperatura se encuentra por debajo del límite inferior (es decir, el setpoint menos la histéresis), el controlador procede a activar la bombilla incandescente. Esta permanecerá encendida hasta que la temperatura rebase el límite superior (definido como el setpoint más la histéresis).

De esta manera, se previene la conmutación excesiva del actuador, lo que contribuye a mantener la temperatura dentro del rango requerido para el funcionamiento adecuado de la CCMS.

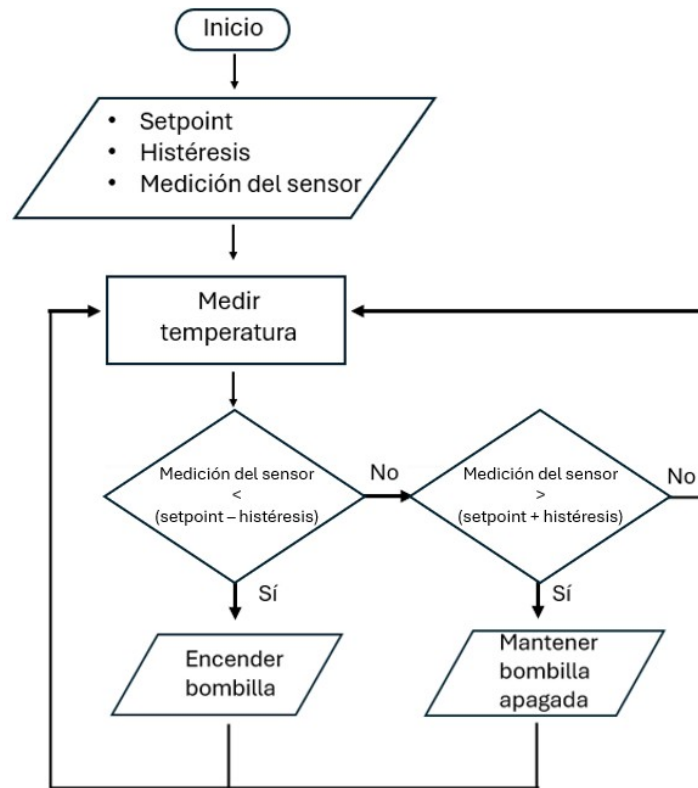


Figura 4.4: Diagrama de flujo de la lógica de programación del sistema de regulación de temperatura. Fuente: Elaboración propia.

4.3.3. Desarrollo del algoritmo de control para el sistema de llenado automático por goteo

En el sistema de llenado automático por goteo se implementó la estrategia de control tipo *on-off*. La lógica del algoritmo se fundamenta en la programación de un horario diario específico para la verificación del nivel de electrolito. Para esto, el sensor se ubica a una altura preestablecida dentro del depósito, asegurando una detección precisa de la distancia entre su posición y la superficie del agua. Esta distancia de referencia se designa como 'X' (Figura 4.5).

Cuando el sensor registra una distancia superior a 'X', se interpreta que el nivel de agua está por debajo del valor óptimo. Ante esta condición, el sistema procede a activar la bomba para iniciar el proceso de llenado. Por el contrario, si la distancia medida es igual a 'X', se asume que el nivel de líquido es el adecuado, lo que anula la necesidad de activar el llenado.

La Figura 4.6 ilustra gráficamente la lógica de funcionamiento del sistema de llenado por goteo, facilitando la comprensión del proceso descrito.

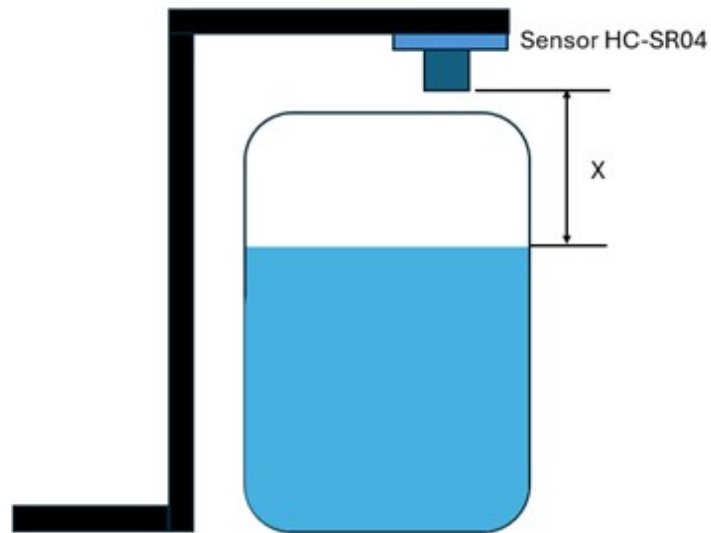


Figura 4.5: Representación de la incorporación del sensor ultrasónico HC-SR04 en la CCMS.
Fuente: Elaboración propia.

El proceso de llenado se ejecuta de manera que la bomba se activa durante un lapso de 100 milisegundos. Este tiempo fue seleccionado tras observar que permite generar un goteo continuo sin provocar perturbaciones en la superficie del líquido. Luego de cada impulso de llenado, la bomba permanece apagada durante dos segundos, intervalo elegido de forma arbitraria, ya que no interfiere con el efecto de goteo ni con el desempeño general del sistema. Este ciclo de encendido y apagado se repite de forma continua hasta completar el llenado requerido.

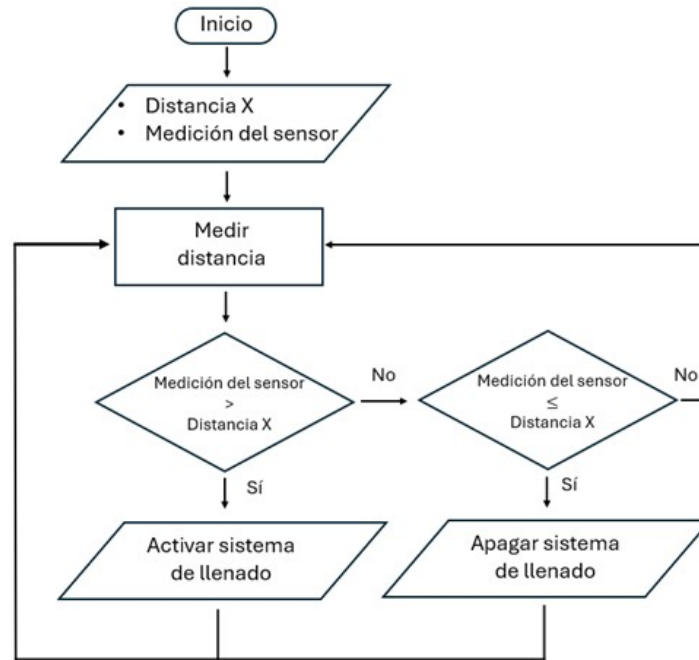


Figura 4.6: Diagrama de flujo de la lógica de programación del sistema de llenado automático.
Fuente: Elaboración propia.

Un aspecto crucial en el desarrollo de este proyecto fue la implementación inicial de ambos sistemas de control (tanto el de regulación de temperatura como el de llenado por goteo) empleando la función *millis()* de Arduino. Esta decisión se tomó con el fin de evitar el uso de funciones de bloqueo, como *delay()*, buscando obtener una ejecución más eficiente del programa y la capacidad del microcontrolador para gestionar múltiples tareas de manera simultánea.

La función *millis()* regresa la cantidad de milisegundos transcurridos desde que Arduino inicia la ejecución del programa. Esto posibilita la gestión de temporizaciones sin interrumpir el flujo normal del código. A diferencia de *delay()*, que pausa completamente la ejecución por un tiempo definido, *millis()* permite al sistema seguir procesando otras instrucciones mientras se espera el cumplimiento del intervalo deseado (Arduino Documentation Team, s.f.).

Este tipo de temporización no bloqueante resulta especialmente útil en aplicaciones que requieren monitoreo y actuación continua sobre diversos elementos, como sensores y actuadores. En el caso de este sistema, se pretendía mantener la lectura constante de variables ambientales al tiempo que se controlaban procesos como la activación de la bomba o del actuador térmico.

Por tanto, el uso de la función *millis()* representó una primera estrategia para estructurar una lógica de control más eficiente en la operación simultánea de ambos subsistemas.

4.4. Pruebas de cada sistema de control de manera individual

En esta Sección se evaluó por separado el funcionamiento de los sistemas de regulación de temperatura y de llenado automático.

El primer sistema en ser probado fue el de regulación de temperatura. Para esta evaluación, se fijó un setpoint de 30 °C. Este valor se eligió por ser ligeramente superior a la temperatura ambiente registrada durante la prueba (la cual era de 24 °C), garantizando así la activación inicial del actuador (la bombilla) por parte del controlador. Una vez que el programa se cargó en la placa Arduino, que ya estaba conectada al circuito del sistema, las lecturas captadas por el sensor de temperatura comenzaron a mostrarse en el monitor serial del entorno de Arduino IDE.

Dado que la temperatura inicial registrada era inferior al setpoint, el sistema activó la bombilla tal como se esperaba. A continuación, se acercó el sensor a la fuente de calor (Figura 4.7) con el propósito de elevar su lectura hasta alcanzar el valor correspondiente al setpoint más el margen de histéresis. Al alcanzarse dicho umbral, la bombilla se apagó automáticamente. Esta prueba permitió confirmar que el sistema respondía de la forma esperada a los cambios de temperatura, validando su funcionamiento conforme a la lógica de control establecida.

