



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

Reducción de consumo eléctrico del sistema de
control térmico de un fotobiorreactor para
producción de microalga

presentada por

Ing. Jonathan Arenas Robles

como requisito para obtener el grado de
**Maestro en Ciencias en Ingeniería
Electrónica**

Director de tesis

Dr. Manuel Adam Medina

Codirector de tesis

Dr. Miguel Ángel Franco Nava

Cuernavaca, Morelos, México. Agosto de 2024.

Cuernavaca, Mor.,
No. de Oficio:
Asunto:

S/agosto/2024
DIE/109/2024
Aceptación de documentos de tesis

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

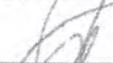
Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. JONATHAN ARENAS ROBLES**, con número de control **M22CE007** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado "Reducción de Consumo Eléctrico del Sistema de Control Térmico de un Fotobiorreactor para Producción de Microalga", y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS



Dr. Manuel Adam Medina
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 5992003

CODIRECTOR DE TESIS



MC. Miguel Ángel Franco Nava
Maestro en Ciencias
Cédula profesional 4875190

REVISOR 1



Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez
Doctor en Ingeniería
Cédula profesional 3431842

REVISOR 2



Dr. Víctor Manuel Alvarado Martínez
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 8031070

C.p. M.T.I. Maria Elena Gómez Torres. Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Estudiante
JGM/kmq



Cuernavaca, Mor.,
No. De Oficio:
Asunto:

12/agosto/2024
SAC/236/2024
Autorización de
impresión de tesis

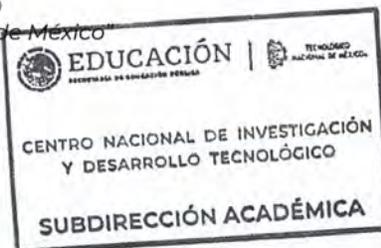
**JONATHAN ARENAS ROBLES
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **“Reducción de Consumo Eléctrico del Sistema de Control Térmico de un Fotobiorreactor para Producción de Microalga”**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
“Conocimiento y tecnología al servicio de México”



**CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO**

C. c. p. Departamento de Ingeniería Electrónica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



Resumen

La creciente demanda de energía eléctrica que se consume diariamente y la necesidad de encontrar fuentes alternativas sostenibles, han impulsado la investigación en áreas como la química sustentable y el desarrollo de tecnologías innovadoras. En el área de la ingeniería y las energías renovables los fotobiorreactores han surgido como una herramienta clave para la producción sostenible de biocombustibles y productos bioquímicos, acelerando el proceso de reproducción y la fotosíntesis en microorganismos como las microalgas.

El trabajo de esta tesis se enfoca en el análisis del consumo eléctrico y el sistema de control de temperatura en un fotobiorreactor, ubicado en el Instituto Tecnológico de Mazatlán y que se desarrolló en colaboración con el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), para el estudio y desarrollo de tecnología que permita una producción sustentable de biocombustibles de tercera generación y biomoléculas de alto valor farmacéutico y nutricional. Se examinan los factores que influyen en el consumo eléctrico, como el tamaño, la configuración del sistema de control de temperatura y las condiciones de operación, así como la eficiencia del Fotobiorreactor.

Los hallazgos de este trabajo contribuyen a mejorar la sostenibilidad y eficiencia en la producción de biocombustibles y productos bioquímicos del fotobiorreactor y muestran la importancia de comprender y optimizar el funcionamiento de los fotobiorreactores en la búsqueda de un futuro energético eficiente más limpio y sostenible.

Abstract

The growing demand for electrical energy consumed daily and the need to find sustainable alternative sources have driven research in areas such as sustainable chemistry and the development of innovative technologies. In the area of engineering and renewable energy, photobioreactors have emerged as a key tool for the sustainable production of biofuels and biochemical products, accelerating the process of reproduction and photosynthesis in microorganisms such as microalgae.

The work of this thesis focuses on the analysis of the electrical consumption and the temperature control system in a photobioreactor, located at the Technological Institute of Mazatlan and developed in collaboration with the Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), for the study and development of technology that allows a sustainable production of third generation biofuels and biomolecules of high pharmaceutical and nutritional value. Factors that influence electricity consumption, such as size, temperature control system configuration and operating conditions, as well as the efficiency of the photobioreactor, are examined.

The findings of this work contribute to improving sustainability and efficiency in the production of biofuels and biochemicals from the photobioreactor and show the importance of understanding and optimizing the operation of photobioreactors in the quest for a cleaner and more sustainable energy efficient future.

Dedicatoria

A Nsambia (Dios), por concederme la fortaleza y las habilidades para afrontar este reto en mi vida. Porque son los desafíos los que dan verdadero sentido a la existencia.

A mi padre y a toda mi familia, por ser mi constante fuente de inspiración y motivación diaria; este logro es también es dedicado a ustedes.

A mis amigos, Bernardino Rosales A., Fausto Lorenzo A. y Jesús Gonzalo V. P., por todo el apoyo, amistad y ánimo que han sido invaluable durante todo este proceso. A mis mentores, en especial al Dr. Manuel Adam Medina, mi director de tesis y guía, por su sabiduría y orientación en mi recorrido académico. Este trabajo es también el resultado del esfuerzo y apoyo de todos.

A todos aquellos que, sin ser parte de mi familia, me han brindado su apoyo incondicional. Sus palabras de aliento su compañía y todo lo que ha sido fundamental para mí en este viaje. Gracias por estar siempre ahí.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por el apoyo que me proporcionó para alcanzar una meta adicional y realizar una estancia en el estado de Mazatlán, Sinaloa.

Al Tecnológico Nacional de México (TECNM), por animarme a estudiar la maestría en Ciencia en Ingeniería Electrónica, con especialidad en Energía Renovable y Eficiencia Energética.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) y a todo el personal de la institución por su dedicación y esfuerzo. Por inspirar en mí el interés por la investigación tecnológica.

A uno de mis más grandes mentores de la vida, el Dr. Manuel Adam M., le agradezco profundamente por su apoyo tanto académico como personal. Gracias por brindarme su amistad, confianza y conocimientos, y por estar siempre al pendiente de mí.

Al Dr. Miguel A. Franco, una persona sumamente comprometida con su trabajo. Muchas gracias por brindarme su tiempo y conocimiento, y por ofrecerme hospedaje durante mi estancia en Mazatlán.

A todo el equipo del laboratorio del Instituto Tecnológico de Mazatlán (ITTMAZ), valoro mucho todas las atenciones que tuvieron conmigo, Dulce, Profe Sol, Profe Guevara y al Profe Franco. Muchas gracias.

Al Dr. Gerardo Vicente G., por su contribución a mi desarrollo personal y académico a través de sus clases. Estoy profundamente agradecido por su tiempo y esfuerzo invertidos en mi formación.

Al Dr. Victor M. Alvarado, por su dedicación y orientación a lo largo de este proceso. Sus valiosos comentarios y sugerencias han enriquecido significativamente mi trabajo de tesis.

A la Licenciada Lorena Ruiz, por su impecable coordinación en la biblioteca. Su amabilidad, disposición fueron fundamentales para mi trabajo de investigación.

A María Santana, Apolinar Aguilar, Polo y Amira, por abrirme las puertas de su hogar en Cuernavaca para que yo pudiera asistir a la escuela. Su generosidad y hospitalidad han sido un pilar en mi educación, y les estaré eternamente agradecido.

A Jose Luis Caraza, Eva Isabel Molina y su familia, quienes me brindaron hospedaje durante mi estancia en Sinaloa y me acogieron con mucho cariño, tratándome como si fuera parte de su familia. Su calidez y hospitalidad hicieron de esa experiencia algo inolvidable. Gracias de todo corazón.

A Jocelin y Rogelio Cervantes Arenas, mis primos, a quienes considero mis hermanos. Siempre han estado ahí para mí, brindándome su cariño incondicional. Gracias por ser una parte tan importante de mi vida.

A Miguel Cervantes y a sus padres, Juana Martínez y Pedro Cervantes, por su constante cariño y preocupación por mi bienestar desde la universidad. Siempre estaré agradecido por su generosidad y calidez.

A mi grupo de amigos que siempre han estado a mi lado cuando les he necesitado que han sido una fuente de apoyo incluyéndome en actividades que disminuyeron mi nivel de estrés y me han dado tantos momentos significativos: Esther Merari A., César Garnica A., Laura Rocío., Jorge Quenatzin.

Además mi más sincero agradecimiento. A Nuvia Nayeli Vergara Elizalde, el impacto de su apoyo está dejando huella imborrable en mí. Su fuerza, determinación, y capacidad para liderar con tanta convicción son inspiradoras. Gracias por brindarme una oportunidad cuando más lo necesitaba; siempre llevaré con orgullo la experiencia.

A mis compañeros y amigos. Dryden, Isaí, Donaciano, Gabriel. Por todo su compañerismo y ánimo durante todo este camino. Además. También quiero agradecer a los profesores y profesoras con los que he tenido el placer de convivir durante este tiempo.

Índice

1. Introducción	3
1.1. Antecedentes	6
1.1.1. Diseño y construcción del Fotobiorreactor de columna vertical a escala piloto	6
1.1.2. Modelado y control de temperatura de un fotobiorreactor escala piloto con intercambiador de calor	8
1.1.3. Análisis de los antecedentes	9
1.2. Estado del arte	10
1.2.1. Investigación, desarrollo y diseño de Fotobiorreactores	10
1.2.2. Consumo eléctrico y optimización de condiciones para el cultivo	11
1.2.3. Cultivo y generación de biodiesel a partir de microalgas	12
1.2.4. Automatización y control en fotobiorreactores	12
1.2.5. Producción de biomasa y el impacto económico en sistemas de cultivo	13
1.2.6. Control de temperatura en fotobiorreactores	14
1.2.7. Análisis del estado del arte	14
1.3. Planteamiento del problema	15
1.4. Justificación	16
1.5. Objetivo general	16
1.5.1. Objetivos particulares	16
1.6. Metas	17
1.7. Alcances	18
1.8. Limitaciones	18
2. Marco Teórico	19
2.1. Fotobiorreactor	19
2.2. Microalgas	21
2.3. Microalga <i>Nannochloropsis Oculata</i>	22
2.4. Proceso de producción de biomasa	22

2.5. Control y monitoreo de Fotobiorreactores	24
2.6. Salinidad, pH, luminiscencia, temperatura, mezcla	24
2.7. Consumo eléctrico en Fotobiorreactores	26
2.8. Ley de Watt/Joule	26
2.9. Factor de Potencia	28
3. Metodología	30
3.1. Características de los subsistemas	30
3.2. Subsistemas y lazos de control del fotobiorreactor	30
3.3. Interconexión de subsistemas en el fotobiorreactor	34
3.4. Subsistema de control de temperatura en el Fotobiorreactor	35
3.5. Descripción del controlador	36
3.6. Metodología para la obtención del consumo eléctrico del Fotobiorreactor	38
3.6.1. Análisis preliminar de datos para la identificación del consumo eléctrico	39
3.6.2. Medidas de tendencia central de los datos recopilados del periodo de cosecha de biomasa del Fotobiorreactor del 18/10/2022 al 24/10/2022	40
3.6.3. Resumen de hallazgos	43
3.7. Metodología para la obtención del consumo eléctrico nominal por día del subsistema de control de temperatura	45
3.8. Análisis de datos del subsistema de control de temperatura	47
3.8.1. Interpretación de resultados	53
3.9. Evaluación de datos del consumo eléctrico del subsistema térmico	53
3.9.1. Implementación de los sensores de monitoreo para el consumo eléctrico del sistema de control de temperatura	53
3.9.2. Proceso de preparación para la inoculación microalgal	55
3.9.3. Evaluación del comportamiento microalgal y consumo eléctrico sin control térmico	56
3.9.4. Interpretación del comportamiento y consumo eléctrico sin control térmico	59

3.9.5. Evaluación del comportamiento microalgal y consumo eléctrico con control térmico	60
3.9.6. Observaciones del comportamiento y consumo eléctrico con control térmico	61
3.9.7. Análisis de ambos experimentos y resumen de observaciones	62
3.10. Propuestas para la reducción del consumo eléctrico del sistema de control de temperatura	62
3.10.1. Propuesta de aislamiento del circuito de circulación del glicol	62
3.10.2. Propuesta de ampliación del margen de histéresis en el subsistema de control térmico	64
4. Resultados	66
4.1. Integración del nuevo actuador al subsistema térmico	66
4.1.1. Ingeniería inversa del subsistema de control de temperatura	66
4.2. Integración del nuevo actuador	70
4.3. Escenario A: Evaluación del consumo eléctrico en el subsistema térmico al extraer 0.1°C del fotobiorreactor	73
4.3.1. Cálculos del consumo eléctrico al extraer 0.1°C al del medio de cultivo del fotobiorreactor	73
4.3.2. Resultados del sistema térmico sin modificar	74
4.3.3. Observaciones del escenario A	75
4.4. Escenario B: Evaluación del consumo eléctrico en el subsistema térmico modificado	75
4.4.1. Cálculo del consumo eléctrico en el subsistema de control de temperatura modificado	76
4.4.2. Resultados del escenario B	77
4.4.3. Observaciones del escenario B	90
4.5. Escenario C: Evaluación de la ampliación del margen de histéresis a 0.5 °C en el subsistema térmico	93
4.5.1. Resultados del escenario C	94
4.5.2. Observaciones del escenario C	102

4.6. Escenario D: Evaluación de la ampliación del margen de histéresis a 1 °C en el sistema térmico	108
4.6.1. Resultados del escenario D	108
4.6.2. Observaciones del escenario D	117
4.6.3. Análisis matemático	117
4.7. Observaciones generales	122
4.7.1. Comparación entre Escenarios B y C	122
4.7.2. Comparación entre Escenarios B y D	122
4.7.3. Comparación entre Escenarios C y D	123
5. Conclusiones	124
5.1. Perspectivas	125
5.2. Trabajos futuros	126
5.3. Estancia en Mazatlán, Sinaloa	127
5.4. Contribuciones	128

Lista de tablas

1.	Proyectos que se enfocan a la investigación, desarrollo y diseño de Fotobiorreactores	10
2.	Proyectos que se enfocan al consumo eléctrico y optimización de condiciones para el cultivo de microorganismos	11
3.	Proyectos que se enfocan al cultivo y generación de biodiesel a partir de microalgas	12
4.	Proyectos que se enfocan a la automatización y el control en Fotobiorreactores . . .	13
5.	Proyectos que se enfocan al impacto económico en sistemas de cultivo de microorganismos	13
6.	Trabajos que se enfocan al control térmico en fotobiorreactores	14
7.	Actuadores que conforman al sistema térmico de enfriamiento del fotobiorreactor . .	35
8.	Consumo eléctrico por subsistema y conteo celular diario del 18/10/2022 al 24/10/2022	42
9.	Resumen de potencias y consumo eléctrico nominal del Fotobiorreactor	43
10.	Resultados del sistema de control de temperatura durante 24 días	47
11.	Parámetros del medio de cultivo para el experimento 1	57
12.	Consumo eléctrico por subsistema diario, conteo celular y consumo eléctrico total por subsistema del experimento 1, del 06/05/2023. al 12/05/2023	59
13.	Parámetros del medio de cultivo para el experimento 2	60
14.	Consumo eléctrico por subsistema diario, conteo celular y consumo eléctrico total por subsistema del experimento 2, del 25/05/2023. al 29/05/2023	61
15.	Caudales de la bomba 1	71
16.	Caudales de la bomba 2	71
17.	Consumo eléctrico del sistema térmico SIN MODIFICAR	74
18.	Consumo eléctrico del sistema térmico MODIFICADO	74
19.	Valores nominales de los actuadores que conforman al subsistema térmico	75
20.	Temperaturas de los fluidos refrigerantes	76
21.	Resumen de estadísticos para los tres días con histéresis de 0.1 °C	88
22.	Consumo eléctrico del subsistema de control de temperatura antes de la modificación	91
23.	Consumo eléctrico del subsistema de control de temperatura después de la modificación	91

24. Medias de Consumos Eléctricos Totales en (W s) 122

Lista de figuras

1.1. Biocombustibles como opción para reducir la emisión de gases del efecto invernadero. Tomado de Vecteezy.com.	3
1.2. Fotografía de un cultivo de microalgas de tipo <i>Nannochloropsis oculata</i> en recipientes a escala laboratorio.	4
1.3. Fotografía del Fotobiorreactor en ITMAZ-TecNM.	5
1.4. a) Fotografía del fotobiorreactor. b) Estructura del fotobiorreactor. c) Esquema de la lámpara. Tomado de Jiménez (2017).	6
1.5. Diagrama general del fotobiorreactor de columna vertical. Tomado de Jiménez (2017).	7
1.6. Sistema de temperatura del Fotobiorreactor. Tomado de Alonso-Bastida et al. (2022).	8
2.1. Ejemplo de un fotobiorreactor de columna de burbujas para cultivo de microalgas. Tomado de González-Lazo et al. (2019).	19
2.2. Tipos básicos de fotobiorreactores: a)Tipo carrusel, b)Tipo plano, c)Con iluminación interna, d)Tipo serpentín e)Tipo tubular. Tomado de Cuao Arévalo and Martínez Cepeda (2021).	20
2.3. Microalgas. Tomado de UNAM (2015).	21
2.4. Fotografía de la muestra de un cultivo de microalgas de tipo <i>Nannochloropsis Oculata</i>	22
2.5. Opciones de proceso para cultivar microalgas y fabricar biomateriales a partir de microalgas. Tomado de Steven et al. (2022).	23
2.6. Diagrama a bloques de un sistema de control retroalimentado.	24
2.7. Subsistemas para mantener un entorno favorable para el crecimiento y la productividad de las microalgas.	25
2.8. Representación del triángulo de potencia que muestra la relación entre la potencia real, la potencia reactiva y la potencia aparente en un sistema de AC. Tomado de Giha Yidi (2023).	28
3.1. Diagrama a bloques del lazo de control del subsistema de salinidad del medio de cultivo.	31

3.2. Diagrama a bloques del lazo de control del subsistema de pH en el medio de cultivo.	31
3.3. Diagrama a bloques del lazo de control del subsistema de (aireación) o mezcla del medio de cultivo.	32
3.4. Diagrama a bloques del lazo de control del subsistema de control de temperatura. . .	32
3.5. Diagrama a bloques del lazo de control del subsistema de iluminación del medio de cultivo.	33
3.6. Diagrama general del control del bioproceso de producción microalgal en el fotobio- reactor Valenzuela Páez et al. (2023).	34
3.7. Diagrama esquemático del subsistema de temperatura. Tomado de Valenzuela Páez et al. (2024).	36
3.8. Diagrama de conexión de dispositivos <i>Full Gauge®</i> y comunicación con el <i>software Sitrad®</i> . Tomado de Controls (2023).	37
3.9. Gabinete de control.	37
3.10. Diagrama representativo de la ubicación del controlador.	38
3.11. Metodología para determinar el consumo eléctrico nominal y real de un fotobiorreactor.	39
3.12. Incremento del consumo eléctrico nominal vs concentración celular del 18/10/2022- 24/10/2022.	42
3.13. Funcionamiento del código diseñado en MatLab.	46
3.14. Comportamiento del consumo eléctrico nominal del sistema de control de tempera- tura del día 10 de noviembre del 2022.	51
3.15. Comportamiento del consumo eléctrico nominal del sistema de control de tempera- tura del día 21 de noviembre del 2022.	52
3.16. PZEM-004T, Arduino y conexión con la pantalla LCD.	54
3.17. Sistema de monitoreo (110V/220V) utilizando sensores de potencia PZEM004T. . .	54
3.18. Diagrama de flujo del funcionamiento del código de programación diseñado para los módulos de comunicación de tipo PZEM-004T.	55
3.19. Ejemplo ilustrativo de como se llevó a cabo el proceso para la inoculación microalgal.	56

3.20. Fotografía de como se llevo a cabo el procedimiento para el conteo celular con la cámara de Neubauer y un microscopio óptico.	57
3.21. Consumo eléctrico vs concentración celular sin sistema térmico <i>06/05/23 al 12/05/23</i>	58
3.22. Consumo eléctrico vs concentración celular con sistema térmico <i>25/05/23 al 30/05/23</i>	60
3.23. Propuesta de aislamiento para la reducción del consumo eléctrico del subsistema de control de temperatura.	63
4.1. Diagrama del circuito TC-LOGIC del sistema de control del fotobiorreactor estudiado.	67
4.2. Diagrama de la conexión del circuito de los relevadores del sistema de control del fotobiorreactor.	68
4.3. Diagrama obtenido de la ingeniería inversa del subsistema de control de temperatura del fotobiorreactor	69
4.4. Diagrama representativo del subsistema de control de temperatura modificado, con la integración del nuevo actuador.	70
4.5. Diagrama representativo del circuito del gabinete de control de temperatura modificado, con la integración del nuevo actuador.	72
4.6. Diagrama representativo de la circulación del glicol a través de ambos circuitos.	76
4.7. Conexiones del STEP el día 1.	77
4.8. Incremento del consumo eléctrico del STEP el día 1.	78
4.9. Conexiones del STES el día 1.	78
4.10. Incremento del consumo eléctrico del STES el día 1.	79
4.11. Conexiones del STEP el día 2.	79
4.12. Incremento del consumo eléctrico del STEP el día 2.	80
4.13. Conexiones del STES el día 2.	80
4.14. Incremento del consumo eléctrico del STES el día 2.	81
4.15. Conexiones del STEP el día 3.	81
4.16. Incremento del consumo eléctrico del STEP el día 3.	82
4.17. Conexiones del STES el día 3.	82
4.18. Incremento del consumo eléctrico del STES el día 3.	83

4.19. Consumo eléctrico STEP y STES día 1.	83
4.20. Consumo eléctrico STEP y STES día 2.	84
4.21. Consumo eléctrico STEP y STES día 3.	84
4.22. Consumo eléctrico total STF día 1.	85
4.23. Consumo eléctrico total STF día 2.	85
4.24. Consumo eléctrico total STF día 3.	86
4.25. Conexiones del STEP durante los tres días de prueba.	88
4.26. Incremento del consumo eléctrico del STEP durante los tres días de prueba.	89
4.27. Conexiones del STES durante los tres días de prueba.	89
4.28. Incremento del consumo eléctrico del STES durante los tres días de prueba.	90
4.29. Conexiones del STEP el día 1.	94
4.30. Incremento del consumo eléctrico del STEP el día 1.	94
4.31. Conexiones del STES el día 1.	95
4.32. Incremento del consumo eléctrico del STES el día 1.	95
4.33. Conexiones del STEP el día 2.	96
4.34. Incremento del consumo eléctrico del STEP el día 2.	96
4.35. Conexiones del STES el día 2.	97
4.36. Incremento del consumo eléctrico del STES el día 2.	97
4.37. Conexiones del STEP el día 3.	98
4.38. Incremento del consumo eléctrico del STEP el día 3.	98
4.39. Conexiones del STES el día 3.	99
4.40. Incremento del consumo eléctrico del STES el día 3.	99
4.41. Consumo eléctrico STEP y STES día 1 (histéresis 0.5 °C).	100
4.42. Consumo eléctrico STEP y STES día 2 (histéresis 0.5 °C).	100
4.43. Consumo eléctrico STEP y STES día 3 (histéresis 0.5 °C).	101
4.44. Consumo eléctrico total STF día 1 (histéresis 0.5 °C).	101
4.45. Consumo eléctrico total STF día 2 (histéresis 0.5 °C).	102
4.46. Consumo eléctrico total STF día 3 (histéresis 0.5 °C).	102

4.47. Promedio de las conexiones del STEP durante los tres días de prueba con histéresis de 0.5 °C.	105
4.48. Conexiones del STES durante los tres días de prueba con histéresis de 0.5 °C.	105
4.49. Promedio del incremento del consumo eléctrico del STEP durante los tres días de prueba con histéresis de 0.5 °C.	106
4.50. Promedio del incremento del consumo eléctrico del STES durante los tres días de prueba con histéresis de 0.5 °C.	106
4.51. Conexiones del STEP el día 1.	108
4.52. Incremento del consumo eléctrico del STEP el día 1.	109
4.53. Conexiones del STES el día 1.	109
4.54. Incremento del consumo eléctrico del STES el día 1.	110
4.55. Conexiones del STEP el día 2.	110
4.56. Incremento del consumo eléctrico del STEP el día 2.	111
4.57. Conexiones del STES el día 2.	111
4.58. Incremento del consumo eléctrico del STES el día 2.	112
4.59. Conexiones del STEP el día 3.	112
4.60. Incremento del consumo eléctrico del STEP el día 3.	113
4.61. Conexiones del STES el día 3.	113
4.62. Incremento del consumo eléctrico del STES el día 3.	114
4.63. Consumo eléctrico STEP y STES día 1 (histéresis 1 °C).	114
4.64. Consumo eléctrico STEP y STES día 2 (histéresis 1 °C).	115
4.65. Consumo eléctrico STEP y STES día 3 (histéresis 1 °C).	115
4.66. Consumo eléctrico total STF día 1 (histéresis 1 °C).	116
4.67. Consumo eléctrico total STF día 2 (histéresis 1 °C).	116
4.68. Consumo eléctrico total STF día 3 (histéresis 1 °C).	117
4.69. Promedio de las conexiones del STEP durante los tres días de prueba con histéresis de 1 °C.	119
4.70. Conexiones del STES durante los tres días de prueba con histéresis de 1 °C.	119

4.71. Promedio del incremento del consumo eléctrico del STEP durante los tres días de prueba con histéresis de 1 °C. 120

4.72. Promedio del incremento del consumo eléctrico del STES durante los tres días de prueba con histéresis de 1 °C. 120

.1. Fotografía de la ficha técnica del *chiller*. 136

.2. Datos de la ficha técnica del *chiller*. 136

.3. Datos nominales de las bombas. Tomado de Home Depot (2024) 137

Nomenclatura

I	Corriente eléctrica (A).
C.E.T	Consumo eléctrico total (kWh).
D-Max	Duración máxima (s).
D-Min	Duración mínima (s).
H	Altura (m).
m	Masa (kg).
P_{nom}	Potencia nominal (W).
P_{act}	Potencia activa o real (kW).
S	Potencia aparente (VA).
Q_r	Potencia reactiva (VAR).
Q	Energía acumulada (J).
ρ	Densidad (kg/m ³).
T_{emp}	Temperatura (°C).
t	Tiempo (s, h).
A	Área (m ²).
T-P	Tiempo promedio de encendido (s).
V_{ol}	Volumen (m ³).
V	Voltaje (Voltio).
Biocombustibles	Combustibles derivados de biomasa.
Biomasa	Materia orgánica usada como combustible.
Desviación e.	Desviación estándar
Chiller	Intercambiador de calor por placas.
Refrigerante prim.	Refrigerante gaseoso comercial tipo R22.
Refrigerante sec.	Refrigerante/anticongelante líquido de etilenglicol (Glicol).
Media	Valor promedio aritmético de los datos.

Mediana	Valor central de los datos.
T-ON	Número total de encendidos.

Subíndices

amb	Ambiente.
s	Solución/Cultivo.
ref	Referencia.

Acrónimos y simbología adicional

D	Dispositivos mecánicos.
T	Depósitos auxiliares.
M	Variables del medio de cultivo.
S	Sensores.
C	Unidad de control.
Sitrad®	Sistema de monitoreo y control (Full Gauge Controls).
TC-960Ri	Controlador de temperatura (Full Gauge Controls).
STEP	Sistema térmico de enfriamiento primario.
STES	Sistema térmico de enfriamiento secundario.
PUFAs	Ácidos grasos polinsaturados.
EPA	Ácido eicosapentaenoico.
ARA	Ácido araquidónico.
DHA	Ácido docosahexaenoico.
TMC	Temperatura del medio de cultivo.

Capítulo 1

1. Introducción

El constante aumento en la población y el desarrollo industrial ha generado una creciente demanda de energía, que a su vez ha exacerbado la presión sobre los recursos naturales y el medio ambiente. La dependencia abrumadora de los combustibles fósiles, como el petróleo y el carbón, plantea una serie de desafíos principalmente en los precios y la degradación del medio ambiente.

La necesidad urgente de buscar alternativas sostenibles y renovables se ha vuelto imperativa para mitigar los impactos negativos del cambio climático. Según la investigación de [Allen Pfeiffer \(2006\)](#), los biocombustibles han surgido como una opción prometedora (Figura 1.1), ofreciendo la posibilidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.



Figura 1.1: Biocombustibles como opción para reducir la emisión de gases del efecto invernadero. Tomado de Vecteezy.com.

En particular, el biodiésel se presenta como una alternativa viable y de bajo impacto ambiental, que puede contribuir a la transición hacia un futuro energético más sostenible. En los últimos años, la tendencia hacia la química sustentable ha influido significativamente en el área de investigación.

El proceso de producción de biocombustibles y productos bioquímicos en un fotobiorreactor tiene varias etapas, una de ellas se puede ilustrar con la siguiente fotografía (Figura 1.2), que muestra el cultivo de microalgas de tipo *Nannochloropsis oculata* en matraces y recipientes de vidrio.



Figura 1.2: Fotografía de un cultivo de microalgas de tipo *Nannochloropsis oculata* en recipientes a escala laboratorio.

La química sustentable se centra en investigar nuevas formas de sintetizar sustancias químicas con el objetivo de reducir o eliminar los productos que contaminan y causan daños al medio ambiente [Espinosa Martínez et al. \(2015\)](#). De esta manera, la integración de procesos biotecnológicos y principios de química sustentable puede ofrecer soluciones innovadoras y amigables con el medio ambiente para la producción de biocombustibles y otros productos bioquímicos.

La sociedad apuesta al desarrollo de tecnologías innovadoras como los fotobiorreactores, que se han convertido en una excelente herramienta para la producción sostenible de biocombustibles y productos bioquímicos, pues estos dispositivos contribuyen a la aceleración del proceso de la fotosíntesis de algunos microorganismos, como las microalgas, para convertir la energía solar en biomasa y la generación de productos útiles para el ser humano [Moreno et al. \(2021\)](#).

Para un fotobiorreactor, el consumo eléctrico depende de varios factores, que incluyen el tamaño, la configuración, las condiciones de operación, la iluminación y los tipos de microorganismos, [Jiménez \(2017\)](#).

Estos aspectos son de suma importancia cuando se considera el funcionamiento del sistema de control de la temperatura en un fotobiorreactor específico, como el que se encuentra en el Instituto Tecnológico de Mazatlán (ITMAZ) y que fue diseñado y construido en colaboración con el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) véase Figura 1.3.



Figura 1.3: Fotografía del Fotobiorreactor en ITMAZ-TecNM.

Debido a que en general, la zona costera en México tiene un clima cálido y soleado durante la mayor parte del año manteniendo altas temperaturas, uno de los aspectos más importantes para el buen funcionamiento de este tipo de fotobiorreactor es el control de la temperatura del medio de cultivo, por lo que las condiciones térmicas adecuadas en este sistema maximizan la actividad fotosintética y la productividad en la cosecha de microorganismos [Alonso Bastida et al. \(2020\)](#).

En este trabajo se explora el proceso empleado para generar y extraer los datos relacionados con el control *ON-OFF* del subsistema de control de la temperatura, destacando la importancia de esta información en el contexto del comportamiento del consumo eléctrico en un periodo de 24 horas.

Se propone también, la implementación de una estrategia de aislamiento del circuito del fluido refrigerante, en este caso glicol al 50%, mediante la adición de otro actuador, basándose en la premisa de que al incluir un nuevo actuador, el actuador que opera a 220V AC. reducirá la cantidad de encendidos, lo cual se estima generará un significativo ahorro de energía eléctrica.

Además se plantea la necesidad de ajustar los parámetros de control térmico. Se propone ajustar el margen de histéresis para mejorar la efectividad de esta nueva configuración ya que dentro de este sistema, se ha identificado un fenómeno de histéresis, caracterizado por un rango de temperatura en el que el controlador activa o desactiva los actuadores.

1.1. Antecedentes

1.1.1. Diseño y construcción del Fotobiorreactor de columna vertical a escala piloto

La aportación de este trabajo tiene un comienzo desde la intervención de Jiménez (2017), donde se diseñó, construyó e instrumentó un fotobiorreactor, definió su estructura y propuso una lámpara para el subsistema de iluminación interna para la realización de experimentos y la generación de datos, (Véase Figura 1.4), el objetivo principal de esta investigación fue modelar y automatizar un fotobiorreactor para el cultivo eficiente de *Nannochloropsis oculata*.

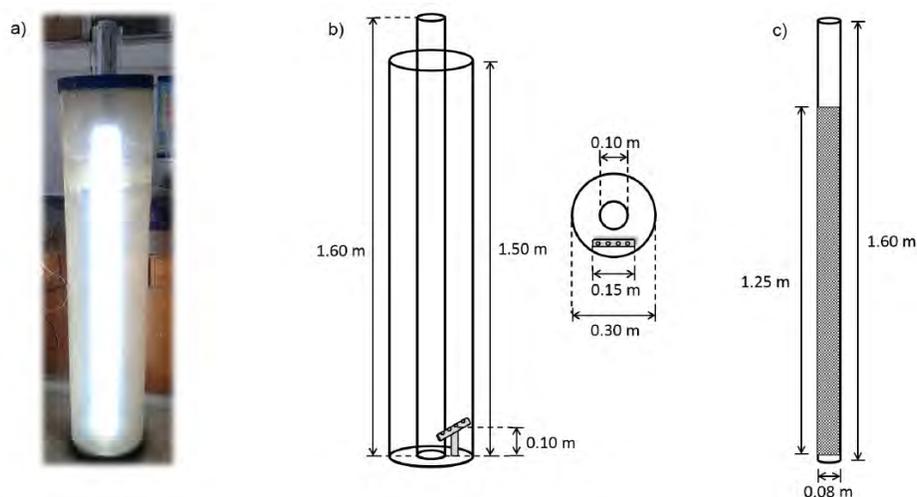


Figura 1.4: a) Fotografía del fotobiorreactor. b) Estructura del fotobiorreactor. c) Esquema de la lámpara. Tomado de Jiménez (2017).

La Figura 1.5, muestra el diagrama general que fue propuesto por Jiménez (2017), donde se observan algunos de los componentes que conformaban la primer versión diseñada para el control de los subsistemas por los que está compuesto el Fotobiorreactor.

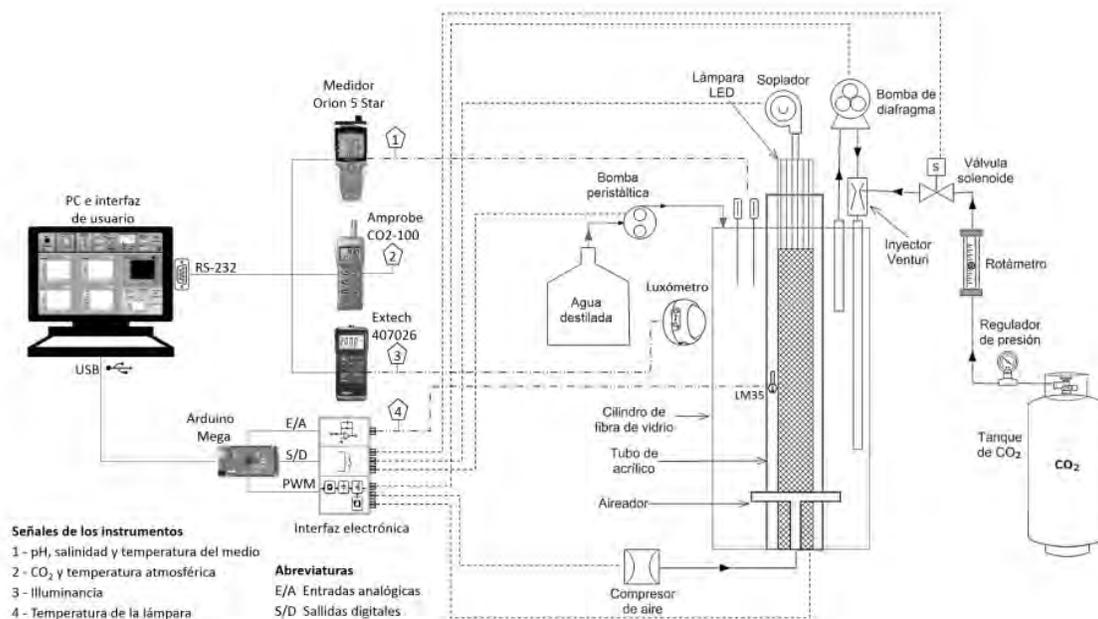


Figura 1.5: Diagrama general del fotobiorreactor de columna vertical. Tomado de Jiménez (2017).

Se eligió ese tipo de fotobiorreactor debido a su buen balance entre complejidad y rendimiento, se propuso también una estrategia basada en modelos de caja-gris para la identificación del sistema partir de datos experimentales, se desarrollaron dos métodos de entrenamiento basados en el Filtro de Kalman Unscented (UKF) que fue modificado para mejorar su estabilidad numérica.

Dentro del campo de la biotecnología, el control de bioprocesos tiene la finalidad de incrementar la productividad o la calidad de un producto haciendo uso de las técnicas de monitoreo y control automático para optimizar la producción en tiempo real.

Sin embargo, existen algunas dificultades inherentes al modelado, monitoreo y control de bioprocesos. Para este caso particular se derivó una estructura de modelo de red neuronal de caja-gris mediante la aplicación de balances de masa y de energía y se emplearon los métodos de entrenamiento propuestos para parametrizar el modelo partir de datos experimentales.

1.1.2. Modelado y control de temperatura de un fotobiorreactor escala piloto con intercambiador de calor

En el estudio de [Alonso-Bastida et al. \(2022\)](#), se planteó la creación de una metodología de estimación paramétrica fundamentada en filtros de Kalman extendidos, aplicados a un modelo matemático que describe la dinámica térmica del fotobiorreactor de columna vertical con iluminación interna y un intercambiador de calor inmerso en el medio de cultivo. La Figura 1.6, representa el subsistema de control de temperatura del Fotobiorreactor.

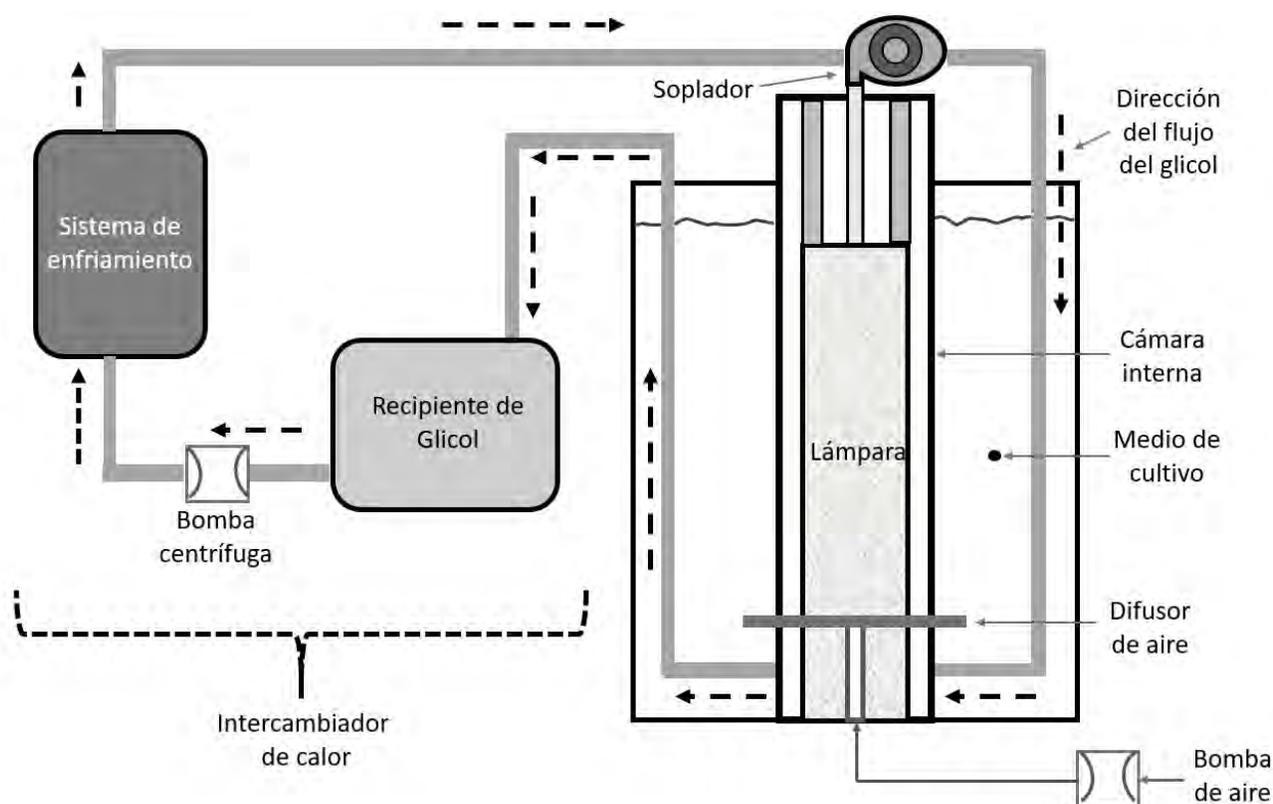


Figura 1.6: Sistema de temperatura del Fotobiorreactor. Tomado de [Alonso-Bastida et al. \(2022\)](#).

En donde se observa: la cámara interna, la lámpara que actúa como fuente de iluminación del medio de cultivo, que es la sección donde se produce la reproducción de la microalga, y el sistema del intercambiador de calor, compuesto por un circuito de recirculación de refrigerante que va desde un depósito del refrigerante hacia un sistema de enfriamiento, luego hacia el medio de cultivo para facilitar el intercambio de calor, y finalmente retorna al depósito inicial.

El modelo matemático en este trabajo se categoriza en parámetros medibles y no medibles, con el propósito de estimar dichos parámetros utilizando la metodología de los filtros de Kalman extendidos y de generar una representación matemática de las temperaturas del fotobiorreactor, localizado en la región de Mazatlán, Sinaloa, México.

1.1.3. Análisis de los antecedentes

Los antecedentes revelan una búsqueda constante por alcanzar condiciones operativas óptimas dentro del fotobiorreactor. Además, la propuesta de un esquema de control adaptativo, capaz de contrarrestar las perturbaciones ambientales en la temperatura, muestra un gran interés por mantener un rendimiento aceptable en el sistema.

El estudio del control de temperatura, con la implementación del control predictivo basado en modelos, por sus siglas en inglés (*MPC*) respaldado por un modelo matemático validado, ofrece una visión innovadora al superar en desempeño a los arreglos de controladores PID (Proportional-Integral-Derivative, Proporcional-Integral-Derivativo) convencionales.

Esta optimización y control podría expandir significativamente el potencial de la biomasa microalgal, incluidos los sectores farmacológicos, nutricionales, acuícolas y de biocombustibles ya que en el sector farmacológico, la biomasa microalgal puede ser utilizada para la producción de compuestos bioactivos y medicamentos. En la industria nutricional, puede proporcionar suplementos dietéticos ricos en nutrientes esenciales y antioxidantes. En la acuicultura, la biomasa microalgal es una fuente de alimento para diversas especies acuáticas.

Además, la integración de enfoques tecnológicos modernos en sistemas de producción y control puede mejorar el rendimiento y la estabilidad de los procesos, contribuyendo también a la creación de un entorno más limpio y eficiente, que al mismo tiempo se unan con los objetivos globales de desarrollo sustentable.