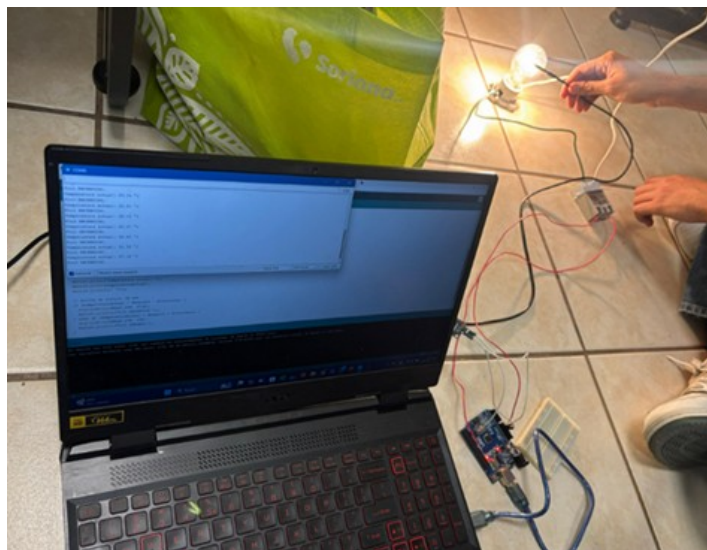


Figura 4.7: Pruebas individuales con el sistema de regulación de temperatura. Fuente: Elaboración propia.

En lo que respecta al sistema de llenado automático, se inició la fase de pruebas individuales

recolectando el líquido necesario para su evaluación. Estas pruebas tuvieron como objetivo verificar el correcto funcionamiento del sistema, utilizando agua suministrada por red pública para observar el comportamiento del goteo en condiciones controladas. Posteriormente, se definió una distancia de referencia denominada “X”, establecida en 10 cm por motivos prácticos, la cual sirvió como parámetro para determinar la activación del sistema de llenado.

Posteriormente, se programó una hora específica para que el sistema iniciara la verificación del nivel de agua, seleccionando un momento cercano al de la prueba para realizar la observación directa del comportamiento del sistema sin necesidad de esperar mucho tiempo.

Una vez definidos los parámetros necesarios, se preparó el montaje de los componentes eléctricos del circuito, asegurando que el suministro de agua pudiera llevarse a cabo correctamente. La mini bomba fue sumergida en un recipiente con agua, y a su salida se conectó una manguera flexible de PVC, la cual fue fijada a un segundo contenedor donde tendría lugar el goteo.

Para lograr un flujo de goteo estable, fue necesario realizar pruebas experimentales modificando el tiempo de encendido de la bomba mediante ajustes en el código. Se observó que el comportamiento del goteo dependía del largo de la manguera y de su posición. Una vez que esta última fue asegurada en una ubicación fija, se realizaron iteraciones sucesivas hasta encontrar el tiempo óptimo de funcionamiento: en este caso, 100 milisegundos fueron suficientes para liberar una gota sin generar perturbaciones en el sistema.

Después de determinar el tiempo adecuado de activación de la bomba de agua, se cargó el programa a la placa Arduino. Al llegar la hora establecida, el sensor se orientó hacia el techo (Figura 4.8), lo cual provocó que midiera una distancia superior a la definida como “X”. Esta lectura fue interpretada por el sistema como un nivel bajo de electrolito, lo que activó el actuador y dio inicio al proceso de llenado por goteo.

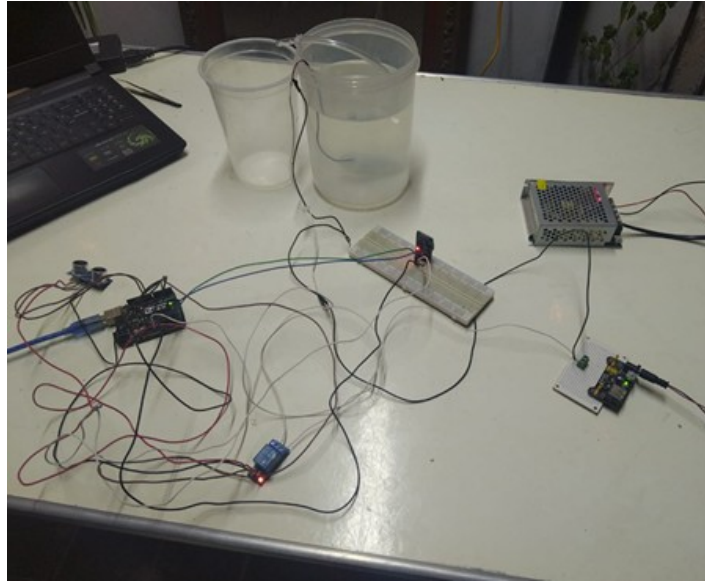


Figura 4.8: Pruebas individuales con el sistema de Llenado automático por goteo. Fuente: Elaboración propia.

El proceso de goteo se llevó a cabo adecuadamente dentro de un contenedor con agua, lo cual permitió observar visualmente el comportamiento del flujo sobre la superficie del líquido. Durante esta prueba se comprobó que las perturbaciones generadas por cada gota eran mínimas, por lo que se concluyó que el goteo obtenido resultaba apropiado para el sistema de llenado propuesto.

Sin embargo, a pesar de que el goteo era consistente, se identificaron ciertas limitaciones en el sensor ultrasónico HC-SR04. Aunque este dispositivo ofrece un amplio rango de medición, durante las pruebas se evidenció que era altamente susceptible al ruido. En particular, se detectaron fluctuaciones bruscas en las lecturas registradas por el monitor serial del entorno Arduino IDE cuando se producían movimientos cercanos de otros componentes del sistema. Estas alteraciones interferían directamente con el correcto funcionamiento del llenado, deteniendo el proceso incluso cuando el nivel real de agua aún era inferior al requerido (es decir, cuando la distancia medida seguía siendo mayor a la referencia establecida como “X”).

Ante esta situación, se reconsideró la elección del sensor, optando por sustituir el HC-SR04 por el sensor capacitivo XKC-Y26. Tal como se explicó en la Sección 2.5.2.1, este no es un sensor invasivo y está diseñado para detectar la presencia de líquido desde la parte externa del contenedor, justo en la altura a la que ha sido colocado (Figura 4.10). Cuando el nivel del agua alcanza dicho punto, el sensor emite una señal digital que puede ser interpretada por un controlador, permitiendo tomar decisiones lógicas dentro del sistema de control.

Tras esta modificación, se actualizó también la lógica de funcionamiento del sistema. A partir de

entonces, cuando el sensor detectaba presencia de líquido, esto indicaba que se había alcanzado el nivel deseado, por lo que enviaba una señal al Arduino para evitar el encendido de la bomba. Por el contrario, si al llegar la hora programada el sensor no detectaba líquido, se activaba automáticamente el proceso de llenado por goteo. Esta nueva lógica de funcionamiento se puede ver plasmada en el diagrama de flujo de la figura 4.9.

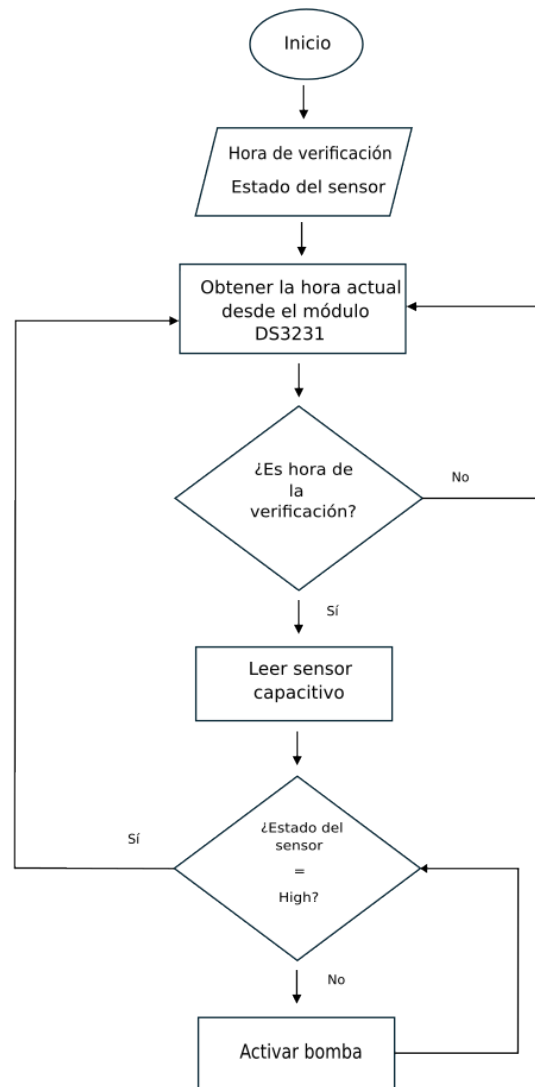


Figura 4.9: Nueva lógica de funcionamiento del sistema de llenado con el sensor XKC-Y26
Fuente: Elaboración propia.

Con esta nueva configuración, se confirmó que el sistema operaba de forma confiable y estable. Por tanto, se decidió adoptar el sensor capacitivo XKC-Y26 como componente definitivo para el sistema de llenado automático.

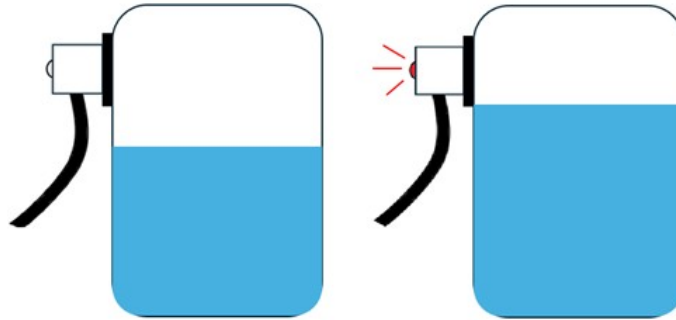


Figura 4.10: Representación del funcionamiento del sensor XKC Y26. Fuente: Elaboración propia.