1.2. Estado del arte

1.2.1. Investigación, desarrollo y diseño de Fotobiorreactores

El apartado del estado del arte de este documento se estructura en varias secciones, comenzando con la tabla 1, que muestra proyectos recientes que se enfocan a la investigación, desarrollo y diseño de Fotobiorreactores.

Cuadro 1: Proyectos que se enfocan a la investigación, desarrollo y diseño de Fotobiorreactores

Autor(es)	Método de estudio	Resumen	Lugar
González-Lazo et al. (2019)	Simulación	Se simuló el comportamiento hidrodinámico de un fotobiorreactor de columna de burbujas utilizando el <i>software Ansys Fluent</i> .	La Habana, Cuba
Zeriouh (2019)	Simulación	Se simuló el biofouling de microalgas en fotobiorreactores cerrados, utilizando la microalga Nannochloropsis gaditana .	Andalucía, España
Sánchez-Bayo Álvarez et al. (2019)	Simulación	Se propuso el cultivo de microalgas para la producción de tres tipos de biocombustibles (bioaceite, biodiésel y biogás), para analizar el comportamiento de estos productos.	Madrid, España
Salguero Rodríguez (2019)	Simulación	Se desarrolló un modelo que integra fenómenos como la dinámica de fluidos y la cinética de fotosíntesis, con una ecuación empírica para los ciclos de luz-oscuridad.	Bogotá, Colombia
Vidó et al. (2019)	Simulación	Se enfocó en el seguimiento de un fotobiorreactor microalga-bacteria para tratar vinazas de la industria tequilera e implementó un controlador automático para regular el volumen de agua.	Villahermosa, Tabasco
Sanz Martínez (2019)	Implementación	Se diseñó un fotobiorreactor a nivel de planta piloto para producir anualmente 30 kg de Dinoflagellate Luciferina, incluyendo los conceptos de biorrefinerías, química sostenible y microalgas.	Barcelona, España
Ruge (2019)	Implementación	Se diseñó un biorreactor para co-compostaje de lodos de tratamiento de aguas residuales y residuos orgánicos. Utiliza controladores basados en FreeRTOS y Arduino Mega 2560 para mantener condiciones de temperatura y humedad.	Tunja, Boyacá

1.2.2. Consumo eléctrico y optimización de condiciones para el cultivo

En la tabla 2, se abordan los avances más relevantes encontrados en la literatura que destacan la escalabilidad y optimización de condiciones para el cultivo de microorganismos foto-sintéticos. Estos trabajos muestran que la evolución hacia sistemas más eficientes y controlados ha permitido una mayor productividad y sostenibilidad en la producción de biocombustibles y productos bioquímicos, destacando la importancia de seguir investigando los fotobiorreactores.

Cuadro 2: Proyectos que se enfocan al consumo eléctrico y optimización de condiciones para el cultivo de microorganismos

Autor(es)	Método de estudio	Resumen	Lugar
Sanz Martínez (2019)	Implementación	Se propuso un fotobiorreactor tipo Airlift de 60 litros, especificando dimensiones, ciclos de iluminación y condiciones de cultivo . Se detallan materiales, parámetros de control y medidas de seguridad.	Cataluña, España
González-Lazo et al. (2019)	Simulación	Se simuló un fotobiorreactor de columna de burbujas para maximizar la productividad de biomasa a partir de microalgas, analizando el comportamiento hidrodinámico .	La Habana, Cuba
Guzmán et al. (2021)	Simulación	Se proporcionó una visión general del proceso de producción de microalgas desde una perspectiva de modelado y control de procesos, así como los diversos tipos de reactores utilizados en su producción.	Valencia, España
García et al. (2020)	Implementación	Estudió el cambio en la dirección de flujo en la tubería de un fotobiorreactor y descubrió que el radio de la curvatura impacta la caída de presión, lo que condujo a una solución para resolver el problema de optimización .	Bucaramanga, Colombia
Arribas Jimeno et al. (2020)	Comparación	Analizó diversos tipos de fotobiorreactores, comparando sus atributos y evaluando los parámetros clave del cultivo microalgal, como la luz, pH, nutrientes, temperatura y mezcla.	Valladolid, España

1.2.3. Cultivo y generación de biodiesel a partir de microalgas

Otras investigaciones emplean técnicas para el cultivo y la generación de biodiesel a partir del cultivo de microalgas y de otros microorganismos a través de la simulación o de la implementación como los trabajos que se muestran en la siguiente tabla 3.

Cuadro 3: Proyectos que se enfocan al cultivo y generación de biodiesel a partir de microalgas

Autor(es)	Método de estudio	Resumen	Lugar
Moncada (2017)	Implementación	Se automatizó una planta de producción de biodiesel a partir de algas y microalgas marinas.	Caracas, Venezuela
Herrera Sánchez (2020)	Simulación	Se determinaron las condiciones óptimas de control para el cultivo de la microalga <i>Chlorella sp.</i>	Bellavista, Perú
Vélez Tamayo et al. (2014)	Simulación	Se hizo un enfoque hacia el modelado y control de ciclo de vida de algunas microalgas sin tomar en cuenta otros parámetros de control.	Almería, España
MarÑn-Quintero et al. (2012)	Simulación	Se realizó un análisis computacional de una bomba centrífuga empleada para bombear cultivos de microalgas en fotobiorreactores tubulares.	Colombia, Bogotá
Bácsi et al. (2022)	Evaluación	Se estudiaron los efectos de los tipos de fotobiorreactores en la producción de biomasa.	Mérida, Yucatán
Kerras et al. (2019)	Implementación	Se implementó la aplicación de métricas de química verde a la producción de biodiésel.	Bucaramanga, Colombia
Alfaro-Vives et al. (2017)	Simulación	Se propuso un modelo matemático para describir el crecimiento dinámico simbiótico de la microalga.	Santiago de Cuba, Cuba
Mena Cabrera (2014)	Implementación	Se utilizó un sistema integrado con microalgas y se observó el comportamiento para el tratamiento de efluentes urbanos.	Buenos Aires, Argentina

1.2.4. Automatización y control en fotobiorreactores

Con énfasis en los trabajos que tienen enfoque en la automatización y control general de fotobiorreactores hay trabajos en la literatura que destacan, como los de la tabla 4.

Cuadro 4: Proyectos que se enfocan a la automatización y el control en Fotobiorreactores

Autor(es)	Método de estudio	Resumen	Lugar
Moreno et al. (2021)	Simulación	Se propuso el control interpolante como una técnica novedosa con capacidad para tratar con restricciones de estado y control con baja carga computacional.	Almería, España
Hoyo et al. (2019)	Implementación	Se implementó un controlador predictivo generalizado (GPC) para el control del pH en un fotobiorreactor <i>raceway</i> para el cultivo de microalgas.	Coruña, España
Romero Carrillo et al. (2021)	Automatización	Se diseñó un sistema lumínico móvil para un fotobiorreactor tubular cerrado usando criterios de diseño mecánico.	Guayaquil, Ecuador
Amaya Orozco (2021)	Automatización	Se estabilizaron a través de técnicas de control , las condiciones de operación específicas de temperatura, pH, baja concentración de oxígeno, dióxido de carbono y niveles de iluminación en un fotobiorreactor.	Bogotá, Colombia
Sánchez-Bayo Álvarez et al. (2019)	Simulación	Se presentó una primera aproximación al control robusto del pH en un fotobiorreactor <i>raceway</i> para el cultivo de microalgas.	Madrid, España

1.2.5. Producción de biomasa y el impacto económico en sistemas de cultivo

Existen además trabajos que han abordado aspectos relacionados con el análisis del impacto económico en fotobiorreactores, por ejemplo, los que se muestran en la tabla 5.

Cuadro 5: Proyectos que se enfocan al impacto económico en sistemas de cultivo de microorganismos

Autor(es)	Método de estudio	Resumen	Lugar
Salguero Rodríguez (2019)	Simulación	Se propuso un modelo para un fotobiorreactor y se planteó una optimización económica que considera tanto la energía de bombeo del sistema como la energía producida.	Colombia, Bogotá
Guarin-Villegas et al. (2020)	Evaluación	Se analizó el efecto de la relación Carbono/-Nitrógeno y se probaron diferentes fuentes de carbono y concentraciones de nitrógeno en reactores tubulares durante 40 días a 25°C.	Valle del Cauca, Colombia

1.2.6. Control de temperatura en fotobiorreactores

En la tabla 6, se muestran cuatro estudios recientes encontrados en la literatura que exploran distintos aspectos del control térmico en estos sistemas.

En específico, el control de la temperatura en fotobiorreactores para la producción de microalgas y biocombustibles se vuelve un área de oportunidad para la innovación y el control de fotobiorreactores, especialmente cuando se trata de lugares cálidos o con altas temperaturas.

Cuadro 6: Trabajos que se enfocan al control térmico en fotobiorreactores

Autor(es)	Método de estudio	Resumen	Lugar
Alonso Bastida et al. (2020)	Simulación	Modeló matemáticamente las interacciones térmicas en un fotobiorreactor, balances energéticos, mediciones físicas y relaciones matemáticas de la literatura y utilizando el filtro de Kalman para la estimación de los parámetros.	Cuernavaca, Morelos
Giral-Ramírez et al. (2021)	Simulación	Exploró la influencia de la temperatura en la eficiencia y la calidad del producto final, proporcionando pautas importantes para el control térmico .	Pereira, Colombia
Capacho González (2021)	Simulación	Se investigó el desarrollo de sensores térmicos innovadores para fotobiorreactores, detallando cómo estos dispositivos mejoran la precisión del control de temperatura y la eficiencia energética.	Pamplona, Colombia
Muñoz et al. (2019)	Simulación	Se propuso un control térmico adaptable mediante la implementación de inteligencia artificial en fotobiorreactores, para optimizar el control de temperatura.	Puebla, Puebla

1.2.7. Análisis del estado del arte

La investigación en fotobiorreactores y la producción de biomasa a partir de microorganismos ha experimentado un crecimiento significativo, como se observa en los estudios revisados. Estos estudios van desde el diseño y optimización de fotobiorreactores hasta el control de variables específicas como temperatura, pH, intensidad lumínica y agitación o mezcla para el cultivo de microalgas.

Además, se exploran estrategias innovadoras, tales como el uso de técnicas de modelización matemática, desarrollo de sensores avanzados, aplicaciones de inteligencia artificial para el control térmico y otras áreas de mejora en la eficiencia y sostenibilidad de la producción de biomasa.

Este análisis del estado del arte que se presenta, muestra un panorama multidisciplinario en el campo de los fotobiorreactores y la producción de biomasa a partir de microorganismos. También reflejan un compromiso continuo con la innovación y la mejora de procesos y destaca la relevancia de este campo para el desarrollo de soluciones sostenibles y eficientes en la producción de biocombustibles y otros productos derivados de microalgas.

1.3. Planteamiento del problema

La producción de microalgas a través del uso de los fotobiorreactores se ha convertido en un campo de investigación vital para diversas industrias, desde la alimentaria hasta la farmacéutica, debido a sus aplicaciones en la obtención de biocombustibles principalmente. Sin embargo, uno de los desafíos fundamentales en la operación de estos sistemas radica en el consumo eléctrico resultante de este tipo de dispositivos.

El sistema de control térmico, esencial para mantener las condiciones óptimas de cultivo de microalgas, presenta una demanda energética considerable. En este trabajo, los actuadores que conforman el sub-sistema de control de temperatura han sido identificado como los principales contribuyentes al consumo eléctrico, en este contexto, la necesidad de reducir el consumo eléctrico en estos sistemas sin comprometer la calidad del cultivo de microalgas es evidente.

Por lo tanto, surge la necesidad de explorar en profundidad la implementación de estrategias como solución a la demanda del consumo eléctrico, evaluando su efectividad en la reducción del uso de energía eléctrica sin comprometer la calidad del cultivo de microalgas.

1.4. Justificación

La contribución de este estudio va de manera directa a la sostenibilidad y eficiencia de las tecnologías empleadas en la producción de microalgas. La posibilidad de reducir significativamente el consumo eléctrico sin afectar la calidad del cultivo podría tener un impacto considerable en la viabilidad económica y ambiental en el uso de estas tecnologías. Además, esta investigación podría abrir nuevas oportunidades para la adopción masiva de sistemas de producción de microalgas en diversas industrias, dado su potencial en la generación de biocombustibles y su aplicación en industrias alimentarias y farmacéuticas.

El propósito principal de esta investigación ha sido explorar y evaluar una estrategia innovadora para reducir el consumo eléctrico en estos sistemas sin comprometer la calidad del cultivo de microalgas. Esta estrategia se centra en el aislamiento del circuito de circulación de glicol, con la incorporación de un actuador adicional para disminuir el tiempo de operatividad del que ha sido identificado como el mayor generador de consumo eléctrico.

Tomando en cuenta la considerable demanda energética asociada a los sistemas de control térmico utilizados para mantener las mejores condiciones de cultivo de microalgas. Los resultados presentados en este documento son el producto de un exhaustivo análisis experimental, el cual ha permitido identificar y cuantificar el impacto de la modificación propuesta en la optimización del consumo eléctrico en los sistemas de control de temperatura del fotobiorreactor.

1.5. Objetivo general

Diseñar y validar estrategias para reducir el consumo eléctrico en la producción de biomasa microalgal en un fotobiorreactor piloto.

1.5.1. Objetivos particulares

- Establecer las características que determinan el consumo eléctrico de un sistema de enfriamiento para un fotobiorreactor.

- Proponer estrategias que reduzcan el consumo eléctrico.
- Implementar estrategias para reducir el consumo eléctrico del subsistema de control de la temperatura del fotobiorreactor.
- Evaluar las estrategias para reducir el consumo eléctrico en el sistema de control de la temperatura.

1.6. Metas

- Recopilar datos sobre las características del consumo eléctrico del sistema térmico, incluyendo variables como el tamaño del fotobiorreactor, la capacidad de enfriamiento requerida, la eficiencia del sistema de enfriamiento, etc.
- Realizar un análisis detallado para identificar las principales variables que influyen en el consumo eléctrico del sistema térmico.
- Investigar metodologías y técnicas de control que sean adecuadas para reducir el consumo eléctrico en sistemas térmico de fotobiorreactores.
- Desarrollar e implementar un sistema de monitoreo para el consumo eléctrico del sistema térmico del fotobiorreactor.
- Aislar el circuito de circulación del glicol mediante la adición de otro actuador para mejorar la eficiencia del sistema térmico.
- Realizar pruebas experimentales modificando los valores de histéresis del controlador de temperatura en el sistema de enfriamiento del fotobiorreactor, con valores de 0.1, 0.5 y 1.
- Comparar el consumo eléctrico antes y después de la implementación de la estrategia de control.

1.7. Alcances

El análisis de las características que determinan el consumo eléctrico del sistema de enfriamiento para un fotobiorreactor.

La propuesta de una estrategia de control específica para reducir el consumo eléctrico del sistema de control de la temperatura del fotobiorreactor.

Las pruebas y experimentos para evaluar la eficacia de la estrategia de control implementada en la reducción del consumo eléctrico.

La evaluación del impacto de la estrategia en la productividad de la producción de biomasa.

Las pruebas modificando los valores de histéresis del controlador de temperatura, incluyendo valores de 0.1, 0.5 y 1.

1.8. Limitaciones

El tiempo disponible para la investigación podría limitar la cantidad de pruebas y experimentos que se pueden realizar, así como el alcance de los análisis.

El acceso al fotobiorreactor piloto puede ser una limitación, ya que la investigación depende de la disponibilidad de este equipo para llevar a cabo las pruebas y experimentos y el dispositivo se encuentra en el municipio de Mazatlán, Sinaloa.

La complejidad del sistema de control de temperatura del fotobiorreactor piloto podría ser una limitación en la implementación de la estrategia de control propuesta.

Los resultados obtenidos pueden estar limitados a las condiciones específicas del fotobiorreactor piloto y pueden no ser directamente generalizables a otros sistemas o escenarios.

Capítulo 2

2. Marco Teórico

2.1. Fotobiorreactor

Los fotobiorreactores son dispositivos que utilizan la luz como fuente de energía para cultivar microorganismos fototróficos. Estos organismos utilizan la fotosíntesis para generar biomasa. Para el cultivo de microalgas, los fotobiorreactores como el que se muestra en la siguiente Figura 2.1, han de mantener un medio de cultivo estable, controlando parámetros como la temperatura, la iluminación, el pH del medio, la salinidad y la mezcla o agitación. Dependiendo de las condiciones del cultivo y del control que se quiera tener sobre estos parámetros, existen dos sistemas de cultivo distintos: sistemas abiertos y sistemas cerrados.



Figura 2.1: Ejemplo de un fotobiorreactor de columna de burbujas para cultivo de microalgas. Tomado de [González-Lazo et al. \(2019\)](#).

Sistemas abiertos

En los sistemas de cultivo abiertos, el entorno de cultivo se encuentra expuesto a la atmósfera, lo que conlleva una baja productividad debido a la falta de control en condiciones clave como la temperatura y el pH. Esta apertura también los hace vulnerables a la invasión de microorganismos externos, por lo que son más adecuados para especies de microalgas resistentes.

Las ventajas de estos sistemas incluyen su costo de construcción y funcionamiento relativamente bajo. Sin embargo, presentan desventajas, como la baja productividad, la necesidad de grandes áreas de cultivo, la falta de control efectivo sobre las condiciones de cultivo, el riesgo de contaminación del medio de cultivo, la complejidad para controlar la temperatura, la dificultad para lograr una mezcla eficiente y la limitación de la luz.

Se muestran en la Figura. 2.2, algunos de los diferentes tipos básicos de Fotobiorreactores.

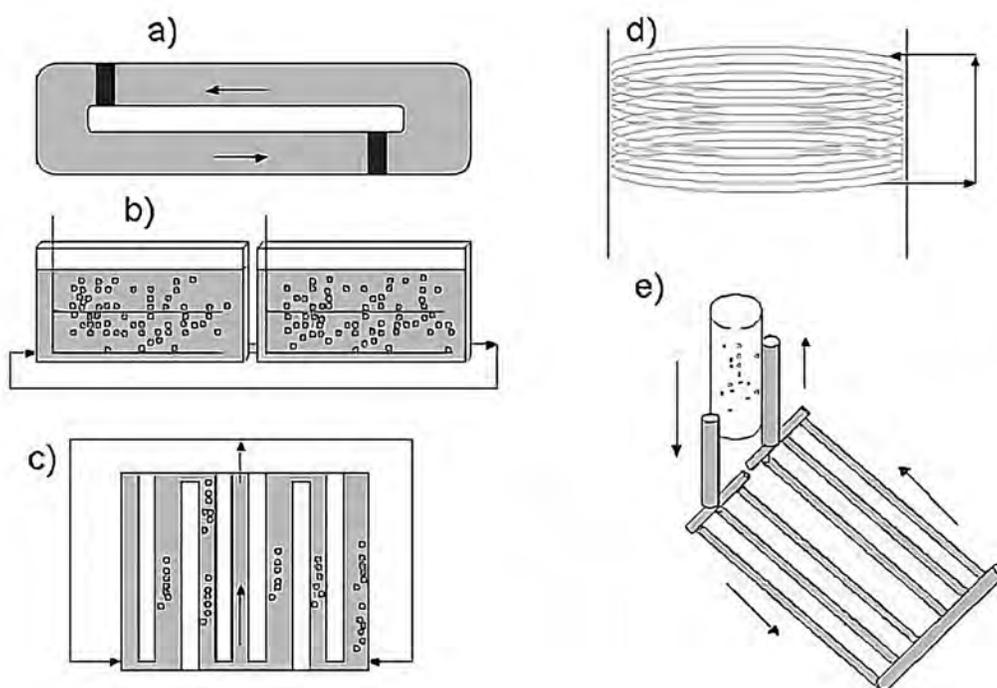


Figura 2.2: Tipos básicos de fotobiorreactores: a)Tipo carrusel, b)Tipo plano, c)Con iluminación interna, d)Tipo serpentín e)Tipo tubular. Tomado de [Cuao Arévalo and Martínez Cepeda \(2021\)](#).

Sistemas cerrados

En contraste con los sistemas abiertos, los sistemas cerrados mantienen el cultivo de microalgas completamente aislado del entorno exterior, lo que impide que el medio interno entre en contacto con la atmósfera. Esta separación total del entorno externo conlleva una reducción significativa de la contaminación y la invasión de especies externas, permitiendo un mayor control sobre las condiciones de cultivo y generando un mayor potencial de rentabilidad.

Entre las ventajas de estos sistemas se encuentra su alta productividad, la capacidad de producción continua, un control exhaustivo del crecimiento de las microalgas y una amplia área iluminada para optimizar la fotosíntesis. No obstante, presentan desventajas como mayores costos de inversión en comparación con los sistemas abiertos, mayor complejidad técnica y constructiva, dificultades para tratar acumulaciones de oxígeno y problemas relacionados con el estrés hidrodinámico.

2.2. Microalgas

Las microalgas (Figura 2.3), así como las cianobacterias son organismos unicelulares que tienen la capacidad de realizar la fotosíntesis y con ello producir biomasa, existen en medios principalmente acuáticos o a veces bajo tierra, las microalgas se caracterizan por ser seres fotoautotróficos: autótrofos porque utilizan el CO_2 como fuente inorgánica de carbono y fotótrofos porque usan la luz como fuente de energía, debido a que crecen con mayor rapidez que las plantas terrestres y debido a que tienen una facilidad de reproducción, ayudan a reducir el efecto invernadero [Sanz Martínez \(2019\)](#).

Las microalgas se presentan como una opción viable para obtener múltiples beneficios debido a su capacidad para convertir la luz solar y el dióxido de carbono en biomasa. Además contienen sustancias de alto valor biológico tales como proteínas, antioxidantes, vitaminas y minerales, por lo que, la biomasa generada puede ser utilizada para producir biodiesel.



Figura 2.3: Microalgas. Tomado de [UNAM \(2015\)](#).

2.3. Microalga *Nannochloropsis Oculata*

La microalga *Nannochloropsis oculata* es altamente destacada en la industria acuícola debido a su excepcional valor nutricional y versatilidad en aplicaciones. Esta especie microscópica pertenece a la clase *Eustigmatophyceae*, un grupo que se distingue por su contenido significativo de ácidos grasos polinsaturados (PUFAs), entre los que se incluyen el ácido eicosapentaenoico (EPA), el ácido araquidónico (ARA) y el docosahexaenoico (DHA) (Véase Figura 2.4).



Figura 2.4: Fotografía de la muestra de un cultivo de microalgas de tipo *Nannochloropsis Oculata*.

Además de su relevancia en la acuicultura, esta microalga ha despertado un gran interés en la industria de la alimentación humana y suplementos dietéticos debido a su alto contenido de nutrientes beneficiosos para la salud. Su cultivo rápido y eficiente en condiciones controladas ha llevado a investigaciones sobre su potencial en la producción de biocombustibles, bioplásticos y productos farmacéuticos, mostrando promesas en la sostenibilidad y la innovación tecnológica [Sánchez-Torres et al. \(2008\)](#).

2.4. Proceso de producción de biomasa

El proceso de producción de biomasa implica el uso de materia orgánica como fuente primaria, condiciones ambientales controladas para el crecimiento óptimo, la presencia de microorganismos o

cultivos específicos que generen la biomasa deseada, la ejecución de procesos biológicos o químicos adaptados, el empleo de equipamiento tecnológico especializado, una gestión continua y cuidadosa del proceso, así como un eventual post-procesamiento para obtener el producto final deseado según su uso previsto, ya sea como biocombustible, materia prima industrial o alimentación animal, entre otros [Sanz Martínez \(2019\)](#).

Por eso la importancia del uso de sistemas como los fotobiorreactores en este contexto. La Fig. 2.5, ilustra de manera general el proceso de generación de aceites a partir de microalgas, mostrando las etapas desde el cultivo en un Fotobiorreactor, hasta la extracción de los lípidos.

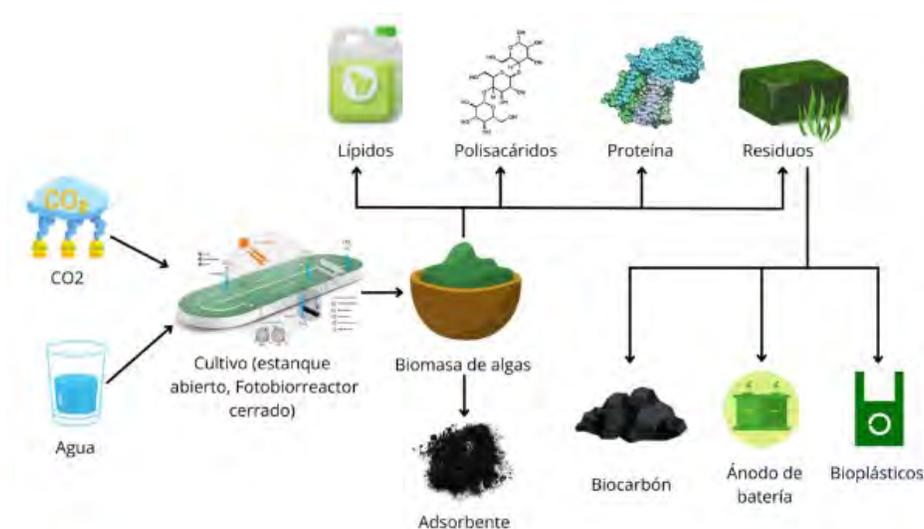
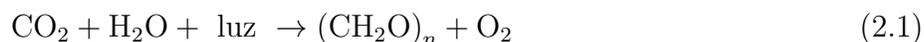


Figura 2.5: Opciones de proceso para cultivar microalgas y fabricar biomateriales a partir de microalgas. Tomado de [Steven et al. \(2022\)](#).

Las microalgas necesitan dióxido de carbono, luz y nutrientes inorgánicos para crecer. La reacción general para la fotosíntesis viene dada por la siguiente Ec 2.1.



Además de la concentración de CO₂ en un cultivo, los factores que afectan el proceso de reproducción de las microalgas son la temperatura, el pH, la luz, el mezclado adecuado, la cepa de cultivo y la densidad del cultivo [Arribas Jimeno et al. \(2020\)](#).

2.5. Control y monitoreo de Fotobiorreactores

El proceso de controlar y monitorear en estos sistemas implica supervisar y ajustar diversas condiciones ambientales, como la temperatura, la calidad y cantidad de luz, el pH, la concentración de nutrientes esenciales, la densidad celular y la velocidad de crecimiento de los microorganismos. El control preciso de estos factores garantiza un crecimiento saludable y eficiente de los microorganismos en el fotobiorreactor [Romero Carrillo et al. \(2021\)](#).

La aplicación de estrategias avanzadas de control, como sistemas adaptativos o algoritmos predictivos, ha demostrado ser efectiva para optimizar el funcionamiento de los fotobiorreactores. Estos sistemas posibilitan ajustes automáticos y dinámicos en respuesta a los cambios del entorno, lo que contribuye a maximizar la eficiencia y reducir los costos operativos. En la siguiente Fig. 2.6 se puede ver el diagrama a bloques de un sistema de control realimentado.

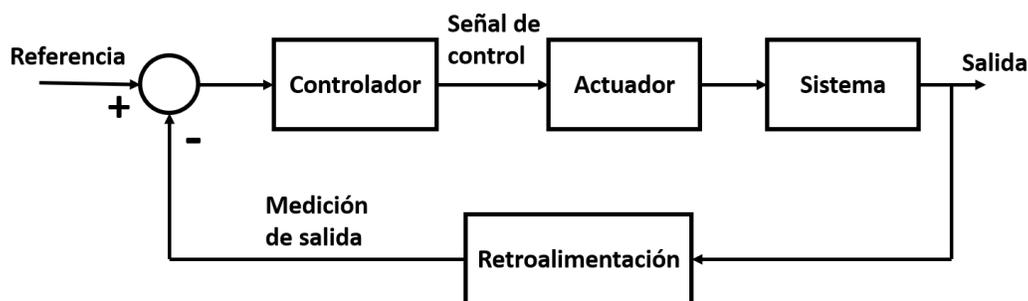


Figura 2.6: Diagrama a bloques de un sistema de control retroalimentado.

El monitoreo se puede llevar a cabo mediante sistemas automatizados y sensores, permitiendo recolectar datos en tiempo real sobre estas variables. Esta retroalimentación ajusta las condiciones y mantener un entorno óptimo, dado que incluso pequeñas variaciones pueden impactar significativamente la eficiencia del proceso de producción de biomasa.

2.6. Salinidad, pH, luminiscencia, temperatura, mezcla

Los fotobiorreactores dependen de varios subsistemas para mantener un entorno favorable para el crecimiento y la productividad de las microalgas cada uno enfocado a una tarea específica trabajando en sinergia con los demás (Véase Figura 2.7).

El subsistema de gestión de salinidad por ejemplo controla la concentración de sales en el medio de cultivo, puede ser mediante la inyección de agua destilada y la regulación del pH con la adición de dióxido de carbono, garantizando así condiciones estables para el metabolismo celular de las microalgas. Un subsistema de aireación o mezcla garantiza una distribución uniforme de las microalgas dentro de un fotobiorreactor. Este sistema facilita la oxigenación del medio y la circulación de nutrientes, lo que promueve un crecimiento saludable de los microorganismos.

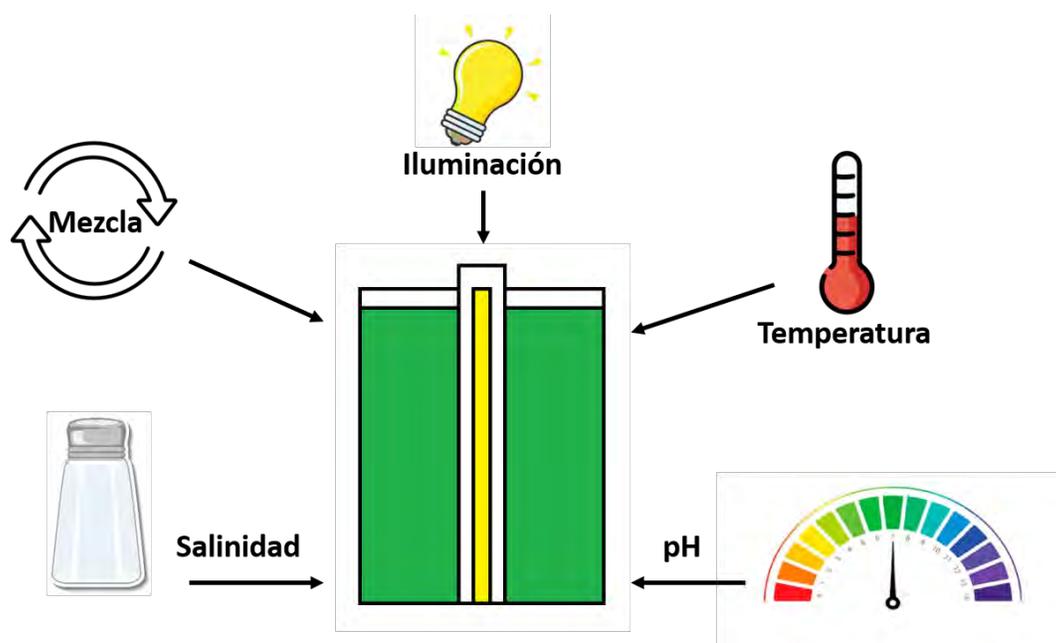


Figura 2.7: Subsistemas para mantener un entorno favorable para el crecimiento y la productividad de las microalgas.

La importancia de una buena mezcla evita la estratificación de las microalgas y asegura que cada célula reciba una exposición homogénea a la luz, optimizando la producción de biomasa y metabolitos. Un sistema de control de temperatura mantiene la temperatura del medio de cultivo dentro de un rango, para favorecer el crecimiento de las microalgas y la eficiencia de la fotosíntesis. Un control preciso de la temperatura también ayuda a prevenir fluctuaciones que podrían afectar negativamente la salud y la productividad de las microalgas.

En conjunto, estos subsistemas crean un ambiente estable y propicio, maximizando la producción de biomasa.

2.7. Consumo eléctrico en Fotobiorreactores

El consumo eléctrico de los fotobiorreactores depende de varios factores, por ejemplo, su diseño, su volumen, las condiciones de operación y la robustez de sus sistemas para satisfacer dichas condiciones. Obtener el consumo eléctrico en fotobiorreactores requiere de aplicar una metodología que permita conocer tanto el consumo eléctrico nominal como el consumo eléctrico real del fotobiorreactor en condiciones reales de operación. [García et al. \(2020\)](#) La metodología para el consumo eléctrico consiste en tres pasos, la identificación de los actuadores que conforman el sistema, la obtención de las potencias eléctricas y los tiempos de operación que conforman el consumo eléctrico, y la aplicación de la ley de Watt/Joule para el cálculo y la evaluación de dicho consumo eléctrico.

2.8. Ley de Watt/Joule

En el cálculo y la evaluación del consumo eléctrico nominal o real de un sistema, es necesario la aplicación de la ley de Watt/Joule, la cual dicta que la energía es la integral de la potencia respecto al tiempo:

$$E = \int P_{\text{act}} dt \quad (2.2)$$

Donde:

- E representa la energía consumida por el dispositivo eléctrico en julios (J).
- P_{act} es la potencia activa o real del dispositivo en kilovatios (kW).
- dt es un elemento de tiempo en segundos (s).
- El símbolo \int denota la integral, que en este contexto representa la acumulación de la potencia a lo largo del tiempo para calcular la energía total consumida.

Tomando en cuenta que:

$$\text{Consumo total de energía} = \sum_{i=1}^n (P_{\text{act}_i} \times \text{Tiempos de operación}_i) \quad (2.3)$$

Donde:

P_{act_i} es la potencia activa o real del sistema i .

t_i es el tiempo de operación del sistema i .

n es la cantidad total de sistemas.

i es el índice utilizado para cada sistema, variando desde 1 hasta n .

La energía se mide en Watts por segundo, como lo indica la fórmula

$$J = s \cdot W \quad (2.4)$$

La ley de Joule establece la cantidad de calor que se genera en un conductor con resistencia cuando una corriente pasa a través de él, expresada por la fórmula:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (2.5)$$

Relacionando esto con la ley de Ohm, representada por:

$$V = I \cdot R \quad (2.6)$$

Y la ley de Watt, dada por:

$$P = V \cdot I \quad (2.7)$$

Se obtiene la equivalencia entre Watt y Joule, lo cual queda representado por la fórmula:

$$E = P \cdot t \quad (2.8)$$

Donde I es la corriente en amperes (A), R la resistencia en ohmios (Ω), t el tiempo en segundos (s), V el voltaje en voltios (V), P la potencia en Watts (W) y E los kilovatios por hora (kWh).

2.9. Factor de Potencia

El factor de potencia (FP) en sistemas eléctricos de corriente alterna (AC), indica la eficiencia con la que se utiliza la energía eléctrica.

Se define como el cociente entre la potencia real, que realiza trabajo útil, y la potencia aparente, que es la combinación vectorial de la potencia real y la potencia reactiva.

El triángulo de potencia es una representación que muestra la relación entre la potencia real, la potencia reactiva y la potencia aparente en un sistema de AC (Véase Figura 2.8).

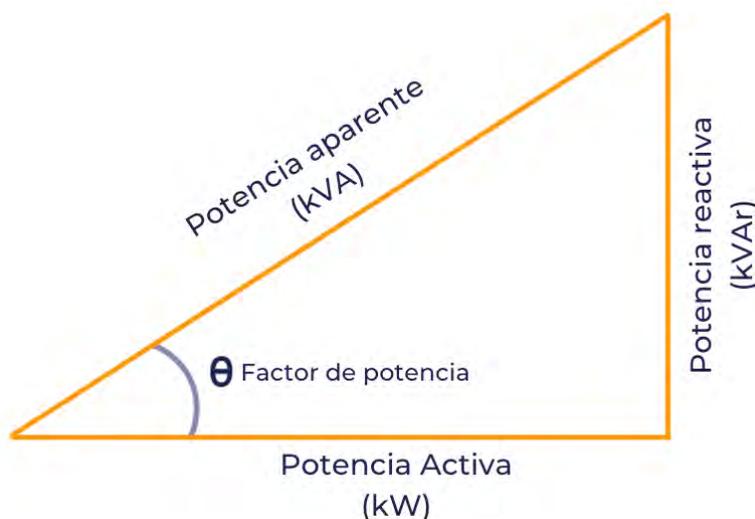


Figura 2.8: Representación del triángulo de potencia que muestra la relación entre la potencia real, la potencia reactiva y la potencia aparente en un sistema de AC. Tomado de [Giha Yidi \(2023\)](#).

Matemáticamente, el factor de potencia es el coseno del ángulo de fase (ϕ) entre la corriente y el voltaje en un circuito de AC.

Potencia Real o Activa (P_{act}): Es la potencia que realiza un trabajo útil, medida en vatios (W).

Potencia Aparente (S): Es la combinación de la potencia real y la potencia reactiva, medida en voltio-amperios (VA). La potencia aparente se calcula como:

$$S = \sqrt{P_{\text{act}}^2 + Q^2} \quad (2.9)$$

Potencia Reactiva (Q): Es la potencia que no realiza un trabajo útil, pero es necesaria para mantener el campo magnético en equipos inductivos como motores y transformadores, medida en voltio-amperios reactivos (VAR). La potencia reactiva se calcula como:

$$Q = \sqrt{S^2 - P_{\text{act}}^2} \quad (2.10)$$

Las siguientes fórmulas describen las relaciones entre las potencias en el triángulo de potencia:

$$S = V \cdot I \quad (2.11)$$

$$P_{\text{act}} = V \cdot I \cdot \cos(\phi) \quad (2.12)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P_{\text{act}}^2} \quad (2.13)$$

$$\text{FP} = \cos(\phi) = \frac{P_{\text{act}}}{S} \quad (2.14)$$

Nota:

- **FP = 1 (o 100 %)**: Toda la potencia está siendo utilizada para trabajo útil.
- **FP = 0**: Toda la potencia está siendo almacenada y liberada en el campo magnético o eléctrico del componente reactivo y no se está realizando ningún trabajo útil.

Un factor de potencia bajo implica que una gran parte de la potencia total está siendo utilizada para mantener campos magnéticos en lugar de realizar trabajo útil. Esto puede traducirse a pérdidas de energía.

Capítulo 3

3. Metodología

3.1. Características de los subsistemas

Este capítulo describe el fotobiorreactor del caso de estudio, se trata de un fotobiorreactor de tipo columna vertical, un dispositivo que acelera el proceso de producción de biomasa microalgal mediante la automatización y el control de los subsistemas que lo complementan creando todo un sistema complejo que opera a través de varios subsistemas, que incluyen el control de la salinidad, el control de pH, el control de la mezcla (o aireación), el control de la iluminación y el control de la temperatura.

Se muestran los diferentes lazos de control asociados a cada subsistema, se explica cómo interactúan entre sí para mantener las condiciones dentro de todo el sistema en general y particularmente, se muestra un análisis profundo del subsistema de control de temperatura, ya que se ha identificado como el principal contribuyente al consumo eléctrico total del fotobiorreactor.

Se proporciona una descripción del controlador que se encuentra dentro del subsistema de temperatura o subsistema térmico, incluyendo su diseño y funcionamiento. Además, se presenta un análisis de los datos obtenidos en varios experimentos que evalúan el consumo eléctrico tanto del sistema en general, como del subsistema térmico en particular.

Se identifican las oportunidades de mejora y optimización en términos de consumo eléctrico y se proponen dos estrategias para mejorar los costes de producción y cosecha de biomasa microalgal.

3.2. Subsistemas y lazos de control del fotobiorreactor

A continuación se muestran los lazos de control de los subsistemas, con los respectivos elementos que en conjunto mantienen la estabilidad, el control y el buen funcionamiento del fotobiorreactor garantizando un ambiente propicio para la salud y la reproducción de las microalgas

■ Control de salinidad

Dentro del fotobiorreactor la gestión de la **salinidad** regula la concentración de sales disueltas en el agua de mar, (ver Figura 3.1), en el subsistema este control de salinidad es controlado a través del suministro de agua destilada con una bomba peristáltica.

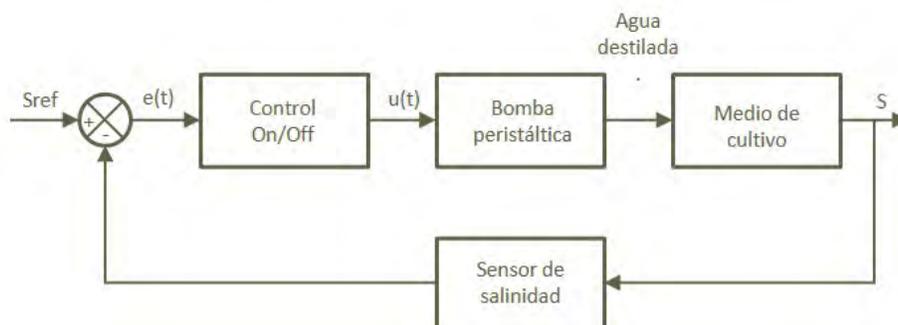


Figura 3.1: Diagrama a bloques del lazo de control del subsistema de salinidad del medio de cultivo.

■ Control de pH

El subsistema de control de **pH** (Ver Figura 3.2), controla la acidez o alcalinidad del medio de cultivo y este control se logra con la inyección de dióxido de carbono a través de una bomba de diafragma y una válvula solenoide.

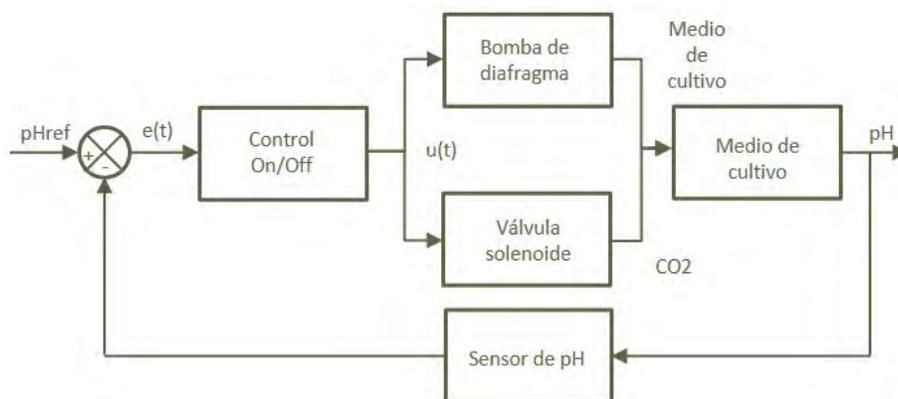


Figura 3.2: Diagrama a bloques del lazo de control del subsistema de pH en el medio de cultivo.

Estos dos subsistemas contribuyen a mantener la homeostasis (equilibrio) y la estabilidad bioquímica, respectivamente.

▪ **Control de mezcla (o aireación)**

El subsistema de aireación o **mezcla** (Ver Figura 3.3), mueve el cultivo mediante el suministro de aire a través de un compresor.

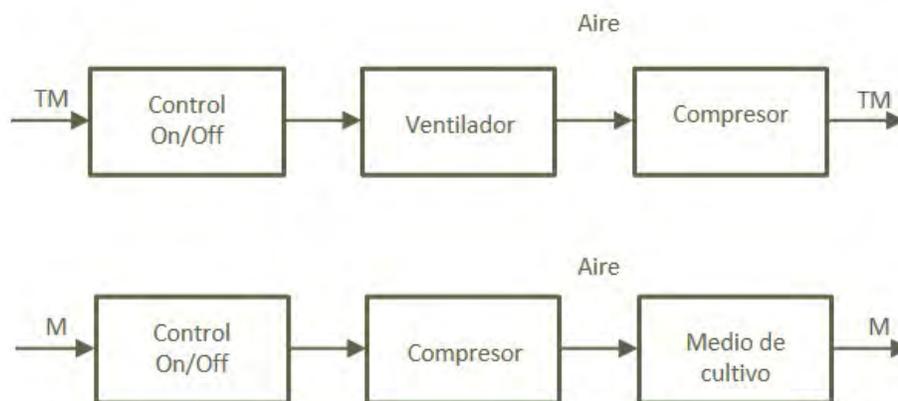


Figura 3.3: Diagrama a bloques del lazo de control del subsistema de (aireación) o mezcla del medio de cultivo.

Al mismo tiempo el compresor cuenta con su propio sistema de enfriamiento que se logra a través de un ventilador acoplado para evitar sobrecalentamientos durante el funcionamiento del compresor.

▪ **Control de temperatura**

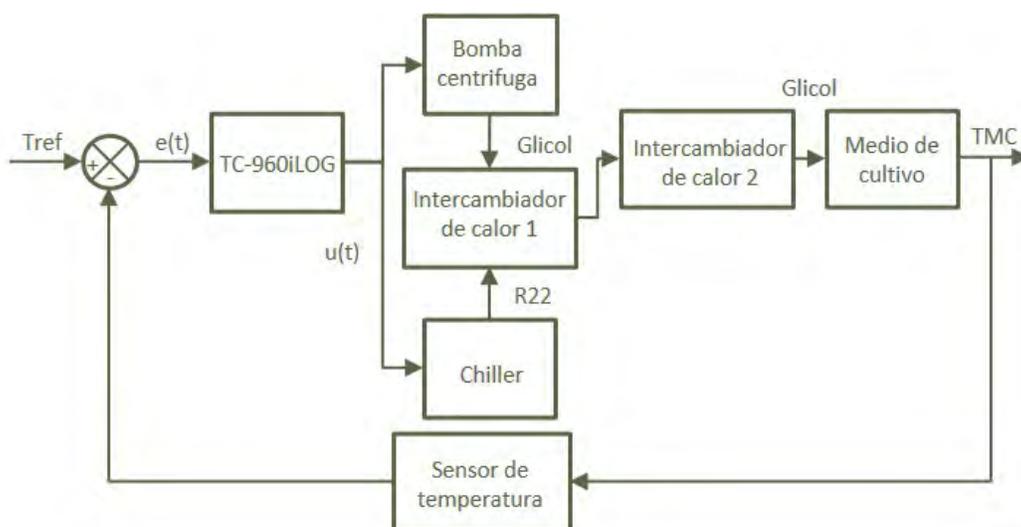


Figura 3.4: Diagrama a bloques del lazo de control del subsistema de control de temperatura.

El subsistema de control de **temperatura** (Ver Figura 3.4), está compuesto por una bomba y un *chiller* que a través de la circulación de un líquido refrigerante atraviesan dos intercambiadores de calor, regulando la temperatura del medio de cultivo.

Como objeto de estudio, este subsistema se abordará con más detalle en las secciones subsecuentes del documento.

■ Control de iluminación

El subsistema de **iluminación** (Ver Figura 3.5), está compuesto por una lámpara hecha con tiras de LED inmersa en el medio de cultivo y protegida con un cilindro acrílico que cuenta con un sistema de extracción de aire caliente, a través de un soplador, haciendo que el calor que produce la lámpara no afecte a la temperatura del medio de cultivo.

Este mismo subsistema a su vez cuenta con un soplador que se encarga de extraer el aire caliente que se genera por la lámpara.

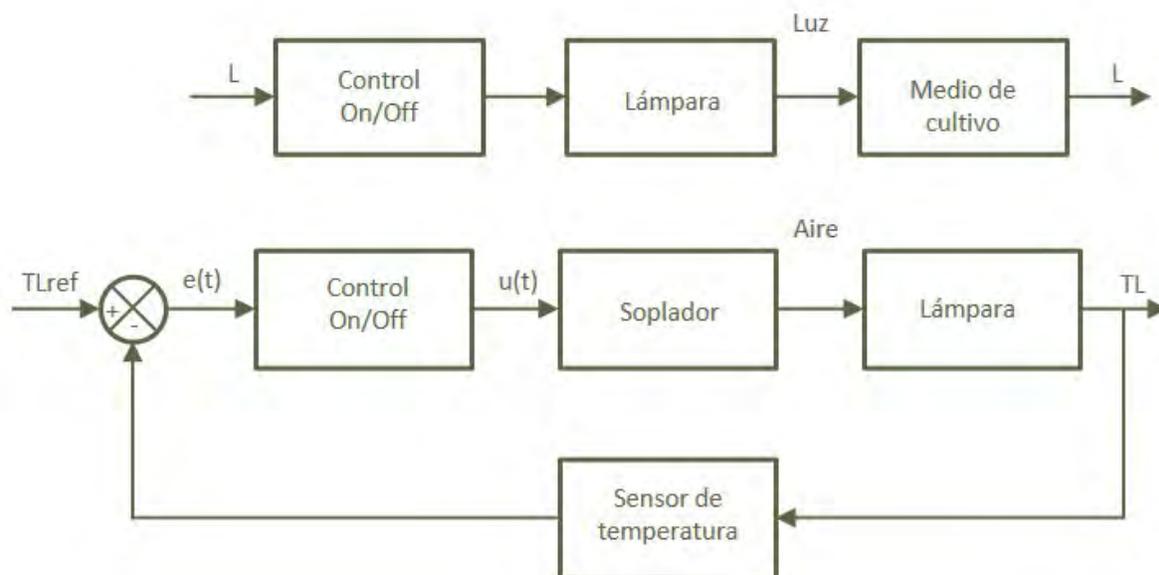


Figura 3.5: Diagrama a bloques del lazo de control del subsistema de iluminación del medio de cultivo.

3.3. Interconexión de subsistemas en el fotobiorreactor

Descripción general del sistema en funcionamiento

Los subsistemas mediante los que este Fotobiorreactor opera son: Salinidad, pH, aireación, iluminación y temperatura, interrelacionados, cada uno cumpliendo una función particular para acelerar el proceso de producción de la microalga de tipo *Nannochloropsis Oculata*.

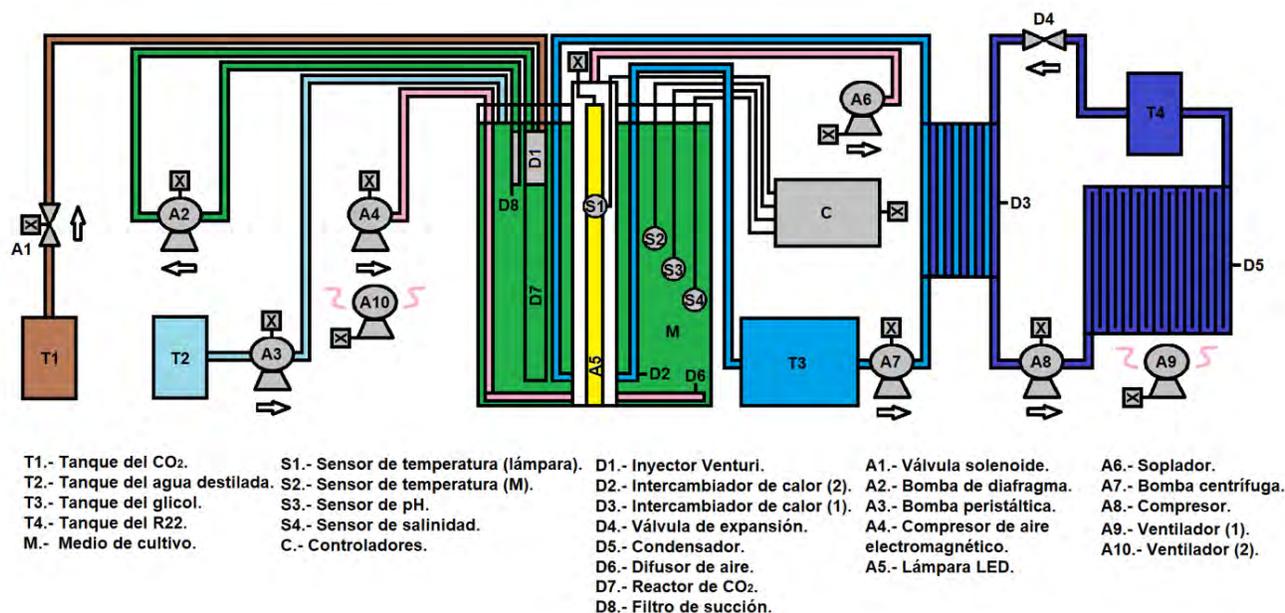


Figura 3.6: Diagrama general del control del bioproceso de producción microalgal en el fotobiorreactor [Valenzuela Páez et al. \(2023\)](#).

El diagrama general de control del bioproceso de producción microalgal del fotobiorreactor de estudio, se representa en la Figura 3.6, en el se identifican los actuadores con la letra (A) de los diferentes sistemas, además se incluyen los dispositivos mecánicos con la letra (D), los depósitos auxiliares con la letra (T). Para el control de cada variable del medio de cultivo se utiliza la letra (M), los sensores se identifican con la letra (S), conectados a una unidad de control (C) que a su vez gobierna a los actuadores que consumen energía eléctrica en función de su régimen de operación. Cada uno de estos subsistemas en su integración dentro del sistema general, demuestran la complejidad y sinergia que se necesita para lograr un sistema de cultivo de microalgas eficaz.

3.4. Subsistema de control de temperatura en el Fotobiorreactor

Considerando lo ya anteriormente mencionado, el subsistema de control de temperatura entonces, está compuesto de dos actuadores.

- Bomba
- *Chiller*

Las características electrónicas de ambos se muestran en la siguiente tabla 7.

Cuadro 7: Actuadores que conforman al sistema térmico de enfriamiento del fotobiorreactor

Sistema	Actuador	Voltaje (V)	Corriente (A)	P_{nom} (W)
Sistema térmico de enfriamiento primario	<i>Chiller</i>	220	7.27	1600
Sistema térmico de enfriamiento secundario	Bomba 1	127	1.18	120

La bomba se encarga de mover o hacer circular el glicol que se encuentra almacenado en un recipiente de material tipo adiabático, a través de todo el sistema por unas tuberías que atraviesan el interior del *chiller* (intercambiador de calor primario) para ser enfriado por el intercambiador de placas por medio de un refrigerante de tipo R22.

Después atraviesa el medio de cultivo que se encuentra dentro del fotobiorreactor (intercambiador de calor secundario) por medio de las tuberías logrando así el intercambio térmico.

Este subsistema cuenta con dispositivos mecánicos y auxiliares, cuenta con una válvula de expansión que se encarga de expandir el refrigerante R22 en el intercambiador de calor primario, extrayendo el calor del refrigerante glicol, un presostato como dispositivo de operación y de protección ante alguna pérdida de refrigerante para evitar el congelamiento del refrigerante.

En el diagrama de la Figura 3.7, se observa el diagrama esquemático del sub-sistema de control de temperatura del Fotobiorreactor, mostrando los componentes que lo conforman.

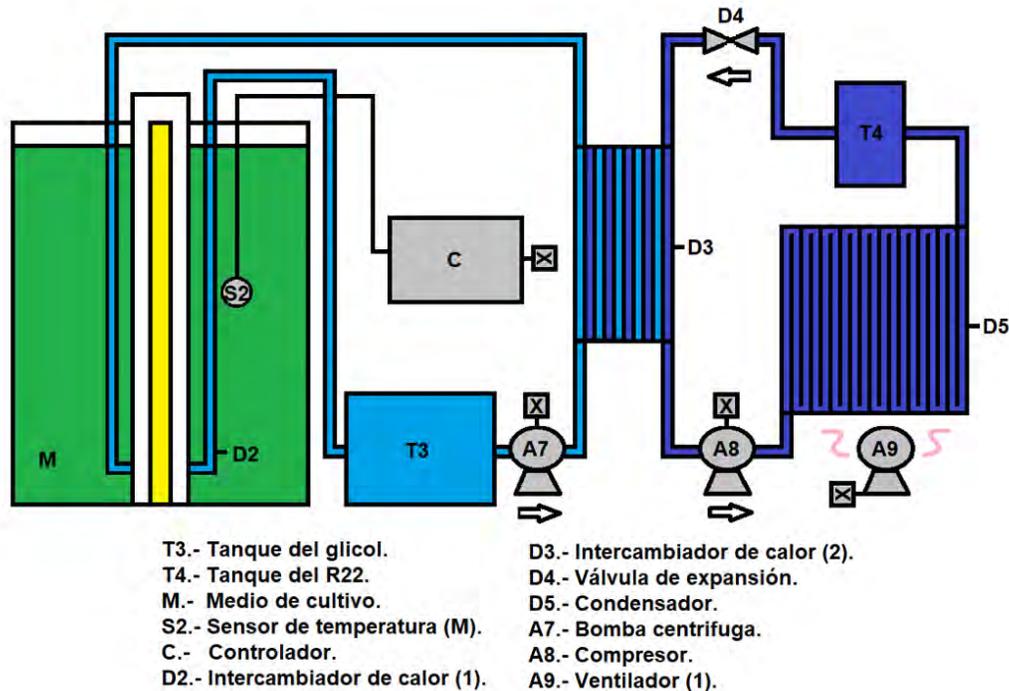


Figura 3.7: Diagrama esquemático del subsistema de temperatura. Tomado de [Valenzuela Páez et al. \(2024\)](#).

En este diagrama, se pueden observar más a detalle las partes por las que está compuesto el segundo actuador (*chiller*), que es el intercambiador de placas que trabaja con el refrigerante de tipo R22 y que, al circular a contracorriente con el glicol a través de él, se encarga de mantener el glicol dentro de un margen de temperatura adecuada.

3.5. Descripción del controlador

El controlador es de tipo **TC-960Ri LOG** de la marca *Full Gauge Controls®*. Este dispositivo monitorea, la temperatura del medio de cultivo, garantizando que se mantenga dentro de los rangos deseados, cuenta con una comunicación tipo serie, hacía un monitor en donde se almacenan en una base los datos obtenidos mediante el *software Sitrad®* como se ilustra en la Figura 3.8. Cuando se alcanza o detecta la temperatura de referencia dentro del medio de cultivo, el controlador enciende o apaga los dos actuadores simultáneamente.

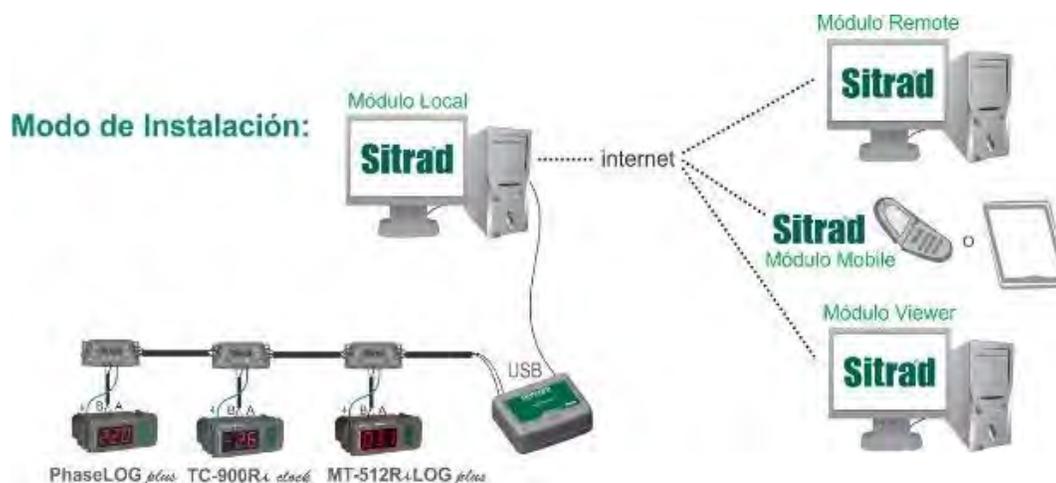


Figura 3.8: Diagrama de conexión de dispositivos *Full Gauge®* y comunicación con el *software Sitrad®*. Tomado de Controls (2023).

Los datos se obtienen debido a que cada uno de los módulos de Sitrad cuenta con un par de sensores sumergibles, dando un total de seis sensores que estratégicamente fueron instalados, el software registra los datos de temperatura de los fluidos refrigerantes.

La Figura 3.9, muestra como están enumerados los tres sensores para identificarlos y mostrar en el gabinete de control, las temperaturas de:

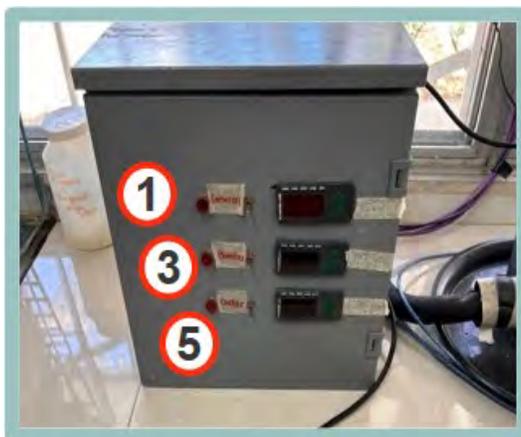


Figura 3.9: Gabinete de control.

Temperatura del medio de cultivo (Sensor 1), temperatura a la que ingresa el glicol al medio de cultivo (Sensor 3), temperatura a la que se encuentra el refrigerante R22 en la entrada (Sensor 5).

El controlador TC-960Ri LOG, cuenta con un sensor ubicado dentro del medio de cultivo para una medición precisa de la temperatura.

La Figura 3.10, representa un diagrama que muestra como el sensor número 1 está asociado con el controlador, midiendo la temperatura para que cuando se rebase o se alcance la temperatura del medio de cultivo, este encienda o apague los actuadores, cerrando así el lazo de control, el sensor 2 mide la temperatura del depósito de glicol, los sensores 3 y 4 miden la temperatura de entrada y salida del glicol refrigerante al medio de cultivo, y los sensores 5 y 6 miden la entrada y salida del refrigerante R22.

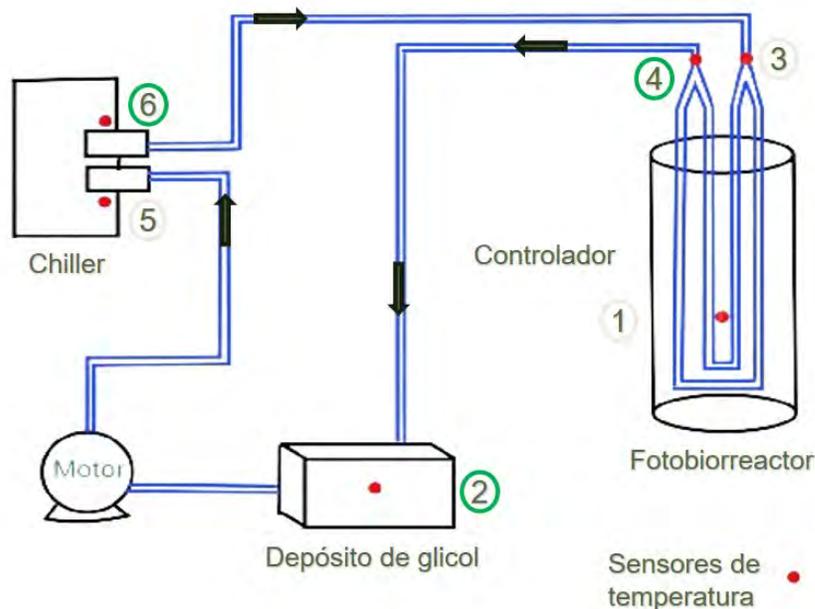


Figura 3.10: Diagrama representativo de la ubicación del controlador.

3.6. Metodología para la obtención del consumo eléctrico del Fotobiorreactor

Esta metodología, representada en la Figura 3.11, fue la guía para el análisis y la interpretación de los datos recopilados con la finalidad de identificar el consumo de cada uno de los subsistemas para analizar las áreas de oportunidad, mejorar la eficiencia operativa y reducir los costos de operación.

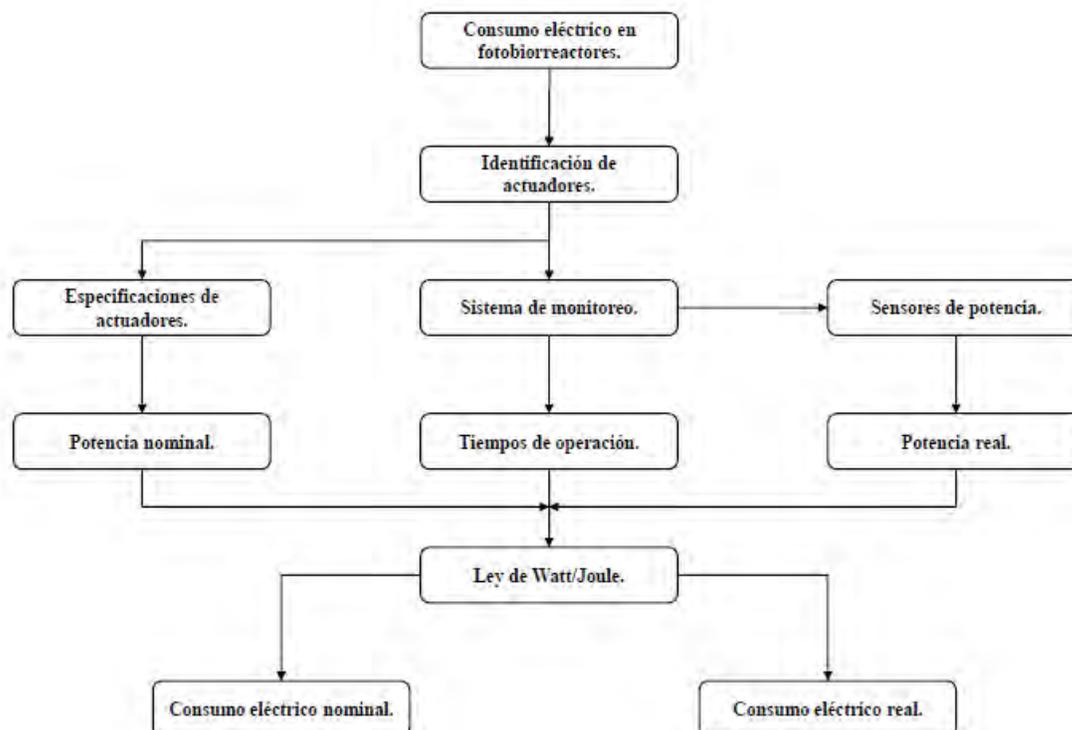


Figura 3.11: Metodología para determinar el consumo eléctrico nominal y real de un fotobiorreactor.

A través de esta metodología, se puede obtener el consumo eléctrico total del sistema, tanto de manera teórica como experimental.

3.6.1. Análisis preliminar de datos para la identificación del consumo eléctrico

Para el primer análisis de datos, se llevó a cabo la búsqueda y recopilación de los datos registrados de un periodo experimental de cosecha de biomasa que se realizó durante el mes de noviembre del año 2022.

Debido a que la cantidad de datos recopilados fue tan grande, se decidió dividir los datos en intervalos de siete días que es la cantidad recomendada para la cosecha de biomasa en este Fotobiorreactor, se emplearon métodos estadísticos y se analizaron cuáles fueron los tiempos de intervalo de encendido de cada subsistema para determinar el consumo eléctrico nominal de cada subsistema y del sistema en general.

Se aplicaron medidas de tendencia central, considerando $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ como el conjunto de tiempos de intervalo encendido de un día específico, donde n representa el total de observaciones registradas.

Para la media (Promedio)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.1)$$

Para la desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.2)$$

3.6.2. Medidas de tendencia central de los datos recopilados del periodo de cosecha de biomasa del Fotobiorreactor del 18/10/2022 al 24/10/2022

Para el promedio se calcularon todos los valores por día (n) y se dividieron entre el número de días (7) por semana ($n = 7$).

Media (promedio) del consumo eléctrico diario de cada subsistema:

Para el subsistema de temperatura:

$$\bar{x}_{\text{temperatura}} = \frac{5.126 + 5.258 + 6.089 + 4.862 + 5.012 + 4.922 + 4.669}{7} = \frac{35.938}{7} = 5.134 \text{ kWh} \quad (3.3)$$

Para el subsistema de iluminación:

$$\bar{x}_{\text{iluminación}} = \frac{2.7648 \times 7}{7} = 2.7648 \text{ kWh} \quad (3.4)$$

Para el subsistema de aireación:

$$\bar{x}_{\text{aireación}} = \frac{1.9368 \times 7}{7} = 1.9368 \text{ kWh} \quad (3.5)$$

Después de obtener los consumos promedios se calculó un consumo total de energía sumando los consumos diarios de cada sistema durante los siete días (Ec.3.6).

$$\text{Consumo total} = \sum_{i=1}^7 (\text{Temperatura}_i + \text{Iluminación}_i + \text{Aireación}_i) \quad (3.6)$$

Dando como resultado un consumo eléctrico total de 68.8492 kWh (Ec.3.7).

$$\text{Consumo total} = (5.12 + 5.25 + 6.08 + 4.86 + 5.01 + 4.92 + 4.66) + (2.7648 \times 7) + (1.9368 \times 7)$$

$$\text{Consumo total} = 35.938 + 19.3536 + 13.5576 = 68.8492 \text{ kWh} \quad (3.7)$$

Con la base de datos, también se analizaron los conteos celulares registrados, para observar el crecimiento microalgal y analizar el consumo eléctrico con relación a la producción de biomasa.

El consumo eléctrico por subsistema y conteo celular que se obtuvo se observan en la tabla 8.

Se realizó un análisis de los resultados recopilados sobre el consumo eléctrico, con el objetivo de evaluar la eficiencia y el rendimiento del Fotobiorreactor.

Cuadro 8: Consumo eléctrico por subsistema y conteo celular diario del 18/10/2022 al 24/10/2022

Sistema	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
Temperatura	5.126	5.258	6.089	4.862	5.012	4.922	4.669
Iluminación	2.7648	2.7648	2.7648	2.7648	2.7648	2.7648	2.7648
Aireación	1.9368	1.9368	1.9368	1.9368	1.9368	1.9368	1.9368
Conteo celular ($\times 10^6$ c/ml)	9.7	12.31	12.30	14.71	17.03	17.91	18

Producción de biomasa y consumo total:

Cálculo de la producción de biomasa por cada kWh de energía consumida

Producción de biomasa por kWh:

$$\frac{\text{Biomasa producida}}{\text{Consumo total}} = \frac{0.9772 \text{ g}}{68.8492 \text{ kWh}} = 0.0142 \text{ g/kWh}$$

En este escenario, se registró una producción de biomasa microalgal seca de 0.9772 gramos, por cada kWh de energía consumida y un consumo eléctrico total de 68.8492 kWh.

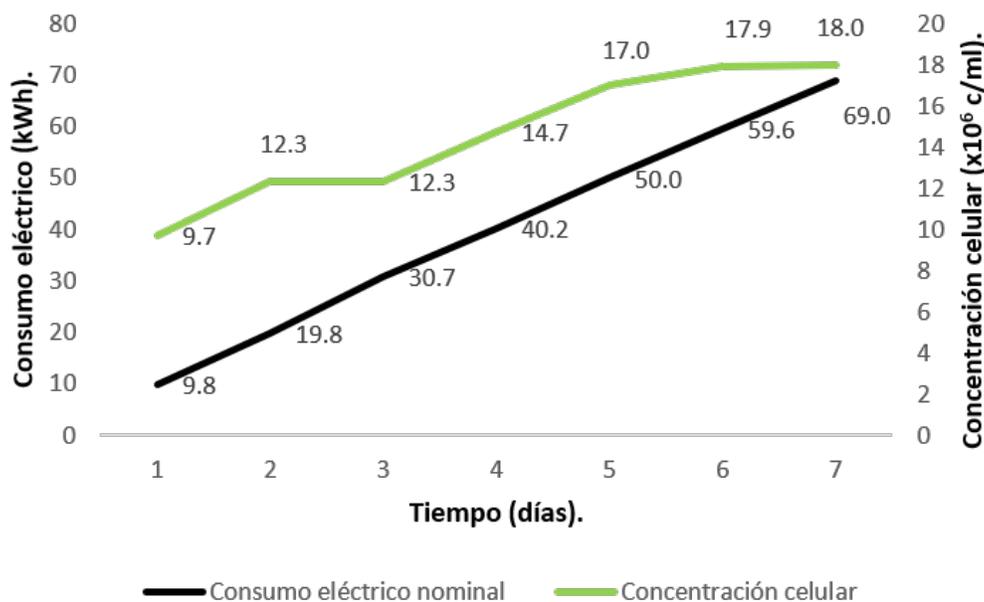


Figura 3.12: Incremento del consumo eléctrico nominal vs concentración celular del 18/10/2022-24/10/2022.

La gráfica de la Figura 3.12, es una representación, de la relación entre estos dos parámetros mostrando de manera evidente cómo el resultado del incremento en la producción celular, provocaba un enorme gasto en el consumo eléctrico de todo el sistema.

La tabla 9 resume las especificaciones eléctricas, el tiempo de operación de los actuadores y el consumo eléctrico nominal del sistema. Con estos datos se puede ver la demanda energética del Fotobiorreactor durante su funcionamiento. La tabla sirve como punto de partida para la evaluación continua del rendimiento energético del sistema.

En la tabla se muestran los actuadores que componen cada subsistema. En este caso, el pH y la salinidad no se controlaron, por lo que no hubo registros en la base de datos de los parámetros de estos dos subsistemas.

Cuadro 9: Resumen de potencias y consumo eléctrico nominal del Fotobiorreactor

Subsistema	Actuador	Potencia real o activa (kW)	Tiempo de operación (h)	CEN (kWh)
Temperatura	<i>chiller</i>	1.6	20.809	33.2944
	Bomba P.	0.127	20.809	2.6427
Iluminación	Lámpara LED	0.1152	168	19.3536
	Soplador	0.060	1.901	0.1140
Mezcla	Compresor de aire	0.060	168	10.08
	Ventilador	0.0207	168	3.4776
pH	Válvula solenoide	0.024	-	-
	Bomba de diafragma	0.0048	-	-
Salinidad	Bomba peristáltica	0.0048	-	-

3.6.3. Resumen de hallazgos

A partir del análisis realizado en este estudio, se identificó que dentro del conjunto de subsistemas, el subsistema de control de temperatura destaca como el principal generador de consumo eléctrico en el fotobiorreactor.

Los valores de la potencia de los actuadores se obtuvieron a través de las especificaciones de la ficha técnica de los dispositivos. Dado este hallazgo, se justifica la necesidad de realizar un análisis más detallado del sub-sistema de control de temperatura comenzando con la desviación estándar y el rango del consumo eléctrico diario del subsistema de control de temperatura utilizando la fórmula de la Ec. 3.8.

Desviación estándar del consumo eléctrico del subsistema de control de temperatura

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.8)$$

Donde: n es el número total de observaciones.

x_i son los valores individuales de las observaciones.

\bar{x} es la media de las observaciones.

En este caso, tenemos dos conjuntos de datos que sumaremos al final para obtener la desviación estándar total. Comencemos por calcular cada conjunto por separado.

Primero, calculamos el primer conjunto de valores:

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{1}{7} ((-0.008)^2 + (0.124)^2 + (0.955)^2)}$$

Expandiendo los términos dentro de la raíz cuadrada:

$$= \sqrt{\frac{1}{7} (0.000064 + 0.015376 + 0.912025)}$$

Sumando los términos dentro de la raíz cuadrada:

$$= \sqrt{\frac{1}{7} \times 0.927465} \approx \sqrt{0.132495} \approx 0.364 \text{ kWh}$$

Luego, calculamos el segundo conjunto de valores:

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{1}{7} ((-0.272)^2 + (-0.122)^2 + (-0.212)^2 + (-0.465)^2)}$$

Expandiendo los términos dentro de la raíz cuadrada:

$$= \sqrt{\frac{1}{7} (0.073984 + 0.014884 + 0.044944 + 0.216225)}$$

Sumando los términos dentro de la raíz cuadrada:

$$= \sqrt{\frac{1}{7} \times 0.350037} \approx \sqrt{0.0500053} \approx 0.224 \text{ kWh}$$

Finalmente, sumamos ambos resultados para obtener la desviación estándar total del subsistema de control de temperatura:

$$\sigma_{\text{temperatura}} = \sigma_1 + \sigma_2 \approx 0.364 \text{ kWh} + 0.224 \text{ kWh} \approx 0.588 \text{ kWh}$$

3.7. Metodología para la obtención del consumo eléctrico nominal por día del subsistema de control de temperatura

Se extendió la investigación para para la obtención del consumo eléctrico en kWh por día, se diseñó y ejecutó en el software MatLab un código de programación que funciona como lo expresa el siguiente diagrama de la Figura 3.13.

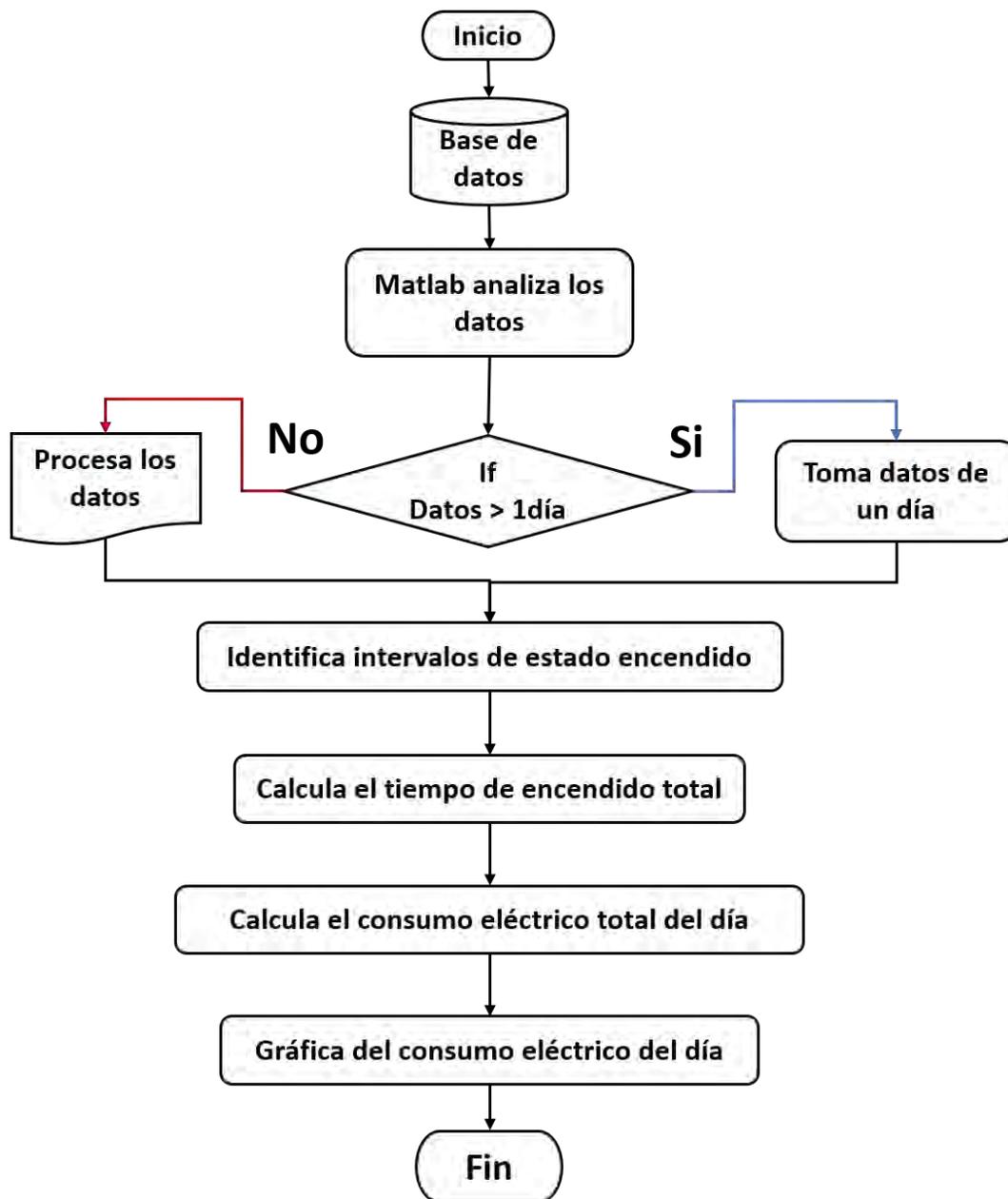


Figura 3.13: Funcionamiento del código diseñado en MatLab.

3.8. Análisis de datos del subsistema de control de temperatura

El comportamiento del subsistema de control de temperatura se analizó durante un periodo de 24 días en el mes de noviembre. Los datos de la tabla 10, reflejan los resultados obtenidos.

En la tabla, la columna D-Max representa el tiempo de duración máxima, la columna D-Min refleja el tiempo de duración mínima y la columna T-P indica el tiempo promedio de encendido del sistema en segundos (s), asimismo, la columna T-ON registra el número total de veces que se encendió el subsistema, mientras que la columna C.E.T muestra el consumo eléctrico total generado, todos los datos durante un periodo de 24 horas (1 día).

Cuadro 10: Resultados del sistema de control de temperatura durante 24 días

Días	D-Max s	D-Min s	T-P s	T-ON #	C.E.T kWh
1	133	107	118	71	4.028
2	127	108	118	73	4.068
3	127	111	118	72	4.064
4	217	107	120	72	4.132
5	128	107	128	72	4.039
6	128	58	117	62	3.428
7	127	110	116	51	2.780
8	128	105	128	28	1.471
9	128	108	118	71	4.066
10	127	107	118	70	3.912
11	126	108	117	70	3.870
12	128	107	116	69	3.799
13	132	106	117	79	4.389
14	132	107	118	87	4.871
15	130	108	119	90	5.061
16	125	107	115	78	4.235
17	129	94	114	82	4.501
18	128	107	115	79	4.311
19	128	109	117	74	4.104
20	129	108	119	68	3.82
21	133	112	118	66	3.822
22	128	107	116	69	3.979
23	154	105	122	71	4.052
24	117	107	120	72	4.032

Con los datos obtenidos se aplicaron medidas de tendencia central para cada columna de los datos.

Para la columna de los de datos duración máxima (D-Max) que se refiere al tiempo máximo registrado que duro encendido el subsistema de control de temperatura durante el período de 24 días.

Media:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{133 + 127 + \dots + 154 + 117}{24} = 131.33 \text{ s}$$

$$\text{Mediana} = \frac{128 + 129}{2} = 128.5 \text{ s}$$

Desviación Estándar:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} = \sqrt{\frac{(133 - 131.33)^2 + \dots + (117 - 131.33)^2}{24}} = 17.64 \text{ s}$$

Y teniendo un **Mínimo de:** 117 s

y un **Máximo de:** 217 s

Para la columna de los datos de duración mínima (D-Min) que se refiere al tiempo mínimo registrado de duración de encendido del subsistema de control de temperatura durante el período de 24 días.

Media:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{107 + 108 + \dots + 105 + 107}{24} = 106.54 \text{ s}$$

$$\text{Mediana} = \frac{107 + 108}{2} = 107.5 \text{ s}$$

Desviación estándar:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} = \sqrt{\frac{(107 - 106.54)^2 + \dots + (107 - 106.54)^2}{24}} = 10.13 \text{ s}$$

Mínimo: 58 s

Máximo: 112 s

Para la columna de los datos del tiempo promedio de encendido (T-P)

Media:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{118 + 118 + \dots + 115 + 119}{24} = 118.08 \text{ s}$$

$$\text{Mediana} = \frac{118 + 118}{2} = 118 \text{ s}$$

Desviación estándar:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} = \sqrt{\frac{(118 - 118.08)^2 + \dots + (119 - 118.08)^2}{24}} = 2.98 \text{ s}$$

Mínimo: 114 s

Máximo: 128 s

Para la columna de los datos del número total de encendidos (T-ON)

Media:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{71 + 73 + \dots + 79 + 90}{24} = 71.29$$

$$\text{Mediana} = \frac{71 + 71}{2} = 71$$

Desviación estándar:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} = \sqrt{\frac{(71 - 71.29)^2 + \dots + (90 - 71.29)^2}{24}} = 13.84$$

Mínimo: 28 veces de encendido

Máximo: 90 veces de encendido

Para la columna de los datos del consumo eléctrico (C.E.T) que se refiere al consumo eléctrico total generado diariamente por el subsistema de control de temperatura durante el período de 24 días.

Media:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{4.028 + 4.068 + \dots + 3.979 + 4.052}{24} = 3.932 \text{ kWh}$$

$$\text{Mediana} = \frac{4.032 + 4.039}{2} = 4.035 \text{ kWh}$$

Desviación estándar:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} = \sqrt{\frac{(4.028 - 3.932)^2 + \dots + (4.052 - 3.932)^2}{24}} = 0.748 \text{ kWh}$$

Mínimo: 1.471 kWh

Máximo: 5.061 kWh

Nota: Tomando en cuenta los cálculos realizados, se observa una variabilidad entre el número de encendidos por día del sistema y el consumo eléctrico que se genera, esto se debe a las condiciones ambientales cambiantes, como la temperatura y la humedad. Además, factores como la calidad de los componentes eléctricos y las interacciones entre subsistemas también pueden influir en el consumo.

De los datos también se puede obtener una representación gráfica por día de cada uno de ellos.

A continuación se muestra la gráfica del primer ejemplo que se tomó que pertenece al día 10 de noviembre del 2022. (Figura 3.14), La gráfica representa, en el eje horizontal (eje x) el consumo eléctrico en kW y en el eje vertical (eje y) las horas del día. Cada punto en la gráfica representa un encendido del sistema, con su ubicación determinada por el consumo exacto en ese momento por lo que la cantidad total de puntos en la gráfica corresponde al número total de conexiones.