4.5. Ensamblaje del sistema completo

En esta etapa del proyecto se procedió a la integración de los dos sistemas desarrollados de forma individual (el sistema de regulación de temperatura y el sistema de llenado automático por goteo) en un único conjunto funcional. Esta integración tuvo como propósito principal su implementación dentro de la CCMS. El esquema general del sistema completo puede consultarse en la Figura 4.11.

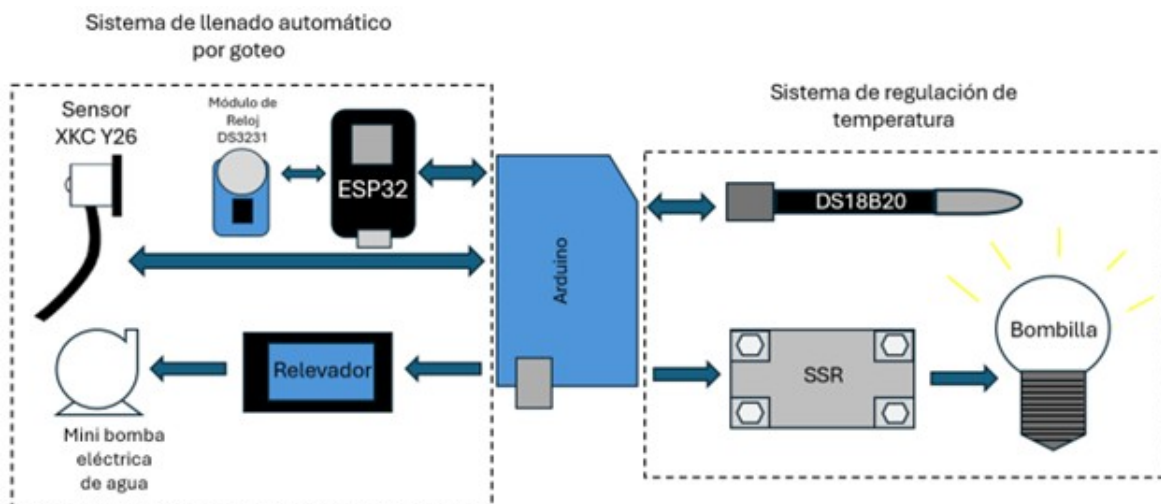


Figura 4.11: Esquema de la integración de los sistemas de control. Fuente: Elaboración propia.

4.6. Integración del sistema completo en la CCMS

En esta fase se incorporó el sistema completo, conformado por los dos circuitos de control (regulación de temperatura y llenado automático por goteo) a la CCMS. La Figura 4.12 muestra la implementación física de dicha integración. Esta fase tuvo como objetivo incorporar el sistema completo a la CCMS, con el fin de llevar a cabo las pruebas necesarias para verificar su correcto funcionamiento de manera integrada.

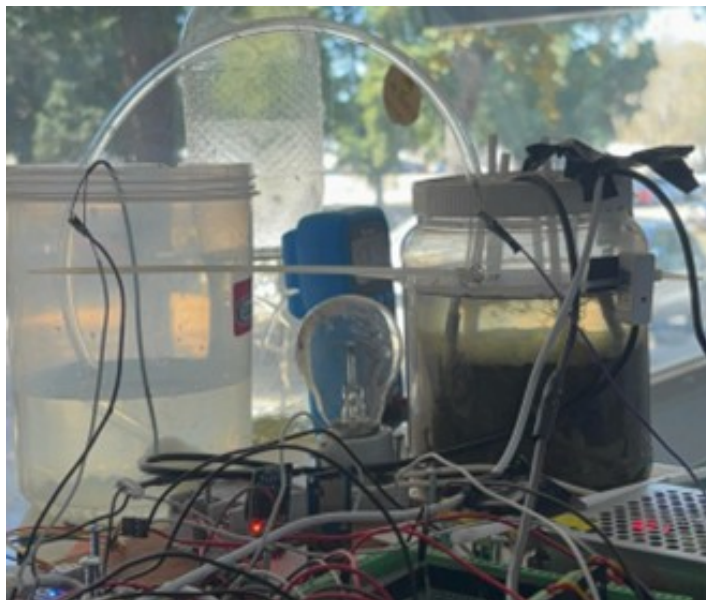


Figura 4.12: Integración del sistema de control general en la CCMS. Fuente: Elaboración propia.

La bombilla fue colocada a una distancia aproximada de 5 cm con respecto a la CCMS. Para el sistema de llenado, se empleó la misma manguera flexible utilizada durante las pruebas previas. A fin de mantenerla fija, se realizaron dos perforaciones en el contenedor de la CCMS, a través de las cuales se introdujo un cincho plástico que aseguró la manguera en su lugar, permitiendo que el goteo se realizara de manera precisa.

En cuanto a la instalación del sensor XKC-Y26, se utilizó un segundo cincho, el cual sujetó firmemente el sensor a la estructura externa de la CCMS. Este fue posicionado a la altura correspondiente al nivel deseado del líquido, es decir, el punto en el que se espera que se mantenga el nivel del agua dentro del sistema (Figura 4.13).



Figura 4.13: Integración del sensor XKC Y26 a la CCMS. Fuente: Elaboración propia.

4.7. Pruebas del sistema de control integrado a la CCMS

En esta etapa del proyecto se llevaron a cabo las pruebas correspondientes al sistema de control general, con el propósito de verificar su correcto funcionamiento una vez integrado a la CCMS. Tal como se mencionó al inicio de este apartado, para esta fase se utilizó agua del río Culiacán como electrolito de trabajo en el sistema de llenado automático.

Es importante destacar que, aunque el sistema de control desarrollado para la regulación de temperatura y el llenado automático por goteo representa un proyecto en sí mismo, forma parte de una arquitectura más compleja. Esta estructura incluye un módulo de monitoreo de variables críticas en la CCMS, el cual utiliza un ESP32 para la transmisión de datos a una plataforma web. Esta plataforma no solo facilita la visualización en tiempo real de la información, sino que también posibilita la modificación de parámetros esenciales, como la hora de inicio para la verificación del nivel de líquido y el *setpoint* para el control de temperatura.

Inicialmente, tal como se mencionó en la Sección 4.1.4, se consideró que el Arduino Mega 2560 sería el controlador principal para ambos procesos. Sin embargo, las pruebas preliminares revelaron ciertas limitaciones operativas que obligaron a reconsiderar esta decisión de diseño.

Siguiendo la metodología de las pruebas individuales descritas en la Sección 4.4, una vez que el sistema general estuvo integrado en la CCMS, se llevaron a cabo los ajustes necesarios en cada uno de sus subsistemas componentes. Entre los parámetros clave que se recalibraron, destacaron el *setpoint* para la regulación térmica y el horario establecido para la verificación del nivel del líquido.

En lo referente al control de temperatura, el sistema funcionó correctamente durante las pruebas. La lógica implementada respondió de forma adecuada a las condiciones medidas, y el actuador (la bombilla) operó de acuerdo con los valores registrados por el sensor, manteniendo la temperatura dentro del rango establecido.

Para verificar que el sistema de llenado respondiera correctamente a cualquier horario programado en el código, se retiró parte del electrolito contenido en la CCMS, de manera que el nivel del líquido quedara por debajo de la altura a la que se encontraba posicionado el sensor XKC-Y26.

Durante esta fase de prueba, se observó un comportamiento anómalo en el sistema de monitoreo externo al presente proyecto. En particular, cuando se ejecutaba la acción de llenado las lecturas de los sensores comenzaban a presentar valores erróneos o señales de ruido en la interfaz web. Esta situación únicamente podía resolverse mediante el reinicio manual del microcontrolador.

Tras analizar el problema, se concluyó que la causa probable era una sobrecarga en el procesamiento del Arduino Mega 2560, derivada de la ejecución simultánea de múltiples tareas. Las tareas que generaban esta carga incluían la lectura de múltiples sensores, la gestión integral del sistema de regulación de temperatura y la interpretación de los comandos transmitidos a través del protocolo de comunicación serial por el ESP32. Este último, en particular, actuaba como intermediario para la transmisión de datos hacia la plataforma en línea.

Para resolver esta problemática, se decidió mudar la lógica completa del sistema de llenado al ESP32. Dicho traslado abarcó el control del actuador (la bomba), la lectura del sensor de nivel, y la verificación horaria mediante el módulo de reloj DS3231, el cual ya estaba conectado a este microcontrolador. Con esta modificación estratégica, el Arduino se dedicó exclusivamente al sistema de regulación térmica y a los sensores auxiliares, lo que resultó en una optimización significativa de su desempeño. Por su parte, el ESP32 asumió la tarea de enviar los datos a la nube y de controlar el proceso de llenado con base en el horario establecido y el estado del sensor.

Esta reorganización de las funciones entre los controladores fue clave para solucionar los problemas de interferencia que afectaban las lecturas del sistema. Al redistribuir las tareas entre dos microcontroladores, cada uno con roles claramente definidos, el sistema de control general ahora se compone de ambos, tal como se ilustra en la Figura 4.14.