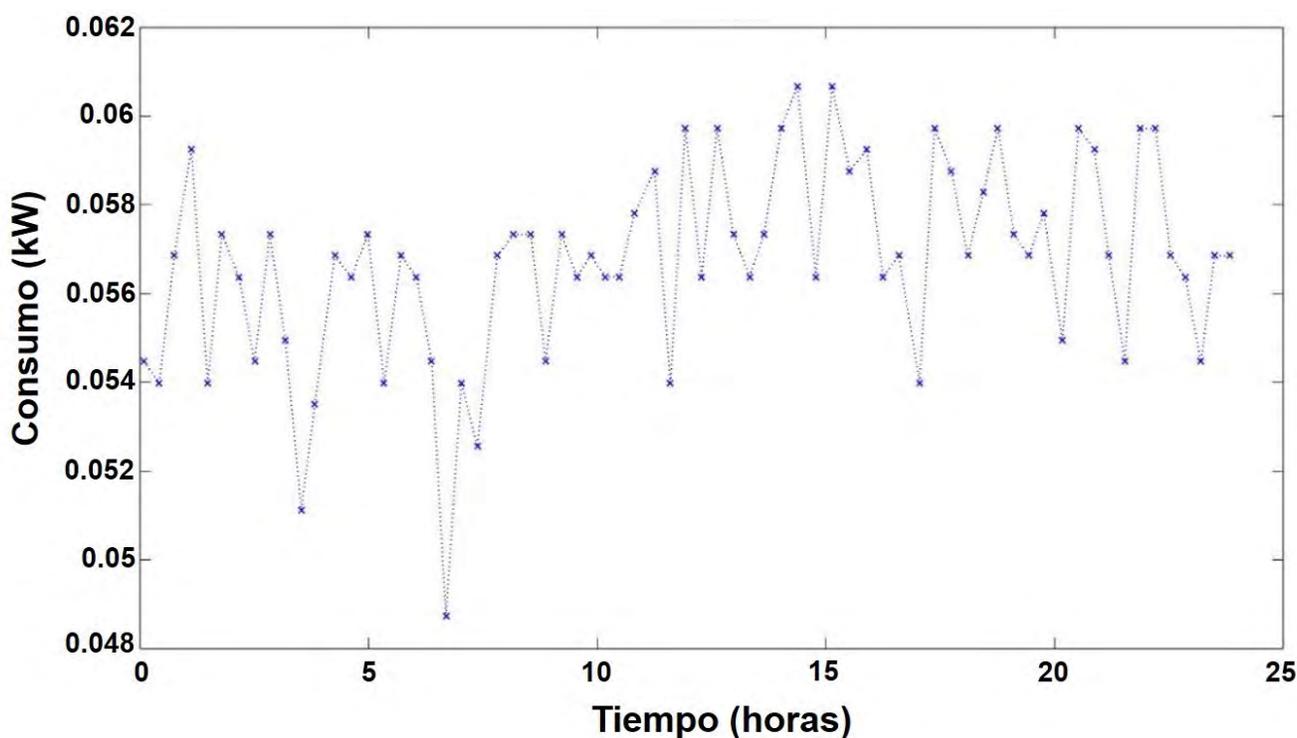


Figura 3.14: Comportamiento del consumo eléctrico nominal del sistema de control de temperatura del día 10 de noviembre del 2022.

Los datos presentan que el consumo eléctrico nominal total del sub-sistema de control de temperatura el día 10 de noviembre del 2022 fue de 3.912 kWh, el tiempo de duración máxima de encendido del sistema en segundos fue de 127 segundos, el tiempo de duración mínima de encendido del sistema en segundos fue de 102 segundos, por lo que el tiempo promedio de encendido es de 118.66 segundos y el número total de veces que se encendió el sistema de control de temperatura fue de 69 veces. Para el segundo ejemplo se tomó el día 21 de Noviembre. (Véase Figura 3.15).

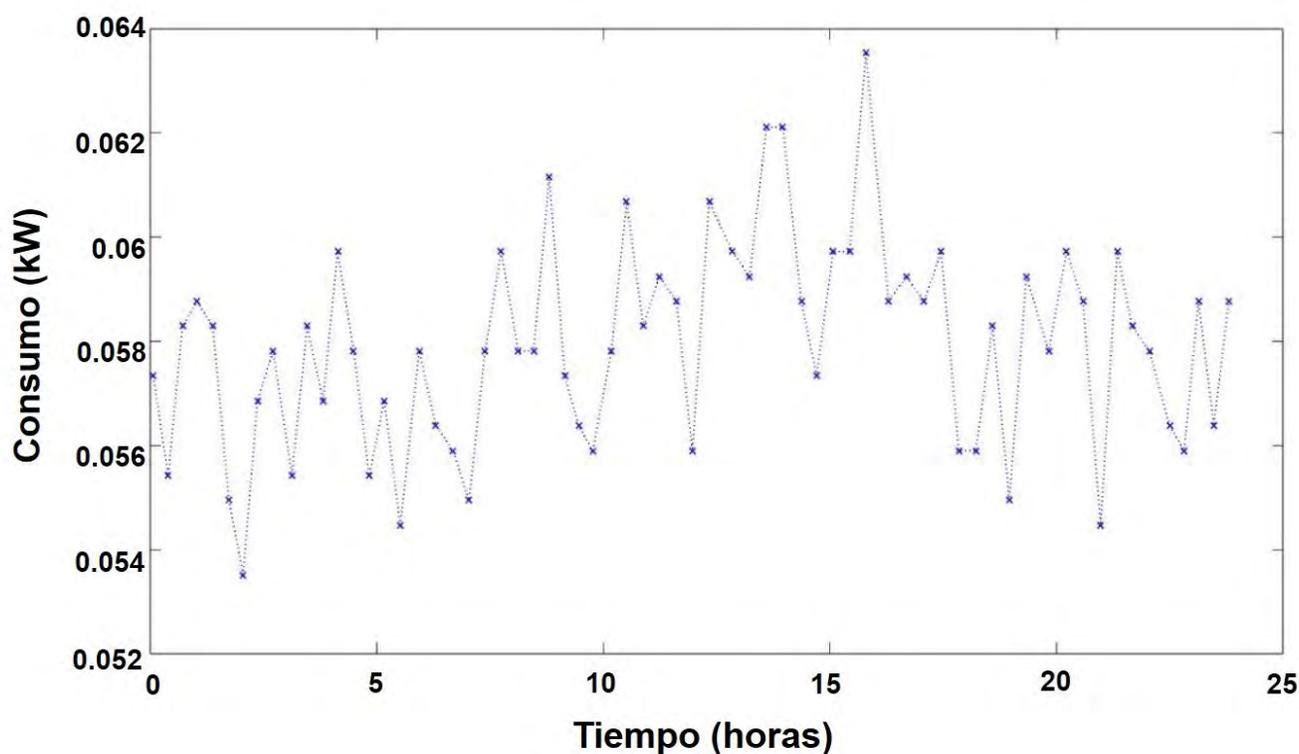


Figura 3.15: Comportamiento del consumo eléctrico nominal del sistema de control de temperatura del día 21 de noviembre del 2022.

Los datos arrojan que el consumo eléctrico nominal total del sub-sistema de control de temperatura el día 21 de noviembre del 2022 fue de 3.822 kWh, el tiempo de duración máxima de encendido del sistema en segundos fue de 133 segundos, el tiempo de duración mínima de encendido del sistema fue de 112 segundos, el tiempo promedio de encendido fue de 118.66 segundos y el número total de veces que se encendió el sistema de control de temperatura fue de 66 veces.

3.8.1. Interpretación de resultados

En ambas gráficas, se observa que el consumo eléctrico menor se encuentra en las primeras horas del día (en la madrugada) y el mayor pasando las 15:00 hrs, (en la tarde).

Por lo tanto, cuando la temperatura del medio ambiente aumenta, la temperatura del medio de cultivo también aumenta, por lo que es necesario reducir la temperatura, esto ocasiona que el sistema de control de temperatura dure más tiempo conectado, esto a su vez genera un aumento en el consumo eléctrico.

Con esto se demuestra que el consumo eléctrico del Fotobiorreactor depende de la temperatura del medio en el que se encuentre.

3.9. Evaluación de datos del consumo eléctrico del subsistema térmico

Para la obtención del consumo eléctrico del subsistema de control de la temperatura del Fotobiorreactor, se realizó el ensamblaje con cada uno de los subsistemas que lo completan, obteniendo a su vez, un panorama amplio de cómo funciona cada control de las demás variables.

A diferencia del análisis de los datos que se obtuvieron de la base de datos, en donde se determinó el consumo eléctrico nominal, con los valores nominales de los actuadores, y el tiempo real de funcionamiento de cada uno de ellos. Para los dos experimentos posteriores, se realizó un proceso de inoculación microalgal y se implementó un sistema de monitoreo que se explican a continuación.

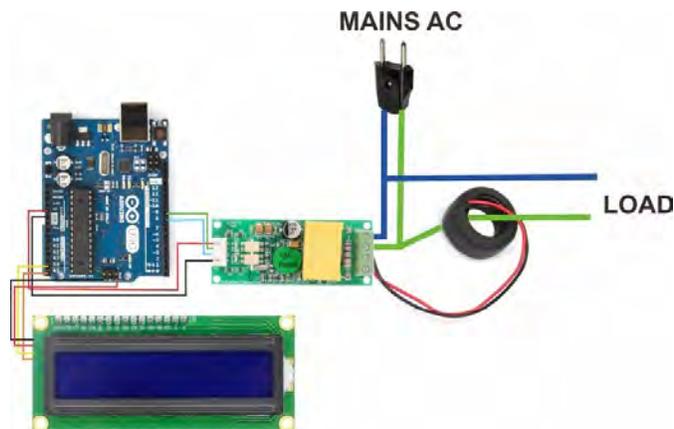
3.9.1. Implementación de los sensores de monitoreo para el consumo eléctrico del sistema de control de temperatura

Se implementaron dos módulos, Figura 3.16, de comunicación PZEM-004T Figura 3.16a, con una placa de desarrollo Arduino UNO, una pantalla LCD Figura 3.16b, para poder ver el consumo eléctrico acumulativo real, Figura 3.17.

Es importante mencionar que la conexión del módulo depende del voltaje en el que se esté operando.



(a) Módulo de comunicación PZEM-004T.



(b) Conexión de Arduino y pantalla LCD.

Figura 3.16: PZEM-004T, Arduino y conexión con la pantalla LCD.

En este caso, el *chiller* opera a 220 V CA y la bomba opera a 127 V CA.

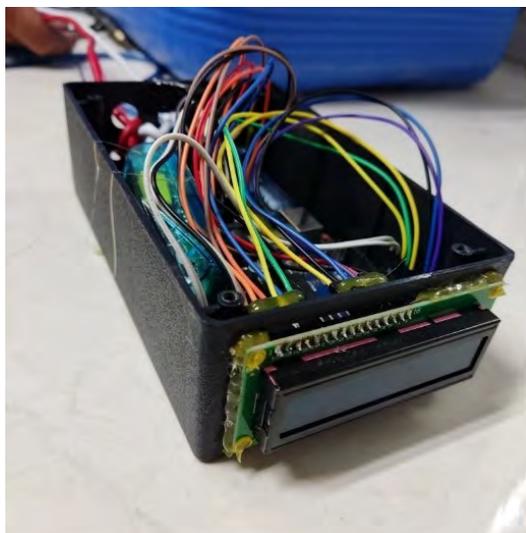


Figura 3.17: Sistema de monitoreo (110V/220V) utilizando sensores de potencia PZEM004T.

Se diseñó también un código de programación, que brinda los tiempos de operación de cada dispositivo que funciona como lo explica el siguiente diagrama de flujo de la siguiente Figura 3.18.

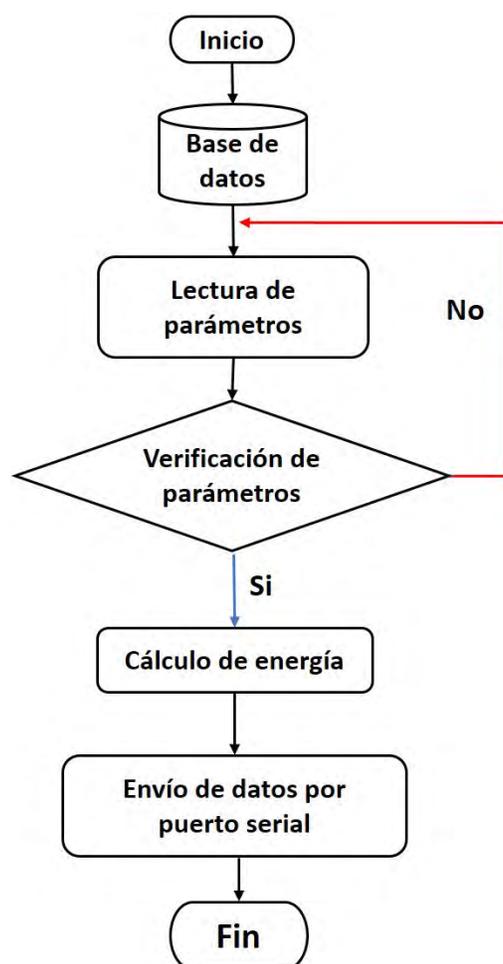


Figura 3.18: Diagrama de flujo del funcionamiento del código de programación diseñado para los módulos de comunicación de tipo PZEM-004T.

3.9.2. Proceso de preparación para la inoculación microalgal

El proceso de inoculación microalgal tuvo un comienzo en una caja de *Petri*, donde se cultivó inicialmente en un medio de crecimiento adecuado. Posteriormente, se transfirió una pequeña cantidad de este cultivo a un tubo de ensayo de 10 mililitros para su desarrollo en un volumen más amplio. Conforme la población de microalgas creció, se transfirió a un matraz de 100 mililitros para continuar su multiplicación.

Luego, el cultivo se escaló hacia un garrafón de 15 litros y finalmente el cultivo se introdujo en el fotobiorreactor, controlado con las condiciones necesarias de nutrientes y el control adecuado.

Una idea de como se llevó a cabo el proceso de inoculación microalgal se ilustra en la Figura 3.19.

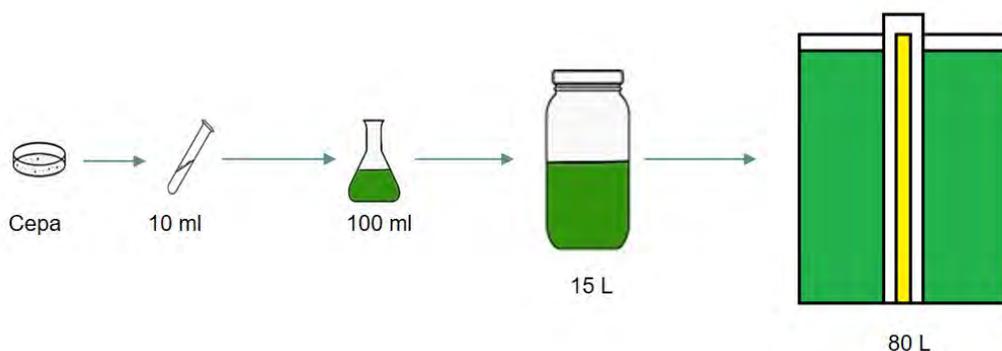


Figura 3.19: Ejemplo ilustrativo de como se llevó a cabo el proceso para la inoculación microalgal.

Después de la configuración de los sensores y el ensamblaje del fotobiorreactor con la integración de todos los actuadores y los subsistemas de control se llevaron a cabo rutinas de limpieza, mantenimiento en cada dispositivo. Además, se realizaron las conexiones de los circuitos que constituyen a cada subsistema para asegurar el funcionamiento correcto y garantizar un entorno controlado y adecuado para las microalgas.

Para los dos experimentos que se realizaron, se hizo el proceso de inoculación, con una cepa de microalga de tipo *Nannochloropsis oculata*.

3.9.3. Evaluación del comportamiento microalgal y consumo eléctrico sin control térmico

El primer experimento se realizó con la intención de verificar la validez y la importancia de utilizar el subsistema de control de temperatura y tuvo una duración del 06/05/2023. al 12/05/2023.

El propósito principal de este experimento fue no usar el sistema térmico para observar el comportamiento microalgal al no controlar la temperatura del medio de cultivo, medir el consumo eléctrico del fotobiorreactor y evaluar el consumo eléctrico real de todo el sistema.

Para la parte del bioproceso de producción microalgal se utilizaron los parámetros del medio de cultivo que se muestran en la siguiente tabla 11.

Cuadro 11: Parámetros del medio de cultivo para el experimento 1

Variable	Valor
Iluminación	250 lúmenes
Aireación	60 L/min
pH	9-11 upH
Salinidad	35 ups

Para llevar a cabo el cálculo del conteo celular, se utilizó una cámara de Neubauer y un microscopio óptico.

Este procedimiento comienza con la preparación de la muestra de en este caso las microalgas, la cual se diluyó para una distribución uniforme de las células. Una vez preparada la muestra, se colocó una pequeña cantidad (aproximadamente 10 μL) en la cámara de Neubauer. (La cámara de Neubauer, contiene una rejilla micrométrica grabada en su superficie), se colocó bajo el microscopio y se contaron las células presentes en los cuadros definidos por la rejilla.

La siguiente fotografía, muestra como se llevo a cabo este procedimiento (Figura 3.20).



Figura 3.20: Fotografía de como se llevo a cabo el procedimiento para el conteo celular con la cámara de Neubauer y un microscopio óptico.

Para obtener un buen conteo, se contó el número de células en varios cuadros y se calculó el promedio para determinar la concentración celular en la muestra original, utilizando la siguiente fórmula que considera el volumen de los cuadros contados:

$$N = \frac{\text{Número total de células contadas}}{\text{Número de cuadros contados}} \times \frac{1}{V_c} \times \frac{1}{V_s}$$

donde N representa la concentración celular en células por mililitro (cél/mL), V_c es el volumen de cada cuadro de la cámara de Neubauer (en mm^3), y V_s es el volumen de la muestra diluida que se cargó en la cámara (en mL).

Observaciones del comportamiento y consumo eléctrico sin control térmico

En la Figura 3.21 se observa la gráfica del comportamiento microalgal y el consumo eléctrico real del fotobiorreactor durante los siete días que duró el **experimento**.

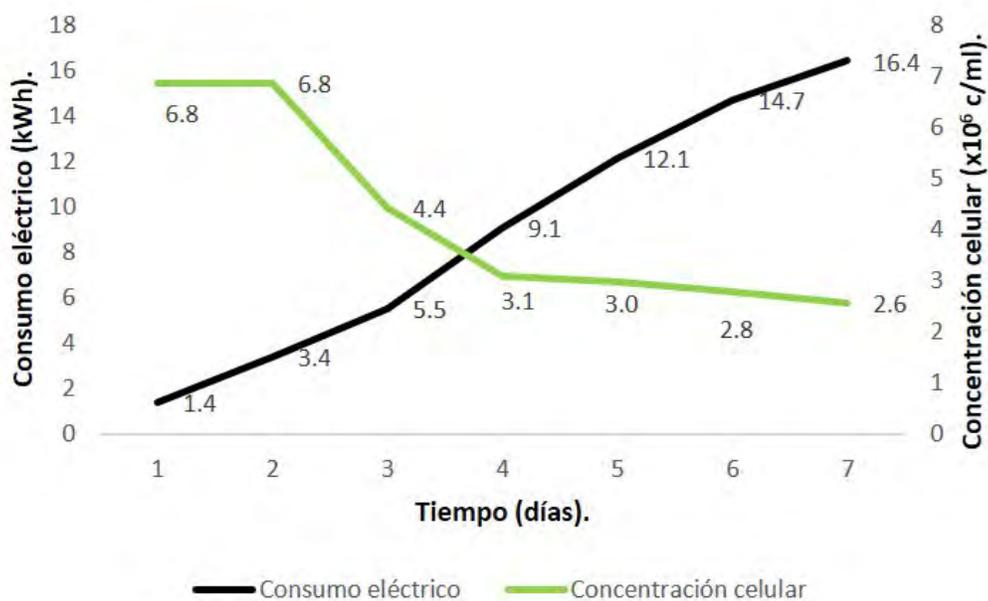


Figura 3.21: Consumo eléctrico vs concentración celular sin sistema térmico 06/05/23 al 12/05/23.

En la tabla 12, se observan los datos registrados por los sensores de corriente de cada uno de los subsistemas en un periodo de 24 horas y el consumo eléctrico total de cada sistema, así como también el conteo celular diario obtenidos de este experimento 1.

Cuadro 12: Consumo eléctrico por subsistema diario, conteo celular y consumo eléctrico total por subsistema del experimento 1, del 06/05/2023. al 12/05/2023

Fecha	Conteo celular	Subsistema de iluminación	Subsistema de aireación	Subsistema de pH	Subsistema de salinidad	Consumo total
06/05/2023	6.84 millones cél/mL	0.568 kWh	0.85 kWh	0.002 kWh	0.003 kWh	1.423 kWh
07/05/2023	6.84 millones cél/mL	1.35 kWh	2.02 kWh	0.007 kWh	0.005 kWh	3.382 kWh
08/05/2023	4.42 millones cél/mL	2.439 kWh	3.027 kWh	0.049 kWh	0.011 kWh	5.526 kWh
09/05/2023	3.09 millones cél/mL	4.93 kWh	4.059 kWh	0.076 kWh	0.015 kWh	9.08 kWh
10/05/2023	2.96 millones cél/mL	6.046 kWh	5.124 kWh	0.919 kWh	0.02 kWh	12.109 kWh
11/05/2023	2.77 millones cél/mL	7.435 kWh	5.962 kWh	1.238 kWh	0.023 kWh	14.658 kWh
12/05/2023	2.57 millones cél/mL	8.738 kWh	6.102 kWh	1.512 kWh	0.027 kWh	16.379 kWh

3.9.4. Interpretación del comportamiento y consumo eléctrico sin control térmico

Del análisis de los datos obtenidos a partir de los sensores de corriente y del conteo celular, se puede observar que:

La falta de un sistema de control de temperatura tuvo un impacto en el crecimiento de la microalga *Nannochloropsis Oculata*. El conteo celular diario demostró una disminución gradual en la viabilidad celular.

Al principio del experimento, el conteo celular era de 6.84 millones cél/mL, pero al final del experimento, el conteo había disminuido a 2.57 millones cél/mL con este decremento celular se pudo observar la sensibilidad de las microalgas a las fluctuaciones de temperatura.

La falta de control de temperatura afectó negativamente el crecimiento microalgal y con eso un uso ineficiente de la energía ya que no se obtuvo una producción de biomasa

3.9.5. Evaluación del comportamiento microalgal y consumo eléctrico con control térmico

Se inició un segundo experimento al que se le llamó: **experimento 2**, utilizando los parámetros de la tabla 13 y el mismo tipo de microalga, con una excepción, utilizar el sistema térmico y controlar la temperatura del medio de cultivo a 25°C.

Cuadro 13: Parámetros del medio de cultivo para el experimento 2

Variable	Valor
Temperatura	25°C
Iluminación	250 lúmenes
Aireación	60 L/min
pH	9-11 upH
Salinidad	35 ups

En la Figura 3.22, se observa la gráfica del comportamiento microalgal y el consumo eléctrico real del fotobiorreactor durante los días que duró el **experimento 2**.

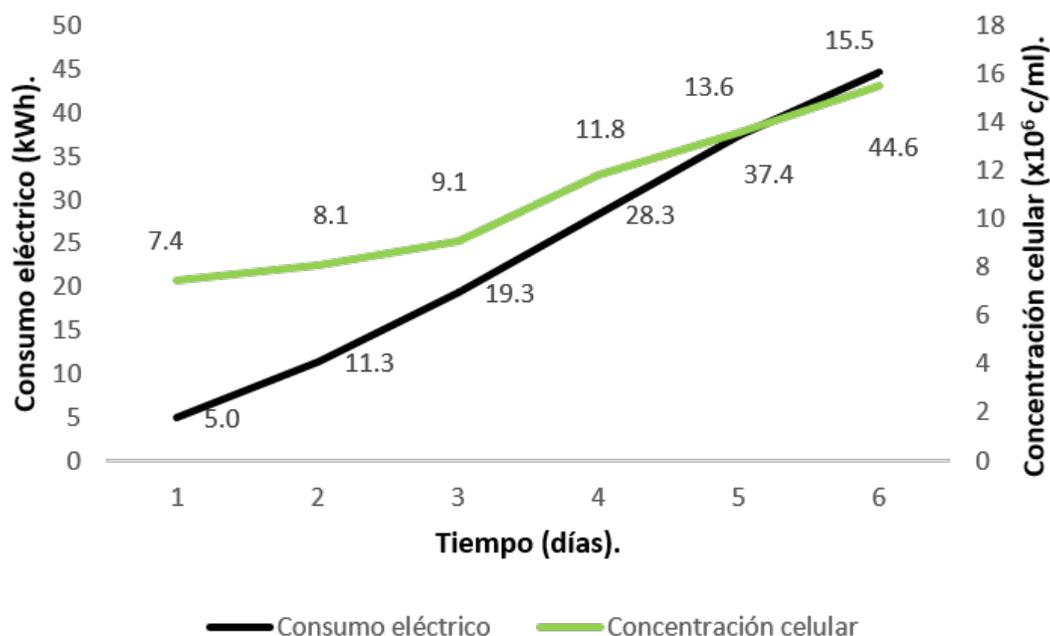


Figura 3.22: Consumo eléctrico vs concentración celular con sistema térmico 25/05/23 al 30/05/23.

Cuadro 14: Consumo eléctrico por subsistema diario, conteo celular y consumo eléctrico total por subsistema del experimento 2, del 25/05/2023. al 29/05/2023

Fecha	Conteo celular	Subsistema de temperatura	Subsistema de iluminación	Subsistema de aireación	Subsistema de pH	Subsistema de salinidad	Consumo total
25/05/2023	7.43 millones cél/mL	2.156 kWh	1.378 kWh	1.035 kWh	0.411 kWh	0.005 kWh	4.985 kWh
26/05/2023	8.11 millones cél/mL	2.317 kWh	2.492 kWh	1.032 kWh	0.5 kWh	0.005 kWh	11.331 kWh
27/05/2023	9.08 millones cél/mL	3.819 kWh	2.551 kWh	1.116 kWh	0.501 kWh	0.004 kWh	19.322 kWh
28/05/2023	11.80 millones cél/mL	4.799 kWh	2.564 kWh	1.148 kWh	0.497 kWh	0.006 kWh	28.336 kWh
29/05/2023	13.58 millones cél/mL	4.309 kWh	2.483 kWh	1.032 kWh	1.19 kWh	0.005 kWh	37.355 kWh
30/05/2023	15.51 millones cél/mL	3.28 kWh	2.440 kWh	1.067 kWh	0.414 kWh	0.06 kWh	44.562 kWh

En la tabla 14, se observan los datos registrados por los sensores de corriente de cada uno de los subsistemas en un periodo de 24 horas y el consumo eléctrico total de cada sistema, así como también el conteo celular diario obtenidos del experimento 2.

3.9.6. Observaciones del comportamiento y consumo eléctrico con control térmico

Del análisis de los datos obtenidos a partir de los sensores de corriente y del conteo celular, se puede observar que:

- El conteo celular aumenta de manera significativa a lo largo de los días. Comienza en 7.43 millones de células por mililitro (cél/mL) y alcanza los 15.51 millones cél/mL.
- El consumo eléctrico total diario muestra un aumento constante y considerable, comenzando en 4.985 kWh y llegando a 44.562 kWh.

Los datos de la tabla 14, muestran que la inclusión de un subsistema de control de temperatura tiene un impacto positivo en el crecimiento de las microalgas. Sin embargo, la demanda energética plantea dudas sobre la eficiencia del fotobiorreactor.

Si bien el sistema de control de temperatura demuestra ser importante para las microalgas, también es el subsistema que más consume energía.

3.9.7. Análisis de ambos experimentos y resumen de observaciones

Con los resultados de los datos del experimento 2 donde se controló la temperatura y los del experimento 1 donde no había control de temperatura, se observa que el conteo celular en el experimento 2 aumenta significativamente, mientras que en el experimento 1 disminuye, esto demuestra que el control de temperatura tiene un impacto en el crecimiento microalgal.

Para el caso del consumo eléctrico total es mucho mayor en el experimento 2 debido a que se incorporó el subsistema de control de temperatura lo que vuelve ineficiente al fotobiorreactor.

El incremento en el consumo total de energía y de concentración celular, dan a notar que los subsistemas están trabajando para mantener las mejores condiciones para el crecimiento de las microalgas.

Sin embargo, la demanda energética es demasiado alta en el subsistema de control de temperatura, esto sugiere que, aunque el fotobiorreactor cumple su función, no es completamente eficiente.

En comparación con los demás subsistemas, el control de temperatura es el mayor consumidor de energía eléctrica, lo que representa una oportunidad de mejora para la optimización y reducción de costos operativos.

3.10. Propuestas para la reducción del consumo eléctrico del sistema de control de temperatura

3.10.1. Propuesta de aislamiento del circuito de circulación del glicol

Tras el análisis de los resultados obtenidos del consumo eléctrico de todo el sistema y el consumo eléctrico particular del subsistema de control de temperatura, se propuso como primer estrategia para la reducción del consumo eléctrico del sistema de control de temperatura, implementar un

aislamiento del circuito de circulación de glicol mediante la adición de un nuevo actuador, como se muestra en la Figura 3.23.

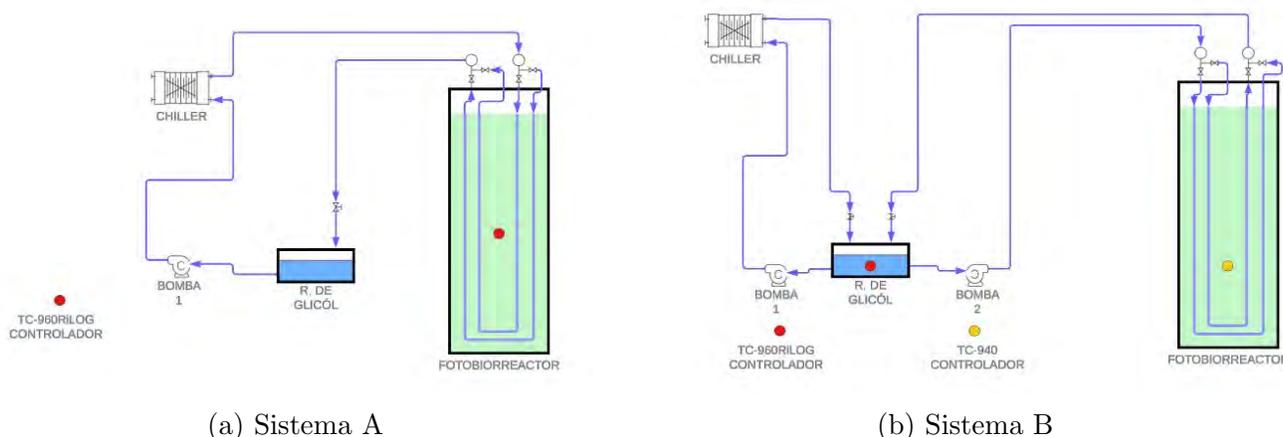


Figura 3.23: Propuesta de aislamiento para la reducción del consumo eléctrico del subsistema de control de temperatura.

Esta propuesta se fundamenta con la premisa de que al incorporar una nueva bomba (bomba 2) en el sistema A 3.23a, se reducirá la frecuencia de encendido del *Chiller*.

El resultado de esta implementación, sistema B 3.23b, muestra la integración del segundo actuador (bomba 2) aislando la circulación del glicol en dos circuitos independientes uno del otro controlados por separado.

Con esta implementación el sensor de temperatura (inmerso en el medio de cultivo) estará asociado al controlador TC-940 que hará encender la bomba 2 haciendo circular el glicol a través de las tuberías, cada que se rebase la temperatura de referencia del medio de cultivo y apagándola cuando vuelva a su temperatura deseada (en este caso 25 °C), cerrando así el lazo de control.

El sensor de temperatura (inmerso en el glicol) asociado al controlador TC-960RiLOG hará encender la bomba 1 y el *chiller*, haciendo circular el glicol a través de él, cada que se rebase la temperatura de referencia del glicol y apagando ambos actuadores cuando el glicol vuelva a su temperatura deseada.

3.10.2. Propuesta de ampliación del margen de histéresis en el subsistema de control térmico

Se planteó también ajustar los parámetros de control térmico. Se propuso ajustar el margen de histéresis para mejorar la efectividad de esta nueva configuración ya que dentro de este sistema, se identificó un fenómeno de histéresis, caracterizado por un rango de temperatura en el que el controlador realiza la función del *ON-OFF*.

El sistema está configurado para que se active cuando la temperatura alcance los 25.1 °C y se desactive cuando la temperatura nuevamente se encuentre a 25 °C establecidos pero debido a la inercia térmica la temperatura suele bajar hasta los 24.9 °C.

Este control puede considerarse demasiado estricto ya que la microalga *Nannochloropsis oculata* ha demostrado una tolerancia a mayor temperatura, por lo que ampliar el rango de histéresis podría plantear las siguientes posibilidades:

1. Una mayor amplitud en el rango de histéresis podría provocar a una disminución en la frecuencia de veces de encendido y apagado del sistema.
2. La posibilidad de que un rango de histéresis más grande, podría provocar una mayor demanda energética por el tiempo se que se tarde el sistema en llegar a la temperatura de referencia para lograr el intercambio térmico.

Nota

Para el cálculo del consumo eléctrico, se utilizó un factor de potencia de 0.94 para el *chiller* y de 0.80 para las bombas. Estos valores fueron obtenidos a partir de los datos especificados en las fichas técnicas de los dispositivos que se muestran en los anexos 5.4.

Considerando la fórmula para calcular el factor de potencia:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (3.9)$$

Donde la potencia aparente es:

$$S = V \cdot I \quad (3.10)$$

Para el chiller, con una potencia activa (P) de 1600 W, un voltaje nominal (V) de 220 V y una corriente nominal (I) de 7.7 A:

La potencia aparente (S):

$$S = V \cdot I = 220 \text{ V} \cdot 7.7 \text{ A} = 1694 \text{ VA} \quad (3.11)$$

Sustituyendo en la fórmula del factor de potencia:

$$\text{FP} = \frac{1600 \text{ W}}{1694 \text{ VA}} \approx 0.94 \quad (3.12)$$

Para las bombas, con una potencia activa (P) de 120 W, un voltaje nominal (V) de 127 V y una corriente nominal (I) de 1.18 A:

La potencia aparente (S) se calculó como:

$$S = V \cdot I = 127 \text{ V} \cdot 1.18 \text{ A} = 149.86 \text{ VA} \quad (3.13)$$

Sustituyendo:

$$\text{FP} = \frac{120 \text{ W}}{149.86 \text{ VA}} \approx 0.80 \quad (3.14)$$

Capítulo 4

4. Resultados

4.1. Integración del nuevo actuador al subsistema térmico

En este capítulo, se muestra la integración del nuevo actuador en el subsistema de control de temperatura del fotobiorreactor, con el objetivo de mejorar los costos de producción de biomasa microalgal.

Además, se explica el proceso de ingeniería inversa del subsistema de control de temperatura para obtener los diagramas de conexión del gabinete de control ya que no existía algún registro de ellos, eso ayudó también a comprender a fondo su funcionamiento y así garantizar la efectividad de la implementación además de obtener información sobre la estructura del controlador para poder analizar las áreas de mejora.

Para la implementación del nuevo actuador, se llevó a cabo un proceso de ingeniería inversa dividido en varias etapas.

4.1.1. Ingeniería inversa del subsistema de control de temperatura

Desmontaje del subsistema de control

El primer paso fue desmontar completamente el gabinete de control. Se llevó a cabo un proceso de reingeniería inversa del subsistema de control de temperatura, debido a que no se contaba con los diagramas que explicaran el funcionamiento y se desconocía la interacción elementos que conforman el subsistema.

El subsistema tiene conectado el *SITRAD*, está compuesto por los tres módulos. Dos de estos módulos son del tipo T940RiLOG; uno se encarga del encendido y apagado de la bomba y el otro controla el *chiller*.

El tercer módulo, es de tipo T960RiLOG, es el que está asociado al controlador, el cual es responsable de la temperatura del medio de cultivo.

Como cada uno de estos módulos tiene dos sensores de temperatura y se alimenta con 12 V de corriente directa (CD), el gabinete contiene también tres inversores que convierten 120 V de corriente alterna (CA) a 12 V de CD.

Estos inversores están conectados a tres *switches* que encienden o apagan un LED indicador para cada vez que uno de los módulos está en funcionamiento. Véase Figura 4.1.

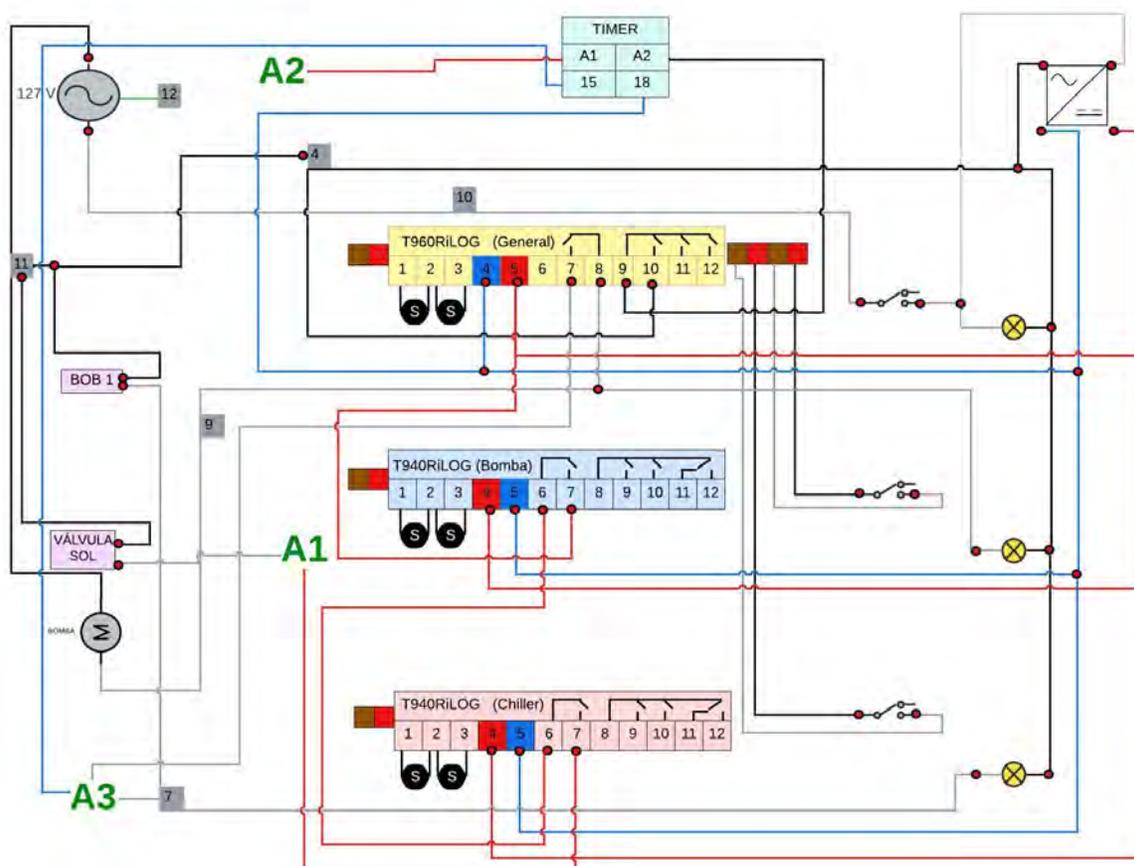


Figura 4.1: Diagrama del circuito TC-LOGIC del sistema de control del fotobiorreactor estudiado.

El sistema también incluye cinco relevadores, identificados en el diagrama anterior como A1, A2, A3. Tres de estos relevadores son del tipo TDS-1202L y los otros dos son del tipo THD-1201L. Un

temporizador que regula los ciclos de operación del sistema, y la comunicación serial correspondiente para los módulos SITRAD.

El sistema también incluye cinco relevadores, identificados en el diagrama anterior como A1, A2, A3. Tres de estos relevadores son del tipo TDS-1202L, estos están diseñados para manejar cargas de corriente alterna (CA) y proporcionar una alta capacidad de conmutación y aislamiento eléctrico. Los otros dos relevadores son del tipo THD-1201L, que están diseñados para aplicaciones que requieren una conmutación rápida y fiable de corrientes más pequeñas.

La Figura 4.2 muestra la conexión de los relevadores hacia los tres módulos de comunicación de *SITRAD* y los demás componentes.

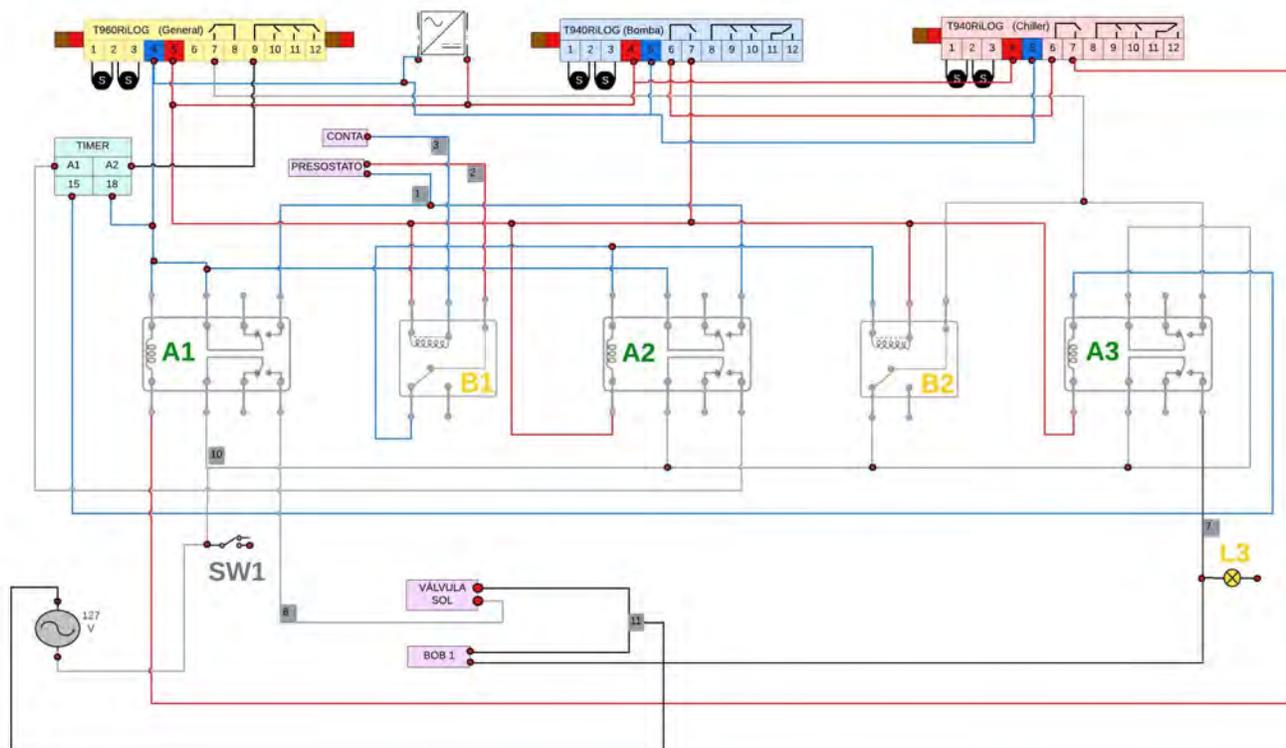


Figura 4.2: Diagrama de la conexión del circuito de los relevadores del sistema de control del fotobiorreactor.

El sistema cuenta con un temporizador que regula los ciclos de operación del sistema, asegurando que los componentes funcionen en intervalos específicos. La comunicación serial correspondiente

para los módulos SITRAD hace la transmisión y la recepción de los datos entre los módulos y el sistema de control central.

Para el caso del *chiller*, las conexiones incluyen un contactor, una bobina, un presostato, un sensor de flujo y una válvula solenoide. El presostato que está dentro del *chiller* controla la presión del sistema, el sensor de flujo monitorea la circulación del refrigerante, y la válvula solenoide regula el flujo del refrigerante en respuesta a las señales del controlador.

El diagrama de la Figura 4.3, es el resultado de la ingeniería inversa y muestra todos los componentes que están integrados y conectados en el subsistema de control de temperatura.

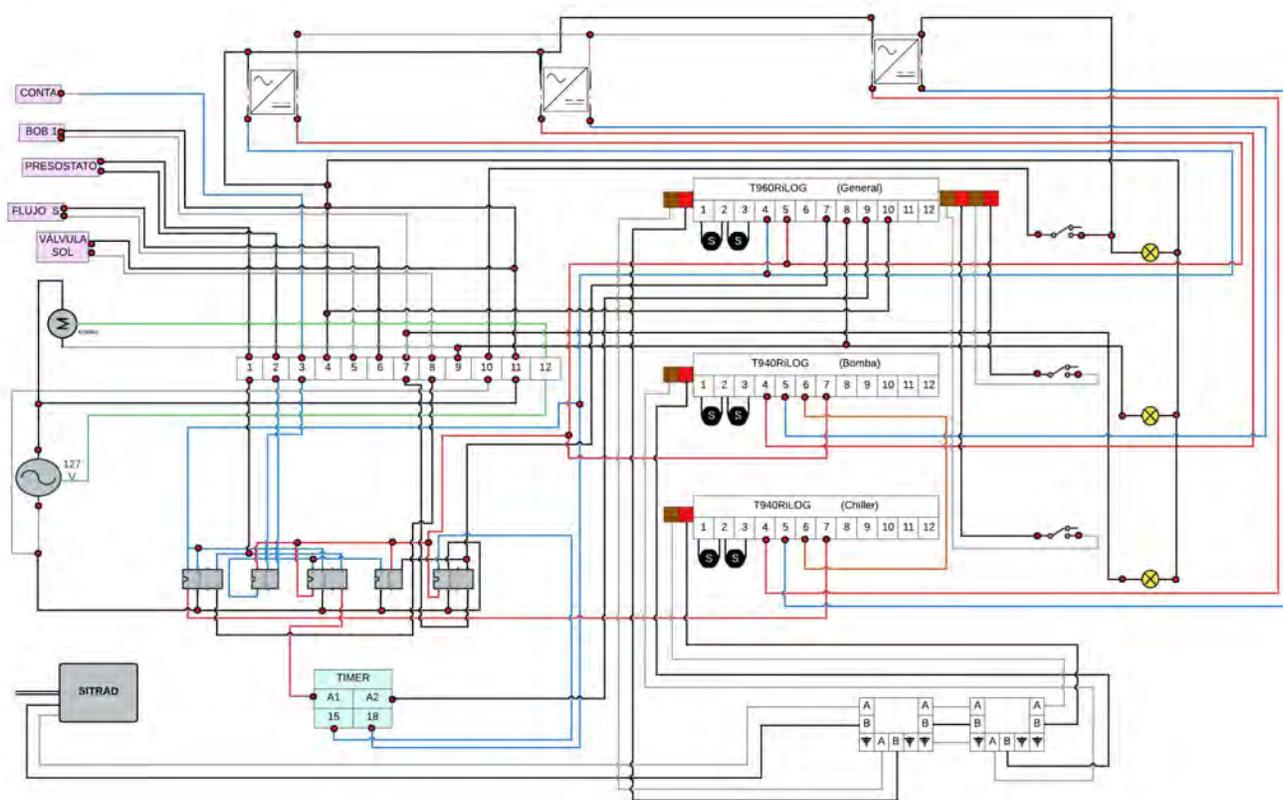


Figura 4.3: Diagrama obtenido de la ingeniería inversa del subsistema de control de temperatura del fotobiorreactor

Se identificaron posibles puntos de reajustes para la adición del nuevo actuador.

4.2. Integración del nuevo actuador

La implementación de la propuesta para reducir el consumo eléctrico del sistema de control de temperatura implicó la incorporación de un nuevo actuador en el circuito de circulación de glicol. Este actuador se estimó que provocaría una disminución en la frecuencia de encendido y apagado del actuador principal, que opera a 220V AC (*chiller*), manteniendo al mismo tiempo las condiciones de temperatura para el medio de cultivo, en este caso a 25°C.

En el siguiente diagrama representativo de la Fig. 4.4, se puede observar el resultado de la inclusión del segundo actuador y la modificación en el subsistema de control de temperatura.

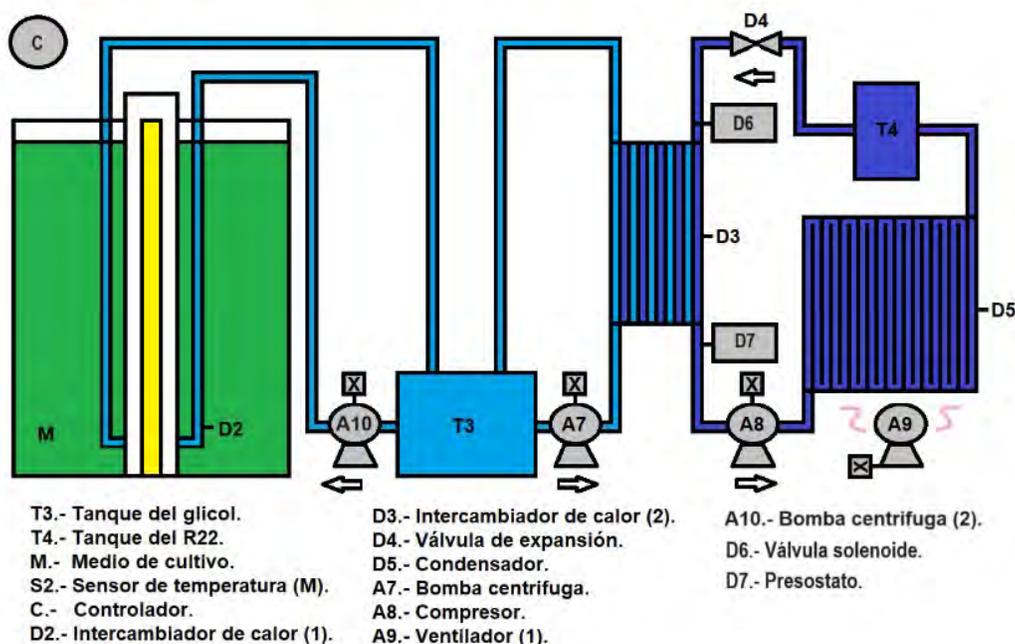


Figura 4.4: Diagrama representativo del subsistema de control de temperatura modificado, con la integración del nuevo actuador.

Análisis de caudales en bombas de recirculación

Después de la adquisición del nuevo actuador, se llevaron a cabo pruebas y mediciones en condiciones de operación reales para comprobar funcionamiento, consumo, y los caudales de flujo con el glicol.

Se iniciaron experimentos para medir el caudal de las bombas de recirculación 1 y 2 después de la modificación del sistema térmico. En la Tabla 15 se presentan los resultados obtenidos para la bomba de recirculación 1, mientras que en la Tabla 16 se muestran los resultados para la bomba de recirculación 2.

Al comparar los caudales experimentales de las bombas de recirculación, se observó que, aunque nominalmente la bomba de recirculación 2 debería dar un caudal mayor que la bomba de recirculación 1, los resultados experimentales demostraron que al final ambas proporcionan caudales similares.

La bomba 1 presenta un caudal promedio de 4.512 L min^{-1} con una desviación estándar de 0.062 L min^{-1} , mientras que la bomba 2 tiene un caudal promedio de 4.408 L min^{-1} con una desviación estándar de 0.077 L min^{-1} .

Cuadro 15: Caudales de la bomba 1

Prueba	Volumen (L)	Tiempo (s)	Caudal (L min^{-1})
1	5	67	4.47
2	5	65	4.61
3	5	66	4.54
4	5	67	4.47
5	5	67	4.47

La bomba 2, tiene una mayor longitud de tuberías en comparación con la bomba de recirculación 1 entonces estas pérdidas también son proporcionales a la longitud de las tuberías y esto reduce el caudal de la bomba 2, haciendo que los caudales experimentales sean similares.

Cuadro 16: Caudales de la bomba 2

Prueba	Volumen (L)	Tiempo (s)	Caudal (L min^{-1})
1	5	67	4.47
2	5	70	4.28
3	5	68	4.41
4	5	67	4.47
5	5	68	4.41

El diagrama de la Figura 4.5, muestra como está constituido el diagrama de conexión del controlador con la inclusión del nuevo actuador (bomba 2).

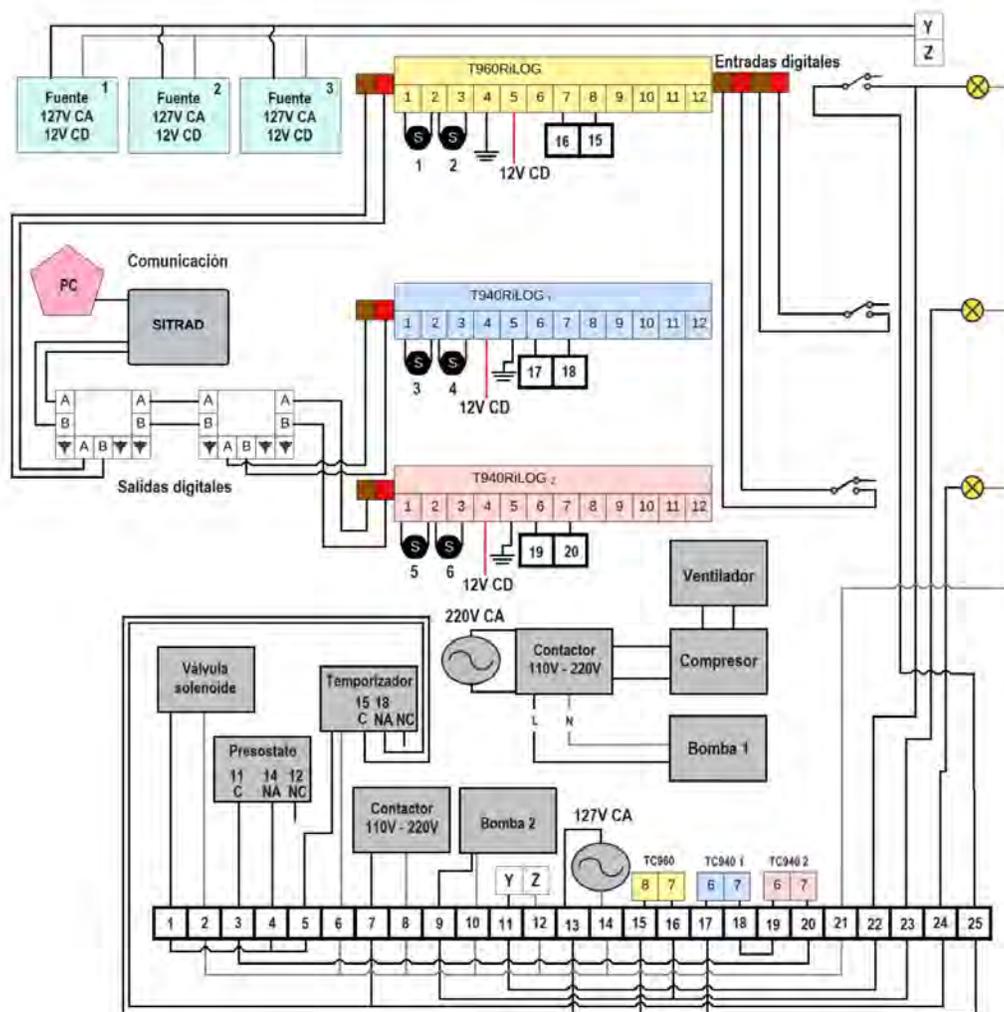


Figura 4.5: Diagrama representativo del circuito del gabinete de control de temperatura modificado, con la integración del nuevo actuador.

4.3. Escenario A: Evaluación del consumo eléctrico en el subsistema térmico al extraer 0.1°C del fotobiorreactor

4.3.1. Cálculos del consumo eléctrico al extraer 0.1°C al del medio de cultivo del fotobiorreactor

Para comenzar con la evaluación del subsistema térmico modificado del fotobiorreactor, se llevó a cabo un primer experimento enfocado en medir el consumo eléctrico del *chiller* y de las bombas 1 y 2.

Además, se tomaron en consideración los resultados de experimentos previamente realizados cuando el subsistema aún no tenía modificaciones. El objetivo principal fue cuantificar el consumo eléctrico del sistema térmico al extraer 0.1°C al fotobiorreactor. Los datos obtenidos sirvieron como base para comprender el comportamiento del sistema térmico antes de su modificación y poder compararlos con los que se obtuvieron ya con el sistema modificado.

En ambos experimentos se realizaron tres pruebas para obtener un promedio del consumo eléctrico.

Sistema térmico sin modificar:

Promedio del consumo eléctrico del *chiller*:

$$\frac{27.36 + 29.04 + 26.13}{3} = 27.51 \text{ kWh}$$

Promedio del consumo eléctrico de la bomba de recirculación 1:

$$\frac{1.75 + 1.85 + 1.82}{3} = 1.81 \text{ kWh}$$

Promedio del del consumo eléctrico del sistema térmico:

$$\frac{29.11 + 30.89 + 27.95}{3} = 29.32 \text{ kWh}$$

Sistema térmico modificado:

Promedio del del consumo eléctrico del *chiller*:

$$\frac{6.67 + 7.39 + 4.74}{3} = 6.60 \text{ kWh}$$

Promedio del consumo eléctrico de la bomba de recirculación 1:

$$\frac{2.12 + 2.68 + 2.28}{3} = 2.36 \text{ kWh}$$

Promedio del consumo eléctrico del sistema térmico:

$$\frac{10.39 + 12.09 + 8.74}{3} = 10.41 \text{ kWh}$$

4.3.2. Resultados del sistema térmico sin modificar

Los resultados se presentan en la tabla 17 y en la tabla 18, en kilovatios-hora (*kWh*).

Cuadro 17: Consumo eléctrico del sistema térmico SIN MODIFICAR

	Prueba 1 (<i>kWh</i>)	Prueba 2 (<i>kWh</i>)	Prueba 3 (<i>kWh</i>)
Chiller	27.36	29.04	26.13
Bomba de recirculación	1.75	1.85	1.82
Sistema térmico	29.11	30.89	27.95

Cuadro 18: Consumo eléctrico del sistema térmico MODIFICADO

	Prueba 1 (<i>kWh</i>)	Prueba 2 (<i>kWh</i>)	Prueba 3 (<i>kWh</i>)
<i>Chiller</i>	6.67	7.39	4.74
Bomba de 1	2.12	2.68	2.28
Bomba de 2	1.6	2.02	1.72
Sistema térmico	10.39	12.09	8.74

4.3.3. Observaciones del escenario A

Chiller: El consumo promedio del chiller disminuyó de 27.51 kWh a 6.60 kWh con la implementación del sistema térmico modificado.

Bomba de recirculación 1: El consumo promedio de la bomba de recirculación se mantuvo similar, con una pequeña variación de 1.81 kWh a 2.36 kWh.

Sistema térmico completo: El consumo promedio del sistema térmico también mostró una reducción de 29.32 kWh a 10.41 kWh con el aislamiento del sistema de control de temperatura al extraer 0.1°C.

Estos resultados indican que la implementación del sistema térmico modificado provocó a una reducción significativa en el consumo eléctrico del sistema en comparación con la configuración original, lo que se tradujo en una mejora en la eficiencia energética del fotobiorreactor.

Para sustentar y hacer un análisis más a fondo se realizaron más experimentos.

4.4. Escenario B: Evaluación del consumo eléctrico en el subsistema térmico modificado

Se muestra en la siguiente tabla 19, los valores nominales obtenidos de la ficha técnica de los actuadores del sistema térmico de enfriamiento primario y del sistema térmico de enfriamiento secundario.

Cuadro 19: Valores nominales de los actuadores que conforman al subsistema térmico

Sistema	Actuador	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia real o activa (W)
Sistema térmico de enfriamiento primario	Chiller	220	7.7	1600
	Bomba 1	127	1.18	120
Sistema térmico de enfriamiento secundario	Bomba 2	127	1.18	120

4.4.1. Cálculo del consumo eléctrico en el subsistema de control de temperatura modificado

Se evaluó el consumo eléctrico ya con las modificaciones, considerando la circulación del glicol para ambos circuitos (Veáse Fig. 4.6) y se analizaron los datos de un periodo de 24 horas con tres pruebas (tres días).

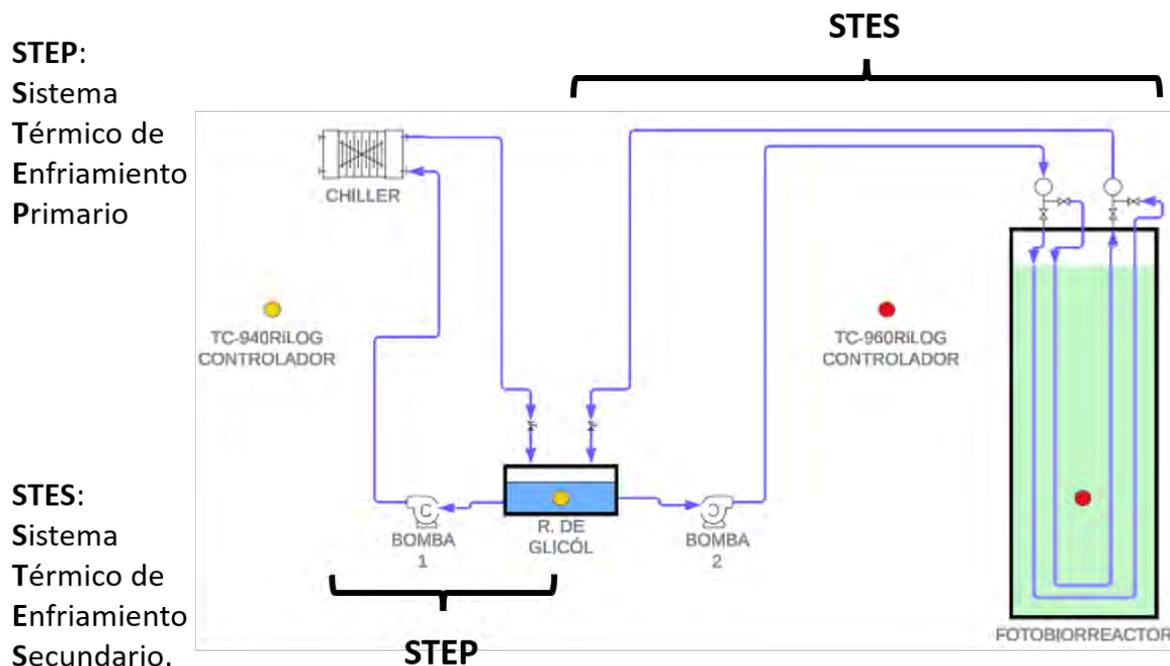


Figura 4.6: Diagrama representativo de la circulación del glicol a través de ambos circuitos.

Los rangos de las temperaturas a las que se mantienen los refrigerantes se muestran en la tabla 20.

Cuadro 20: Temperaturas de los fluidos refrigerantes

Variable	Valor
Refrigerante R22	-10 °C máximo
Temperatura baja del glicol	3 °C
Temperatura alta del glicol	10 °C
Refrigerante R22	-15 °C mínimo

4.4.2. Resultados del escenario B

Se presentan a continuación las gráficas que ilustran el comportamiento del consumo eléctrico en el subsistema de control de temperatura durante los tres días de prueba. Estas gráficas consideran por separado la circulación del glicol en ambos circuitos: el **STEP** (compuesto por dos actuadores: el chiller y la bomba 1) y el **STES** (compuesto por la bomba 2). Las pruebas se realizaron manteniendo la temperatura a 25°C.

Día 1 (20/03/2024 - 21/03/2024)

El primer día se realizaron mediciones del consumo eléctrico en el subsistema de control de temperatura con una histéresis de 0.1°C.

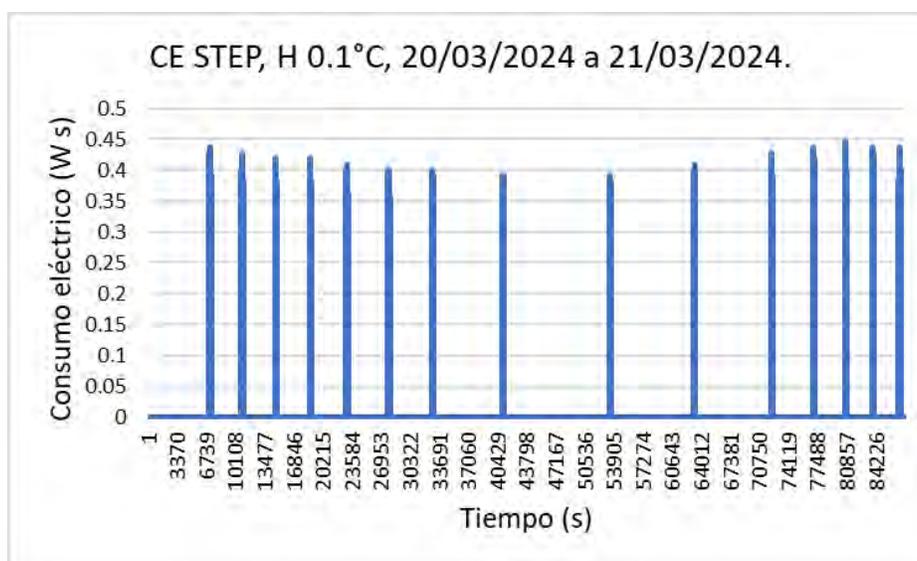


Figura 4.7: Conexiones del STEP el día 1.

La Figura 4.7 muestra las veces que el sistema STEP se conectó a lo largo del día, representando cada barra un encendido. En el eje y se presenta el consumo eléctrico, mientras que en el eje x se muestran los segundos transcurridos en el día.

La Figura 4.8 muestra el incremento del consumo eléctrico del sistema STEP y se observa un aumento exponencial a lo largo del día en donde el resultado fue de **1167.82 (W s)**.

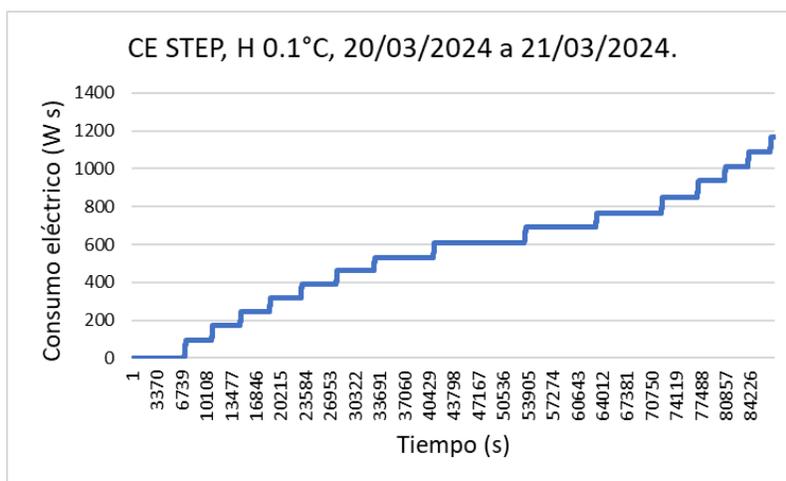


Figura 4.8: Incremento del consumo eléctrico del STEP el día 1.

Para el STES el primer día con histéresis 0.1

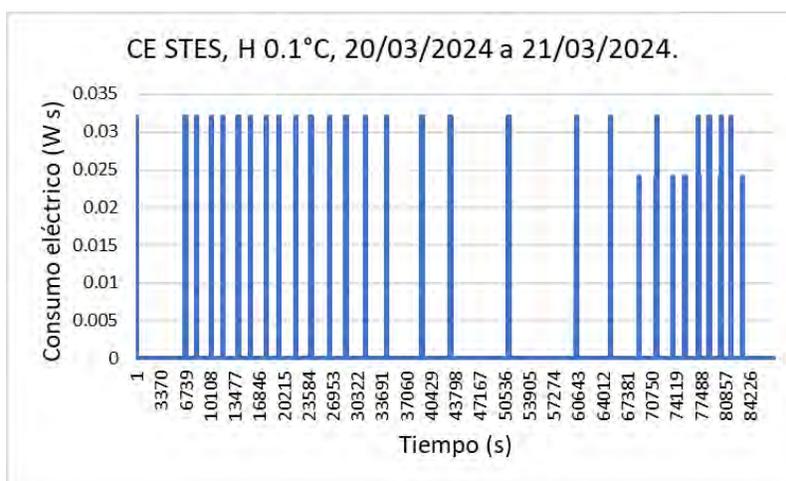


Figura 4.9: Conexiones del STES el día 1.

La Figura 4.9 muestra las veces que el sistema STES se conectó a lo largo del día, representando cada barra un encendido. En el eje y se presenta el consumo eléctrico, mientras que en el eje x se muestran los segundos transcurridos.

La Figura 4.10 muestra el incremento del consumo eléctrico del sistema STES, observándose un aumento exponencial a lo largo del día en donde el resultado fue de **42.60 (W s)**.

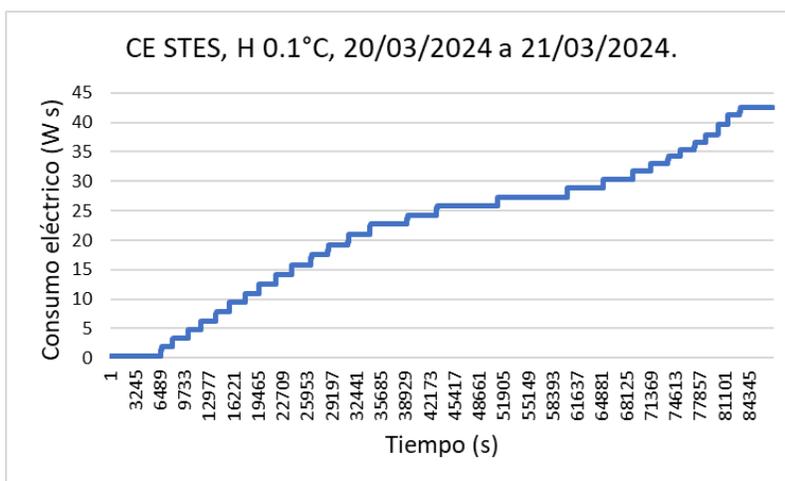


Figura 4.10: Incremento del consumo eléctrico del STES el día 1.

Día 2 (21/03/2024 - 22/03/2024)

El segundo día se realizó el mismo procedimiento para evaluar la consistencia de los resultados.

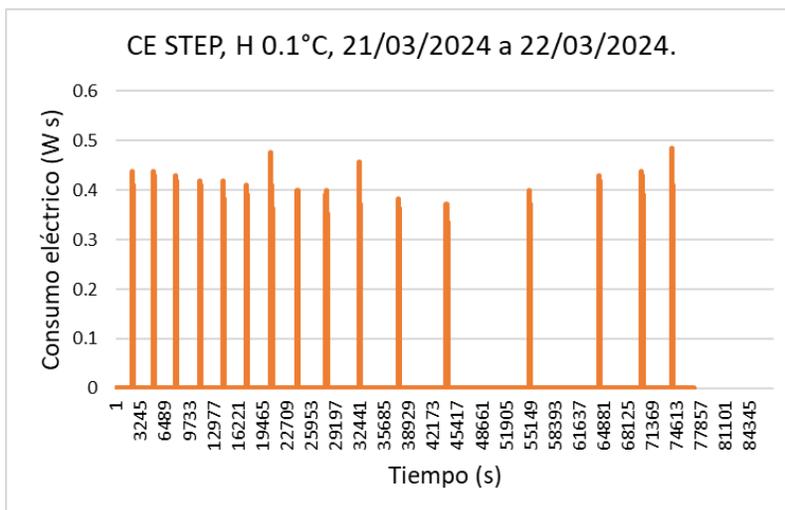


Figura 4.11: Conexiones del STEP el día 2.

La Figura 4.11 muestra las veces que el sistema STEP se conectó a lo largo del día, representando cada barra un encendido. En el eje y se presenta el consumo eléctrico, mientras que en el eje x se muestran los segundos transcurridos.

La Figura 4.12 muestra el incremento del consumo eléctrico que fue de **1175.32 (W s)** del STEP.

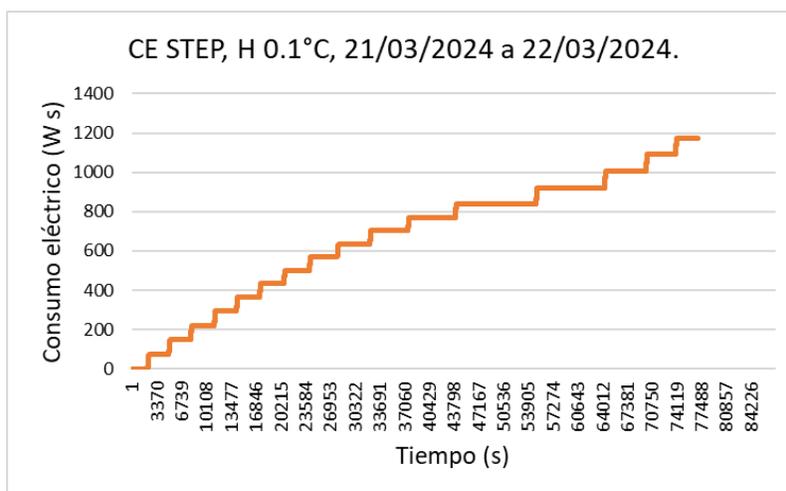


Figura 4.12: Incremento del consumo eléctrico del STEP el día 2.

Para el STES el segundo día con histéresis 0.1

El segundo día se realizaron las mismas mediciones para evaluar la consistencia de los resultados.

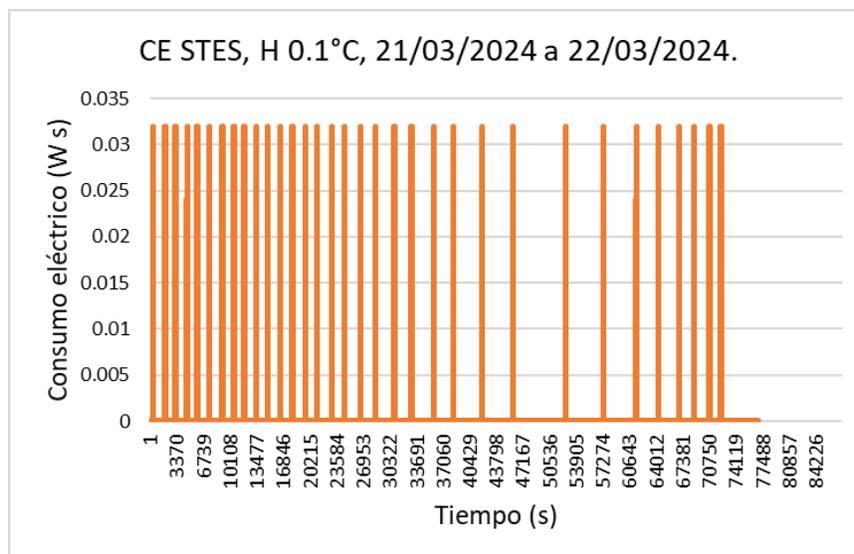


Figura 4.13: Conexiones del STES el día 2.

La Figura 4.13 muestra las veces que el sistema STES se conectó a lo largo del día, representando cada barra un encendido. En el eje y se presenta el consumo eléctrico, mientras que en el eje x se muestran los segundos transcurridos.

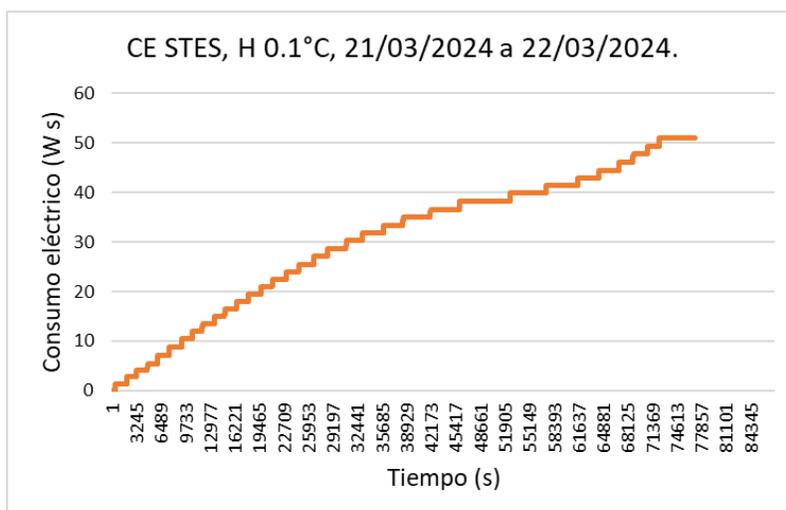


Figura 4.14: Incremento del consumo eléctrico del STES el día 2.

La Figura 4.14 muestra el incremento del consumo eléctrico que fue de **50.95 (W s)** del STES.

Día 3 (22/03/2024 - 23/03/2024)

El tercer día se completaron las mediciones para evaluar el comportamiento del consumo eléctrico.

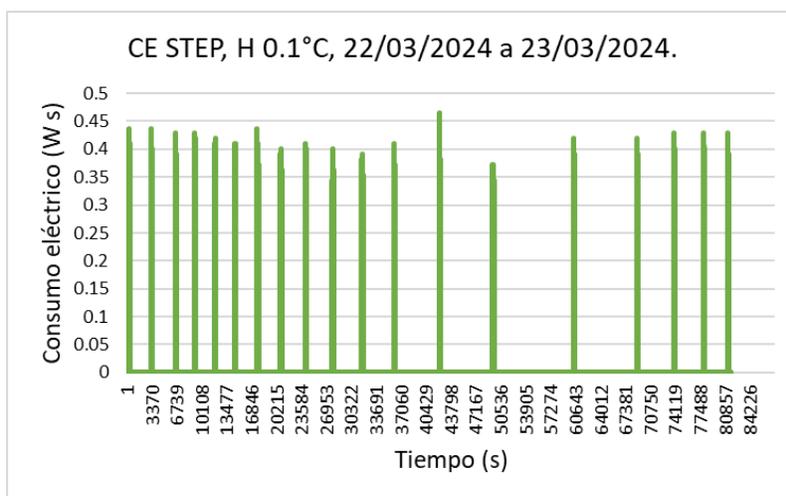


Figura 4.15: Conexiones del STEP el día 3.

La Figura 4.15 muestra las veces que el sistema STEP se conectó a lo largo del día, representando cada barra un encendido. En el eje y se presenta el consumo eléctrico, mientras que en el eje x se muestran los segundos transcurridos del día.

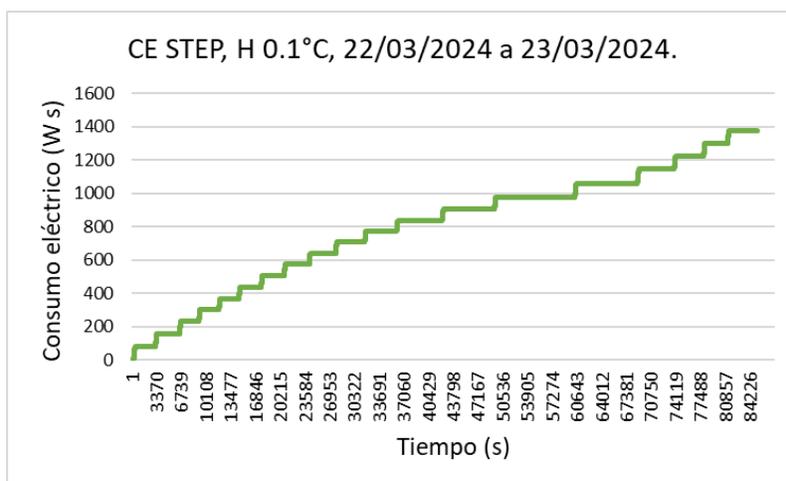


Figura 4.16: Incremento del consumo eléctrico del STEP el día 3.

La Figura 4.16 muestra el incremento del consumo eléctrico que fue de **1378.21 (W s)** del STEP.

Para el STES el tercer día con histéresis 0.1

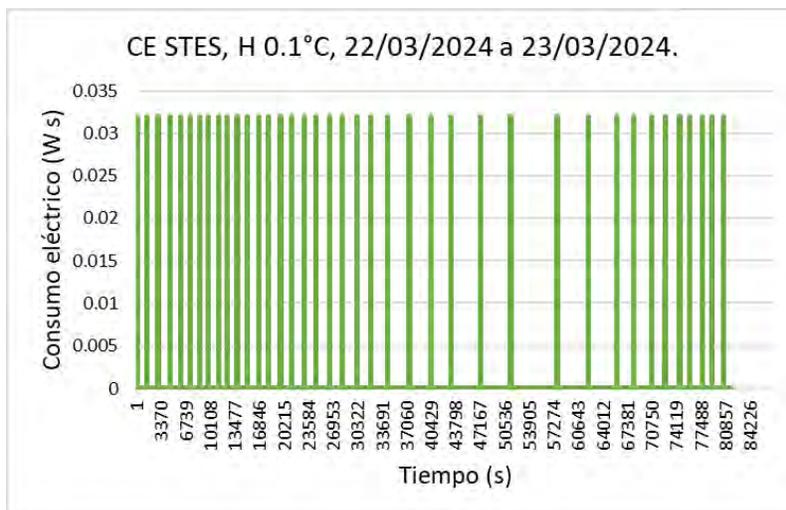


Figura 4.17: Conexiones del STES el día 3.

La Figura 4.17 muestra las veces que el sistema STES se conectó a lo largo del día, representando cada barra un encendido. En el eje y se presenta el consumo eléctrico, mientras que en el eje x se muestran los segundos transcurridos.

La Figura 4.18 muestra el incremento del consumo eléctrico que fue de **60.36 (W s)** del STES.

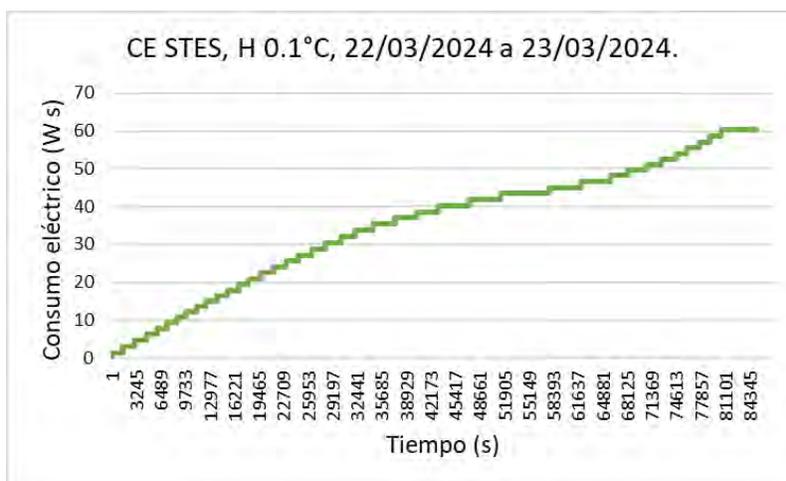


Figura 4.18: Incremento del consumo eléctrico del STES el día 3.

Consumo eléctrico diario de los sistemas STEP y STES

Se presentan los gráficos comparativos que ilustran cómo el consumo del sistema STEP, que incluye el chiller y la bomba 1, se compara con el consumo del sistema STES, compuesto por la bomba 2. Las Figuras 4.19, 4.20 y 4.21, presentan el consumo eléctrico de los subsistemas STEP y STES del sistema térmico del fotobiorreactor (STF), para los tres días de prueba, respectivamente. El sistema STEP, representado en color azul, presenta un consumo significativamente mayor en comparación con el sistema STES, que se muestra en color naranja.

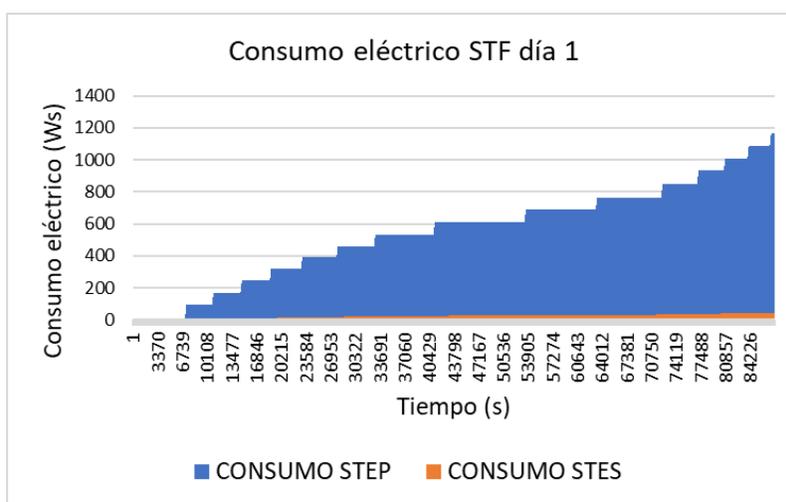


Figura 4.19: Consumo eléctrico STEP y STES día 1.

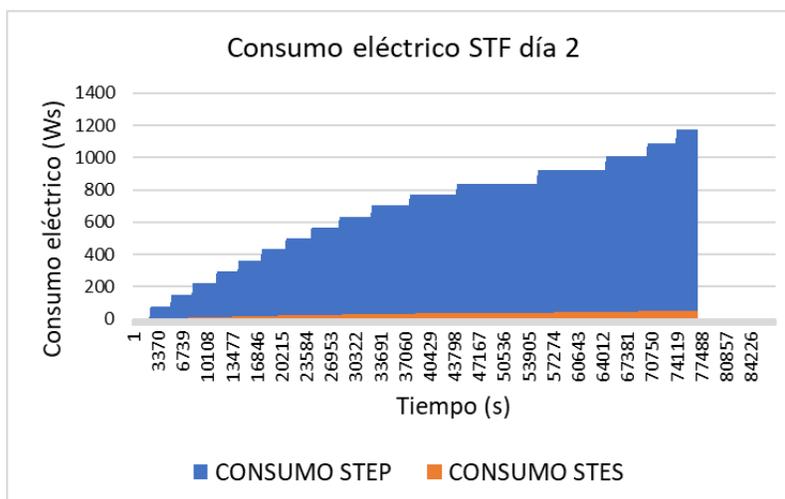


Figura 4.20: Consumo eléctrico STEP y STES día 2.

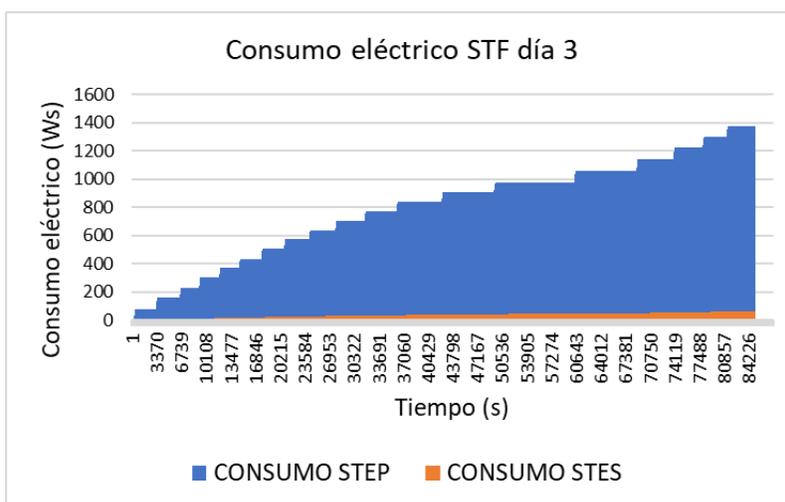


Figura 4.21: Consumo eléctrico STEP y STES día 3.

Consumo total STF

Las Figuras 4.22, 4.23 y 4.24, presentan el consumo eléctrico total del sistema térmico del fotobiorreactor (STF) durante los tres días de prueba, estos resultados involucran el consumo de los subsistemas STEP y STES en el fotobiorreactor con un consumo de 1210.45 (W s) el día 1, 1226.27 (W s), el día 2 y 1438.58 (W s) el día 3.