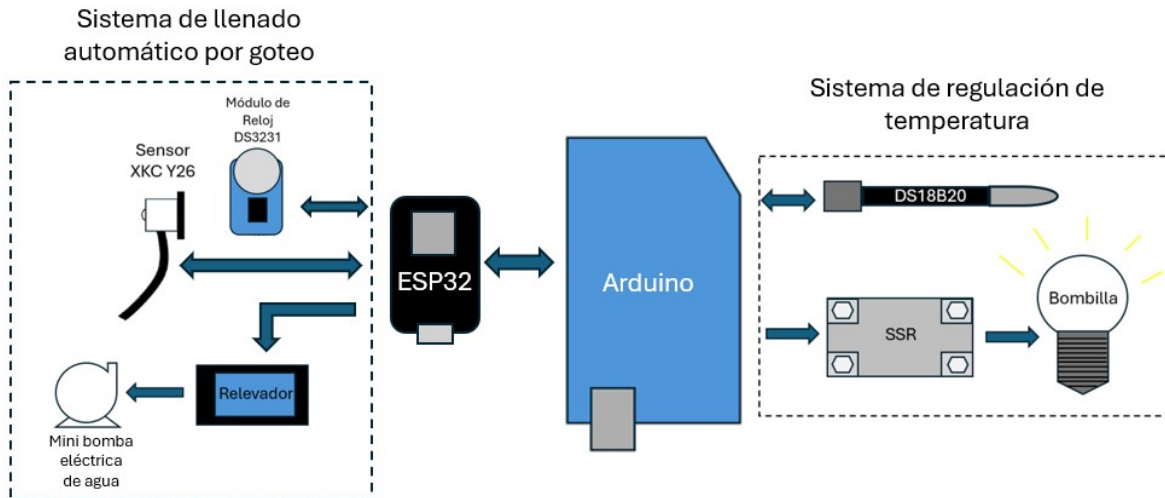


Figura 4.14: Integración del sensor XKC Y26 a la CCMS. Fuente: Elaboración propia.

Una vez que el sistema de llenado automático por goteo fue trasladado al ESP32, se procedió a realizar nuevas pruebas para verificar el funcionamiento del sistema general de control. Como en ocasiones anteriores, el sistema de regulación de temperatura operó correctamente, cumpliendo con la lógica programada.

Por otro lado, al evaluar el nuevo sistema de llenado, se identificó un problema: al llegar la hora programada para la verificación del nivel de líquido, aunque la bomba se activaba, el goteo no era constante ni preciso. En algunos casos, el flujo resultaba ser turbulento, mientras que en otros no se suministraba agua en absoluto. En resumen, el comportamiento del suministro era inconsistente.

A pesar de este nuevo inconveniente, las lecturas del sistema de monitoreo externo eran correctamente visualizadas en la página web. Esto indicaba que la redistribución de tareas entre los microcontroladores había solucionado el problema de interferencia en las mediciones, pero que aún era necesario ajustar el funcionamiento del goteo.

Ante esta situación, se optó por modificar la lógica de control en el código del ESP32, específicamente en el sistema de llenado. Como se mencionó en la Sección 4.3, inicialmente se había implementado la función *millis()* para gestionar los tiempos de encendido y apagado, con el fin de evitar bloqueos en la ejecución del código. Su funcionamiento se basa en registrar los milisegundos desde el arranque del programa. Esto confiere al sistema la habilidad de procesar múltiples operaciones en paralelo, sin necesidad de detener el curso normal de la ejecución del código. No obstante, por fines de prueba, se decidió reemplazar esta función por *delay()*, que sí detiene la ejecución durante el tiempo especificado, limitando temporalmente otras operaciones del microcontrolador.

Tras aplicar este cambio, se volvieron a realizar las pruebas. Como se esperaba, el sistema de regulación de temperatura continuó funcionando correctamente. Pero, además, el sistema de llenado ahora mostró un comportamiento mucho más estable: el goteo fue preciso y constante, solucionando así el problema anterior.

Sin embargo, al utilizar *delay()* también surgió una nueva limitación: mientras se ejecutaba el ciclo de llenado, el sistema de monitoreo dejaba de enviar datos a la nube. Para disminuir esta interrupción sin comprometer el desempeño del goteo, se estableció un tiempo máximo para la acción de llenado. Este lapso debía permitir alcanzar el nivel requerido sin mantener bloqueado el envío de datos durante un periodo prolongado. Se eligió un tiempo de tres minutos, ya que permitía un llenado adecuado y, al mismo tiempo, su omisión en la visualización de datos no afectaba significativamente al proyecto externo, que requiere grandes volúmenes de datos para entrenamiento de modelos de regresión lineal.

Posteriormente, se dejó el sistema funcionando durante una semana con esta configuración. Se observó que, en la mayoría de los casos, el nivel de líquido alcanzaba el punto requerido dentro del intervalo de tres minutos. En los pocos casos en que no lo hacía, la diferencia era mínima y no representaba una afectación para el funcionamiento de la CCMS. Por lo tanto, se concluyó que esta estrategia representaba un compromiso adecuado entre consistencia en el goteo y estabilidad en el monitoreo de datos.

Después de haber hecho esta última configuración en el sistema de llenado se decidió implementar una segunda verificación a las 12 horas después de la primera, es decir, la verificación del nivel de líquido en la CCMS se realizó 2 veces al día, esto con el fin de asegurar que la evaporación del agua no representara un problema en el rendimiento de la CCMS, por esta razón se decidió implementar 2 verificaciones de nivel al día con lapsos de tiempo prolongados entre sí con tal de mantener el nivel en la celda lo más regulado posible cada día.

Esta nueva configuración de 2 verificaciones de nivel al día se dejó implementada una semana y lo que se observó es que, en la primera verificación del día, si se necesitaba hacer la acción de llenado esta tardaba menos en comparación a cuando era solo una verificación cada 24 horas, esto porque, al haber un segundo llenado en un lapso más corto a esas 24 horas el agua que se evaporaba no dejaba al nivel del líquido tan bajo a cuando solo se hacía un llenado al día.

Además, durante la fase de pruebas, también se realizaron estimaciones sobre la vida útil del relevador utilizado para controlar el funcionamiento de la bomba. Se observó que dicha bomba opera a 5 VCD y presenta un consumo estimado entre 130 y 220 mA, lo que representa una carga considera-

blemente inferior a la capacidad nominal del relé, el cual es capaz de manejar hasta 10 A a 250 VCA o 30 VCD en condiciones de carga resistiva (Farnell, s.f.). Además, el módulo incorpora un circuito de protección para la bobina, lo que ayuda a prolongar su vida útil al mitigar los efectos de picos inductivos.

El sistema está programado para activar el relé durante 100 milisegundos y desactivarlo durante 2 segundos, repitiendo este ciclo de forma continua durante un periodo de 3 minutos. Este procedimiento se ejecuta dos veces al día. Así, cada ciclo completo tiene una duración de 2.1 segundos:

$$\text{Duración del ciclo} = 0.1 \text{ s (activado)} + 2 \text{ s (desactivado)} = 2.1 \text{ s}$$

El número total de ciclos por sesión puede estimarse dividiendo el tiempo total de operación entre la duración de un ciclo:

$$\text{Total de ciclos por sesión} = \frac{180 \text{ s}}{2.1 \text{ s}} \approx 85 \text{ ciclos}$$

Al repetirse esta rutina dos veces al día, el número total máximo de activaciones diarias es de:

$$\text{Activaciones diarias} = 85 \text{ ciclos} \times 2 \text{ sesiones} = 170 \text{ activaciones}$$

De acuerdo con la hoja de datos del fabricante, el relé tiene una vida útil mecánica aproximada de 100,000 ciclos en condiciones de carga resistiva nominal (Farnell, s.f.). Sin embargo, al operar con una carga mucho menor y protegida, su vida útil puede extenderse considerablemente. Estudios de relés equivalentes, como el modelo Omron G5LE, indican que bajo condiciones similares (baja carga y conmutación protegida), la vida útil puede alcanzar los 300,000 ciclos eléctricos (Omron Electronics LLC, n.d.).

Tomando como base estos escenarios, el tiempo teórico estimado de funcionamiento del relé en este sistema sería:

$$\frac{300,000 \text{ ciclos}}{170 \text{ ciclos/día}} \approx 1,765 \text{ días} \approx 4.8 \text{ años}$$

Considerando las condiciones operativas específicas de este proyecto —que incluyen el empleo de una carga de baja potencia, una frecuencia de conmutación moderada y una protección eficaz contra picos inductivos— se determinó que el relevador elegido es totalmente apto para garantizar una operación fiable y prolongada.

Es importante resaltar que la decisión de limitar a solo dos las verificaciones diarias del nivel de agua se fundamentó en la necesidad de evitar un consumo excesivo de este recurso. Esto, a su vez, minimiza la frecuencia de llenado y optimiza la disponibilidad del líquido. Adicionalmente, el desempeño adecuado de la CCMS no requiere que el nivel de agua se conserve en un punto preciso e inamovible. Por esta razón, se determinó que dos verificaciones al día eran suficientes para conservar un nivel adecuado de líquido durante la mayor parte del tiempo, sin incurrir en un uso innecesario de agua.

Por este motivo, se dejó implementada esta segunda verificación 12 horas después de la primera en el sistema de llenado automático por goteo. De esta forma es como se logró desarrollar un sistema adecuado de control para regulación de temperatura y nivel de agua por goteo en una CCMS.

Una vez que se aplicaron las modificaciones previamente detalladas, el sistema de control general fue puesto en operación continua en la CCMS durante un periodo de siete días. Para esta fase, se configuró un setpoint de 26 °C con tal de que la temperatura se encuentre en el margen aceptado de 25 a 30 °C (ver Sección 1.1). Durante este periodo se recopilaron datos continuos de temperatura y se realizó una observación sistemática del nivel de líquido durante la primera verificación del día, programada a las 9:30 a.m. El objetivo de este seguimiento fue obtener información suficiente para evaluar el desempeño del sistema en condiciones reales de operación.

Capítulo 5

Resultados

En este apartado se exponen los resultados obtenidos al implementar la metodología propuesta.