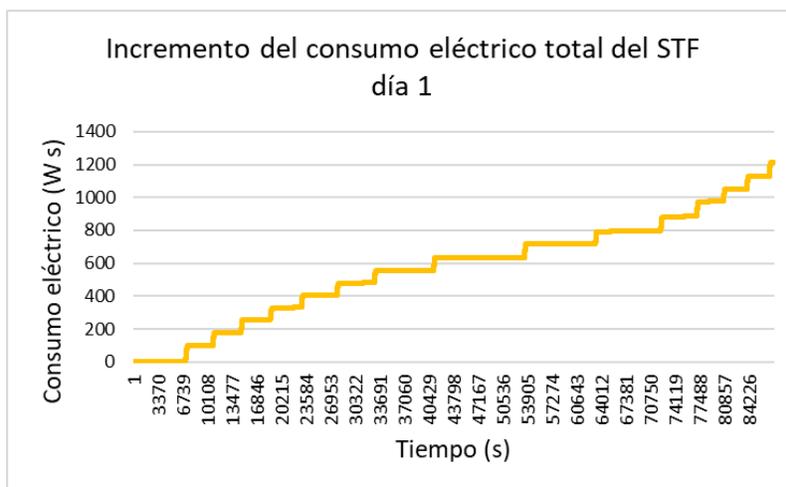


Figura 4.22: Consumo eléctrico total STF día 1.

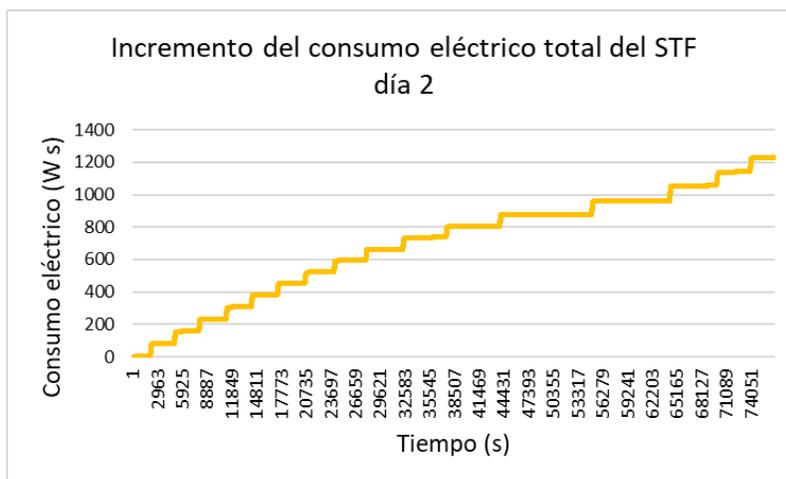


Figura 4.23: Consumo eléctrico total STF día 2.

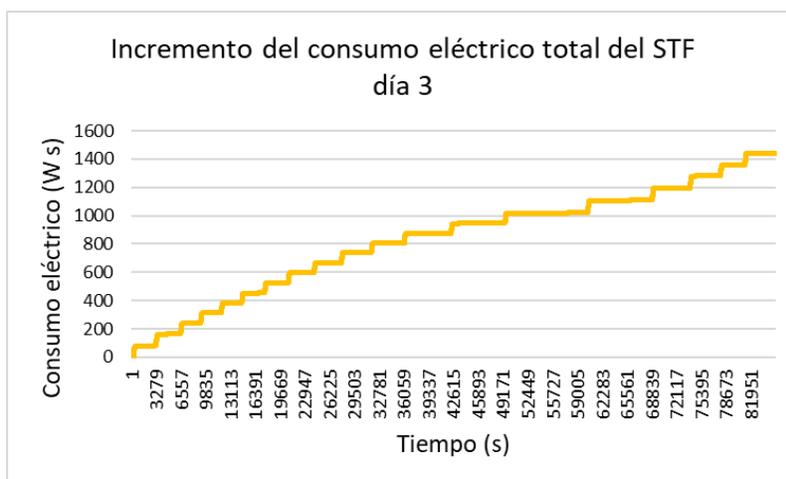


Figura 4.24: Consumo eléctrico total STF día 3.

Análisis estadístico de los consumos eléctricos totales STES, STEP Y STF

Se realizó un análisis estadístico de los consumos eléctricos totales del sistema de control de temperatura del fotobiorreactor (STF) y de ambos circuitos (STEP y STES) durante los tres días de prueba obteniendo los siguientes resultados.

Media

$$\text{Media STEP} = \frac{1167.82 + 1175.32 + 1378}{3} = \frac{3721.14}{3} = 1240.38 \text{ (W s)}$$

$$\text{Media STES} = \frac{42.60 + 50.95 + 60.36}{3} = \frac{153.91}{3} = 51.30 \text{ (W s)}$$

$$\text{Media STF} = \frac{1210.43 + 1226.27 + 1438.58}{3} = \frac{3875.28}{3} = 1291.76 \text{ (W s)}$$

Rango

$$\text{Rango STEP} = 1378 - 1167.82 = 210.18 \text{ (W s)}$$

$$\text{Rango STES} = 60.36 - 42.60 = 17.76 \text{ (W s)}$$

$$\text{Rango STF} = 1438.58 - 1210.43 = 228.15 \text{ (W s)}$$

Varianza y desviación estándar

$$\text{Varianza STEP} = \frac{(1167.82 - 1240.38)^2 + (1175.32 - 1240.38)^2 + (1378 - 1240.38)^2}{3}$$

$$\text{Varianza STEP} = \frac{(5264.54) + (4232.81) + (18934.74)}{3} = \frac{28432.09}{3} = 9477.36$$

$$\text{Desviación estándar STEP} = \sqrt{9477.36} = 97.34 \text{ (W s)}$$

$$\text{Varianza STES} = \frac{(42.60 - 51.30)^2 + (50.95 - 51.30)^2 + (60.36 - 51.30)^2}{3}$$

$$\text{Varianza STES} = \frac{(75.69) + (0.12) + (82.09)}{3} = \frac{157.90}{3} = 52.63$$

$$\text{Desviación estándar STES} = \sqrt{52.63} = 7.25 \text{ (W s)}$$

$$\text{Varianza STF} = \frac{(1210.43 - 1291.76)^2 + (1226.27 - 1291.76)^2 + (1438.58 - 1291.76)^2}{3}$$

$$\text{Varianza STF} = \frac{(6614.57) + (4289.40) + (21558.44)}{3} = \frac{32462.41}{3} = 10820.80$$

$$\text{Desviación estándar STF} = \sqrt{10820.80} = 104.01 \text{ (W s)}$$

Cuadro 21: Resumen de estadísticos para los tres días con histéresis de 0.1 °C

Estadístico	STEP (W s)	STES (W s)	STF (W s)
Media (Promedio)	1240.38	51.30	1291.76
Mediana	1240.38	51.30	1291.76
Rango	210.18	17.76	228.15
Desviación Estándar	94.01	7.24	106.68

Promedio STEP de los tres días

La Figura 4.25 muestra las conexiones del sistema STEP durante los tres días de prueba. Cada barra representa las conexiones diarias.

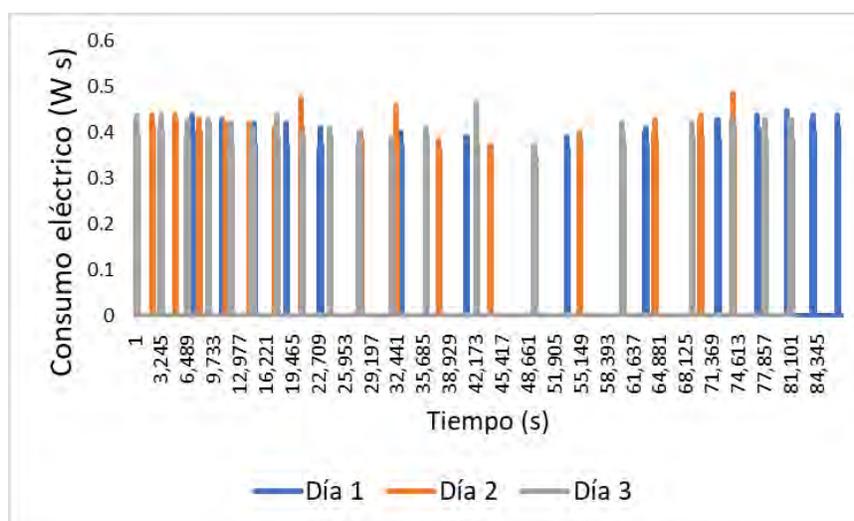


Figura 4.25: Conexiones del STEP durante los tres días de prueba.

La Figura 4.26 presenta el incremento del consumo eléctrico del sistema STEP durante los tres días de prueba, la línea amarilla indica el promedio del incremento del consumo eléctrico.

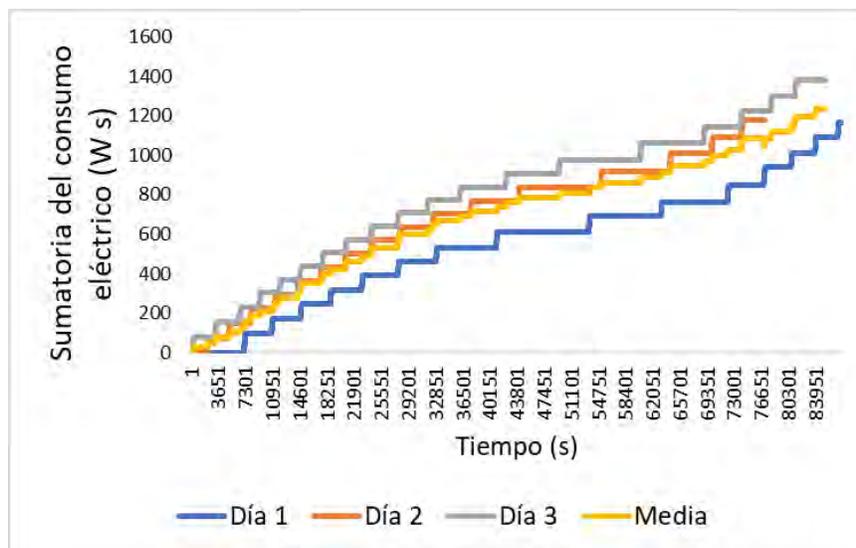


Figura 4.26: Incremento del consumo eléctrico del STEP durante los tres días de prueba.

Promedio STES de los tres días

La Figura 4.27 muestra las conexiones del sistema STES durante los tres días de prueba. Cada barra representa las conexiones diarias.

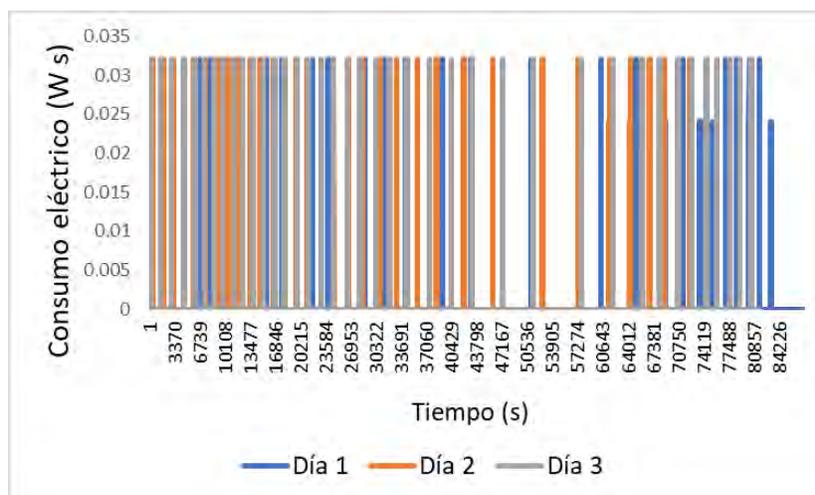


Figura 4.27: Conexiones del STES durante los tres días de prueba.

La Figura 4.28 presenta el incremento del consumo eléctrico del sistema STES durante los tres días de prueba. Cada línea representa el consumo diario, y la línea amarilla indica el promedio del incremento del consumo eléctrico.

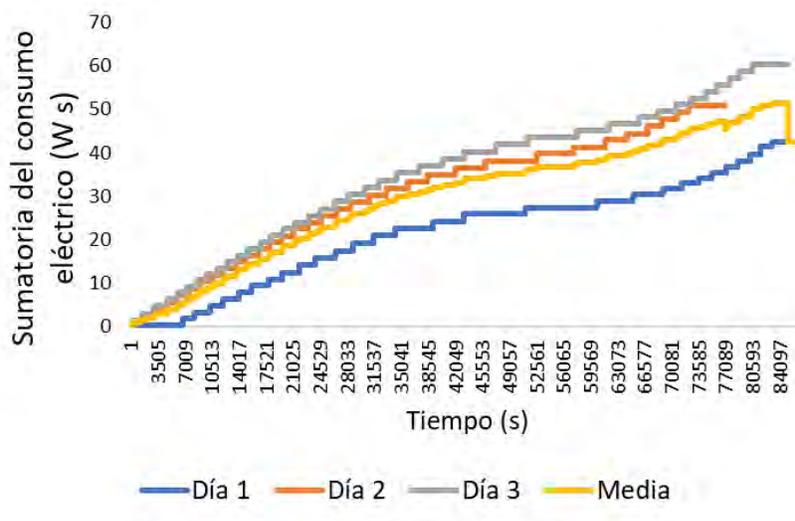


Figura 4.28: Incremento del consumo eléctrico del STES durante los tres días de prueba.

4.4.3. Observaciones del escenario B

Los resultados obtenidos del escenario B, muestran una reducción en el consumo eléctrico en comparación con los datos obtenidos antes de la modificación del sistema.

Con esta primera estrategia propuesta para la reducción de consumo eléctrico, se cumplieron los objetivos de la tesis, demostrando que la implementación propuesta puede disminuir significativamente el consumo de energía.

Aunque aún falta por demostrar la efectividad de la segunda propuesta, los experimentos realizados ya validaron la primera estrategia.

A continuación, se presenta una comparación de los consumos eléctricos y el impacto de la estrategia implementada.

Comparación del consumo eléctrico antes y después del aislamiento de la circulación del glicol

Datos del experimento 2 (antes de la modificación del subsistema térmico)

En el experimento 2, el consumo eléctrico del subsistema de control de temperatura fue medido durante seis días consecutivos. Los resultados se muestran en la siguiente tabla [22](#).

Cuadro 22: Consumo eléctrico del subsistema de control de temperatura antes de la modificación

Fecha	Consumo eléctrico (kWh)
25/05/2023	2.156
26/05/2023	2.317
27/05/2023	3.819
28/05/2023	4.799
29/05/2023	4.309
30/05/2023	3.28

Promedio del consumo eléctrico (antes de la modificación del subsistema térmico)

$$\bar{x}_{\text{antes}} = \frac{2.156 + 2.317 + 3.819 + 4.799 + 4.309 + 3.28}{6} = \frac{20.68}{6} = 3.45 \text{ kWh}$$

Datos del Escenario B (después de la modificación del subsistema térmico)

Para el escenario B, el consumo eléctrico del subsistema de control térmico (STF) se midió durante tres días consecutivos, considerando la circulación del glicol en ambos circuitos (STEP y STES). Los resultados se muestran en la tabla [23](#).

Cuadro 23: Consumo eléctrico del subsistema de control de temperatura después de la modificación

Fecha	CE total STEP (W s)	CE total STES (W s)	CE total STF (W s)
20/03/2024	1167.82	42.60	1210.43
21/03/2024	1175.32	50.95	1226.27
22/03/2024	1378.00	60.36	1438.58

Análisis comparativo

Para realizar este análisis, se definieron las medias del consumo eléctrico antes (\bar{x}_{antes}) y después ($\bar{x}_{\text{después}}$) de la implementación.

Antes de la modificación, la media del consumo eléctrico (\bar{x}_{antes}) se calculó de la siguiente manera:

$$\bar{x}_{\text{antes}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{2.156 + 2.317 + 3.819 + 4.799 + 4.309 + 3.28}{6} = \frac{20.68}{6} = 3.45 \text{ kWh}$$

Donde $n = 6$ representa el número de días de medición y x_i representa el consumo eléctrico en kWh de cada día.

Después de la implementación de la estrategia de control, la media del consumo eléctrico ($\bar{x}_{\text{después}}$) se calculó con los siguientes valores en W s:

$$\bar{x}_{\text{después}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1210.43 + 1226.27 + 1438.58}{3} = \frac{3875.28}{3} = 1291.76 \text{ W s}$$

Donde $n = 3$ representa el número de días de medición y x_i representa el consumo eléctrico en W s de cada día.

Para convertir la media del consumo eléctrico después de la modificación en kWh es:

$$\bar{x}_{\text{después}}(\text{kWh}) = \frac{\bar{x}_{\text{después}}(\text{W s})}{3600 \text{ W s/kWh}} = \frac{1291.76 \text{ W s}}{3600 \text{ W s/kWh}} = 0.3588 \text{ kWh}$$

La comparación entre estas dos medias demostró una gran reducción en el consumo eléctrico:

$$\Delta \bar{x} = \bar{x}_{\text{antes}} - \bar{x}_{\text{después}} = 3.45 \text{ kWh} - 0.3588 \text{ kWh} = 3.0912 \text{ kWh}$$

Esto representa una disminución del consumo eléctrico en aproximadamente un 89.49%, que se calculó de la siguiente forma:

$$\text{Reducción (\%)} = \left(\frac{\bar{x}_{\text{antes}} - \bar{x}_{\text{después}}}{\bar{x}_{\text{antes}}} \right) \times 100 = \left(\frac{3.45 - 0.3588}{3.45} \right) \times 100 \approx 89.49\%$$

Observaciones generales

Los resultados demostraron que la primera propuesta del aislamiento en los circuitos de la circulación del glicol lograron reducir el consumo eléctrico del subsistema de control de temperatura del fotobiorreactor. La evaluación mostró una reducción, con una disminución del 89.49% en el consumo medio diario. Esto cumple con el objetivo de mejorar la sostenibilidad del proceso.

4.5. Escenario C: Evaluación de la ampliación del margen de histéresis a 0.5 °C en el subsistema térmico

Se presenta el análisis de los datos del consumo eléctrico de los experimentos realizados con un margen de histéresis de 0.5 °C. Los datos incluyen, el consumo eléctrico total del sistema térmico del Fotobiorreactor (STF), del sistema térmico de enfriamiento primario (STEP) y del sistema térmico de enfriamiento secundario (STES).

Las Figuras 4.29, 4.33 y 4.37 muestran las veces que el subsistema STEP se conectó a lo largo del día para los tres días de prueba, respectivamente. Con la misma representación gráfica las Figuras 4.31, 4.35 y 4.39 presentan las conexiones pero del subsistema STES durante el mismo periodo. Cada barra representa un encendido del sistema, presentando el consumo eléctrico en el eje y y los segundos transcurridos en el día en el eje x.

Las Figuras 4.30, 4.34 y 4.38 muestran el incremento del consumo eléctrico del sistema STEP para los tres días de prueba y las Figuras 4.32, 4.36 y 4.40 ilustran el aumento del consumo del sistema STES en los mismos días respectivamente.

4.5.1. Resultados del escenario C

Día 1 (23/03/2024 - 24/03/2024)

Para este primer día se registró un consumo eléctrico total del STEP de 1009.57 (W s)

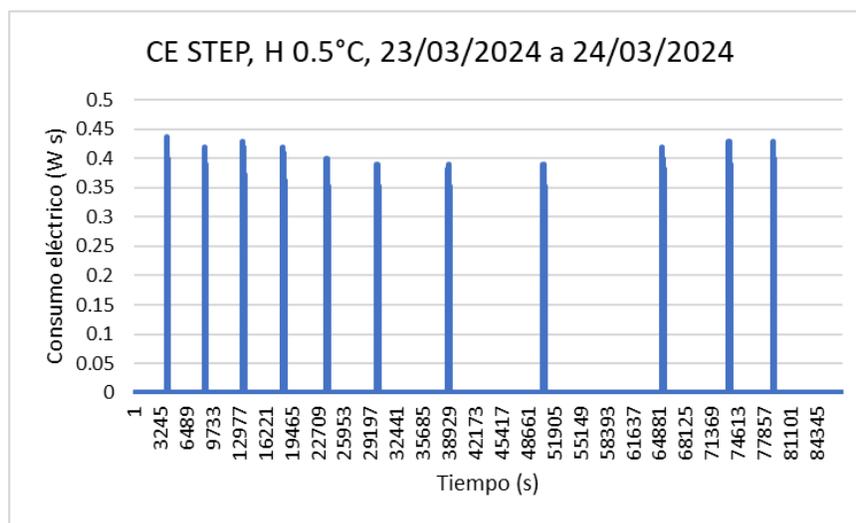


Figura 4.29: Conexiones del STEP el día 1.

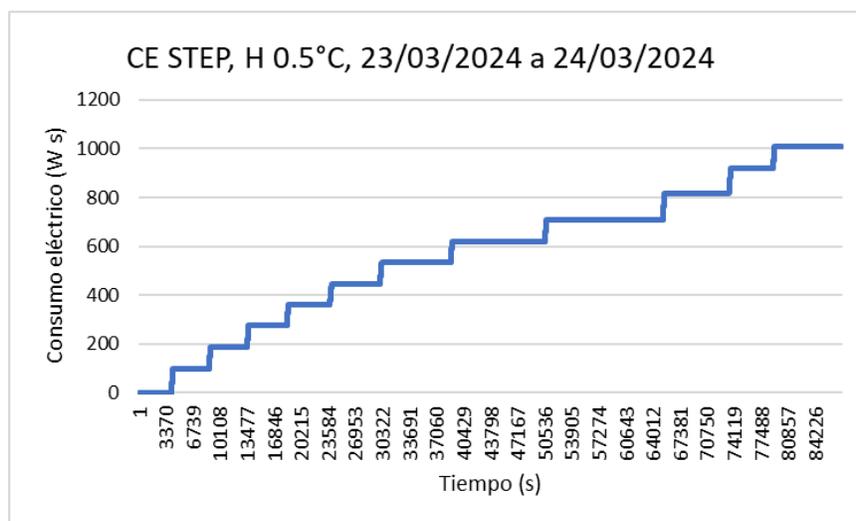


Figura 4.30: Incremento del consumo eléctrico del STEP el día 1.

Para el caso del STES el primer día se registró un consumo eléctrico total de 91.14 (W s)

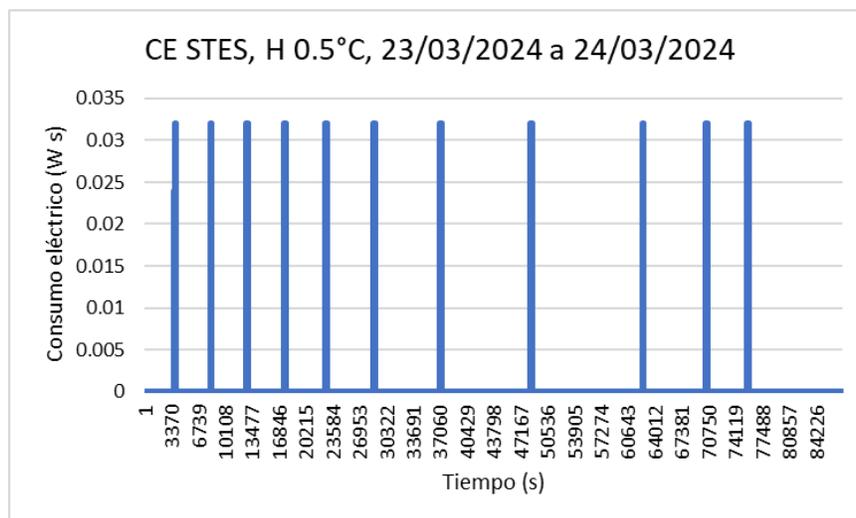


Figura 4.31: Conexiones del STES el día 1.

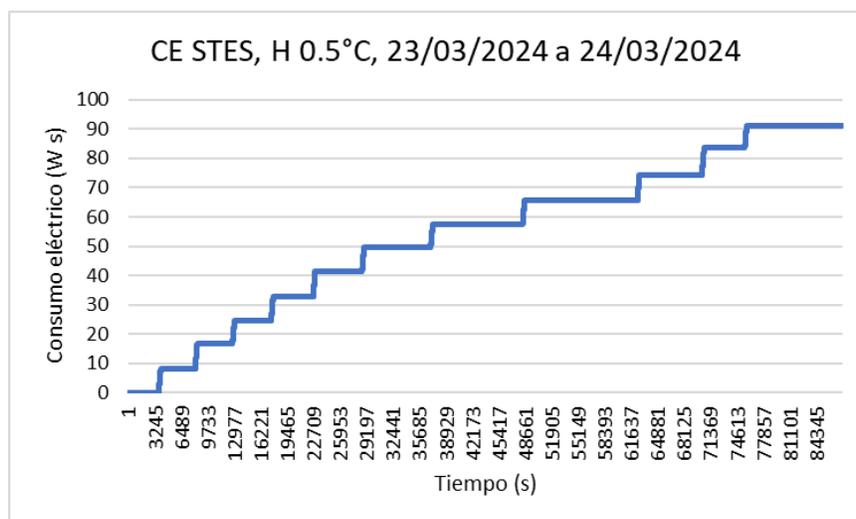


Figura 4.32: Incremento del consumo eléctrico del STES el día 1.

Día 2 (25/03/2024 - 26/03/2024)

Para el segundo día se registró un consumo eléctrico total del STEP de 830.21 (W s)

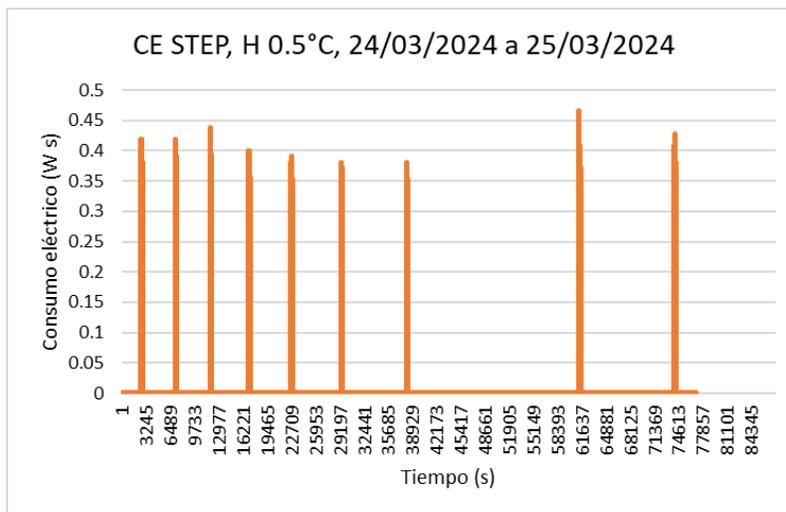


Figura 4.33: Conexiones del STEP el día 2.

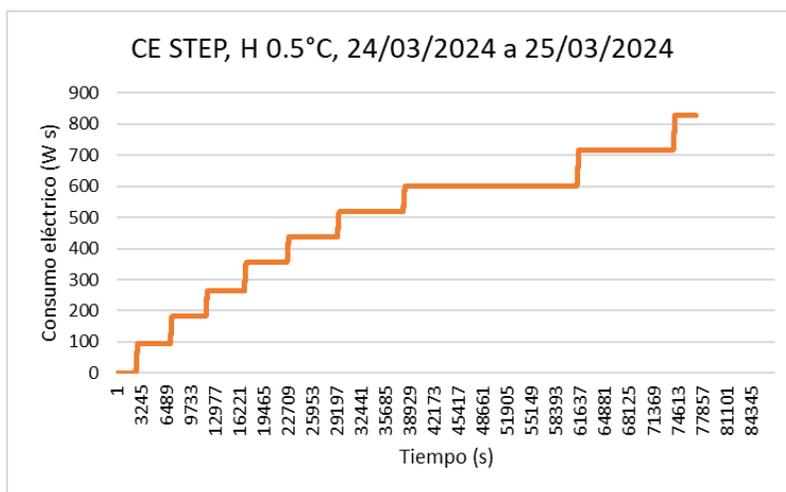


Figura 4.34: Incremento del consumo eléctrico del STEP el día 2.

Para el caso del STES el segundo día se registró un consumo eléctrico total de 73.95 (W s)

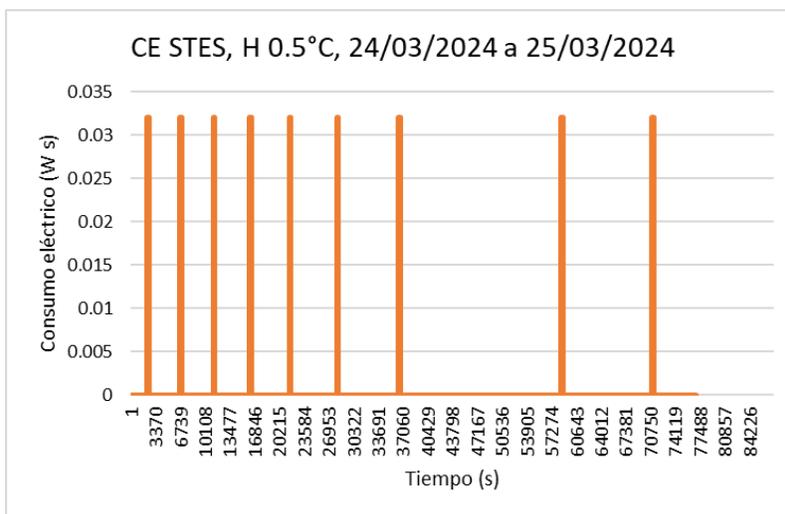


Figura 4.35: Conexiones del STES el día 2.

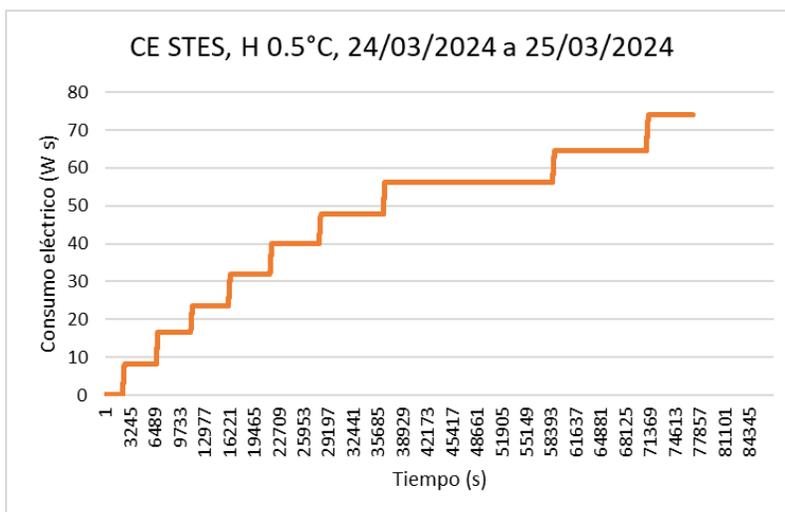


Figura 4.36: Incremento del consumo eléctrico del STES el día 2.

Día 3 (27/03/2024 - 28/03/2024)

Para el tercer día se registró un consumo eléctrico total del STEP de 546.64 (W s)

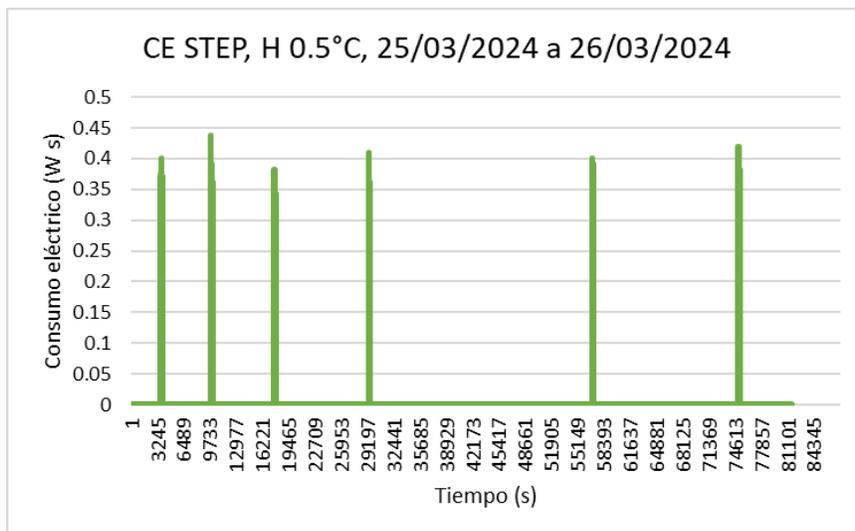


Figura 4.37: Conexiones del STEP el día 3.

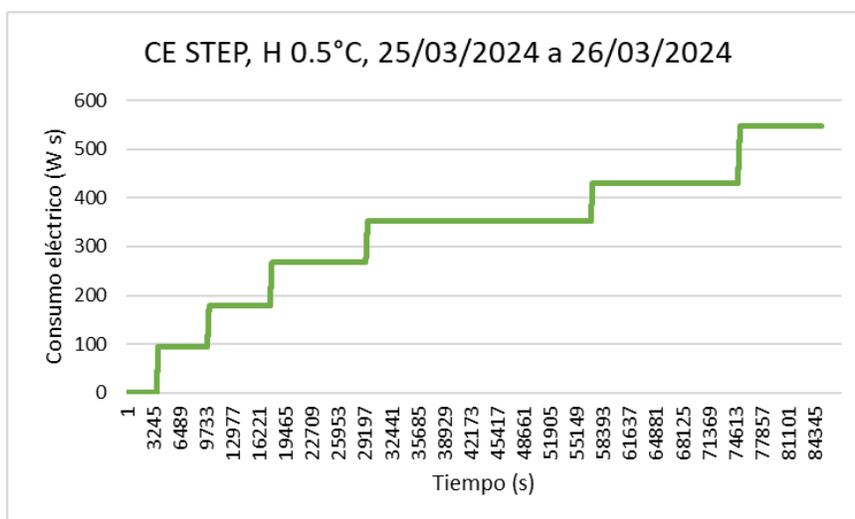


Figura 4.38: Incremento del consumo eléctrico del STEP el día 3.

Para el caso del STES el tercer día se registró un consumo eléctrico total de 41.91 (W s)

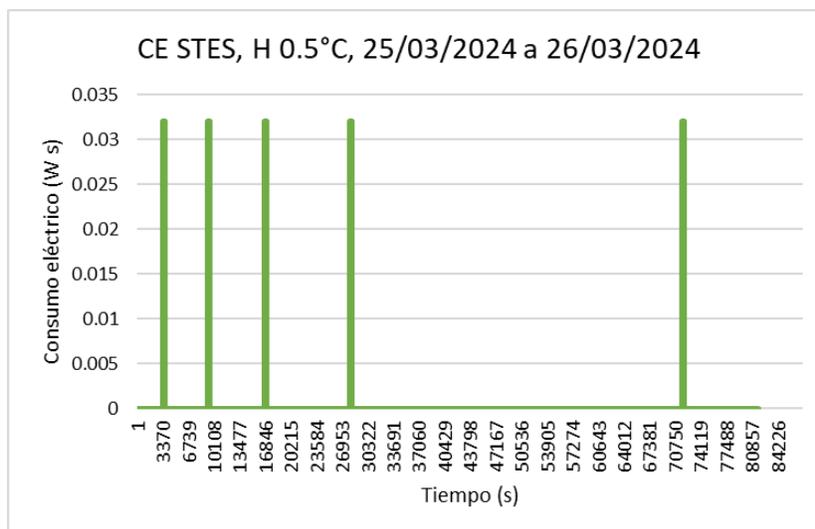


Figura 4.39: Conexiones del STES el día 3.

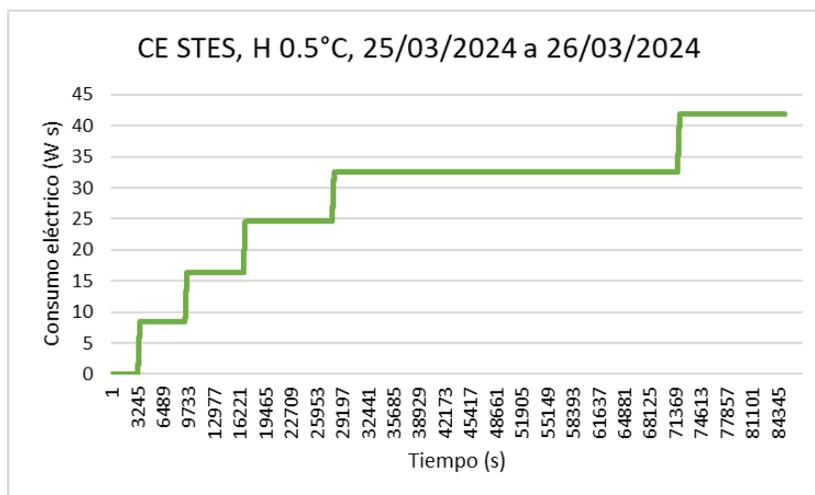


Figura 4.40: Incremento del consumo eléctrico del STES el día 3.

Las Figuras 4.41, 4.42 y 4.43 presentan el consumo eléctrico de los subsistemas STEP y STES del sistema térmico del fotobiorreactor (STF), para los tres días de prueba, respectivamente. El sistema STEP, representado en color azul, presenta un consumo significativamente mayor en comparación con el sistema STES, que se muestra en color naranja.

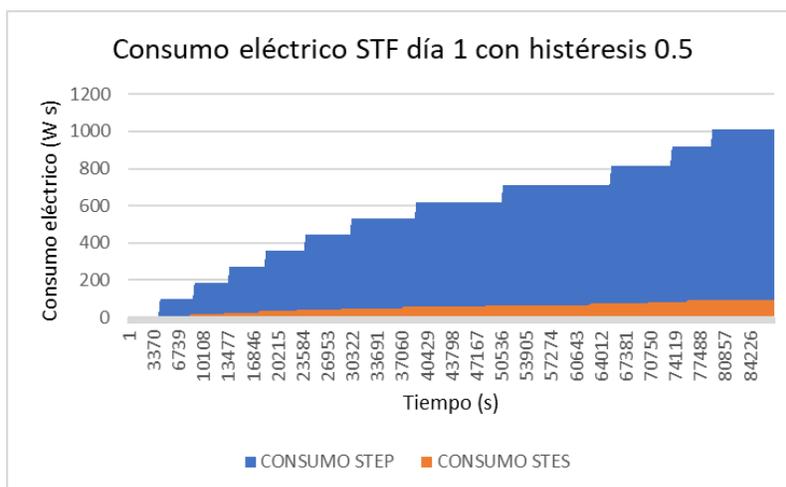


Figura 4.41: Consumo eléctrico STEP y STES día 1 (histéresis 0.5 °C).

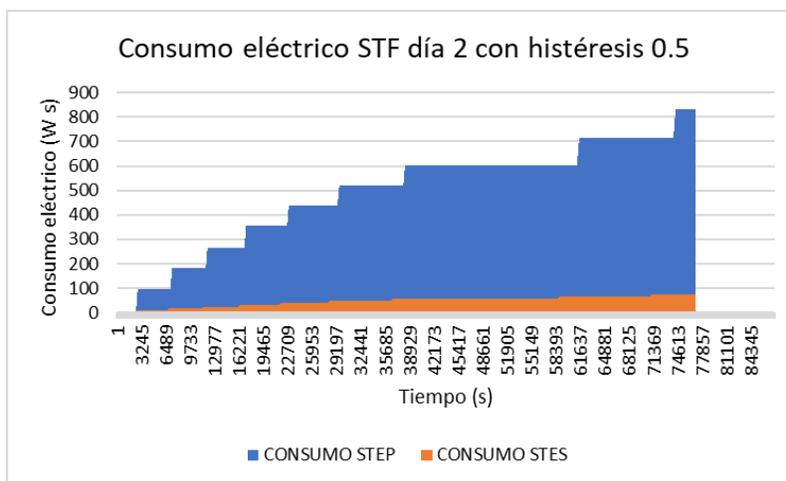


Figura 4.42: Consumo eléctrico STEP y STES día 2 (histéresis 0.5 °C).

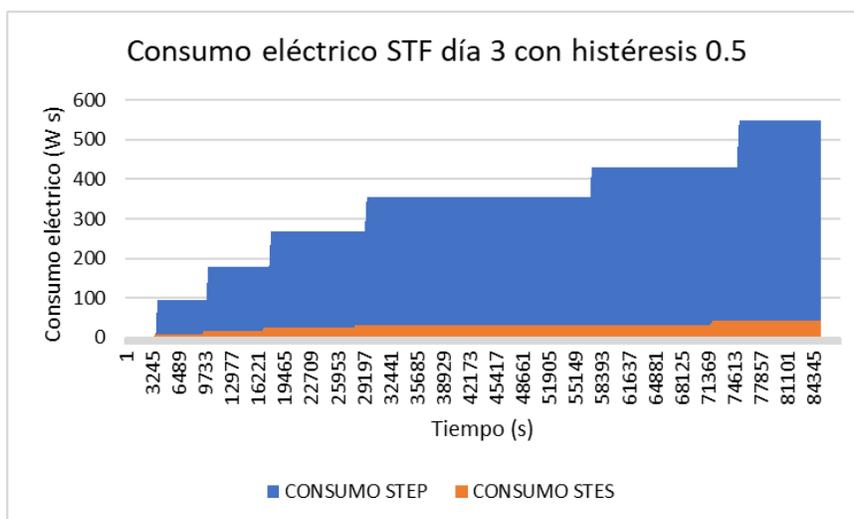


Figura 4.43: Consumo eléctrico STEP y STES día 3 (histéresis 0.5 °C).

Las Figuras 4.44, 4.45 y 4.46 presentan el consumo eléctrico total del sistema térmico del fotobiorreactor (STF) durante los tres días de prueba, estos resultados integran el consumo de los subsistemas STEP y STES en el fotobiorreactor con un consumo de 1100.71 (W s) el día 1, un consumo de 904.17 (W s), el día 2 y 588.56 (W s) el día 3.

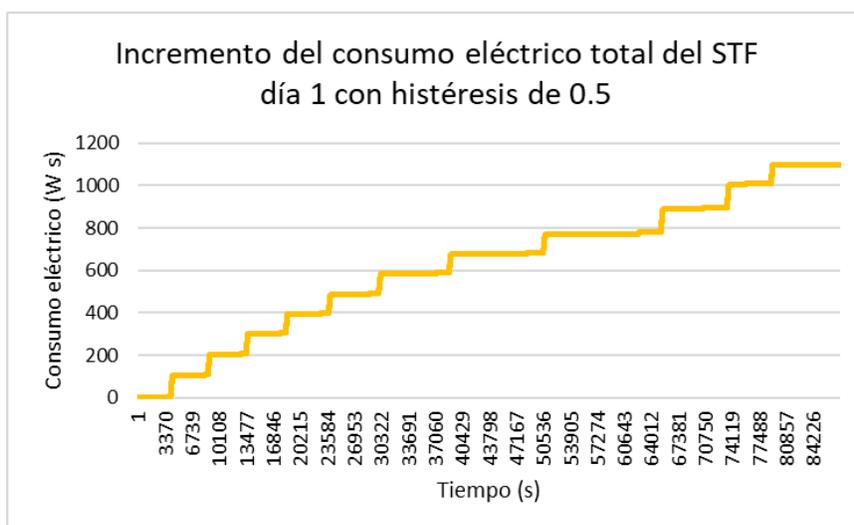


Figura 4.44: Consumo eléctrico total STF día 1 (histéresis 0.5 °C).

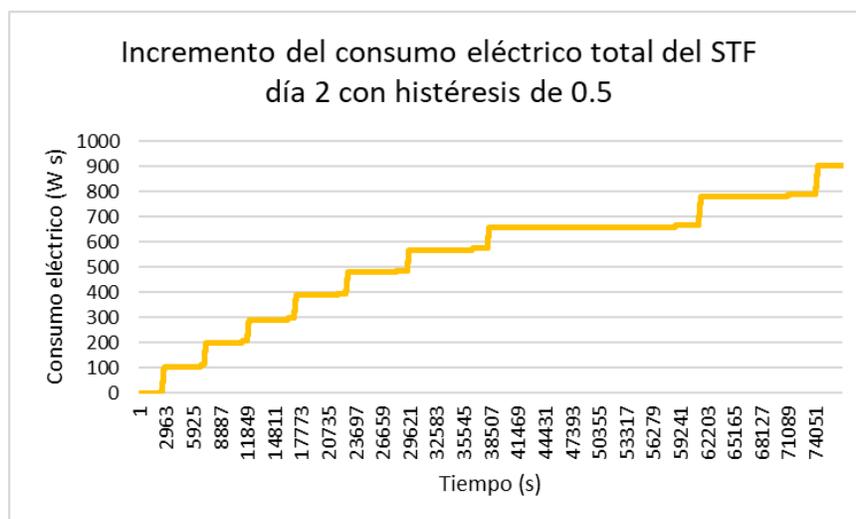


Figura 4.45: Consumo eléctrico total STF día 2 (histéresis 0.5 °C).

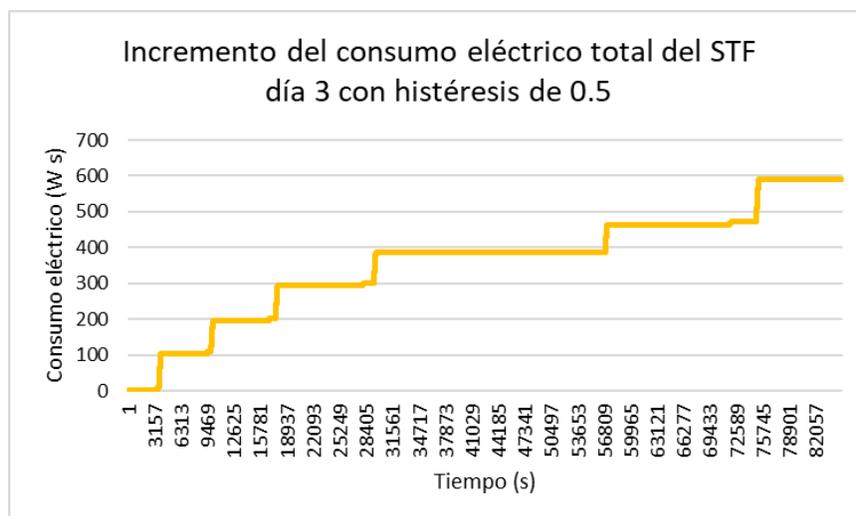


Figura 4.46: Consumo eléctrico total STF día 3 (histéresis 0.5 °C).

4.5.2. Observaciones del escenario C

Datos del escenario C (Histéresis de 0.5 °C)

Día 1: CE total STEP: 1009.57 (W s), CE total STES: 91.14 (W s), CE total STF: 1100.71 (W s).

Día 2: CE total STEP: 830.21 (W s), CE total STES: 73.95 (W s), CE total STF: 904.17 (W s)

Día 3: CE total STEP: 546.64 (W s), CE total STES: 41.91 (W s), CE total STF: 588.56 (W s)

Análisis matemático

Media de los consumos eléctricos del escenario C

$$\bar{x}_{\text{STEP}, 0.5} = \frac{1009.57 + 830.21 + 546.64}{3} = \frac{2386.42}{3} = 795.47 \text{ (W s)}$$

$$\bar{x}_{\text{STES}, 0.5} = \frac{91.14 + 73.95 + 41.91}{3} = \frac{206.00}{3} = 68.67 \text{ (W s)}$$

$$\bar{x}_{\text{STF}, 0.5} = \frac{1100.71 + 904.17 + 588.56}{3} = \frac{2593.44}{3} = 864.48 \text{ (W s)}$$

Rango de los consumos eléctricos del escenario C

$$\text{Rango}_{\text{STEP}, 0.5} = 1009.57 - 546.64 = 462.93 \text{ (W s)}$$

$$\text{Rango}_{\text{STES}, 0.5} = 91.14 - 41.91 = 49.23 \text{ (W s)}$$

$$\text{Rango}_{\text{STF}, 0.5} = 1100.71 - 588.56 = 512.15 \text{ (W s)}$$

Varianza y desviación estándar del consumo eléctrico

$$\begin{aligned} \text{Varianza}_{\text{STEP}, 0.5} &= \frac{(1009.57 - 795.47)^2 + (830.21 - 795.47)^2 + (546.64 - 795.47)^2}{3} \\ &= \frac{45838.81 + 1206.86 + 61916.36}{3} = \frac{108962.03}{3} = 36320.68 \end{aligned}$$

$$\text{Desviación Estándar}_{\text{STEP}, 0.5} = \sqrt{36320.68} = 190.55 \text{ (W s)}$$

$$\text{Varianza}_{\text{STES}, 0.5} = \frac{(91.14 - 68.67)^2 + (73.95 - 68.67)^2 + (41.91 - 68.67)^2}{3} = 415.84$$

$$\text{Desviación Estándar}_{\text{STES}, 0.5} = \sqrt{415.84} = 20.39 \text{ (W s)}$$

$$\text{Varianza}_{\text{STF}, 0.5} = \frac{(1100.71 - 864.48)^2 + (904.17 - 864.48)^2 + (588.56 - 864.48)^2}{3} = 44479.87$$

$$\text{Desviación Estándar}_{\text{STF}, 0.5} = \sqrt{44479.87} = 210.89 \text{ (W s)}$$

Comparativa entre escenarios B y C

Media del consumo eléctrico (Escenario B: Histéresis de 0.1 °C)

$$\bar{x}_{\text{STF}, 0.1} = \frac{1210.43 + 1226.27 + 1438.58}{3} = \frac{2875.28}{3} = 1291.76 \text{ (W s)}$$

Media del consumo eléctrico (Escenario C: Histéresis de 0.5 °C)

$$\bar{x}_{\text{STF}, 0.5} = \frac{1100.71 + 904.17 + 588.56}{3} = \frac{2593.44}{3} = 864.48 \text{ (W s)}$$

Comparación de medias convertidas a kWh:

$$\bar{x}_{\text{STF}, 0.1}(\text{kWh}) = \frac{1291.76 \text{ (W s)}}{3600 \text{ (W s)/kWh}} = 0.3588 \text{ kWh}$$

$$\bar{x}_{\text{STF}, 0.5}(\text{kWh}) = \frac{864.48 \text{ (W s)}}{3600 \text{ (W s)/kWh}} = 0.2407 \text{ kWh}$$

La Figura 4.47 muestra las conexiones del sistema STEP durante los tres días de prueba, y la Figura 4.48 presenta las conexiones del sistema STES durante el mismo periodo. Cada barra representa las conexiones diarias de ambos sistemas.

Promedios del consumo eléctrico

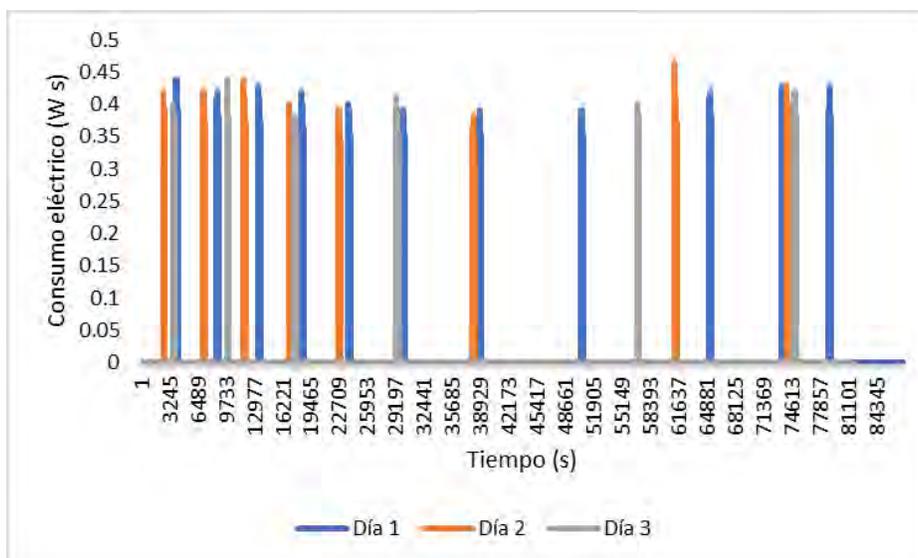


Figura 4.47: Promedio de las conexiones del STEP durante los tres días de prueba con histéresis de 0.5 °C.

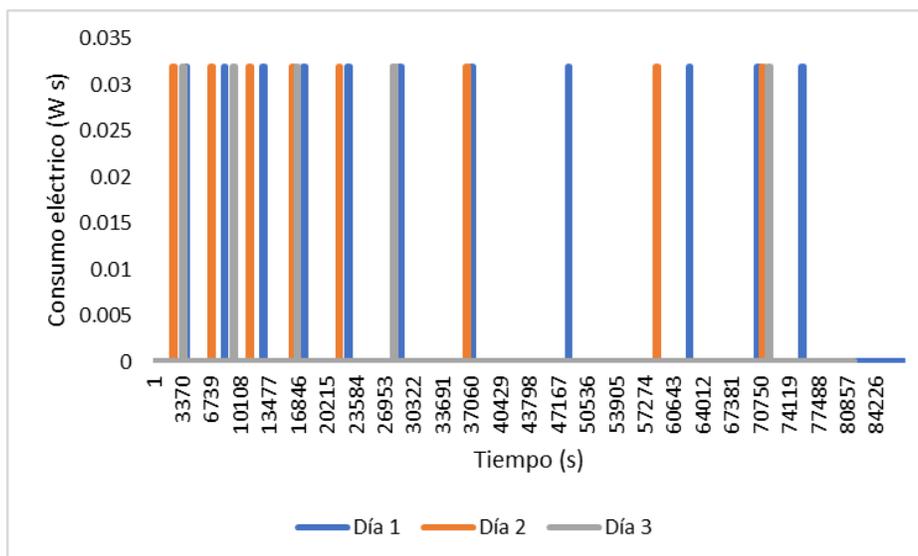


Figura 4.48: Conexiones del STES durante los tres días de prueba con histéresis de 0.5 °C.

La Figura 4.49 presenta el incremento del consumo eléctrico del sistema STEP durante los tres días de prueba, la Figura 4.50 muestra el aumento del consumo del sistema STES en el mismo periodo.

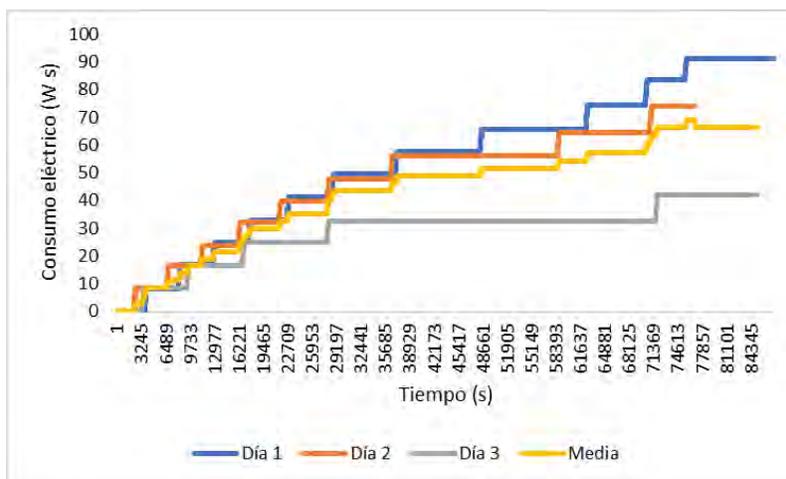


Figura 4.49: Promedio del incremento del consumo eléctrico del STEP durante los tres días de prueba con histéresis de 0.5 °C.

En ambas figuras, la línea amarilla indica el promedio del incremento del consumo eléctrico.

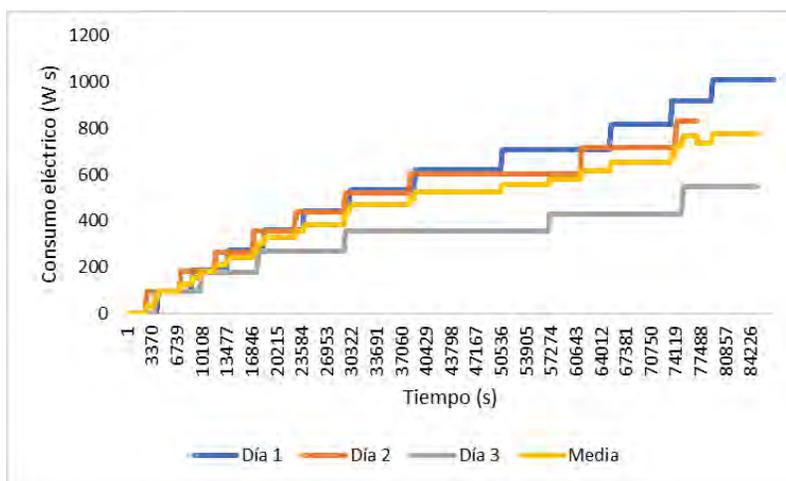


Figura 4.50: Promedio del incremento del consumo eléctrico del STES durante los tres días de prueba con histéresis de 0.5 °C.

Comparación de la ampliación del margen de histéresis en los escenarios B y C

Datos del escenario B (Histéresis de 0.1 °C)

Día 1: CE total STEP: 1167.82 (W s), CE total STES: 42.60 (W s), CE total STF: 1210.43 (W s).

Día 2: CE total STEP: 1175.32 (W s), CE total STES: 50.95 (W s), CE total STF: 1226.27 (W s).

Día 3: CE total STEP: 1378.00 (W s), CE total STES: 60.36 (W s), CE total STF: 1438.58 (W s).

$$\text{Reducción del CE} = \bar{x}_{\text{STF}, 0.1} - \bar{x}_{\text{STF}, 0.5} = 0.35882 \text{ kWh} - 0.2407 \text{ kWh} = 0.11812 \text{ kWh}$$

$$\text{Porcentaje de Reducción} = \left(\frac{\bar{x}_{\text{STF}, 0.1} - \bar{x}_{\text{STF}, 0.5}}{\bar{x}_{\text{STF}, 0.1}} \right) \times 100$$

$$\text{Porcentaje de Reducción} = \left(\frac{0.11812 \text{ kWh}}{0.35882 \text{ kWh}} \right) \times 100 \approx 32.92 \%$$

Observaciones del escenario C

Los resultados obtenidos del escenario C, con el margen de histéresis de 0.5 °C, muestran una reducción en el consumo eléctrico en comparación con el escenario B con histéresis de 0.1 °C.

La comparación de las medias de consumo eléctrico entre los dos escenarios muestra una reducción significativa en el consumo eléctrico cuando se amplía el margen de histéresis de 0.1 °C a 0.5 °C.

Antes de la modificación (escenario B), la media del consumo eléctrico era de 0.3446 kWh. Después, con una histéresis de 0.5 °C (escenario C), la media del consumo eléctrico se redujo a 0.2209 kWh. Esto demostró que la ampliación del margen de histéresis reduce el consumo eléctrico.

4.6. Escenario D: Evaluación de la ampliación del margen de histéresis a 1 °C en el subsistema térmico

Se presenta el análisis de los datos del consumo eléctrico de los experimentos realizados con un margen de histéresis de 1 °C.

Las Figuras 4.51, 4.55 y 4.59 muestran las veces que el subsistema STEP se conectó a lo largo del día para los tres días de prueba, respectivamente. Con la misma representación gráfica, las Figuras 4.53, 4.57 y 4.61 presentan las conexiones, pero del subsistema STES durante el mismo periodo. Cada barra representa un encendido del sistema, presentando el consumo eléctrico en el eje y y los segundos transcurridos en el día en el eje x.

Las Figuras 4.52, 4.56 y 4.60 muestran el incremento del consumo eléctrico del sistema STEP para los tres días de prueba y las Figuras 4.54, 4.58 y 4.62 ilustran el aumento del consumo del sistema STES en los mismos días.

4.6.1. Resultados del escenario D

Día 1 (26/03/2024 - 27/03/2024)

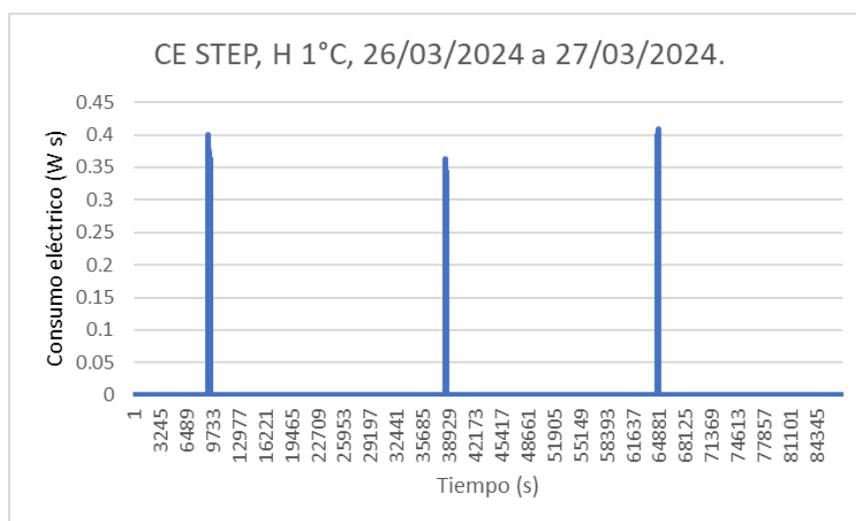


Figura 4.51: Conexiones del STEP el día 1.

Para el primer día se registró un consumo eléctrico total en el STEP de 297.74 (W s)

Mientras que para el caso del STES el primer día se registró un consumo eléctrico total de 15.64 (W s)

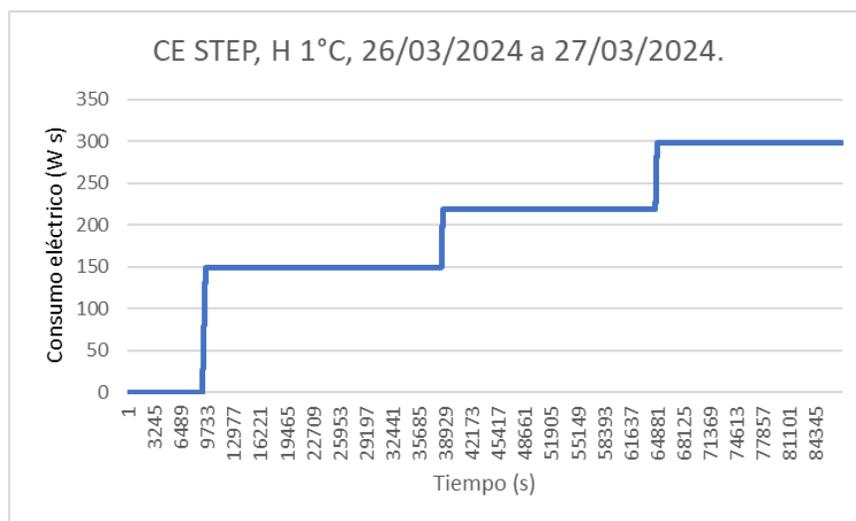


Figura 4.52: Incremento del consumo eléctrico del STEP el día 1.

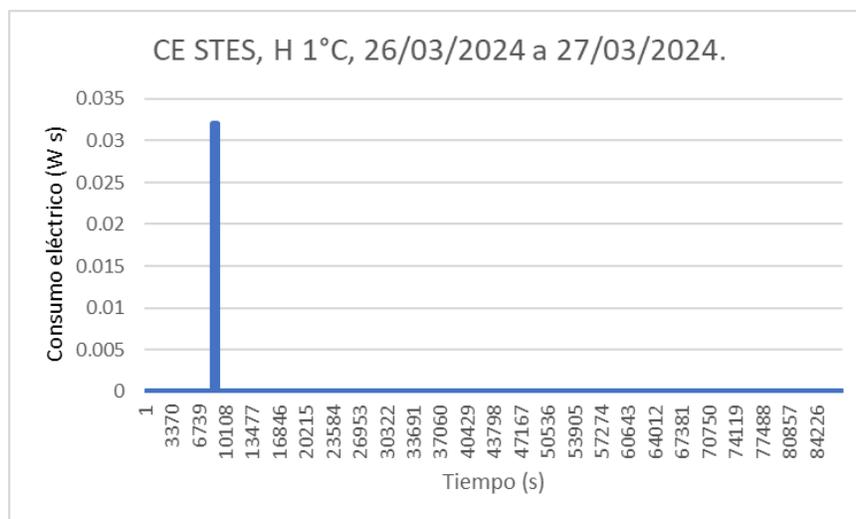


Figura 4.53: Conexiones del STES el día 1.

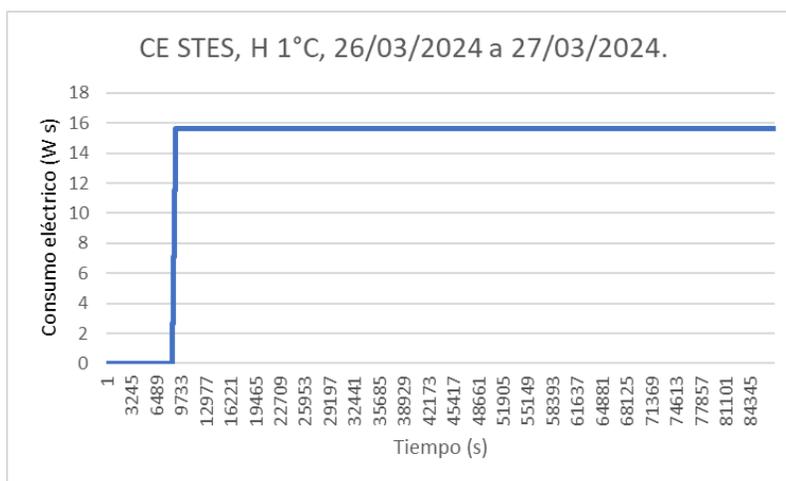


Figura 4.54: Incremento del consumo eléctrico del STES el día 1.

Día 2 (27/03/2024 - 28/03/2024)

Para el segundo día se registró un consumo eléctrico total en el STEP de 575.69 (W s)

Mientras que para el caso del STES se registró un consumo eléctrico total de 48.94 (W s)

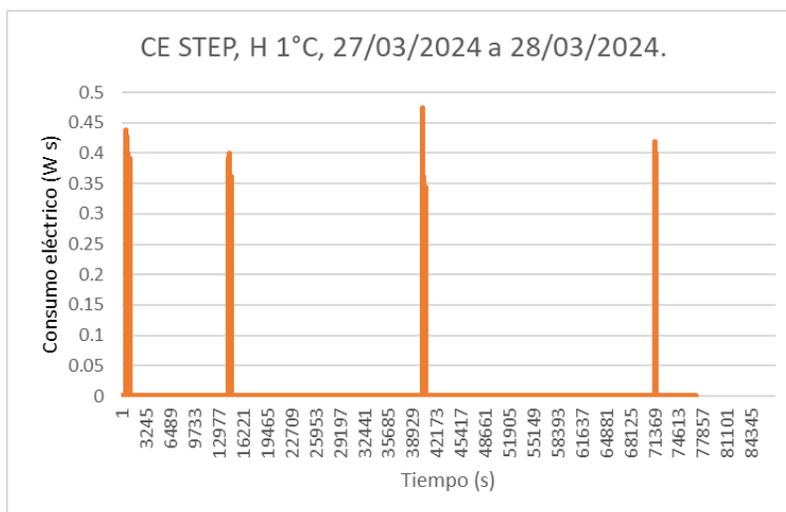


Figura 4.55: Conexiones del STEP el día 2.

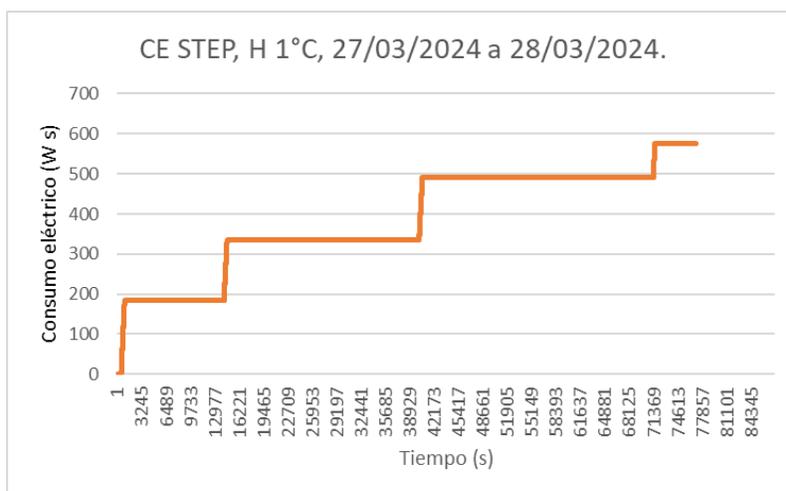


Figura 4.56: Incremento del consumo eléctrico del STEP el día 2.

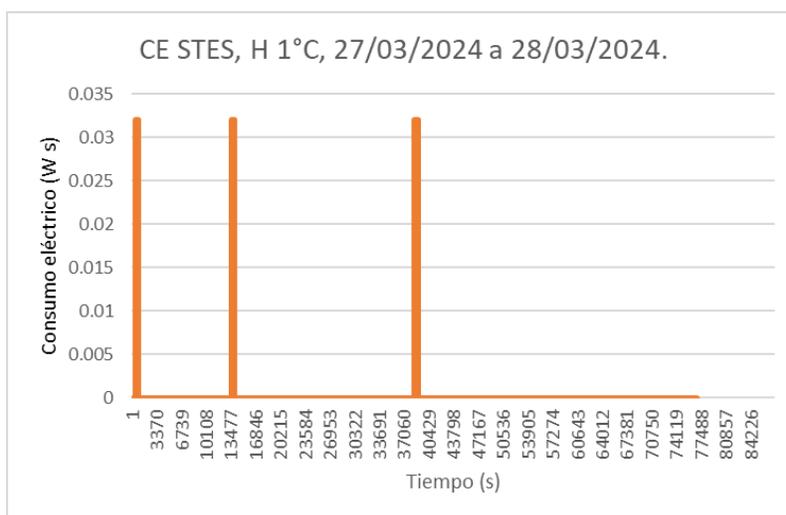


Figura 4.57: Conexiones del STES el día 2.

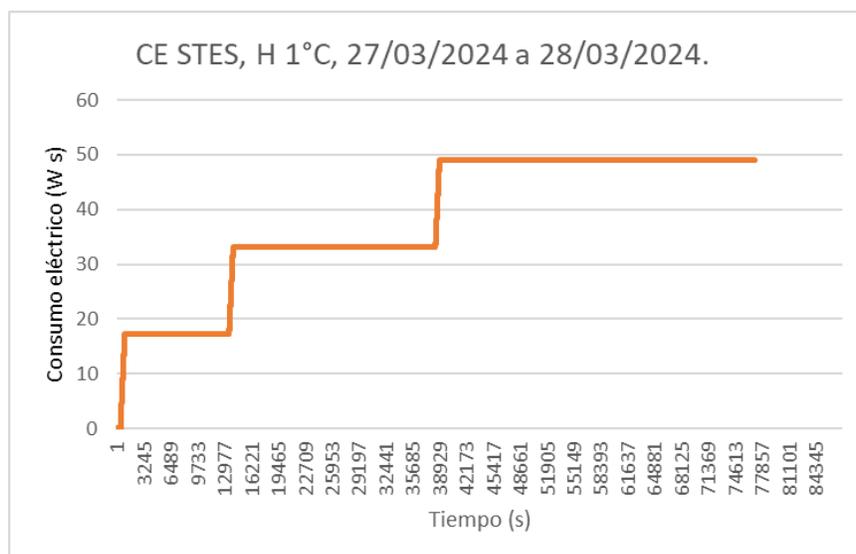


Figura 4.58: Incremento del consumo eléctrico del STES el día 2.

Día 3 (28/03/2024 - 29/03/2024)

Para el tercer día se registró un consumo eléctrico total en el STEP de 816.68 (W s)

Mientras que para el caso del STES se registró un consumo eléctrico total de 69.06 (W s)

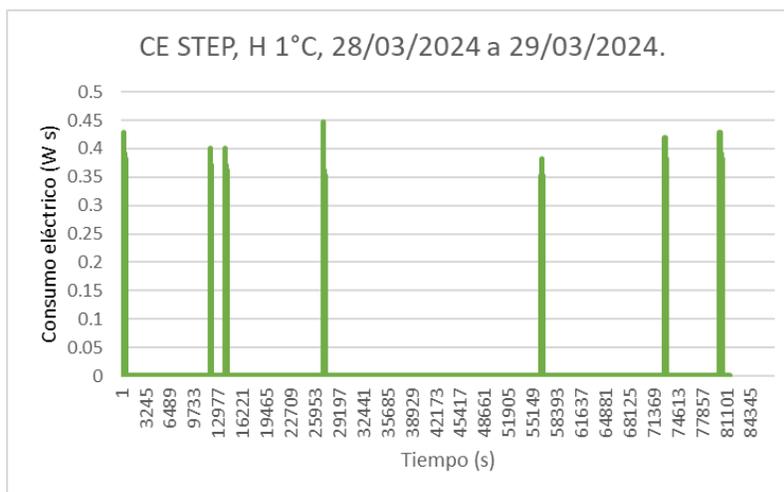


Figura 4.59: Conexiones del STEP el día 3.

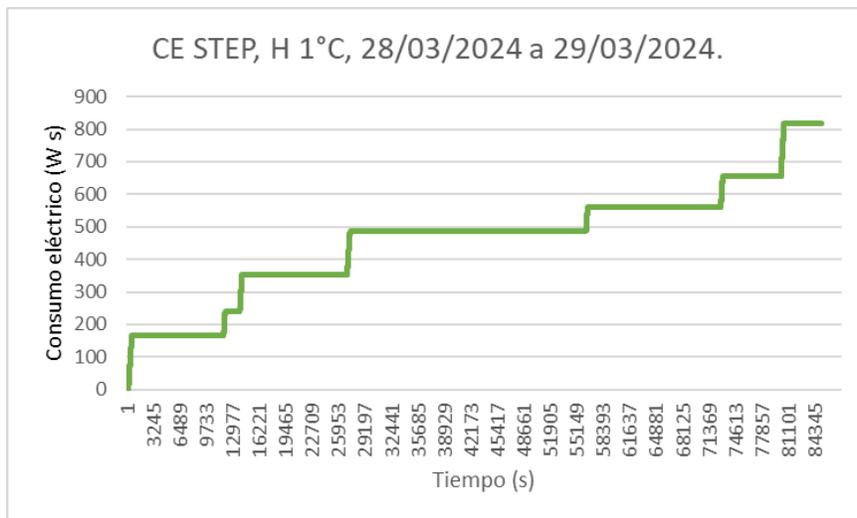


Figura 4.60: Incremento del consumo eléctrico del STEP el día 3.

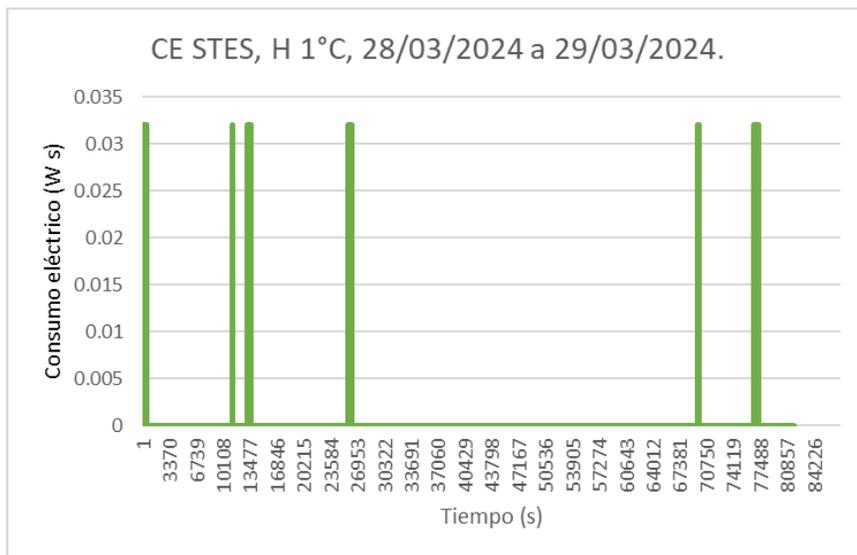


Figura 4.61: Conexiones del STES el día 3.

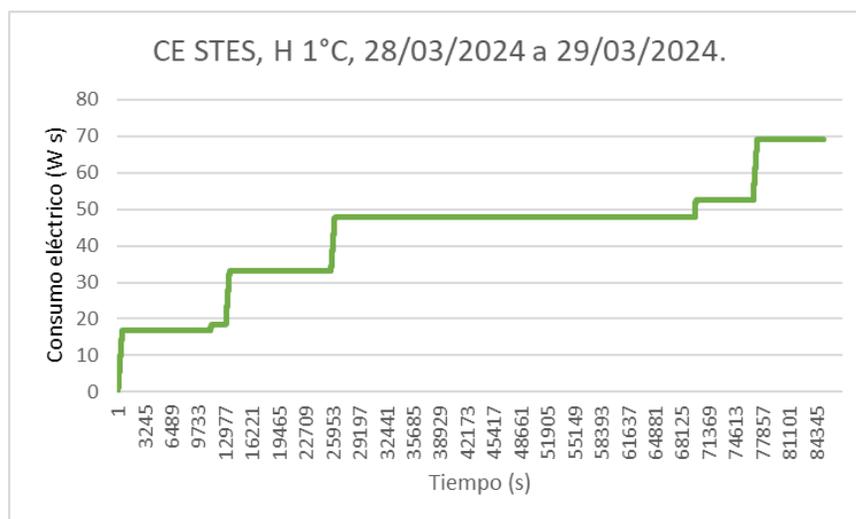


Figura 4.62: Incremento del consumo eléctrico del STES el día 3.

Las Figuras 4.63, 4.64 y 4.65 presentan el consumo eléctrico de los subsistemas STEP y STES del sistema térmico del fotobiorreactor (STF), para los tres días de prueba, respectivamente. El sistema STEP, representado en color azul, presenta un consumo significativamente mayor en comparación con el sistema STES, que se muestra en color naranja.

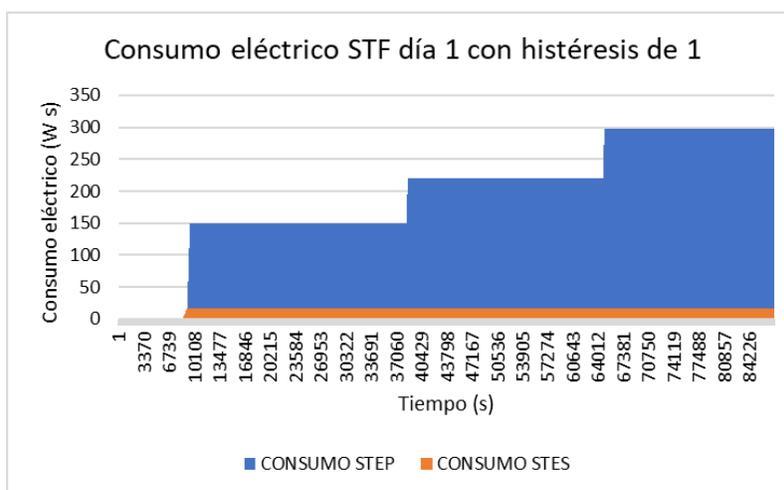


Figura 4.63: Consumo eléctrico STEP y STES día 1 (histéresis 1 °C).

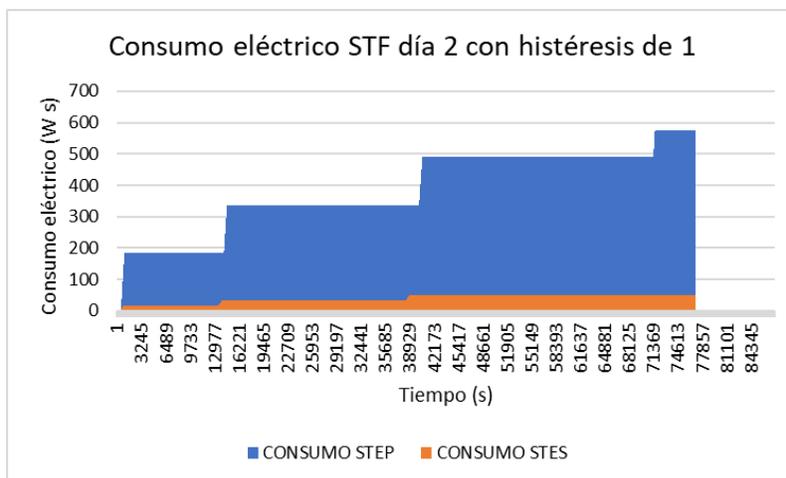


Figura 4.64: Consumo eléctrico STEP y STES día 2 (histéresis 1 °C).

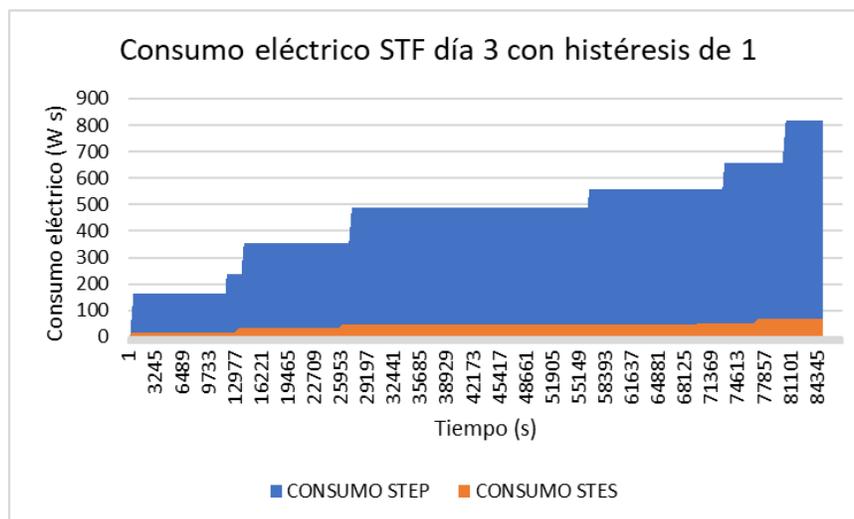


Figura 4.65: Consumo eléctrico STEP y STES día 3 (histéresis 1 °C).

Las Figuras 4.66, 4.67 y 4.68 presentan el consumo eléctrico total del sistema térmico del fotobiorreactor (STF) durante los tres días de prueba, estos resultados integran el consumo de los subsistemas STEP y STES en el fotobiorreactor con un consumo de 313.39 (W s) el día 1, un consumo de 624.63 (W s), el día 2 y 885.75 (W s) el día 3.

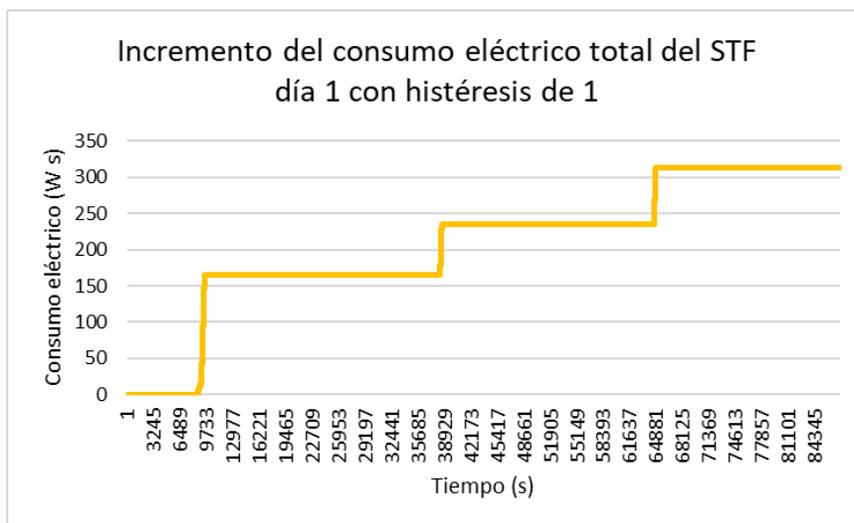


Figura 4.66: Consumo eléctrico total STF día 1 (histéresis 1 °C).

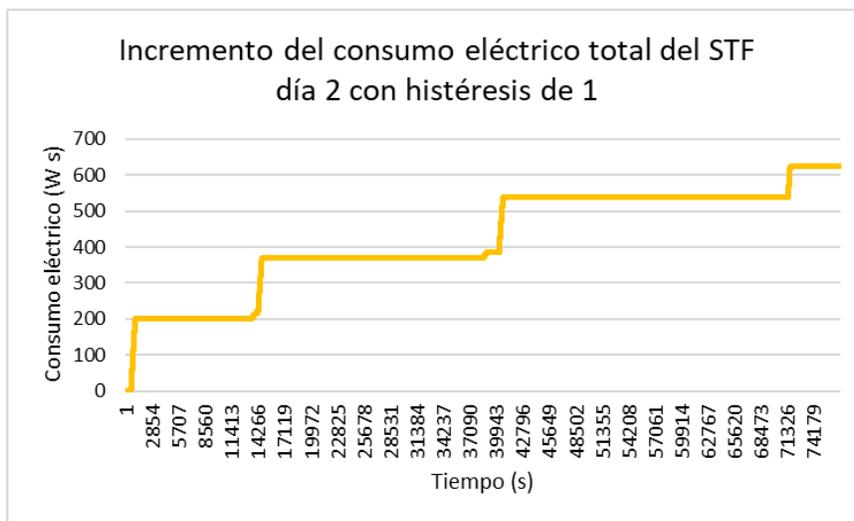


Figura 4.67: Consumo eléctrico total STF día 2 (histéresis 1 °C).

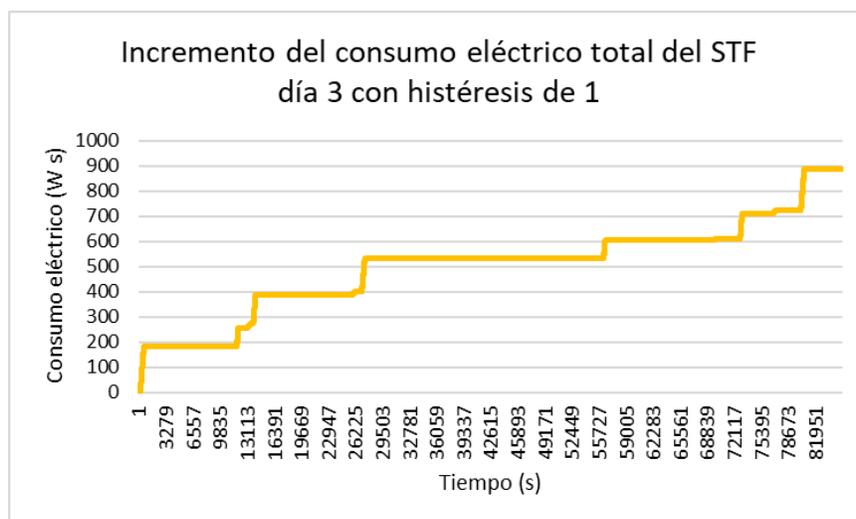


Figura 4.68: Consumo eléctrico total STF día 3 (histéresis 1 °C).