5.1. Evaluación del sistema de regulación de nivel de electrolito en la CCMS

Dado a la naturaleza del sensor XKC Y26, que indica simplemente la presencia de líquido a una altura específica la forma de comprobar el resultado de llenado fue visualizando el nivel de agua y el led del sensor una vez terminaba el tiempo de esta etapa de goteo.

Se comprobó que los 5 días de la semana que se estuvo en el lugar donde se encontraba la CCMS el nivel del electrolito alcanzó la posición en la que se dejó al sensor (Figura 5.1), manteniendo esta condición en la celda al menos después de realizar la acción de llenado.

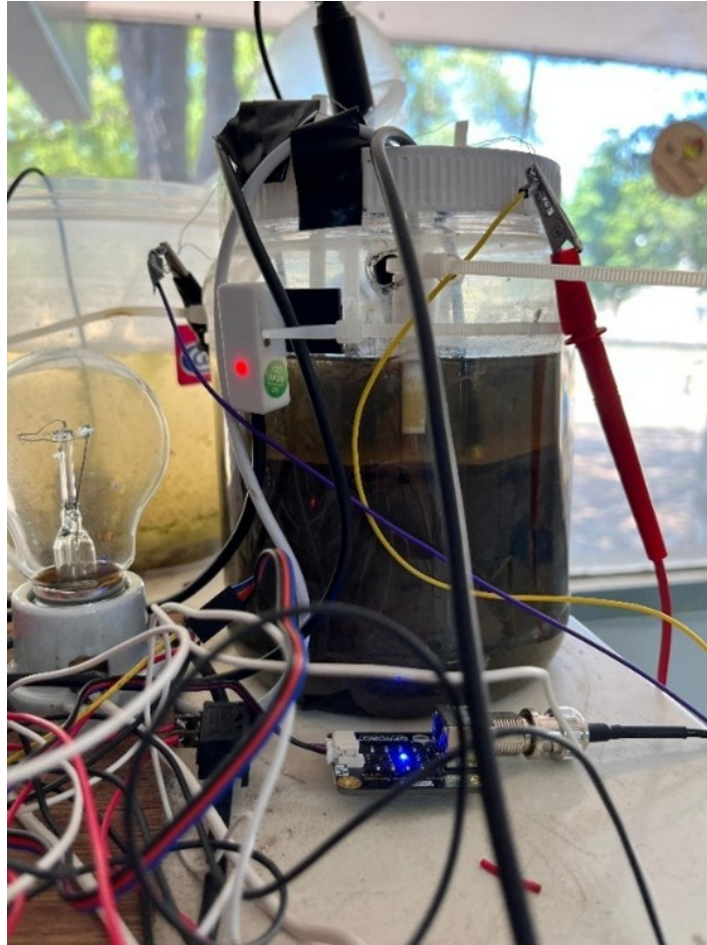


Figura 5.1: CCMS con el nivel indicado de electrolito posterior al llenado. Fuente: Elaboración propia.

5.2. Evaluación del sistema de regulación de temperatura en la CCMS

Como se explicó en la Sección 4.7, el sistema completo fue instalado y operado durante una semana continua, tiempo durante el cual se recopilaban datos de temperatura y voltaje a través del sistema de monitoreo mencionado en la Sección 1.1. Las mediciones horarias de un día completo se extrajeron y se representaron gráficamente. Estos resultados pueden apreciarse en la Figura 5.2.

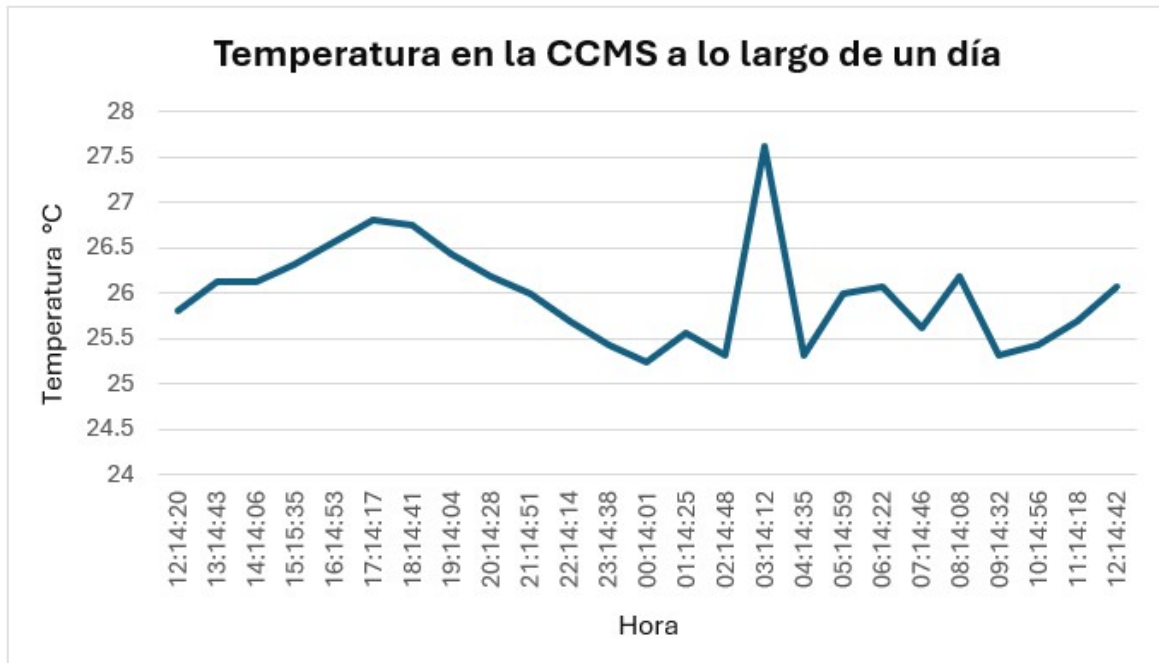


Figura 5.2: Gráfica de la temperatura en la CCMS a lo largo de un día entero. Fuente: Elaboración propia.

Es importante señalar que, durante el lapso de 9:00 a 12:00 horas, el ambiente donde se encontraba la CCMS se mantuvo a 24 °C gracias al uso de aire acondicionado. A pesar de esta condición ambiental externa, el sistema de regulación de temperatura consiguió, de manera efectiva, mantener dicha variable dentro del rango objetivo de 25 a 30 °C.

Tal como se aprecia en la Figura 5.2, la temperatura se mantuvo regulada durante el transcurso del día, alcanzando un máximo de 27.625 °C cerca de las 3:00 a.m. y un mínimo de 25.25 °C a las 12:14 a.m. Estas fluctuaciones se consideran aceptables, dado que la temperatura nunca excedió el rango preestablecido, lo que confirma la eficiencia del sistema en su función de regulación térmica.

Adicionalmente, se llevó a cabo una comparación con los valores de voltaje registrados en los mismos periodos mostrados en la Figura 5.3. El propósito fue identificar posibles correlaciones entre la temperatura y el rendimiento eléctrico. La dinámica del voltaje durante ese día se presenta en la Figura 5.3.

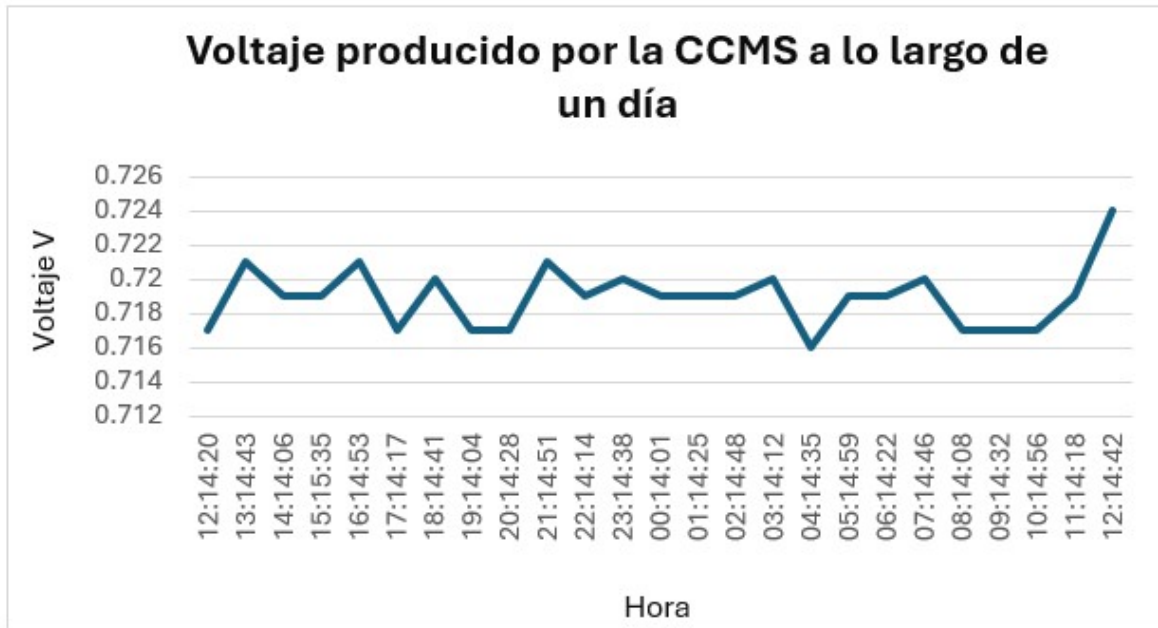


Figura 5.3: Gráfica del voltaje producido por la CCMS a lo largo de un día entero. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5.3 ilustra las fluctuaciones del voltaje a lo largo del día. A pesar de estas variaciones, es notable que el valor del voltaje se incrementó ligeramente en el transcurso de las 24 horas, pasando de 0.717 V a 0.724 V. Aunque la mejora no es drástica, esta tendencia sugiere una ligera y favorable estabilización del sistema operando bajo condiciones controladas, tanto térmicas como de nivel de electrolito.

Para evaluar el desempeño sostenido del sistema, se procedió a calcular los promedios diarios de temperatura y voltaje registrados durante un periodo de una semana. La Figura 5.4 presenta la evolución del promedio diario de temperatura.

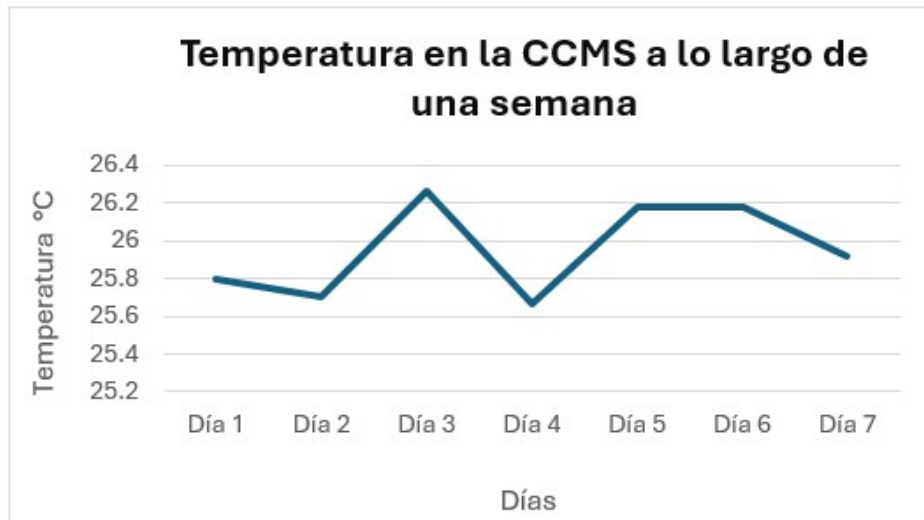


Figura 5.4: Gráfica de la temperatura en la CCMS a lo largo de una semana. Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 5.4, a pesar de ligeras fluctuaciones diarias, los valores promedio de temperatura se mantuvieron consistentemente dentro del rango adecuado para la operación de la CCMS. Esto refuerza la eficacia del sistema de control térmico implementado.

Por otro lado, la Figura 5.5 ilustra el promedio diario del voltaje generado por la CCMS durante la misma semana. Esta gráfica revela una tendencia ascendente, con un voltaje inicial de 0.717 V al inicio del periodo y un incremento hasta 0.759 V al finalizar la semana.



Figura 5.5: Gráfica del voltaje en la CCMS a lo largo de una semana. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de este estudio demuestran la capacidad del sistema de regulación térmica para mantener la temperatura interna de la CCMS consistentemente dentro del rango objetivo de 25 °C

a 30 °C. Esto se logró incluso frente a condiciones adversa , como la operación de un sistema de aire acondicionado a 24 °C en el entorno circundante. Este desempeño es similar al descrito por (C. Wang et al., 2024), quienes emplearon un controlador PID para estabilizar el voltaje en una MFC ajustando dinámicamente la tasa de dilución, lo que permitió sostener un ambiente favorable para la actividad microbiana. No obstante, en contraste con esta propuesta, cuya validación se efectuó exclusivamente a través de simulaciones en el software Simulink, el sistema desarrollado en este proyecto se implementó de manera física, permitiendo así verificar su funcionamiento en condiciones reales y sujetas a perturbaciones externas.

En cuanto al sistema de llenado por goteo, la inclusión del sensor capacitivo XKC Y26 permitió mantener el nivel del electrolito dentro de los parámetros requeridos, previniendo así cualquier sobre-llenado. Esto se logró gracias a la activación precisa del actuador, basada en la detección capacitiva de la presencia de líquido en un punto específico del contenedor.

Si bien esta estrategia resulta más sencilla en comparación con la propuesta de (Yadav et al., 2020), quienes integraron un sistema de hidroponía por goteo en una MFC orientado al tratamiento de aguas residuales, los resultados obtenidos fueron funcionalmente equivalentes en cuanto al mantenimiento de condiciones estables dentro del reactor. Además, el sistema desarrollado en este trabajo destaca por su bajo costo, simplicidad de implementación y menor complejidad estructural.

Capítulo 6

Conclusiones

6.1. Conclusión

La metodología empleada hizo posible el desarrollo de un sistema de control para la regulación de temperatura y nivel del electrolito por goteo en una CCMS. En este sistema se integraron dos sistemas individuales, uno de regulación de temperatura y otro de control de nivel de líquido.

Durante el desarrollo del proyecto se realizaron pruebas de funcionamiento del sistema de control general en la CCMS. La prueba consistió en mantener el sistema instalado en la celda durante una semana, realizando observaciones visuales del nivel de electrolito tras la primera verificación, y registrar el cambio de temperatura y voltaje a lo largo de este lapso. Respecto al sistema de llenado automático se demostró que el goteo realizado durante la acción de llenado era constante y preciso sin provocar perturbaciones en la superficie del electrolito, además de que el nivel era alcanzado después de esta etapa. En lo que respecta al sistema de regulación de temperatura se estuvieron registrando los valores promedio de temperatura diariamente los cuales eran obtenidos de una página web correspondiente a un sistema de monitoreo que formaba parte de un proyecto aparte, de igual manera se hizo lo mismo con los valores de voltaje en esa semana, con la intención de ver el cambio una vez instalados los sistemas de control en la CCMS.

Los resultados mostraron que durante la semana el nivel de líquido se mantuvo en la altura deseada, (esto al menos siendo comprobable de forma visual durante la primera verificación de nivel durante 5 días de la semana que se asistió de forma presencial) además, la temperatura se mantuvo dentro del rango planteado de 25 a 30 °C aún con la presencia del efecto del aire acondicionado a 24 °C que estaba encendido de 9:00 am a 12:00 pm durante 5 de los 7 días. En lo que respecta al voltaje se observó que en el lapso de una semana este incrementó de 0.717 V a 0.759 V, es decir, en un lapso

de 7 días este aumento 42 mV indicando que la regulación de las variables de temperatura y nivel de líquido favorecieron al rendimiento de la CCMS.

6.2. Limitaciones o desafíos

Se identificó que el uso de un solo controlador para gestionar ambas acciones de control presentaba limitaciones en etapas ajenas del proyecto como lo es la de la etapa de monitoreo de este sistema perteneciente a otro proyecto, ya que provocaba ruido en las mediciones registradas una vez ocurría la acción de llenado.

Por otra parte, si bien el mudar el sistema de control de nivel a otro controlador solucionó la cuestión anteriormente descrita se presentó el nuevo inconveniente de que ahora el goteo no era consistente ya que a veces se suministraba un flujo turbulento de electrolito y otras veces ni siquiera alcanzaba a formarse la gota para el llenado, por lo que se tuvo que cambiar la lógica de programación del algoritmo de control de este sistema, la cual antes tenía una lógica basada en *millis()* lo que permitía hacer el llenado en paralelo con las tareas correspondientes al sistema de monitoreo.

Sin embargo, se optó por utilizar *delay()*, los cuales provocaron que durante la ejecución del llenado el goteo se realizara de forma constante y precisa, pero durante el tiempo de ejecución de esta tarea se pausaba el registro de datos en la página web del otro sistema, para esto, se decidió que dicha acción de llenado durara un 3 minutos, es decir, el llenado por goteo se realizaría o hasta que el sensor detectara que se alcanzó el nivel deseado o hasta que hayan pasado estos 3 minutos con el fin de no intervenir mucho tiempo con el otro sistema de monitoreo, esto último solucionó los inconvenientes de goteo lo cual aseguró que el sistema de llenado funcionara de forma adecuada junto con el sistema de regulación de temperatura.

6.3. Aportaciones

Este trabajo presenta aportaciones importantes relacionadas con las CCMS, entre la cuales se encuentran:

1. Diseño e implementación de un sistema de regulación térmica que emplea una acción de control *on – off* con histéresis. Este fue capaz de conservar la temperatura del entorno de la CCMS dentro de un rango operativo establecido (25 a 30 °C). Este tipo de control demostró ser eficaz

incluso ante interferencias térmicas externas, como la presencia de aire acondicionado en el entorno de operación.

2. Se desarrolló un sistema automático de llenado por goteo, el cual se basa en la detección del nivel de líquido mediante el sensor XKC-Y26. Esta estrategia permitió asegurar el nivel requerido del electrolito sin la necesidad de emplear sensores de tipo invasivo o configuraciones mecánicas elaboradas. El algoritmo de control desarrollado permitió una dosificación precisa y constante del líquido, garantizando la producción de voltaje por parte de la CCMS.
3. Distribución estratégica de funciones entre dos microcontroladores (Arduino Mega 2560 y ESP32), con el objetivo de evitar interferencias entre los procesos de regulación y monitoreo. Esta arquitectura permitió que las tareas de control se ejecutaran de forma independiente de las de adquisición y transmisión de datos, mejorando así la estabilidad general del sistema.
4. Validación experimental en condiciones reales de operación, lo que permitió observar el desempeño del sistema ante variaciones térmicas del ambiente y comprobar su capacidad para mantener las condiciones deseadas dentro de la CCMS durante un periodo continuo de pruebas.
5. Contribución indirecta al desarrollo de un sistema de monitoreo externo, perteneciente a otro proyecto de investigación desarrollado en paralelo, al asegurar que la CCMS se mantuviera en condiciones estables de temperatura y nivel de electrolito. Esto facilitó que los datos recolectados por el sistema de monitoreo (como voltaje, temperatura y otras variables) pudieran ser enviados de manera confiable a la nube para su posterior análisis, incluyendo su uso en modelos de regresión destinados a predecir el comportamiento de la CCMS.
6. Propuesta de un enfoque replicable y escalable, aplicable a otras configuraciones de CCMS de una sola celda, orientado a mantener condiciones operativas estables mediante soluciones económicas, accesibles y de baja complejidad tecnológica.

6.4. Recomendaciones futuras

Se han identificado diversas oportunidades de mejora para el sistema de control de temperatura y nivel de electrolito en una Celda de Combustible Microbiana (CCMS), las cuales potenciarían su versatilidad y rendimiento:

1. **Expansión del Sistema de Llenado:** Actualmente, el llenado automático se limita a una sola celda. Una expansión significativa implicaría la capacidad de abastecer múltiples CCMS de manera simultánea. Esto no solo eliminaría la limitación existente, sino que también permitiría su aplicación en configuraciones más extensas.
2. **Optimización de la Regulación Térmica:** La incorporación de más actuadores térmicos podría optimizar sustancialmente este sistema. Esto permitiría mantener condiciones de temperatura adecuadas en diversas CCMS a la vez, facilitando su aplicación en sistemas más complejos.
3. **Perfeccionamiento del Algoritmo de Llenado:** Se busca refinar el algoritmo de control del sistema de llenado para lograr un goteo continuo y preciso. El objetivo es que esta acción no interfiera con otras funciones críticas, como el monitoreo en tiempo real, evitando así bloqueos parciales en el procesamiento de datos.
4. **Implementación de estrategias de control más precisas y avanzadas:** Para configuraciones más elaboradas, como arreglos de CCMS conectadas en serie o paralelo —donde el control de temperatura y nivel de electrolito exige dinámicas más rigurosas—, sería beneficiosa la implementación de estrategias de control más precisas y sofisticadas.

Estas propuestas no solo conducirían al diseño de un sistema de control más robusto y versátil para ambientes que involucren múltiples CCMS, sino que también abrirían la posibilidad de estudiar con mayor profundidad el comportamiento colectivo de estos sistemas interconectados. Este avance, a su vez, representaría una contribución al conocimiento en el ámbito de las energías renovables basadas en procesos bioelectroquímicos.

Bibliografía

- AGE Electrónica. (s.f.). Módulo Sensor de Temperatura con PT100 - OKY3076 [Consultado el 11 de julio de 2025]. <https://agelectronica.lat/pdfs/textos/O/OKY3076.PDF> (page 24).
- Arduino Documentation Team. (s.f.). *millis()* - *Arduino Reference* [Accedido: 2025-07-16]. <https://docs.arduino.cc/language-reference/en/functions/time/millis/> (page 57).
- Arduino S.r.l. (2025). Arduino Uno Rev3 (A000067) Datasheet [Accedido el 11 de julio de 2025]. <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000067-datasheet.pdf> (page 21).
- Asturgo. (s.f.). Catálogo de resistencias Asturgo [Consultado el 12 de julio de 2025]. https://asturgo.com/catalogos/CATALOGO_RESISTENCIAS_ASTURGO.pdf (page 26).
- Behera, M., Murthy, S. S. R., & Ghangrekar, M. M. (2011). Effect of operating temperature on performance of microbial fuel cell. *Water Science and Technology*, 64(4), 917-922. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.704> (page 2).
- Boas, J. V., Oliveira, V. B., Simões, M., & Pinto, A. M. (2022). Review on microbial fuel cells applications, developments and costs. *Journal of Environmental Management*, 307, 114525. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114525> (page 2).
- Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (2018). *Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos* (11.^a ed.). PEARSON. (Page 28).
- Commons, W. (2024a). File:3 wire PT100 Sensor.jpg — Wikimedia Commons, the free media repository [[Online; accessed 11-July-2025]]. https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:3_wire_PT100_Sensor.jpg&oldid=973435555 (page 23).
- Commons, W. (2024b). File:Adafruit MAX31855 thermocouple amplifier module.jpg — Wikimedia Commons, the free media repository [[Online; accessed 11-July-2025]].

- https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Adafruit_MAX31855_thermocouple_amplifier_module.jpg&oldid=896353655 (page 24).
- Commons, W. (2025). File:Heizstab-heatingelement-espressomachine.jpg — Wikimedia Commons, the free media repository [[Online; accessed 12-July-2025]]. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Heizstab-heatingelement-espressomachine.jpg&oldid=1021960132> (page 26).
- Commons, W. (2023a). File:Lightbulb-g78ee411a4_1920.jpg — Wikimedia Commons, the free media repository [[Online; accessed 12-July-2025]]. https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Lightbulb-g78ee411a4_1920.jpg&oldid=753113110 (page 25).
- Commons, W. (2023b). File:Omron G2R, Songle SMIH series relays 01.jpg — Wikimedia Commons, the free media repository [[Online; accessed 12-July-2025]]. https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Omron_G2R,_Songle_SMIH_series_relays_01.jpg&oldid=793499909 (page 27).
- Commons, W. (2024c). File:Sensor DS18B20.jpg — Wikimedia Commons, the free media repository [[Online; accessed 11-July-2025]]. https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Sensor_DS18B20.jpg&oldid=947715222 (page 25).
- Commons, W. (2024d). File:Solid State Relay - 40A (3-32V DC Input) (14592070167).jpg — Wikimedia Commons, the free media repository [[Online; accessed 12-July-2025]]. [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Solid_State_Relay_-_40A_\(3-32V_DC_Input\)_14592070167.jpg&oldid=890724632](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Solid_State_Relay_-_40A_(3-32V_DC_Input)_14592070167.jpg&oldid=890724632) (page 29).
- Commons, W. (2023c). File:SparkFun HC-SR04 Ultrasonic-Sensor 13959-01a.jpg — Wikimedia Commons, the free media repository [[Online; accessed 12-July-2025]]. https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:SparkFun_HC-SR04_Ultrasonic-Sensor_13959-01a.jpg&oldid=793367874 (page 31).
- Corripio, A. B., & Smith, C. A. (2014). *Control automático de procesos: Teoría y práctica* (2.^a ed.). LIMUSA / Wiley. (Page 19).
- Durna Pişkin, E., & Genç, N. (2024). Microbial fuel cells in electricity generation with waste treatment: Alternative electron acceptors. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 42(1), 273-288 (page 53).

- Dziegielowski, J., Mascia, M., Metcalfe, B., & Di Lorenzo, M. (2023). Voltage evolution and electrochemical behaviour of Soil microbial fuel cells operated in different quality soils. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56, 103071. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103071> (pages 36, 39, 41).
- Eaton. (2024). *On/Off Control for HVAC Systems* [Consultado el 9 de julio de 2025]. Eaton Corporation. <https://www.eaton.com/us/en-us/products/controls-drives-automation-sensors/industrial-control-center/automation-control/hvac-control/on-off-control.html> (page 14).
- E-Ceica. (s.f.). SENSOR DE NIVEL DE FLOTADOR PARA MEDICION CONTINUA [Consultado el 12 de julio de 2025]. https://e-ceica.com.mx/images/imagenes_apg/catalogos/sensores-nivel-flotador.pdf (page 30).
- Espressif Systems. (2025). ESP32 Series Datasheet [Accedido el 11 de julio de 2025]. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf (page 22).
- Farnell. (s.f.). Relay 3 Click [Accedido: 2025-07-16]. <https://www.farnell.com/datasheets/2773929.pdf> (page 68).
- Feregrino-Rivas, M., Ramirez-Pereda, B., Estrada-Godoy, F., Cuesta-Zedeño, L. F., Rochín-Medina, J. J., Bustos-Terrones, Y. A., & Gonzalez-Huitron, V. A. (2023). Performance of a sediment microbial fuel cell for bioenergy production: Comparison of fluvial and marine sediments—. *Biomass and Bioenergy*, 168, 106657. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106657> (page 1).
- Feregrino-Rivas, M., Ramírez-Pereda, B., & Estrada-Godoy, F. (2022). Estudio estadístico de la influencia de la distribución geométrica del cátodo en la producción de energía eléctrica en una celda de combustible microbiana de sedimentos [Epub 14 de agosto de 2023]. *Revista de Ciencias Tecnológicas*, 5(1), e163. <https://doi.org/10.37636/recit.v518095> (pages 9, 10).
- Fuku, X., Kamika, I., & Munonde, T. S. (2025). Microbial Fuel Cells and Microbial Electrolysis Cells for the Generation of Green Hydrogen and Bioenergy via Microorganisms and Agro-Waste Catalysts. *Nanomanufacturing*, 5(1). <https://doi.org/10.3390/nanomanufacturing5010003> (page 2).

- Gutiérrez Hinestroza, M. d. V., & Iturralde Kure, S. A. (2017). *Fundamentos básicos de instrumentación y control* [Primera edición, 127 páginas. Portada por Manuel Martínez Santana]. Universidad Estatal Península de Santa Elena. <https://www.fnmt.es/documents/10179/10666378/Fundamentos%2Bb%C3%A1sico%2Bde%2Binstrumentaci%C3%B3n%2By%2Bcontrol.pdf> (page 11).
- Halfacree, G. (2024). *La Guía Oficial de Raspberry Pi Para Principiantes: Cómo Usar Tu Nuevo Ordenador* (5.^a ed.) [Primera publicación en 2020 por Raspberry Pi Trading Ltd]. Raspberry Pi Press. (Page 22).
- Hamed, M. S., Majdi, H. S., & Hasan, B. O. (2020). Effect of Electrode Material and Hydrodynamics on the Produced Current in Double Chamber Microbial Fuel Cells. *ACS Omega*, 5(18), 10339-10348. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b04451> (page 53).
- HandsOn Tech. (s.f.). SR-04 Ultrasonic Sensor Datasheet [Consultado el 12 de julio de 2025]. <https://handsontec.com/dataspecs/sensor/SR-04-Ultrasonic.pdf> (page 31).
- Hernández Gaviño, R. (2010). *Introducción a los sistemas de control* : Prentice Hall, <https://isae.metabiblioteca.org/cgi-bin/koha/opac-retrieve-file.pl?id=daeb9e1269a506c16bcf161ff918a9f8> (page 16).
- HORST GmbH. (2025). *Heating Plates – Electrical Heating Plates with Exchangeable Heating Conductors and Temperature Sensors* [Consultado el 12 de julio de 2025]. HORST GmbH. <https://www.horst.de/en/produkte/heating-plates> (page 26).
- Izquierdo Fernández, J. (2011). Detección automática de objetos 3D para entornos urbanos a partir de datos LiDAR y ortofotos [Consultado el 11 de julio de 2025]. https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2011/hdl_2072_199563/PFC_JonatanIzquierdoFernandez.pdf (page 18).
- Javier Garcia Fernández and Oriol Boix. (s.f.). *Lámparas incandescentes* [Consultado el 11 de julio de 2025]. UPC – Citcea. <https://recursos.citcea.upc.edu/llum/lamparas/lincan.html> (page 25).
- Larrosa-Guerrero, A., Scott, K., Head, I., Mateo, F., Ginesta, A., & Godinez, C. (2010). Effect of temperature on the performance of microbial fuel cells. *Fuel*, 89(12), 3985-3994. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.06.025> (pages 21, 34).

- LastMinuteEngineers.com. (2025). *Tutorial: Interfacing DS18B20 Digital Temperature Sensor with Arduino* [Consultado el 11 de julio de 2025]. <https://lastminuteengineers.com/ds18b20-arduino-tutorial/> (pages 24, 45).
- Leonard, M. D., Michaelides, E. E., & Michaelides, D. N. (2020). Energy storage needs for the substitution of fossil fuel power plants with renewables. *Renewable Energy*, 145, 951-962. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.066> (page 1).
- Li, D., Liu, L., & Xu, L. (2025). A sprinkler- water cycle PEC-MFC system with bimetallic monatomic Co-Fe/g-C₃N₄/ACF cathode achieves efficient removal of gas trimethylamine. *Separation and Purification Technology*, 354, 129041. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129041> (pages 37, 39, 41).
- Li, L. H., Sun, Y. M., Yuan, Z. H., Kong, X. Y., & Li, Y. (2013). Effect of temperature change on power generation of microbial fuel cell [Jul-Aug]. *Environmental Technology*, 34(13-16), 1929-1934. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.828101> (page 34).
- Lian, L., Ji, P., OuYang, T., Ma, F., Xu, S., Gao, C., & Liu, J. (2021). Fuzzy Integral Sliding Mode Control Based on Microbial Fuel Cell. *Complexity*, 2021(1), 6670039. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2021/6670039> (pages 36, 39, 40).
- Litkahi, H. R., & Dehnavi, H. Y. (2024). Microbial Community. En M. Zendehtel, N. Y. Nia & M. Samer (Eds.), *Revolutionizing Energy Conversion*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1004001> (page 2).
- Logan, B. E., & Regan, J. M. (2006). Microbial Fuel Cells—Challenges and Applications. *Environmental Science Technology*, 40(17), 5172-5180. <https://doi.org/10.1021/es0627592> (page 2).
- Mahadevan, A., Gunawardena, D. A., & Fernando, S. (2014). Biochemical and Electrochemical Perspectives of the Anode of a Microbial Fuel Cell. En C.-T. Wang (Ed.), *Technology and Application of Microbial Fuel Cells*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/58755> (page 35).
- Misali, R., Mohd Noor, N. N., Oktavutri, N. I., & Kim, K. (2024). The impact of bottom water light exposure on electrical and sediment remediation performance of sediment microbial fuel cells. *Chemosphere*, 362, 142720. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142720> (page 47).

- Nadeem, F., Hussain, S. M. S., Tiwari, P. K., Goswami, A. K., & Ustun, T. S. (2019). Comparative Review of Energy Storage Systems, Their Roles, and Impacts on Future Power Systems. *IEEE Access*, 7, 4555-4585. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2888497> (page 2).
- Naha, A., Debroy, R., Sharma, D., Shah, M. P., & Nath, S. (2023). Microbial fuel cell: A state-of-the-art and revolutionizing technology for efficient energy recovery. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 5, 100050. <https://doi.org/10.1016/j.clcb.2023.100050> (page 29).
- Novus Automation. (s.f.). *Manual de operación SSR 40–80-AC (V1.0x D)* [Fecha de consulta: 12 de julio de 2025]. Novus Automation. Rua Engenheiro Homero Carlos Simon, 737 – Guajuviras, 92442-000, Canoas – RS, Brasil. https://cdn.novusautomation.com/downloads/manual_ssr_ac_40-80a_v10x_e-es.pdf (page 28).
- Omron Electronics LLC. (n.d.). Datasheet: Omron G5LE Series Relay [Accessed: 2025-07-16]. <https://www.mouser.com/datasheet/2/307/D20G5LE0503-7108.pdf> (page 68).
- Rahimnejad, M. (2023). *Biological fuel cells: Fundamental to applications*. Elsevier. (Pages 1, 9).
- Ramírez, L. G. C., Jiménez, G. S. A., & Carreño, J. M. (2021). *Sensores y actuadores: Aplicaciones con Arduino* (Edición Clásica). Patria Educación. (Pages 11, 12).
- Ren, H., Jiang, C., & Chae, J. (2017). Effect of temperature on a miniaturized microbial fuel cell (MFC). *Micro and Nano Systems Letters*, 5(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s40486-017-0048-8> (page 4).
- RIFT Actuators Ltd. (2023). *Unveiling the Mechanics: Exploring How Electric Valves Work* [Consultado el 12 de julio de 2025]. RIFT Actuators Ltd. <https://riftactuators.com/hub/how-does-an-electric-valve-work/#:~:text=What%20is%20the%20working%20principle,and%20cost%20savings%20in%20pounds.> (page 33).
- Sánchez, E. L. (2012). Diseño de un sistema de control domótico basado en la plataforma Arduino [Consultado el 12 de julio de 2025]. <https://savonius.iesbinefar.es/wp-content/uploads/2014/09/DOMOTICA-ARDUINO.pdf> (page 27).
- Shen, W., Su, H., Gao, J., Fan, L., Zhang, G., & Zhou, S. (2025). A Multi-Objective Temperature Control Method for a Multi-Stack Fuel Cell System with Different Stacks Based

- on Model Predictive Control. *Energies*, 18(10). <https://doi.org/10.3390/en18102443> (pages 35, 40, 41).
- Shenzhen XingKeChuang Technology Co., Ltd. (s.f.). *Non-Contact Liquid Level Sensor XKC-Y26 Series Manual* (Version V1.6) [Consultado el 12 de julio de 2025]. Shenzhen XingKe-Chuang Technology Co., Ltd. 11th Floor, No.48, Xinyu Road, Xinqiao Community, Bao'an District, Shenzhen, China. <https://sensor1stop.com/wp-content/uploads/2024/12/Y26-Non-contact-liquid-level-sensor.pdf> (page 30).
- Solares Basurto, A., Pérez Ruiz, M., Luján Vega, M. A., Olivares-Ramírez, J. M., Vera-Estrada, I. L., González-Duran, J. E. E., & Rodríguez Reséndiz, J. (2024). Bio-Power Generation in Microbial Fuel Cell with Vermicompost Using *Eisenia foetida*. *Eng*, 5(4), 2560-2574. <https://doi.org/10.3390/eng5040134> (page 2).
- Soldered Electronics. (s.f.). Mini Water Pump – Soldered Electronics [Datasheet retrieved from Mouser Electronics]. https://www.mouser.lt/datasheet/2/1398/Soldered_101844_mini_water_pump-3532437.pdf (page 32).
- SRC Sensores. (s.f.). Características técnicas de sensores *PT100* y termopares [Consultado el 11 de julio de 2025]. https://srcsl.com/catalogoPDFs/1_SENSORES%20TEMPERATURA/1_SENSORES_RTD/Caracteristicas_PT100_termopares.pdf (page 23).
- Topsflo. (2023). *DC Mini Water Pump* [Consultado el 12 de julio de 2025]. Topsflo. <https://www.topsflo.com/news/dc-mini-water-pump.html> (page 32).
- Valworx. (s.f.). *What is a Solenoid Valve?* [Consultado el 12 de julio de 2025]. Valworx. <https://www.valworx.com/product/what-is-a-solenoid-valve> (page 32).
- Wang, C., Zhu, B., Ma, F., & Sun, J. (2024). Design of a PID Controller for Microbial Fuel Cells Using Improved Particle Swarm Optimization. *Electronics*, 13(17). <https://doi.org/10.3390/electronics13173381> (pages 35, 36, 38, 40, 75).
- Wang, C.-T. (2014). Flow Control in Microbial Fuel Cells. En C.-T. Wang (Ed.), *Technology and Application of Microbial Fuel Cells*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/58346> (page 53).
- Xu, B., Ge, Z., & He, Z. (2015). Sediment microbial fuel cells for wastewater treatment: challenges and opportunities. *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, 1, 279-284. <https://doi.org/10.1039/C5EW00020C> (page 4).

Yadav, R. K., Chiranjeevi, P., Sukrampal & Patil, S. A. (2020). Integrated drip hydroponics-microbial fuel cell system for wastewater treatment and resource recovery. *Biore-source Technology Reports*, 9, 100392. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100392> (pages 37, 39, 41, 75).