4.6.2. Observaciones del escenario D

Datos del escenario D (Histéresis de 1 °C)

Día 1: CE total STEP: 297.74 (W s), CE total STES: 15.64 (W s), CE total STF: 313.39 (W s)

Día 2: CE total STEP: 575.69 (W s), CE total STES: 48.94 (W s), CE total STF: 624.63 (W s)

Día 3: CE total STEP: 816.68 (W s), CE total STES: 69.06 (W s), CE total STF: 885.75 (W s)

4.6.3. Análisis matemático

Media de los consumos eléctricos del escenario D

$$\bar{x}_{STEP, 1.0} = \frac{297.74 + 575.69 + 816.68}{3} = \frac{1690.11}{3} = 563.37 \text{ (W s)}$$

$$\bar{x}_{STES, 1.0} = \frac{15.64 + 48.94 + 69.06}{3} = \frac{133.64}{3} = 44.55 \text{ (W s)}$$

$$\bar{x}_{STF, 1.0} = \frac{313.39 + 624.63 + 885.75}{3} = \frac{1823.77}{3} = 607.92 \text{ (W s)}$$

Rango de los consumos eléctricos del escenario D

$$\text{Rango}_{\text{STEP}, 1.0} = 816.68 - 297.74 = 518.94 \text{ (W s)}$$

$$\text{Rango}_{\text{STES}, 1.0} = 69.06 - 15.64 = 53.42 \text{ (W s)}$$

$$\text{Rango}_{\text{STF}, 1.0} = 885.75 - 313.39 = 572.36 \text{ (W s)}$$

Varianza y desviación estándar del consumo eléctrico

$$\begin{aligned} \text{Varianza}_{\text{STEP}, 1.0} &= \frac{(297.74 - 563.37)^2 + (575.69 - 563.37)^2 + (816.68 - 563.37)^2}{3} \\ &= \frac{70559.08 + 150.66 + 64120.22}{3} = \frac{134829.96}{3} = 44943.32 \end{aligned}$$

$$\text{Desviación Estándar}_{\text{STEP}, 1.0} = \sqrt{44943.32} = 211.98 \text{ (W s)}$$

$$\text{Varianza}_{\text{STES}, 1.0} = \frac{(15.64 - 44.55)^2 + (48.94 - 44.55)^2 + (69.06 - 44.55)^2}{3} = 484.58$$

$$\text{Desviación Estándar}_{\text{STES}, 1.0} = \sqrt{484.58} = 22.01 \text{ (W s)}$$

$$\text{Varianza}_{\text{STF}, 1.0} = \frac{(313.39 - 607.92)^2 + (624.63 - 607.92)^2 + (885.75 - 607.92)^2}{3} = 54628.43$$

$$\text{Desviación Estándar}_{\text{STF}, 1.0} = \sqrt{54628.43} = 233.73 \text{ (W s)}$$

La Figura 4.69 muestra las conexiones del sistema STEP durante los tres días de prueba, y la Figura 4.70 presenta las conexiones del sistema STES durante el mismo periodo. Cada barra representa las conexiones diarias de ambos sistemas.

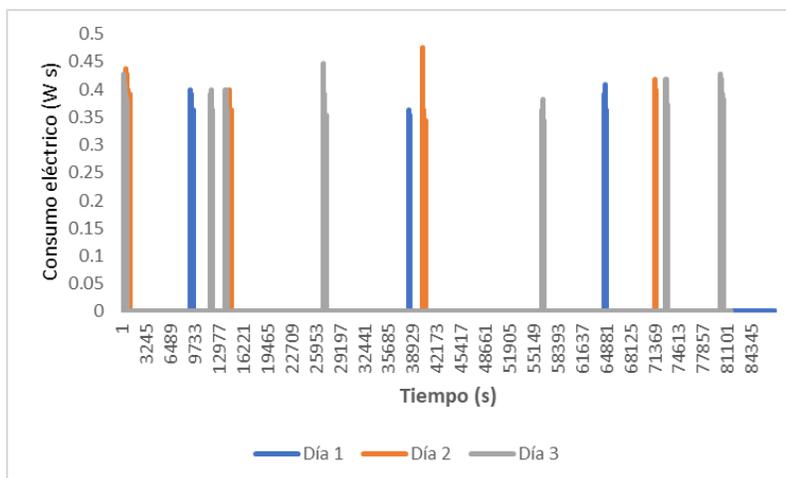


Figura 4.69: Promedio de las conexiones del STEP durante los tres días de prueba con histéresis de 1 °C.

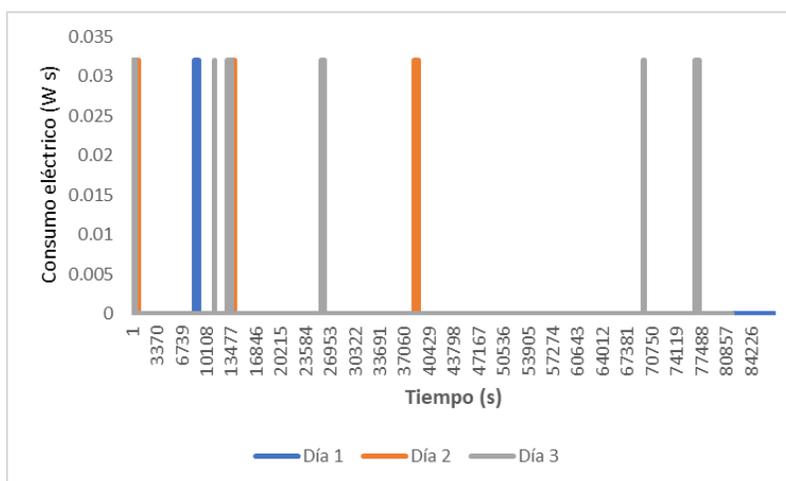


Figura 4.70: Conexiones del STES durante los tres días de prueba con histéresis de 1 °C.

Promedios del consumo eléctrico

La Figura 4.71 presenta el incremento del consumo eléctrico del sistema STEP durante los tres días de prueba, la Figura 4.72 muestra el aumento del consumo del sistema STES en el mismo periodo.

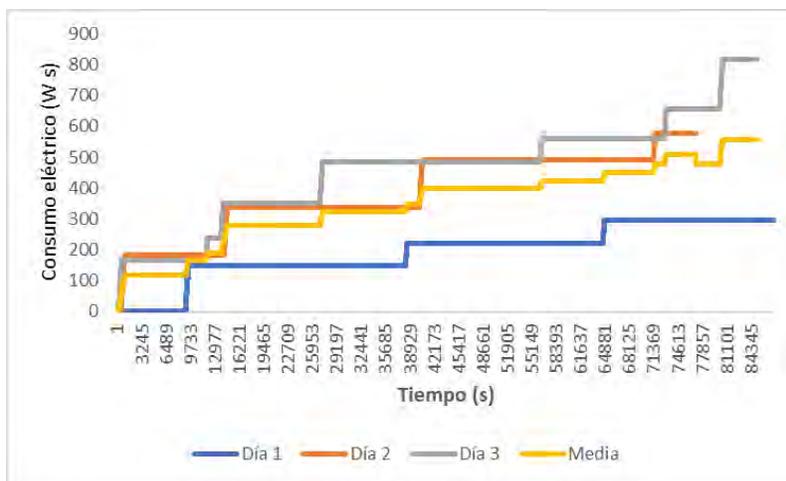


Figura 4.71: Promedio del incremento del consumo eléctrico del STEP durante los tres días de prueba con histéresis de 1 °C.

En ambas figuras, la línea amarilla indica el promedio del incremento del consumo eléctrico.

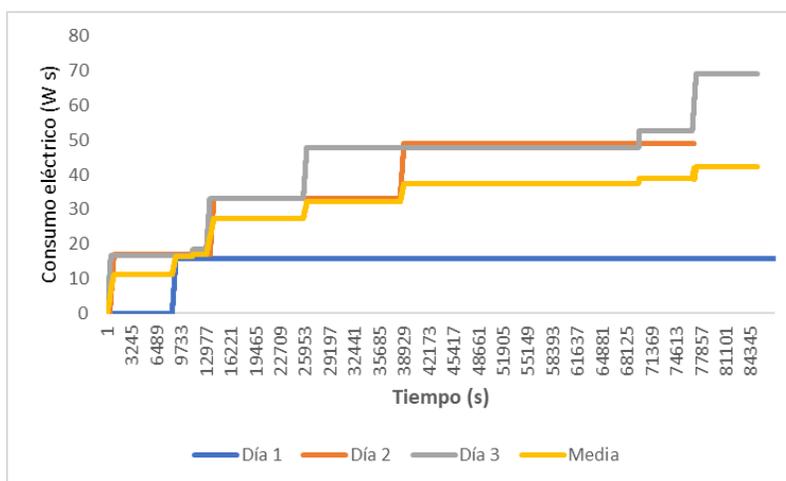


Figura 4.72: Promedio del incremento del consumo eléctrico del STES durante los tres días de prueba con histéresis de 1 °C.

Comparativa entre escenarios C y D

Recordando

Datos del escenario C (Histéresis de 0.5 °C)

Día 1: CE total STEP: 1009.57 (W s), CE total STES: 91.14 (W s), CE total STF: 1100.71 (W s).

Día 2: CE total STEP: 830.21 (W s), CE total STES: 73.95 (W s), CE total STF: 904.17 (W s)

Día 3: CE total STEP: 546.64 (W s), CE total STES: 41.91 (W s), CE total STF: 588.56 (W s)

La comparación de las medias de consumo eléctrico entre los dos escenarios muestran que el consumo eléctrico efectivamente es aún menor cuando se amplía el margen de histéresis de 0.5 °C a 1.0 °C.

En el escenario C, la media del consumo eléctrico fue de 0.2401 kWh. Después, con una histéresis de 1.0 °C (escenario D), la media del consumo eléctrico se redujo a 0.169 kWh.

Para determinar la reducción en el consumo eléctrico:

$$\text{Reducción del CE} = \bar{x}_{\text{STF}, 0.5} - \bar{x}_{\text{STF}, 1.0} = 0.2407 \text{ kWh} - 0.169 \text{ kWh} = 0.0711 \text{ kWh}$$

La fórmula para calcular el porcentaje de reducción es:

$$\text{Porcentaje de reducción} = \left(\frac{\bar{x}_{\text{STF}, 0.5} - \bar{x}_{\text{STF}, 1.0}}{\bar{x}_{\text{STF}, 0.5}} \right) \times 100$$

Sustituyendo los valores obtenidos:

$$\text{Porcentaje de reducción} = \left(\frac{0.0711 \text{ kWh}}{0.2401 \text{ kWh}} \right) \times 100 \approx 29.61 \%$$

Esto demuestra la efectividad de la ampliación del margen de histéresis para reducir aún más el consumo eléctrico.

4.7. Observaciones generales

A continuación, se presentan las medias de los consumos eléctricos totales de los subsistemas y el sistema completo:

Cuadro 24: Medias de Consumos Eléctricos Totales en (W s)

Escenario	STEP (W s)	STES (W s)	STF (W s)
B (Histéresis de 0.1 °C)	1237.12	51.97	1291.76
C (Histéresis de 0.5 °C)	795.47	69.67	864.48
D (Histéresis de 1.0 °C)	563.37	44.55	607.92

4.7.1. Comparación entre Escenarios B y C

La media del consumo eléctrico total del sistema térmico del fotobiorreactor (STF) en el escenario B fue de 1291.76 (W s), mientras que en el escenario C fue de 864.48 (W s). La reducción del consumo eléctrico se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Reducción del } CE_{B,C} = \bar{x}_{STF, 0.1} - \bar{x}_{STF, 0.5} = 1291.76 \text{ (W s)} - 864.48 \text{ (W s)} = 427.28 \text{ (W s)}$$

$$\text{Porcentaje de Reducción}_{B,C} = \left(\frac{427.28 \text{ (W s)}}{1291.76 \text{ (W s)}} \right) \times 100 \approx 33.07 \%$$

4.7.2. Comparación entre Escenarios B y D

La media del consumo eléctrico total del STF en el escenario D fue de 607.92 (W s). La reducción del consumo eléctrico comparado con el escenario B es:

$$\text{Reducción del CE}_{B,D} = \bar{x}_{\text{STF}, 0.1} - \bar{x}_{\text{STF}, 1.0} = 1291.76 \text{ (W s)} - 607.92 \text{ (W s)} = 683.84 \text{ (W s)}$$

$$\text{Porcentaje de Reducción}_{B,D} = \left(\frac{683.84 \text{ (W s)}}{1291.76 \text{ (W s)}} \right) \times 100 \approx 52.95 \%$$

4.7.3. Comparación entre Escenarios C y D

La reducción del consumo eléctrico al ampliar el margen de histéresis de 0.5 °C a 1.0 °C es:

$$\text{Reducción del CE}_{C,D} = \bar{x}_{\text{STF}, 0.5} - \bar{x}_{\text{STF}, 1.0} = 864.48 \text{ (W s)} - 607.92 \text{ (W s)} = 256.56 \text{ (W s)}$$

$$\text{Porcentaje de Reducción}_{C,D} = \left(\frac{256.56 \text{ (W s)}}{864.48 \text{ (W s)}} \right) \times 100 \approx 29.68 \%$$

Los resultados demuestran que la ampliación del margen de histéresis tiene un impacto en la reducción del consumo eléctrico del subsistema de control térmico del fotobiorreactor. Con la ampliación del margen de histéresis de 0.1 °C a 0.5 °C, se logró una reducción del 33.07% en el consumo eléctrico total del sistema térmico. Al ampliar el margen de histéresis a 1.0 °C, la reducción fue aún mayor, alcanzando un 52.95%.

Además, al comparar los escenarios C y D, se observa que la ampliación del margen de histéresis de 0.5 °C a 1.0 °C muestra una reducción adicional del 29.68% en el consumo eléctrico.

Capítulo 5

5. Conclusiones

El presente trabajo se enfocó en el análisis y reducción del consumo eléctrico del sistema térmico de un fotobiorreactor, con el fin de mejorar la eficiencia en la producción de biomasa microalgal.

Se llevó a cabo un análisis del consumo eléctrico del sistema térmico sin modificar, para obtener una línea base del consumo energético. Se determinaron los valores nominales de los actuadores principales (el chiller y la bomba de recirculación) y se realizaron mediciones de su consumo eléctrico en condiciones de operación normales.

Después de la implementación de los sensores de monitoreo para medir el consumo eléctrico del sistema térmico en tiempo real durante los experimentos. Se realizaron dos experimentos: el primero sin utilizar el sistema térmico y el segundo utilizando el sistema térmico para cultivar microalgas. En el experimento sin control térmico, se observó una disminución en el conteo celular de las microalgas *Nannochloropsis Oculata*, en donde se observó que la falta de control de temperatura afectó negativamente el crecimiento microalgal. En el segundo experimento, con control térmico, se registró un aumento en el conteo celular, pero también un alto consumo eléctrico del sistema térmico, lo que indica la necesidad de optimizar el consumo energético.

Para abordar esta parte, se propusieron dos estrategias. La primera consistió en aislar el circuito de circulación de glicol mediante la adición de un nuevo actuador (bomba de recirculación 2), con el objetivo de reducir la frecuencia de encendido del chiller. La segunda estrategia propuso ajustar el margen de histéresis del controlador de temperatura para disminuir los ciclos de encendido y apagado del sistema.

Uno de los puntos clave de este trabajo fue la realización de ingeniería inversa del subsistema de control de temperatura lo que implicó el desmontaje completo del gabinete de control y la elaboración de diagramas de los componentes y conexiones del sistema, esto facilitó la implementación de las modificaciones propuestas.

Con la implementación del nuevo actuador se propuso también ajustar el margen de histéresis, se realizaron primero experimentos adicionales para comparar el consumo eléctrico antes y después de las modificaciones.

En el escenario inicial (sin modificar), se midió el consumo eléctrico al extraer 0.1°C del fotobiorreactor, obteniendo un consumo promedio de 29.32 W s. Después de la modificación, el consumo se redujo a 10.41 W s, esto demostró la efectividad de la estrategia de aislamiento del circuito de glicol.

Finalmente, se llevaron a cabo tres escenarios adicionales para evaluar el impacto de la ampliación del margen de histéresis en el consumo eléctrico:

Escenario B (Histéresis de 0.1°C): El consumo eléctrico promedio del sistema térmico fue 0.3588 kWh.

Escenario C (Histéresis de 0.5°C): La ampliación del margen de histéresis a 0.5°C mostró una reducción del consumo eléctrico a 0.2401 kWh, lo que representa una disminución del 33.07 % en comparación con el escenario B.

Escenario D (Histéresis de 1.0°C): Ampliar el margen de histéresis a 1.0°C redujo aún más el consumo eléctrico a 0.169 kWh, un 29.68 % respecto al escenario C.

La implementación y experimentación de ambas propuestas en este trabajo demostraron ser efectivas para reducir el consumo eléctrico del sistema térmico del fotobiorreactor, mejorando su eficiencia energética contribuyendo al desarrollo de tecnologías más sostenibles y eficientes para la producción de biomasa microalgal, con potenciales aplicaciones en diversas industrias.

5.1. Perspectivas

A continuación, se presentan algunas perspectivas basadas en los resultados de este trabajo. Aunque las estrategias implementadas han demostrado ser efectivas para reducir el consumo eléctrico, existe un potencial significativo para una optimización continua del sistema térmico.

Futuras investigaciones podrían explorar la implementación de algoritmos de control más avanzados, como el control predictivo basado en modelos (MPC), que podrían mejorar aún más la eficiencia energética y la estabilidad del sistema de control de temperatura.

La integración de fuentes de energía renovable, como la energía solar fotovoltaica o la energía eólica con el sistema de fotobiorreactor puede que reduzca aún más la dependencia de fuentes de energía no renovables. Investigaciones futuras pueden centrarse en el diseño e implementación de sistemas híbridos que combinan fotobiorreactores con tecnologías de energía renovable.

Algunos de los experimentos de esta tesis se enfocaron en la producción de biomasa microalgal para biocombustibles, pero las microalgas tienen un potencial significativo para la producción de una amplia gama de productos, incluyendo alimentos, productos farmacéuticos y cosméticos se podrían explorar la diversificación de productos obtenidos de microalgas.

La complejidad de los sistemas de fotobiorreactores y la diversidad de aplicaciones potenciales requieren una colaboración interdisciplinaria entre ingenieros, biólogos, químicos y científicos de datos. Fomentar la colaboración entre diferentes disciplinas y sectores puede acelerar el desarrollo de tecnologías innovadoras y soluciones integrales para la producción sostenible de biomasa microalgal.

5.2. Trabajos futuros

En base a los resultados obtenidos y las perspectivas identificadas, se proponen varios trabajos futuros que pueden extender y profundizar los hallazgos de esta tesis.

Una propuesta interesante para futuros estudios es la implementación de variaciones en el flujo del glicol a través de una válvula reguladora. Estos experimentos analizarán qué sucede cuando se varía el caudal del glicol a través de las tuberías que van hacia el fotobiorreactor.

El desarrollo e implementación de algoritmos de control más avanzados, podría mejorar la eficiencia energética del subsistema de control de temperatura del fotobiorreactor. Investigar la viabilidad y

los beneficios de integrar sistemas de fotobiorreactores con fuentes de energía renovable, como la energía solar podrán reducir aún más la dependencia de fuentes de energía no renovables.

Explorar la producción de una variedad de productos a partir de microalgas, como alimentos, productos farmacéuticos y cosméticos, puede diversificar las aplicaciones y mercados de la biomasa microalgal. Optimizar el proceso para diferentes productos puede aumentar el valor económico y la sostenibilidad de la producción de microalgas y esto podrá incluir la colaboración entre ingenieros, biólogos, químicos y científicos.

5.3. Estancia en Mazatlán, Sinaloa

Para la realización de esta tesis, se llevó a cabo una estancia de investigación en Mazatlán, Sinaloa, específicamente en el laboratorio de Bioingeniería del Instituto Tecnológico de Mazatlán. Esta estancia, tuvo una duración de nueve meses.

A lo largo de estos nueve meses, enfrenté algunos desafíos, como la adaptación a un nuevo entorno de investigación y la resolución de problemas técnicos con el fotobiorreactor. Sin embargo, estos desafíos fueron superados mediante la implementación de soluciones creativas y colaborativas. Por ejemplo, el ajuste de protocolos experimentales para optimizar el funcionamiento del fotobiorreactor y asegurar la precisión de las mediciones.

Además, esta estancia me permitió establecer colaboraciones importantes con otros investigadores y estudiantes del Instituto Tecnológico de Mazatlán que permitieron compartir conocimientos, técnicas y recursos todo esto fomentó un ambiente de aprendizaje y desarrollo profesional continuo.

Desde una perspectiva personal y profesional, la estancia en Mazatlán fue algo significativo ya que con esta experiencia adquirí habilidades técnicas y de investigación avanzadas y fomenté mi desarrollo personal al enfrentar y superar diversos retos en un entorno nuevo. La oportunidad de trabajar en un laboratorio y colaborar con expertos en el campo fue una experiencia que fortaleció mi carrera como investigador.

5.4. Contribuciones

Las contribuciones de este trabajo de tesis son:

En primer lugar, un análisis del consumo eléctrico en sistemas de enfriamiento de fotobiorreactores para identificar y caracterizar las variables que determinan el consumo eléctrico en estos sistemas,

Desarrollo y validación de una metodología para la medición del consumo eléctrico en tiempo real utilizando sensores avanzados y técnicas de monitoreo, lo que permite obtener datos precisos y fiables.

Diseño e implementación de estrategias de control para reducir el consumo eléctrico en fotobiorreactores. La primera estrategia de optimización del subsistema de control térmico y la segunda de la ampliación del margen de histéresis, logrando una mejora en la eficiencia energética del fotobiorreactor.

Crecimiento de la biomasa microalgal, incrementando significativamente la producción en comparación con sistemas sin control térmico. Se han optimizado las condiciones de cultivo en el fotobiorreactor, lo que da una mayor productividad de las microalgas.

Desarrollo de competencias en técnicas de optimización energética. La implementación de estrategias de control en el fotobiorreactor permitió aplicar conocimientos teóricos a situaciones prácticas, mejorando las habilidades en el campo de las energías renovables.

Los resultados obtenidos de esta tesis han sido documentados y publicados en revistas científicas y conferencias, permitiendo la participación en proyectos de investigación colaborativos, fomentando el intercambio de conocimientos y experiencias con otros investigadores y profesionales del área.

En el anexo [5.4](#), se incluyen los documentos que demuestran y respaldan los logros obtenidos durante el desarrollo de esta tesis, tales como los artículos publicados y los pósters presentados en conferencias.

Referencias

- Alfaro-Vives, O. G., Proenza-Yero, R. A., Matos-Durand, R., and Rupert-Jacobs, A. (2017). Modelo dinámico de un fotobiorreactor de capa fina, utilizado para el cultivo de la microalga *Chlorella* sp. y bacterias en aguas residuales de alta carga orgánica. *Tecnología Química*, 37(1):79–93.
- Allen Pfeiffer, D. (2006). Comemos combustibles fósiles. *Polis. Revista Latinoamericana*, (14).
- Alonso Bastida, A. et al. (2020). Modelado y control de temperatura de un fotobiorreactor escala piloto con intercambiador de calor. *CITCA*.
- Alonso-Bastida, A., Franco-Nava, M., Adam-Medina, M., López-Zapata, B., Alvarez-Gutierrez, P., and García-Morales, J. (2022). Mathematical modeling of thermal interactions in a self-cooling pilot-scale photobioreactor. *Case Studies in Thermal Engineering*, 31:101825.
- Amaya Orozco, N. A. (2021). Automatización de un fotobiorreactor airlift para la disminución en la concentración de CO₂ proveniente de una emisión obtenida por pirolisis de biomasa lignocelulosa. B.S. thesis, Fundación Universidad de América.
- Arribas Jimeno, A. et al. (2020). Fotobiorreactores, técnicas y parámetros implicados en la producción de biocombustibles de origen microalgal. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*.
- Bácsi, I., Tóthfalusi, F., Márton, K., Béré, V., and Gonda, S. (2022). Los efectos del tipo de fotobiorreactor sobre la producción de biomasa y lípidos de la microalga verde *Monoraphidium pusillum* a escala de laboratorio. *EnefSolutions*, 12(4):21.
- Capacho González, A. E. (2021). Desarrollo de un prototipo de sistema de control de temperatura aplicado a un fotobiorreactor airlift para la producción de biomasa microalgal. *EnefSolutions*.
- Controls, F. G. (2023). Sitio web de sitrad. Accedido en junio de 2023.

Cuaio Arévalo, R. M. and Martínez Cepeda, A. M. (2021). Análisis de estrategias para el escalamiento de un fotobiorreactor tipo airlift para el cultivo de microalgas. B.S. thesis, Fundación Universidad de América.

de Jesús Gárate-Osuna, A., Valdez-Ortiz, A., Franco-Nava, M. A., Guevara-Peredia, O. J., Macías-Monárrez, C. Y., and Santos-Ballardo, D. U. (2024). Efecto de las condiciones de cultivo (temperatura y tipo de biorreactor) en la eficiencia de crecimiento de la microalga *Nannochloropsis oculata*. *Nombre del Journal*. Presentadora: andreagarateosuna@gmail.com, Correspondencia: dsantos@upsin.edu.mx.

Espinosa Martínez, P. M., Martínez De Jesús, R. J., and Torres Rendón, L. D. (2015). Análisis técnico en el ahorro de energía eléctrica en motores de inducción de corriente alterna. *EnefSolutions*.

García, A. S., Antequera, D. A., Arango, J. P., Gómez-Pérez, C., and Espinosa, J. (2020). Helical tubular photobioreactor design using computational fluid dynamics. *CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, 10(1):123–130.

Giha Yidi, S. A. (2023). *Diseño de un Sistema de Compensación de Energía Reactiva para el Mejoramiento del Factor de Potencia en el Pcc de un Sistema Eléctrico Industrial con Armónicos*. PhD thesis, Corporación Universidad de la Costa.

Giral-Ramírez, D. A., Mantilla-Castañeda, M., Montoya-Giraldo, O., and Barrera-Cuestas, A. (2021). Temperature control using the simulink plc coder and the iec 61131 standard. *Scientia Et Technica*, 26(4):417–423.

González-Lazo, Y., Rodríguez-Ramos, P. A., Sánchez-Borroto, Y., Teresa-Lombardi, A., and Candido, C. (2019). Diseño y simulación de un fotobiorreactor para el cultivo de la microalga *chlorella vulgaris*. *Ingeniería Mecánica*, 22(3):169–177.

Guarin-Villegas, E., Remolina-Páez, L. M., Bermúdez-Castro, J. P., Mogollón-Londoño, S. O., Contreras-Roperio, J. E., García-Martínez, J. B., and Barajas-Solano, A. F. (2020). Effect of de

carbon/nitrogen ratio on the production of microalgae-based carotenoids. *Ingeniería y competitividad*, 22(1).

Guzmán, J., Ación, F., and Berenguel, M. (2021). Modelado y control de la producción de microalgas en fotobiorreactores industriales. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 18(1):1–18.

Herrera Sánchez, S. E. (2020). Cultivo de microalga chlorella sp en un fotobiorreactor para la obtención de biodiesel. *EnefSolutions*.

Home Depot (2024). Bomba presurizadora. <https://www.homedepot.com.mx/plomeria/bombas/bomba-presurizadora-112473>. Consultado: 21 de agosto de 2024.

Hoyo, Á., Guzmán, J. L., Moreno, J. C., and Berenguel, M. (2019). Control predictivo lineal del ph en un fotobiorreactor raceway. In *XL Jornadas de Automática*, pages 414–420. Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións.

Jiménez, A. (2017). Diseño, modelado y control de un fotobiorreactor. *Cenidet*.

Jiménez González, A. (2017). *Diseño, Modelado y Control de un Fotobiorreactor*. Tesis doctoral, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Tesis presentada como requisito para la obtención del grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica.

Kerras, H., Merouani, R., Nekkab, C., Outili, N., and Meniai, A. (2019). Green chemistry metrics application to biodiesel production from waste vegetable oil. In *2019 10th International Renewable Energy Congress (IREC)*, pages 1–5. IEEE.

MarÑan-Quintero, D. A. et al. (2012). Evaluacion de la mortalidad microalgal en una bomba centrifuga de un fotobiorreactor tubular. *Revista Ingenieria y Universidad*, 16(2):333–348.

Mena Cabrera, P. A. (2014). *Evaluación de la eficiencia de tratamiento de aguas residuales domésticas, implementando un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal (HAFSSH) en el colegio comfamiliar siglo XXI, sede campestre corregimiento de San*

- Fernando, Municipio de Pasto, Colombia.* PhD thesis, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- Moncada, S. N. (2017). Automatización de una planta productora de biodiesel a partir de algas y microalgas marinas. *Télématique*, 16(1):81–105.
- Moreno, J. C., Mercader, P., Guzmán, J. L., Baños, A., and Gutman, P.-O. (2021). Evaluation of an interpolated controller in an industrial photobioreactor. *IEEE Access*, 9:24406–24415.
- Muñoz, N. G., Vives, O. G. A., Sariol, H. C., Silva, R. M. P., and Capote, A. J. (2019). Temperature of the mixed culture of chlorella vulgaris to open sky: incidence in biomass concentration. *Tecnología Química*, 39(3):580–591.
- Romero Carrillo, H. E., Molina Rivas, V. A., Peralta Jaramillo, J. M., et al. (2021). *Diseño de un sistema de iluminación móvil para un fotobiorreactor cerrado de cultivo de microalgas.* PhD thesis, ESPOL. FIMCP.
- Ruge, I. A. R. (2019). Prototipo de biorreactor aeróbico para el monitoreo y control del proceso de co-compostaje, a partir de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales y residuos sólidos orgánicos de plaza de mercado. *Prospectiva*, 17(1):17–24.
- Salguero Rodríguez, Y. (2019). *Análisis del impacto económico de control predictivo basado en modelo económico en fotobiorreactores.* PhD thesis, Facultad de Ingeniería Mecánica.
- Sánchez, Á. H., Sánchez, J. L. G., Úbeda, J. C. M., and Torrico, A. B. (2022). Control robusto del ph en un fotobiorreactor raceway. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 19(3):274–283.
- Sánchez-Bayo Álvarez, A. et al. (2019). Biorrefinería de microalgas para la producción de biocombustibles. *EnefSolutions*.
- Sánchez-Torres, H., Juscamaita-Morales, J., Vargas-Cárdenas, J., and Oliveros-Ramos, R. (2008). Producción de la microalga *nannochloropsis oculata* (droop) hibberd en medios enriquecidos con ensilado biológico de pescado. *Ecología Aplicada*, 7(1-2):149–158.

- Sanz Martínez, V. F. (2019). Diseño de un fotobiorreactor para la obtención de compuestos bioluminiscentes. Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Schmitz, T. A. and Kraft, E. (2021). Pilot scale photobioreactor system for land-based macroalgae cultivation. *Journal of Applied Phycology*, pages 1–10.
- Steven, S., Friatnasary, D., Wardani, A., Khoiruddin, K., Suantika, G., and Wenten, I. (2022). High cell density submerged membrane photobioreactor (smpbr) for microalgae cultivation. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, volume 963, page 012034. IOP Publishing.
- UNAM (2015). Estudian el uso de microalgas para tratar aguas residuales. <https://www.iagua.es/noticias/mexico/unam/15/12/22/estudian-uso-microalgas-tratar-aguasresiduales>. Consultado: 22 de diciembre de 2015.
- Valenzuela Páez, J. G., Arenas Robles, J., Medina, M. A., Franco Nava, M. Á., Franco Cabanillas, J. C., and Guevara Paredia, O. J. (2023). Consumo eléctrico y producción de biomasa microalgal en un fotobiorreactor a escala piloto cultivando *nannochloropsis oculata*.
- Valenzuela Páez, J. G., Arenas Robles, J., Medina, M. A., Franco Nava, M. Á., Guerrero Ramírez, G. V., Guevara Peredia, O. J., and Franco Ortega, J. C. (2024). Energy consumption of the thermal system of a pilot-scale photobioreactor based on the variation of the controller hysteresis.
- Vélez Tamayo, M. J. et al. (2014). Estudio sobre el modelado y control de las condiciones óptimas de cultivo de microalgas en fotobiorreactores para producción de biodiésel. *EnefSolutions*.
- Vidó, J., Pérez, I. P., Neal, S. P., Girón, A. S., Zúñiga, I. T., Salazar, R. C., and Barcia, G. C. (2019). Seguimiento del estado de un fotobiorreactor de microalga-bacteria para el tratamiento de vinazas de la industria tequilera. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 5(1).
- Zeriouh, O. (2019). *Desarrollo de superficies antibiolfouling para fotobiorreactores de microalgas*. PhD thesis, Universidad de Almería.

Anexo A. Código en MATLAB para el Análisis de Datos

En este anexo se presenta el código desarrollado en MATLAB, utilizado para el análisis de datos con los valores nominales de los actuadores y el tiempo real de funcionamiento.

```
1 clear all
2 close all
3 clc
4 load('NOV1') %cargar los datos a analizar
5 muestras=size(tiempo);
6 % plot(tiempo,compresor)
7 % ylim([-1 2])
8 % xlim([0 61203])
9 i=0;
10 ton=0;
11 ban=0;
12 t=1;
13 for K=1:muestras %Calcular los tiempos de encendido por cada intervalo de tiempo
14     if compresor(K)==1 && ban==0 %Buscar y almacenar la hora de encendido
15         a1=K;
16         encendido(t)=tiempo(a1);
17         t=t+1;
18         ban=1;
19     elseif compresor(K)==0 && ban==1
20         a2=K;
21         ton(i+1)=tiempo(a2)-tiempo(a1);
22         a2=0;
23         a1=0;
24         ban=0;
25         i=i+1;
26     end
27 end
28 tam=size(ton);
29 suma=0;
30 for k=1:tam(2)%Sumar los intervalos de tiempo
```

```

31     suma=suma+ton(k);
32 end
33 promedio=suma/tam(2);
34 tonmax=max(ton);
35 consumo=0.12;
36 consumoxocasion=(consumo*ton)/3600;%Calcular consumo por cada encendido
37 consumoxdia=(consumo*suma)/3600;%Consumo total
38 suma2=0;
39 for k=1:tam(2) %Calcular consumo total
40     suma2=suma2+consumoxocasion(k);
41 end
42 % Convertir segundos a horas, minutos y segundos el tiempo de encendido
43 h = fix(encendido/3600); % Horas enteras
44 m = fix(rem(encendido, 3600)/60); % Minutos enteros
45 s = rem(encendido, 60); % Segundos enteros
46 % Mostrar los resultados
47 %disp([h', m', s']) % Mostrar horas, minutos y segundos en una tabla 'r:+' '-x',
    linewidth',1
48 plot(h + m/60 + s/3600,consumoxocasion , 'b:x', 'linewidth',2)
49 title('Noviembre 21')
50 % plot(h + m/60 + s/3600,consumoxocasion , 'b:x', 'LineWidth',2)
51 % legend('Irradiancia (IRR)', 'Interpreter', 'Latex', 'FontSize',20, 'Location', '
    southwest', 'Orientation', 'vertical')
52 %title('Solar Irradiance', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontWeight', 'normal', '
    FontSize',14)
53 % ylabel('$\textbf{\frac{W}{m^2}}$', 'Interpreter', '
    Latex', 'FontSize',20)
54 % xlabel('\textbf{Tiempo}(\textbf{s})', 'Interpreter', 'Latex', 'FontSize',24)
55 grid on
56 set(gca, 'FontSize',25)
57 xlabel('Tiempo (horas)')
58 ylabel('Consumo (kW)')

```

Anexo B. Datos de la ficha técnica del *chiller*



Figura .1: Fotografía de la ficha técnica del *chiller*.

ESPECIFICACIONES

MARCA 

MODELO		1 TON-115 V	1 TON-220V	1.5 TONS-220V	2 TONS-220V
SUMINISTRO ELÉCTRICO	V-Ph-Hz	115 - 1 - 60	230 - 1 - 60		
CAPACIDAD DE ENFRIAMIENTO	Btu/h	12000	12000	18,000	24,000
CONSUMO ENERGÉTICO	W	950	1000	1600	2000
TIPO DE REFRIGERANTE		R22			
COMPRESOR TIPO		Rotativo			
FLUJO DE AIRE	m3/h	550	550	900	1200
NIVEL DE RUIDO INTERIOR	dB	28	28	36	38
DIÁMETROS DE TUBERÍA	pulgadas	1/4 - 1/2	1/4 - 1/2	1/4 - 1/2	3/8 - 5/8
DIMENSIONES UNIDAD INTERIOR (WXHXD)					
SIN EMPAQUE	mm	790 x 275 x 200	790 x 275 x 200	970 x 300 x 224	1078 x 325 x 246
CON EMPAQUE	mm	850 x 339 x 262	850 x 339 x 262	1036 x 360 x 305	1145 x 410 x 335
PESO	Kg	9.0/11	9.0/11	13.5 / 16.5	16.5 / 20
DIMENSIONES UNIDAD EXTERIOR (WXHXD)					
SIN EMPAQUE	mm	776 x 540 x 320	776 x 540 x 320	848 x 540 x 320	913 x 660 x 378
CON EMPAQUE	mm	823 x 595 x 358	823 x 595 x 358	881 x 595 x 363	997 x 740 x 431
PESO	Kg	27 / 29.5	27 / 29.5	30 / 30.5	40 / 52

Figura .2: Datos de la ficha técnica del *chiller*.

Anexo C. Datos nominales de las bombas



Figura .3: Datos nominales de las bombas. Tomado de [Home Depot \(2024\)](#)



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

OTORGA EL PRESENTE

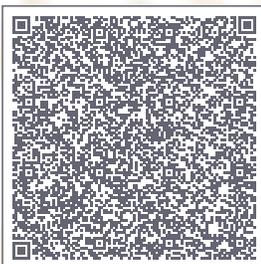
RECONOCIMIENTO

A

Jesús Gonzalo Valenzuela Páez, Jonathan Arenas Robles, Manuel Adam Medina, Miguel Angel Franco Nava, Gerardo Vicente Guerrero Ramírez, Oscar Jesús Guevara Paredia, Juan Carlos Franco Ortega

Por su invaluable presentación del artículo Energy consumption and microalgal biomass production in a pilot-scale photobioreactor growing Nannochloropsis Oculata en el 1er Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada, desarrollado en el Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, TecNM/CENIDET, del 15 al 17 de noviembre de 2023.

Cuernavaca, Morelos, Noviembre de 2023



J0236423

<http://constancias.cenidet.tecnm.mx>

DR. ARTURO ERNESTO MARES GARDEA
DIRECTOR DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

Sello Digital:

i56G6QjY1rJ38hv39jKUXJM5N23T9hVMLkv5i10PK8vN68EgZXQaV1VNB1D1vCXqrG17REot8XKR3dDuwjh5v0
QqFWppmJw7ySaFys/FuS5C9eXugj3aCz02VzrsNDvngx76Uk+lpOQjtFQp64kByaNvYLiw7Vn7RJKVEcKVk7T4
UdnX0E97IxHRFcd5P273GmOLqp3WradBKXV7md123zGXZ/yOF51AABbtSASEmHoerP5xPaBFuccL130skNYX5
IqSWCXNaEcBi8tm7y1lFwU2qC5RvMB2nbMO8H7PwOPDzVQU1WR0xsRxy2/UthbGOMIwPSDKdEksnRpQ1ExDQ==



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

OTORGA EL PRESENTE

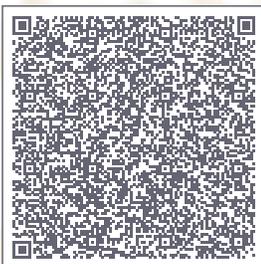
RECONOCIMIENTO

A

Jonathan Arenas Robles, Jesús Gonzalo Valenzuela Páez, Manuel Adam Medina, Miguel Ángel Franco Nava, J-C. Franco-Ortega, O. Guevara-Peredia

Por su invaluable presentación del artículo Desarrollo de un controlador adaptable en intercambiador de calor en el 1er Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada, desarrollado en el Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, TecNM/CENIDET, del 15 al 17 de noviembre de 2023.

Cuernavaca, Morelos, Noviembre de 2023



J0234923

<http://constancias.cenidet.tecnm.mx>

DR. ARTURO ERNESTO MARES GARDEA
**DIRECTOR DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO**

Sello Digital:

*kvdzUPk84yJJpS2yZP8oLL2b6phzbYri/qHInjFM4f1Ts6WgRa2ZhRzGVK/jkR0AGCuNSMvLZp1Omtvolz5gCq
j0xH0jwCJf42D3DTZEIGvMxGkWEz+Kvesvhy8S9h3ZyST+rvl9WZzaswBveUrA8JrxPOj1VwUILLymOiiVIQPXo
oW9hJWp+rUUoie1mudx/yOZVr79j7cnnLHYE7T/X/kOBwH8Qefv1W53VUn9Onq6ewQY2z0eSDLWdqQZ10N+p2w
PjGO/N17dyKnJIhXD4XhuYZNcJxU/GTwjU1RnVmDb1KnXncDuX2E6yXxHf0ZTxu3Y2446czIZTs303CUhWog==*



**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO**

OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

A

**Jesús Gonzalo Valenzuela Páez, Jonathan Arenas Robles,
Manuel Adam Medina, Miguel Angel Franco Nava, Gerardo
Vicente Guerrero Ramírez**

Por su invaluable presentación del Artículo:

Energy consumption of the thermal system of a pilot-scale photobioreactor based on the variation of the controller hysteresis.

En el II Congreso Internacional de Tecnología y Ciencia Aplicada, desarrollado en el Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, TecNM/CENIDET, del 22 al 24 de mayo de 2024.

Cuernavaca, Morelos, 24 de mayo de 2024

DR. ARTURO ERNESTO MARES GARDEA
DIRECTOR DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

DR. ARTURO ABÚNDEZ PLIEGO
COORDINADOR GENERAL
II CITCA



Sello Digital:

*tdyotL0ThsF9WpWK+qB4geZ4eF41/DhgJ6 j6Msre5VMt jDsrrN5QKu0Trg2t00ATD4UoX7UIk8GpytwXqSBwmcv
rM98g5SZ1BbkouW1xE1sj/ jrKVU/BNfJEMJvA2ePC0CIu0XxzP0mwUPD2AjpHDBwL/52KY6IAfTYXx9GE8Z/6A
LUJ32kwcwhI4f6cEMUCmSHEdL7vBvCB42A+yw6h/FGpcGwZhZ17CqVnqCbgF3q26OgcoY1Dp8 jDBhckUcT19Wx
9B7AK8u6uNX0ypFcTnrRm2fbpW4w+ITcN5ssWZwCvHMC0H3kaFD34yP4g0QN8z3DAjkJ19h+cYSE9yRCIFDA==*

<http://constancias.cenidet.tecnm.mx>
CITCA00960124



**TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO**

cenidet[®]
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico