



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

*Estudio de viabilidad técnica para la integración de un sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica en un sistema de electrolizador y pila de combustible de hidrógeno*

Trabajo Final de Graduación para optar por el título de:  
**Ingeniería en Mantenimiento Industrial**  
Con el grado académico de:  
**Licenciatura**

REALIZADO POR:  
José Ricardo Campos Mora

Cartago, Junio 2025



**Carrera evaluada y acreditada por:** Agencia de Acreditación de  
Programas de Ingeniería y de Arquitectura



*Esta obra está bajo licencia CC BY 4.0.*

# Hoja de Datos

## Datos personales

Nombre completo: José Ricardo Campos Mora

Número de cédula: 1-17080425 / DNI: 55846303A

Número de carné: 2018319099

Números de teléfono: +506 8712-5483/ +34 603 289 210

Correo electrónico: jricardo.campos@estudiantec.cr, jrcamposmora@gmail.com

Dirección exacta de domicilio: San José, Vázquez de Coronado, San Antonio, Residencial Santa Teresita, Casa 52

## Datos de la Empresa

Nombre: Centro Nacional del Hidrógeno

Actividad Principal: Investigación en Tecnologías del Hidrógeno.

Dirección: Prolongación Fernando el Santo, s/n 13500 Puertollano (Ciudad Real), Castilla-La Mancha, España.

Contacto: Coordinador de Departamento: Carlos de la Cruz, carlos.delacruz@cnh2.es;  
Asesor de TFG: José Félix Donoso, josefelix.donoso@cnh2.es

Teléfono: +34 926 420 682

# Carta de aceptación de la empresa



T. +34 926 42 06 82  
F. +34 926 67 05 07  
Prolongación Fernando el Santo, s/n  
Código Postal 13500 Puertollano  
(Ciudad Real) SPAIN

A quien pueda estar interesado,

Por este medio, el Centro Nacional del Hidrógeno (CNH<sub>2</sub>), deseamos notificarle la aceptación del estudiante: Jose Ricardo Campos Mora con cédula número 1-17080425 y carné de Estudiante 2018319099, para la realización del Trabajo Fin de Graduación en nuestras instalaciones de Puertollano (Ciudad Real, España).

El proyecto se registrá según el anteproyecto "Estudio de Viabilidad Técnica para la Integración de un sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica en un sistema de electrolizador y pila de combustible de hidrógeno". Documento ya revisado y aceptado por el CNH<sub>2</sub>.

Este proyecto puede suponer una importante mejora en la eficiencia de las instalaciones del CNH<sub>2</sub>, haciendo posible introducir en el mix energético del edificio el calor obtenido tanto en la producción del hidrógeno, como en la transformación del mismo en electricidad, haciendo posible el uso de este calor generado tanto en las instalaciones de climatización, como en bancos de ensayo donde sean requeridas fases de calentamiento. Además, este tipo de instalaciones pueden ser muy útiles en multitud de edificios públicos, donde pueden complementar a las instalaciones de energías renovables existentes y asociarse a su vez con los equipos de generación eléctrica de emergencia.

Atentamente,

DONOSO UBEDA  
JOSE FELIX - DNI  
05929744E

Firmado digitalmente por  
DONOSO UBEDA JOSE  
FELIX - DNI 05929744E  
Fecha: 2024.10.18  
14:39:25 +02'00'

José Félix Donoso Úbeda, unidad de Simulación Control y Usos Finales.

[Josefelix.donoso@cnh2.es](mailto:Josefelix.donoso@cnh2.es)

+34926420682. Ext: 145.

# Dedicatoria

A mi madre y abuela, Maribel Mora Saprissa y Cecilia Saprissa Grillo, sin el apoyo incondicional que he recibido de parte de ellas durante toda mi vida no hubiera sido posible si quiera pensar en la realización de este TFG.

A Melly y mi hermano Emmanuel, por sus consejos, favores, cariño y compañía a lo largo de mi vida en los últimos 16 años. Han sido un soporte esencial durante toda mi vida académica y personal.

Al resto de mi familia, sin su apoyo y acompañamiento, llegar a realizar este TFG hubiera sido imposible.

A mis amigos Aquim Williams, Jeycar Calderón, Juan Miguel Segura, Daniella Brenes, Mariela Rojas, Emmanuel Araya, Juan José Madrigal, Axel Batista, Alejandra Salas, Carlos Murillo, Kenneth Arce, Jose Andrés Chavarría, Luis Castro además de muchos otros que siempre estuvieron ahí como apoyo emocional y apoyo profesional.

A mi papá, el Ing. Óscar Eduardo Campos, descanse en paz, por todas las lecciones que me dio, consejos y grandes momentos en los 11 años de mi vida que lo pude tener conmigo.

Finalmente, a mi tío Daniel Mora Saprissa, descanse en paz, por haberme introducido al mundo de la computación y siempre apoyarme en todas las metas que me he propuesto, incluido este TFG, que semanas antes de morir, tenía toda la ilusión de acompañarme a instalarme en Puertollano.

# Agradecimientos

A toda mi familia por permitirme poder realizar mi TFG en España y en todas mis aventuras, sin su apoyo hubiese sido imposible.

Al Instituto Tecnológico de Costa Rica y al Centro Nacional del Hidrógeno, por darme los conocimientos y abrirme las puertas para poder realizar este TFG en Puertollano, España.

A Carlos de la Cruz, José Félix Donoso, Alberto Aguilar, Diego Rodríguez, Javier Tobajas, Jesús Gómez, Shlomi Nereida y demás miembros de la Unidad de Simulación, Control y Usos Finales del CNH2 y en general a toda la institución, por su apertura y esfuerzo para la realización del TFG y su excelente trato y amistad mostrados durante mi estancia en el CNH2.

A los profesores Carlos Piedra y Sebastián Mata por todo el apoyo y acompañamiento brindado para la realización del TFG en el Centro Nacional del Hidrógeno en Puertollano y por toda su disposición en la apertura de camino en la escuela en el tema del hidrógeno verde.

A Mariela Rojas Quesada por su apoyo en la realización del TFG, así como por todas las experiencias, conocimientos compartidos durante mi tiempo en la UCR en el GIA y sobre todo, por su amistad.

A mi primo el Ing. Rolvin Salas, por todos sus consejos, guía y ayuda durante lo inicios de mi proceso universitario.

Al Ing. Esteban Jiménez Sánchez por todas sus lecciones en temas de ingeniería y por la amistad que tuvimos durante mi tiempo en TECSpace y el GIA.

A TECSpace, por el cúmulo de aprendizajes, experiencias y la oportunidad de poder ser co-fundador y líder de una organización con mucho impacto.

A mis profesores del Colegio Metodista por darme las bases y la motivación que me permitieron poder realizar mis estudios de Ingeniería y llegar hasta donde he llegado.

A mi tutor de matemáticas, Francisco Barrientos, por ayudarme a encontrar la pasión por las matemáticas y, en general, ayudarme en el proceso de orientación vocacional.

Finalmente, a mis dos madres patrias, Costa Rica y España, países que me dieron y me dan muchísimas oportunidades. Espero, en mi vida profesional ser un puente entre estos dos países.

# Resumen

En el contexto del cambio climático y la transición energética hacia fuentes sostenibles, el hidrógeno verde se consolida como un vector energético estratégico. No obstante, su despliegue a gran escala enfrenta desafíos importantes, especialmente relacionados con los elevados costos de producción, operación y eficiencia. Este Trabajo Final de Graduación (TFG) plantea un estudio de viabilidad técnica para la integración de un sistema de refrigeración basado en una bomba de calor geotérmica, a un electrolizador y una pila de combustible de hidrógeno, elementos parte de la microrred del edificio demostrador del Centro Nacional del Hidrógeno (CNH2), en Puertollano, España.

El análisis se centra en la determinación y caracterización de variables clave del sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica, el electrolizador y la pila de combustible, conforme a los lineamientos de las normas ISO 22734, UNE-EN 378 e IEC 62282 y otros insumos de relevancia técnica y legal, con el objetivo de definir criterios técnicos que permitan establecer la viabilidad del uso de una bomba de calor geotérmica como sistema principal de refrigeración del conjunto electrolizador–pila. Se desarrollaron los planos electromecánicos del sistema propuesto, y se validaron los parámetros críticos mediante ensayos experimentales realizados sobre una pila de combustible de 30 kW, un electrolizador alcalino de 60 kW y una bomba de calor geotérmica. Paralelamente, se llevaron a cabo simulaciones para analizar la dinámica térmica del sistema integrado, y se formuló un presupuesto detallado orientado hacia su posible implementación en futuras aplicaciones.

A partir de lo anterior, se establecen conclusiones sobre la viabilidad técnica de la integración de un sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica en el sistema de electrolizador y pila de combustible de hidrógeno en función a los criterios previamente definidos.

Este trabajo aporta una solución innovadora para la mejora de la eficiencia térmica en sistemas de producción y aprovechamiento de hidrógeno en el contexto de microrredes, con potencial para reducir los costos operativos y avanzar en la consolidación del hidrógeno como vector clave en la descarbonización de la economía.

**Palabras Claves:** Hidrógeno Verde, Bomba de Calor Geotérmica, Pila de Combustible, Electrolizador, Microrredes, CNH2.

# Abstract

In the context of climate change and the ongoing energy transition toward more sustainable sources, green hydrogen is emerging as a strategic energy carrier. However, deploying it on a large scale still faces significant challenges, particularly related to high production costs, operational complexity, and efficiency limitations. This Final Graduation Project (TFG) presents a technical feasibility study for the integration of a geothermal heat pump–based cooling system, coupled with a hydrogen electrolyzer and fuel cell, as part of the microgrid of the demonstration building at the Spanish National Hydrogen Centre (CNH2) in Puertollano, Spain.

The analysis focuses on the characterization of key variables of the geothermal heat pump system, the electrolyzer, and the fuel cell, following the guidelines of standards such as ISO 22734, UNE-EN 378, and IEC 62282, along with other relevant technical and legal references. The goal is to define technical criteria to evaluate whether a geothermal heat pump can serve as the main thermal dissipation mechanism for the combined electrolyzer–fuel cell system. Electromechanical blueprints were developed for the proposed configuration, and critical system parameters were validated through experimental testing on a 30 kW fuel cell, a 60 kW alkaline electrolyzer, and a geothermal heat pump. In parallel, dynamic simulations were carried out to understand the thermal behavior of the integrated system under various operating conditions. A detailed cost estimate was also prepared to assess the potential for real-world implementation.

These efforts support conclusions regarding the technical viability of integrating a geothermal heat pump–based cooling system into the hydrogen electrolyzer and fuel cell setup, which operates as part of the CNH2 demonstration building’s microgrid.

This work offers an innovative approach to improving thermal efficiency in hydrogen production and utilization systems in the context of microgrids. It has the potential to reduce operational costs and strengthen the role of hydrogen as a cornerstone in building a decarbonized economy.

**Keywords:** Green Hydrogen, Geothermal Heat Pumps, Fuel Cells, Electrolyzers, Microgrids, CNH2.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.2. Reseña de la Empresa . . . . .	2
1.3. Antecedentes . . . . .	3
1.4. Planteamiento del Problema . . . . .	7
1.5. Objetivos . . . . .	9
1.6. Justificación . . . . .	10
1.7. Alcance . . . . .	12
1.8. Viabilidad . . . . .	13
1.9. Limitaciones . . . . .	14
1.10. Cronograma . . . . .	15
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>17</b>
2.1. Hidrógeno Verde . . . . .	17
2.1.1. Costo Nivelado del Hidrógeno(LCOH) . . . . .	17
2.2. Microrredes . . . . .	18
2.3. Electrolisis, Electrolizadores y Pilas de Combustible . . . . .	19
2.3.1. Electrolizadores . . . . .	20
2.3.2. Pilas de Combustible . . . . .	22
2.3.3. Caracterización de Electrolizadores y Pilas de Combustible . . . . .	24
2.4. Sistemas de refrigeración y calefacción geotérmicos . . . . .	27
2.4.1. Bombas de calor geotérmicas . . . . .	27
2.4.2. Intercambiadores geotérmicos . . . . .	28
2.4.3. Caracterización de circuitos con bombas de calor geotérmicas . . . . .	29
2.4.4. Normas UNE-EN 378, RITE - RD 1027/2007, ASHRAE RP - 1674, Guía del IDAE . . . . .	32
2.5. Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) . . . . .	32
2.5.1. Normas UNE-EN 60706 y IEC 60300 . . . . .	33
<b>3. Metodología</b>	<b>34</b>

<b>4. Resultados</b>	<b>35</b>
4.1. Objetivo I . . . . .	36
4.1.1. Revisión bibliográfica y normativa aplicable. . . . .	36
4.1.2. Variables claves para la caracterización . . . . .	38
4.1.3. Criterios para determinar la viabilidad técnica del sistema geotérmico . . . . .	41
4.2. Objetivo II . . . . .	45
4.2.1. Lámina de portada . . . . .	48
4.2.2. Lámina de diagrama de flujo . . . . .	48
4.2.3. Lámina de distribución de planta . . . . .	49
4.2.4. Lámina de ubicación de edificio demostrador . . . . .	49
4.2.5. Lámina de especificaciones técnicas de equipos principales . . . . .	50
4.2.6. Determinación de índices de intervención técnica (IIT) de la integración del sistema geotérmico con la pila y electrolizador . . . . .	50
4.2.7. Evaluación de la mantenibilidad del sistema geotérmico . . . . .	52
4.3. Objetivo III . . . . .	55
4.3.1. Simulaciones de caracterización de pozo geotérmico . . . . .	55
4.3.2. Ensayo en electrolizador Erredue G16D . . . . .	59
4.3.3. Ensayo en pila de combustible HyPM HD 30 . . . . .	64
4.3.4. Ensayos en bomba de calor geotérmica . . . . .	70
4.3.5. Simulación de dinámica de tanque de inercia y bomba de calor a partir de datos experimentales . . . . .	85
4.4. Objetivo IV . . . . .	88
4.4.1. Presupuesto general de partes y costos asociados . . . . .	88
4.5. Resumen y análisis de resultados finales obtenidos de criterios previamente definidos del estudio de viabilidad técnica . . . . .	90
4.5.1. Eficiencia . . . . .	90
4.5.2. Capacidad de Refrigeración . . . . .	91
4.5.3. Rendimiento de Pila de Combustible y Electrolizador . . . . .	92
4.5.4. Nivel de modificación requerido para la integración . . . . .	93
4.5.5. Mantenibilidad del sistema geotérmico . . . . .	94
4.5.6. Escalabilidad y replicabilidad . . . . .	94
<b>5. Conclusiones</b>	<b>95</b>
<b>6. Recomendaciones</b>	<b>96</b>
<b>7. Anexos</b>	<b>97</b>
7.1. Recorrido fotográfico de la instalación en el CNH2. . . . .	97
7.1.1. Zona de pozo geotérmico . . . . .	97
7.1.2. Entrada desde pozo geotérmico . . . . .	98

7.1.3. Bomba de calor geotérmica . . . . .	98
7.1.4. Tanque de inercia . . . . .	100
7.1.5. Colectores (Manifold) . . . . .	100
7.1.6. Tanque de almacenamiento de frío . . . . .	101
7.1.7. Intercambiador de placas planas . . . . .	101
7.1.8. Tuberías a sala de electrolizador y pila . . . . .	102
7.1.9. Intercambiador placas planas de pila . . . . .	102
7.1.10. Intercambiador placas planas de electrolizador . . . . .	103
7.1.11. Intercambiadores tubulares de circuito(prevista de integración no completa) para recuperación y aprovechamiento del calor en climatización . . . . .	103
7.1.12. Electrolizador . . . . .	104
7.1.13. Pila de combustible . . . . .	105
7.1.14. Gabinete de conexiones de sala de geotermia . . . . .	106
7.2. Fichas Técnicas . . . . .	107
7.2.1. Pila de Combustible HyPM HD 30 . . . . .	107
7.2.2. Electrolizador ClanTech Erredue G16D 60 kW . . . . .	108
7.2.3. Bomba de Calor Geotérmica AERMEC WRL161XH°TUPQ° . . . . .	109
7.3. Variación del IPC en España de los últimos 10 años . . . . .	110
7.4. Proceso de realización de ensayos físicos . . . . .	110
7.4.1. Ensayo de Electrolizador . . . . .	110
7.4.2. Ensayo de Pila de Combustible . . . . .	112
7.4.3. Ensayo de sistema geotérmico con tanque de inercia simulando carga térmica de electrolizador y pila . . . . .	115
<b>8. Apéndice</b>	<b>118</b>
8.1. Simulaciones . . . . .	118
8.1.1. Código para resistencia equivalente de intercambiador geotérmico . . . . .	118
8.1.2. Código para obtención de disposición geométrica de pygfunction . . . . .	119
8.1.3. Código de cálculo de temperaturas del subsuelo . . . . .	120
8.1.4. Modelo de SIMULINK para la simulación de temperaturas del tanque de inercia	121
8.2. Planos en página completa del Circuito de Disipación de Calor de la Pila y Electrolizador	122
<b>Bibliografía</b>	<b>132</b>

# Índice de figuras

1.1. Tipos de Electrolizadores. [11] . . . . .	3
1.2. Arquitectura de Electrolizador [13] . . . . .	4
1.3. Arquitectura de Bomba de Calor Geotérmica [17] . . . . .	5
1.4. Mejora de Eficiencia sobre Aerotérmicas [19] . . . . .	5
1.5. Comparación de EER de GCHP vrs ASHP [18] . . . . .	10
1.6. Curva de Generación de Calor Pila de Combustible [21] . . . . .	11
1.7. Curva de generación de calor Electrolizador [21] . . . . .	11
1.8. Cuadro de Gantt . . . . .	15
2.1. Proceso de Generación de Hidrógeno Verde [22] . . . . .	17
2.2. LCOH [8] . . . . .	18
2.3. Esquema de Microrred [26] . . . . .	19
2.4. Microrred del CNH2 . . . . .	19
2.5. Electroquímica de Electrolisis [28] . . . . .	20
2.6. Stack Electrolizador PEM [30] . . . . .	21
2.7. Balance de planta electrolizador PEM [31] . . . . .	21
2.8. Tipos de Electrolizador y reacciones [32] . . . . .	22
2.9. Esquema de Pila de Combustible . . . . .	23
2.10. Subsistemas de una pila de combustible [35] . . . . .	23
2.11. Tipos de Pila de Combustible . . . . .	23
2.12. Stack de Pila de Combustible . . . . .	24
2.13. Curva I-V de Pila de Combustible . . . . .	25
2.14. Curva I-V de Electrolizador [40] . . . . .	25
2.15. Modos de Operación de Sistema Geotérmico [45] . . . . .	27
2.16. Tipos de bombas de calor geotérmicas [46] . . . . .	28
2.17. Ciclos de Bombas de Calor Geotérmicas [47] . . . . .	28
2.18. Gráfica de funciones G [50] . . . . .	32
2.19. Descripción del mantenimiento centrado en confiabilidad [55] . . . . .	33

4.1. Esquema simplificado de sistema de refrigeración geotérmico del edificio demostrador en el CNH2. . . . .	36
4.2. Curva de Generación $H_2$ del Electrolizador - Fabricante . . . . .	43
4.3. Curva de Rendimiento de Pila de Combustible HyPM HD 30 - Fabricante . . . . .	43
4.4. Diagrama de Flujo con Equipos (proveído por el CNH2) . . . . .	46
4.5. Diagrama de Flujo (proveído por el CNH2) . . . . .	47
4.6. Portada de planos . . . . .	48
4.7. Diagrama de Flujo . . . . .	48
4.8. Distribución de Planta . . . . .	49
4.9. Lámina de Ubicación de Edificio Demostrador . . . . .	49
4.10. Lámina de especificaciones técnicas de equipos principales . . . . .	50
4.11. Válvula termo-estática mezcladora regulable [60] . . . . .	51
4.12. Matriz de Criticidad con énfasis en impacto a la seguridad . . . . .	54
4.13. Mapa de calor de la mantenibilidad del sistema geotérmico. . . . .	55
4.14. Disposición Geométrica de Pozos Utilizada en la Simulación . . . . .	57
4.15. Comportamiento con respecto a flujo másico simulado de la resistencia térmica equivalente del intercambiador . . . . .	57
4.16. Comportamiento con respecto a flujo másico simulado del coeficiente global del intercambiador geotérmico . . . . .	58
4.17. Efecto de la conductividad del suelo en la resistencia térmica del pozo geotérmico . . . . .	58
4.18. Variación anual de temperatura del subsuelo a distintas profundidades para Puertollano, España . . . . .	59
4.19. Mapa de Calor de las Temperaturas a Distintas Profundidades para Puertollano, España. . . . .	59
4.20. Curva I-V electrolizador Erredue G16D . . . . .	60
4.21. Comparación de potencias durante ensayo . . . . .	61
4.22. Caudal de hidrógeno producido vrs potencia del stack . . . . .	61
4.23. Eficiencia de stack de electrolizador . . . . .	62
4.24. Comportamiento de temperaturas durante realización de ensayo . . . . .	62
4.25. Potencia térmica generada durante realización de ensayo. . . . .	63
4.26. Potencia térmica vrs potencia eléctrica de stack. . . . .	63
4.27. Curva I-V experimental de pila de combustible HyPM HD30 desde 2.5 kW hasta 15 kW . . . . .	65
4.28. Comparación de potencias durante ensayo. . . . .	65
4.29. Consumo de hidrógeno durante ensayo. . . . .	66
4.30. Consumo de hidrógeno vrs potencia de stack de pila . . . . .	66
4.31. Comportamiento de eficiencia durante ensayo . . . . .	67
4.32. Eficiencia vrs potencia eléctrica de stack . . . . .	67
4.33. Temperatura registrada de la pila durante el ensayo . . . . .	68
4.34. Energía acumulada durante la realización del ensayo . . . . .	68
4.35. Potencia térmica vrs potencia eléctrica registrada en ensayo . . . . .	69

4.36. Comportamiento de potencias registradas en ensayo . . . . .	71
4.37. Potencia térmica en función a potencia eléctrica consumida por la bomba de calor . . . . .	71
4.38. Comportamiento de temperaturas durante ensayo . . . . .	72
4.39. Comportamiento de flujos máxicos durante ensayo . . . . .	72
4.40. Comportamiento de COP de calefacción/enfriamiento durante ensayo . . . . .	73
4.41. Comportamiento de COP de calefacción/enfriamiento vrs potencia térmica registrado en ensayo . . . . .	73
4.42. Comportamiento de potencias registradas en ensayo . . . . .	74
4.43. Potencia térmica en función a potencia eléctrica consumida por la bomba de calor . . . . .	75
4.44. Comportamiento de temperaturas durante ensayo . . . . .	75
4.45. Comportamiento de flujos máxicos durante ensayo . . . . .	76
4.46. Comportamiento de COP de calefacción/enfriamiento durante ensayo . . . . .	76
4.47. Comportamiento de COP de calefacción/enfriamiento vrs potencia térmica registrado en ensayo . . . . .	77
4.48. Comportamiento de potencias registradas en ensayo . . . . .	78
4.49. Potencia térmica en función a potencia eléctrica consumida por la bomba de calor . . . . .	78
4.50. Comportamiento de temperaturas durante ensayo . . . . .	79
4.51. Comportamiento de flujos máxicos durante ensayo . . . . .	79
4.52. Comportamiento de COP de calefacción/enfriamiento durante ensayo . . . . .	80
4.53. Comportamiento de COP de calefacción/enfriamiento vrs potencia térmica registrado en ensayo . . . . .	80
4.54. Comportamiento de potencias registradas en ensayo . . . . .	81
4.55. Potencia térmica en función a potencia eléctrica consumida por la bomba de calor . . . . .	82
4.56. Comportamiento de temperaturas durante ensayo . . . . .	82
4.57. Comportamiento de flujos máxicos durante ensayo . . . . .	83
4.58. Comportamiento de COP de calefacción/enfriamiento durante ensayo . . . . .	83
4.59. Comportamiento de COP de calefacción/enfriamiento vrs potencia térmica registrado en ensayo . . . . .	84
4.60. Temperatura de Tanque de Inercia bajo operación máxima . . . . .	86
4.61. Temperatura de Tanque de Inercia bajo operación óptima . . . . .	86
4.62. Temperatura de Tanque de Inercia bajo operación experimental . . . . .	87
4.63. Temperatura de Tanque de Inercia bajo operación aislada para pila de combustible . . . . .	87
4.64. Temperatura de Tanque de Inercia bajo operación aislada para el electrolizador . . . . .	88
4.65. Presupuesto de Instalación de Intercambio de Calor Geotérmico en el CNH2 . . . . .	89
4.66. Distribución porcentual presupuestaria de instalación de geotermia con pila y electrolizador . . . . .	89
4.67. Distribución porcentual presupuestaria de solamente instalación geotérmica . . . . .	90
4.68. Comparativa de temperaturas de tanque de inercia bajo los cuatro escenarios . . . . .	91
4.69. Comparativa de temperaturas de tanque de inercia bajo los cuatro escenarios . . . . .	92
7.1. Zona de pozo geotérmico . . . . .	97

7.2. Colectores de pozo geotérmico . . . . .	97
7.3. Entrada y Retorno a Pozo Geotérmico . . . . .	98
7.4. Bomba de calor geotérmica . . . . .	98
7.5. Bomba de calor geotérmica . . . . .	99
7.6. Bomba de calor geotérmica . . . . .	99
7.7. Tanque de inercia . . . . .	100
7.8. Colectores . . . . .	100
7.9. Tanque de almacenamiento de frío . . . . .	101
7.10. Intercambiador de almacenamiento de frío . . . . .	101
7.11. Tuberías a sala de Electrolizador y Pila . . . . .	102
7.12. Intercambiador placas planas de Pila . . . . .	102
7.13. Intercambiador placas planas de Electrolizador . . . . .	103
7.14. Intercambiadores tubulares . . . . .	103
7.15. Electrolizador Erredue G16D 60 kW . . . . .	104
7.16. Electrolizador Erredue G16D 60 kW . . . . .	104
7.17. Pila de combustible Heliocentris HyPM HD 30 . . . . .	105
7.18. Pila de combustible Heliocentris HyPM HD 30 . . . . .	105
7.19. Gabinete de conexiones . . . . .	106
7.20. Ficha Técnica Pila HyPM HD 30 . . . . .	107
7.21. Ficha Técnica Electrolizador ClanTech Erredue G16D 60 kW . . . . .	108
7.22. Ficha Técnica AERMEC WRL161XH°TUPQ° . . . . .	109
7.23. Variación Mensual del IPC en España del INE. [63] . . . . .	110
7.24. Ensayo de Electrolizador . . . . .	110
7.25. Refrigeración integrada de Electrolizador . . . . .	111
7.26. Refrigeración integrada de Electrolizador . . . . .	111
7.27. Chiller de Electrolizador . . . . .	112
7.28. Ensayo de pila de combustible . . . . .	112
7.29. Ensayo de pila de combustible . . . . .	113
7.30. Ensayo de pila de combustible . . . . .	113
7.31. Ensayo de pila de combustible . . . . .	114
7.32. Ensayo de pila de combustible . . . . .	114
7.33. Ensayo de pila de combustible . . . . .	115
7.34. Ensayo de sistema geotérmico . . . . .	115
7.35. Ensayo de sistema geotérmico . . . . .	116
7.36. Ensayo de sistema geotérmico . . . . .	116
7.37. Ensayo de sistema geotérmico . . . . .	116
7.38. Vista térmica de tanque de inercia . . . . .	117
7.39. Vista térmica de bomba de calor geotérmica . . . . .	117

8.1. Modelo de SIMULINK de tanque de inercia . . . . . 122

# Índice de tablas

1.1. Tabla de desviación entre debiera y realidad . . . . .	8
1.2. Listado de Tareas por Realizar en el Proyecto . . . . .	16
2.1. Información técnica de cuatro tecnologías de electrolizadores [33] . . . . .	22
2.2. Descripción de términos de la ecuación de voltaje de pila de combustible . . . . .	24
2.3. Descripción de términos de la ecuación de voltaje del electrolizador . . . . .	25
2.4. Variables físicas clave para el diseño y caracterización de intercambiadores geotérmicos [53] . . . . .	29
2.5. Fórmula y ponderación del NPLV (Non-Standard Part Load Value) . . . . .	31
3.1. Metodología empleada en el desarrollo del proyecto. . . . .	34
4.1. Normativas y Guías Aplicables a la Caracterización de Sistemas con Bombas de Calor Geotérmicas . . . . .	37
4.2. Bibliografía relevante a la caracterización de bombas de calor geotérmicas. . . . .	37
4.3. Normativas y guías aplicables a la caracterización de Pilas de Combustible y Electrolizadores. . . . .	38
4.4. Variables clave del sistema de refrigeración geotérmico . . . . .	39
4.5. Variables claves para la caracterización mediante curva I-V . . . . .	40
4.6. Indicadores de eficiencia energética considerados para la evaluación técnica del sistema de refrigeración . . . . .	42
4.7. Escenarios de operación del sistema electrolizador–pila de combustible. . . . .	42
4.8. Rangos seguros de temperatura del tanque de inercia para el correcto funcionamiento del sistema de refrigeración. . . . .	42
4.9. IIT para evaluar modificaciones requeridas en el sistema actual . . . . .	44
4.10. Indicadores técnicos considerados para la evaluación de escalabilidad y replicabilidad del sistema geotérmico . . . . .	45
4.11. Evaluación del IIT por componente del sistema . . . . .	50
4.12. Especificaciones de válvula termo-estática mezcladora . . . . .	51
4.13. Listado de equipos del sistema de refrigeración geotérmico y sus funciones. . . . .	52
4.14. Análisis RCM del sistema de refrigeración geotérmico . . . . .	53
4.15. Parámetros claves del intercambiador de calor geotérmico . . . . .	56

4.16. Resultados del cálculo del intercambiador de calor geotérmico . . . . .	56
4.17. Indicadores de refrigeración de electrolizador . . . . .	64
4.18. Indicadores en eficiencia máxima del electrolizador . . . . .	64
4.19. Indicadores del sistema de refrigeración de la pila . . . . .	69
4.20. Indicadores de eficiencia máxima registrada de la pila de combustible . . . . .	69
4.21. Resultados experimentales de los indicadores de refrigeración del sistema geotérmico . .	74
4.22. Resultados experimentales de los indicadores de refrigeración del sistema geotérmico . .	77
4.23. Resultados experimentales de los indicadores de refrigeración del sistema geotérmico . .	81
4.24. Resultados experimentales de los indicadores de refrigeración del sistema geotérmico . .	84
4.25. Indicadores de COP en sistemas actuales de refrigeración . . . . .	90
4.26. Resultados de COP y NPLV en ensayos de bomba de calor geotérmica . . . . .	90
4.27. Comparativa entre carga térmica y capacidad de disipación en distintos escenarios de operación . . . . .	91
4.28. Comparativa de eficiencia máxima: valores experimentales vs. esperados . . . . .	93
4.29. Indicadores de escalabilidad y adaptabilidad del sistema geotérmico . . . . .	94

# Siglas y acrónimos

**AFC:** Solución Alcalina  
**ASHRAE:** American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers  
**ASHP:** Air Source Heat Pump (Bomba de Calor de Fuente de Aire)  
**AWE:** Alkaline Water Electrolysis (Electrólisis Alcalina del Agua)  
**CAPEX:** Capital Expenditure (Gasto de Capital)  
**CNH2:** Centro Nacional del Hidrógeno  
**COP:** Coefficient of Performance (Coeficiente de Rendimiento)  
**DMFC:** Membrana de Polímero Sólido  
**EER:** Energy Efficiency Ratio (Índice de Eficiencia Energética)  
**EIS:** Electrochemical Impedance Spectroscopy (Espectroscopía de Impedancia Electroquímica)  
**GSHP:** Ground Source Heat Pump (Bomba de Calor Geotérmica)  
**HPT:** Heat Pumping Technologies  
**I+D:** Investigación y Desarrollo  
**IDAE:** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía  
**IEA:** International Energy Agency (Agencia Internacional de la Energía)  
**IEC:** International Electrotechnical Commission  
**IIT:** Índice de Intervención Técnica  
**IPC:** Índice de Precios al Consumidor  
**ISO:** International Organization for Standardization  
**LCOH:** Levelized Cost of Hydrogen (Costo Nivelado del Hidrógeno)  
**MCFC:** Carbonatos Fundidos  
**NPLV:** Non-Standard Part Load Value (Valor de Carga Parcial No Estándar)  
**ODS:** Objetivos de Desarrollo Sostenible  
**OPEX:** Operational Expenditure (Gasto Operacional)  
**PAFC:** Ácido Fosfórico  
**PEM:** Proton Exchange Membrane (Membrana de Intercambio Protónico)  
**PEMFC:** Membrana de Polímero Sólido  
**PID:** Proportional-Integral-Derivative (Controlador Proporcional-Integral-Derivativo)  
**RCM:** Reliability Centered Maintenance (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad)  
**RITE:** Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios  
**SCADA:** Supervisory Control and Data Acquisition (Sistema de Control y Adquisición de Datos)  
**SOEC:** Solid Oxide Electrolysis Cell (Celda de Electrólisis de Óxido Sólido)  
**SOFC:** Óxido Sólido  
**TEC:** Instituto Tecnológico de Costa Rica  
**TFG:** Trabajo Final de Graduación  
**TRNSYS:** Transient System Simulation Tool  
**UNE-EN:** Norma Española adoptada de norma Europea

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Introducción

En un contexto global marcado por la urgente necesidad de una transición energética debido al cambio climático, las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente provenientes de los combustibles fósiles, alcanzaron 37 gigatoneladas de  $CO_2$  en 2022 [1]. Este nivel de emisiones está contribuyendo significativamente al calentamiento global y a la degradación ambiental, lo que subraya la necesidad de encontrar alternativas sostenibles. En este escenario, el hidrógeno producido a partir de fuentes renovables, conocido como *hidrógeno verde*, emerge como un vector energético prometedor para sustituir los combustibles fósiles en diversas actividades, procesos y sectores.

El hidrógeno verde no solo tiene el potencial de reducir las emisiones de  $CO_2$ , sino que también puede contribuir a la seguridad energética al diversificar las fuentes de energía y reducir la dependencia de los combustibles fósiles importados. Además, su versatilidad permite su uso en una amplia gama de aplicaciones, desde la generación de electricidad y calor hasta el transporte y la industria pesada. [2]

El desarrollo del hidrógeno verde es considerado fundamental en la estrategia de descarbonización de la Unión Europea, que se ha fijado el objetivo de producir 10 millones de toneladas y de importar otras 10 millones de toneladas de hidrógeno renovable para 2030 [3]. Este ambicioso objetivo refleja la importancia del hidrógeno en la transición hacia una economía baja en carbono. Sin embargo, la adopción generalizada del hidrógeno enfrenta importantes barreras de índole micro y macro económica, política y tecnológica [4].

Una de las principales barreras tecnológicas en la producción y consumo del hidrógeno verde es la eficiencia energética de todos sus subprocesos. Se estima que el hidrógeno renovable tiene eficiencias del 20% al 30% desde la generación eléctrica hasta su uso final en sectores de transporte [5]. Muchas de estas pérdidas se deben a la generación de calor en los procesos de conversión.

Dentro de las pérdidas energéticas en el proceso de producción de hidrógeno renovable mediante electrolizadores y su consumo mediante pilas de combustible, se encuentra el consumo energético derivado de la necesidad de refrigeración. Los electrolizadores y las pilas de combustible generan calor durante los procesos de conversión y obtención del hidrógeno, lo cual requiere sistemas de refrigeración adicionales que incrementan el consumo energético total. [6]

Este estudio evalúa la viabilidad técnica de integrar un sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica en una microrred con un sistema de electrolizador y pila de combustible de hidrógeno, ubicado en el edificio demostrador del Centro Nacional de Hidrógeno (CNH2). El fin es caracterizar el sistema con bomba de calor geotérmica como sistema principal de disipación de calor para la pila de combustible y el electrolizador.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Para ello, se identifican y caracterizan las variables claves del sistema de bomba de calor geotérmica, la pila de combustible y el electrolizador, con el objetivo de establecer criterios técnicos que permitan evaluar su viabilidad técnica. Estas variables, junto con los criterios definidos, son validadas mediante simulaciones y ensayos físicos realizados en la microrred del edificio demostrador del CNH2. Paralelamente, se desarrolla el diseño de integración del sistema, incorporando las modificaciones necesarias mediante planos electromecánicos, y se elabora un presupuesto detallado que sirva como base para futuras réplicas del sistema en proyectos con contextos operativos similares.

### 1.2. Reseña de la Empresa

El Centro Nacional de Experimentación de Tecnologías de Hidrógeno y Pilas de Combustible, conocido también como Centro Nacional del Hidrógeno (CNH2), es un centro de investigación de ámbito nacional de España, orientado a impulsar la investigación científica y tecnológica de las tecnologías del hidrógeno y pilas de combustible, estando al servicio de toda la comunidad científica, tecnológica e industrial.

El CNH2 fue creado en el 2007 como un Consorcio Público entre el Ministerio de Educación y Ciencia, actualmente Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, y la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, con una participación del 50 % cada uno, y su sede se encuentra en Puertollano (Ciudad Real, Castilla - La Mancha, España).

El CNH2 tiene cuatro objetivos principales:

- Impulsar la tecnología mediante la ejecución de proyectos de I+D y servicios tanto de investigación básica como aplicada.
- Experimentar y validar prototipos y equipos.
- Desarrollar y escalar procesos.
- Homologar, certificar y verificar componentes y sistemas.

El CNH2 centra sus esfuerzos hacia el desarrollo de *hidrógeno verde* en todas sus fases, cuenta con 13 laboratorios y 5 instalaciones auxiliares en donde se abarcan las siguientes áreas: Producción de hidrógeno desde fuentes renovables, Almacenamiento y distribución de hidrógeno, Transformación de hidrógeno, aplicaciones de las tecnologías de hidrógeno, Normativa, certificación y seguridad, y implantación tecnológica.

El CNH2 es un centro de referencia y de elevado prestigio en el sector a nivel nacional en España, así como internacional. Tienen una elevada cantidad de proyectos de colaboración con universidades, centros tecnológicos y empresas de distinta índole, en donde se cubre toda la cadena de valor del hidrógeno y aporta experiencia, calidad y profesionalidad en el acometer de sus objetivos.

Las actividades del CNH2 son estratégicas para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente los Objetivos 7 relacionado con la energía asequible y no contaminante, 9 relacionado con industria, innovación e infraestructura,11 basado en ciudades y comunidades sostenibles, 13 basado en acción por el clima.



### 1.3. Antecedentes

#### Teóricos

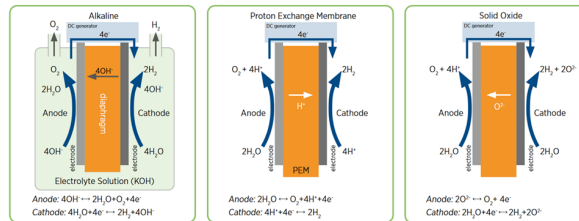
#### Hidrógeno Verde, Pilas de Combustible y Electrolizadores

El hidrógeno verde es clave en la transición energética hacia una matriz des-carbonizada a nivel global. [5] Este hecho, ha impulsado la investigación y desarrollo de tecnologías para la producción de hidrógeno verde, como son las pilas de combustible y los electrolizadores. No obstante, existen barreras de índole político, económico y tecnológico para que el hidrógeno pueda alcanzar su potencial como elemento clave en la matriz energética y ser un facilitador en la des-carbonización. [4]

Uno de los más importantes es el costo de producción de hidrógeno verde por kilogramo, también conocido como el Costo Nivelado de Hidrógeno (LCOH) es el parámetro más utilizado en análisis de viabilidad financiera y en estudios macro económicos sobre la adopción del hidrógeno verde. [7] Actualmente ronda en promedio en \$8 por cada kilogramo de hidrógeno. [8] Se considera un precio elevado aún para que muchos sectores puedan adoptarlo en sustitución de combustibles fósiles. [4]

Además de barreras económicas y de política pública, hay barreras de índole técnico. Uno de ellos esta relacionado con pérdidas térmicas que repercuten en la eficiencia, únicamente en el proceso de producción de un 20 a un 40 % de la potencia de entrada al proceso de generación de hidrógeno verde se pierde en liberación de calor. Incluso, se estima que el sistema de gestión térmica representa el 8 % del CAPEX de una pila de combustible. [9]

El proceso de producción y consumo de hidrógeno verde está basado en la electrolisis del agua. [10] El proceso de electrolisis, tiene como componentes clave el electrolizador y la pila de combustible; el electrolizador puede ser de tres tipologías distintas: electrolisis del agua con líquido alcalino también conocida por sus siglas en inglés de AWE, membrana de intercambio de protones conocida como PEM, y electrolisis de óxido sólido conocida como SOEC. [10] En la **Figura 1.1** se presenta un diagrama de los distintos electrolizadores.



**Figura 1.1:** Tipos de Electrolizadores. [11]

Las pilas de combustible se ven influenciadas en su rendimiento por la temperatura; en una pila de combustible a temperaturas más altas se registra un incremento de la actividad electroquímica pero también una alta temperatura afecta el voltaje máximo al cual la pila de combustible puede operar. [12] El aumento de temperatura más allá de la temperatura de estabilización, implica una reducción de la eficiencia de la pila, haciendo necesario sistemas de refrigeración capaces de disipar la carga térmica producida por el electrolizador y la pila de combustible. Si el calor no es disipado de manera efectiva o utilizado representa una pérdida de eficiencia. [13] Asimismo, una alta temperatura contribuye a una reducción en la duración del ciclo de vida. La arquitectura de un electrolizador; está compuesto por varios subsistemas: sistemas de bombeo, sistemas de separación de oxígeno e hidrógeno y un circuito de refrigeración. [13] Los anteriores son llamados balance de planta. En la **Figura 1.2** se presenta un diagrama de configuración de arquitectura de electrolizador tipo PEM y AWE.

Los electrolizadores representan solamente el 0.1 % de la producción mundial de hidrógeno, la

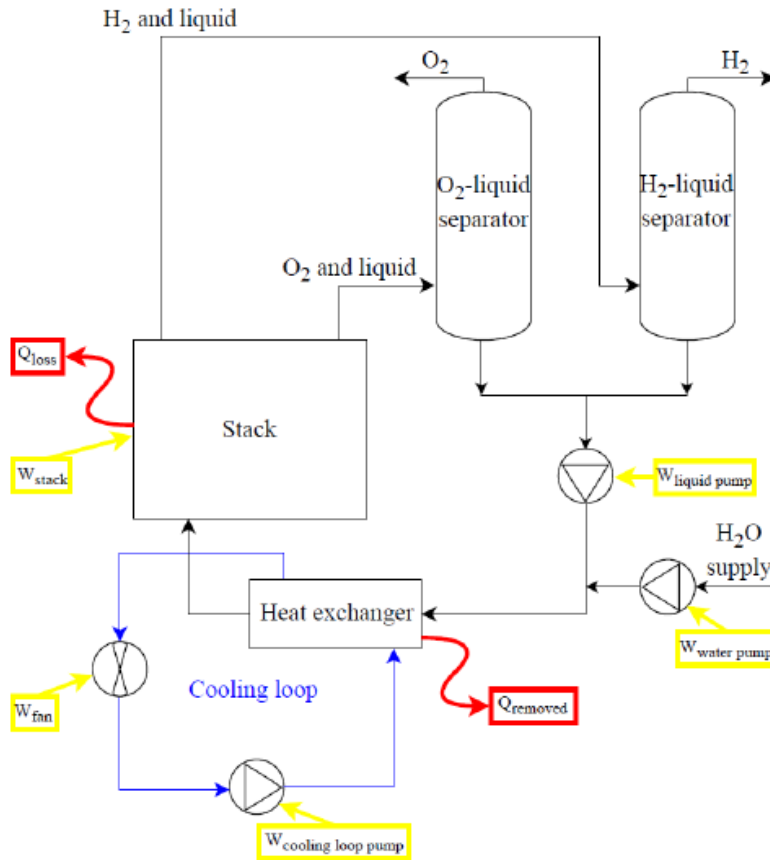


Figura 1.2: Arquitectura de Electrolizador [13]

mayoría sigue siendo producida por procesos químicos convencionales a base de combustibles fósiles. [13] Se estima que los electrolizadores tipo PEM y AWE tienen una vida útil de 10,000 a 40,000 horas operacionales. [13]

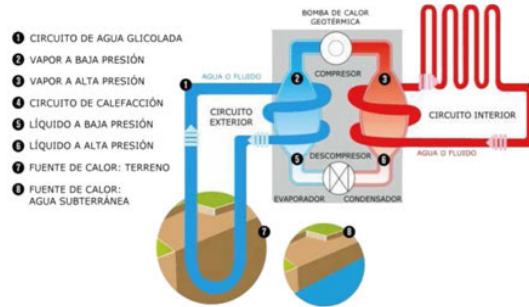
### Bombas de calor geotérmicas

Las bombas de calor geotérmicas o también definidas por su acrónimo en inglés, GSHP (Ground Source Heat Pump) es un término que incluye una variedad de sistemas que utilizan la tierra, mantos acuíferos o cuerpos de agua superficial como una fuente de calor o como un sumidero. [14]

Las bombas de calor geotérmicas se han consolidado como una tecnología altamente eficiente para la gestión térmica y refrigeración en aplicaciones industriales, comerciales y residenciales, aprovechando el calor almacenado en el subsuelo y la temperatura constante del subsuelo. Estos sistemas son capaces de transferir calor desde o hacia la tierra, proporcionando tanto refrigeración como calefacción con un bajo consumo energético, lo que los convierte en una opción clave dentro de la transición hacia energías más limpias y sostenibles. Además, su Coeficiente de Rendimiento (COP) y su Factor de Eficiencia Energética (EER) son significativamente mayores que los de otros sistemas tradicionales, con valores que pueden alcanzar hasta 4 o 5, lo que implica que por cada unidad de electricidad consumida, el sistema puede proporcionar cuatro o cinco unidades de energía térmica disipada [15]. Las bombas de calor geotérmicas no solo mejoran la eficiencia energética en procesos industriales, sino que también

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo a la des carbonización de sectores de alto consumo energético. [16] Su aplicación en la industria, especialmente en casos de sistemas de refrigeración para electrolizadores y pilas de combustible de hidrógeno, permite optimizar la gestión térmica, mejorando el rendimiento general de estos equipos y prolongando su vida útil. En la **Figura 1.3** se presenta la arquitectura de un esquema de refrigeración por bomba de calor geotérmica.

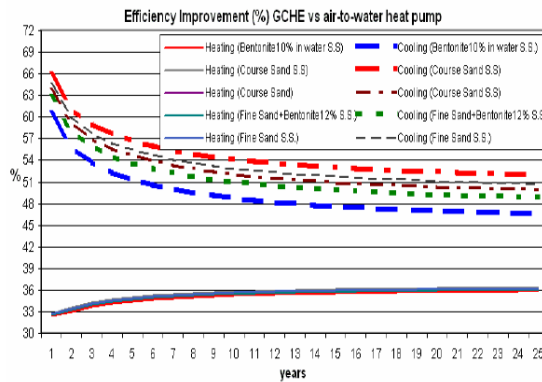


**Figura 1.3:** Arquitectura de Bomba de Calor Geotérmica [17]

## Prácticos

### Bombas de calor geotérmicas

En estudios de caso previos, las bombas de calor geotérmicas han presentado una eficiencia energética anual 25 % superior a la de las bombas de calor aerotérmicas (ASHP). [18] Asimismo, las emisiones de sistemas de bombas de calor geotérmicas son un 2.5 % menores en su ciclo de vida que las de las bombas de calor aerotérmicas. [18] En la **Figura 1.4** se muestra la mejora en eficiencia de una bomba de calor geotérmica sobre una aerotérmica en su ciclo de vida.



**Figura 1.4:** Mejora de Eficiencia sobre Aerotérmicas [19]

### Pilas de Combustible y Electrolizadores

En estudios de caso previos referentes a electrolizadores y pilas de combustible, se han realizado varios estudios técnico-financieros sobre la utilización del calor de rechazo de los electrolizadores y pilas

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

de combustible para la mejora de la eficiencia en la producción del hidrógeno verde. [7] Los casos han dado un balance positivo y con una mejoría en el LCOH del hidrógeno verde.

## 1.4. Planteamiento del Problema

El hidrógeno verde es fundamental en la ruta hacia la des-carbonización global y el cumplimiento de los objetivos del Acuerdo de París. [2] Sin embargo, aún existen diversas barreras que impiden que el hidrógeno verde se consolide como un sustituto viable de los combustibles fósiles en distintos procesos y sectores. [4]

Una de las principales barreras es la eficiencia en la generación de hidrógeno verde y su conversión mediante electrolizadores y pilas de combustible. Se estima que entre el 20% y el 40% de la potencia de entrada en estos sistemas se pierde como calor. [7] Además, el sistema de gestión térmica representa aproximadamente el 8% de los costos de instalación de una pila de combustible de hidrógeno. [9]

Por tanto, los sistemas de refrigeración en sistemas de electrolizadores y pilas de combustible son fundamentales para la seguridad y la eficiencia en la operación de los mismos, por lo que resulta de relevancia el conocimiento de distintas alternativas tecnológicas para los sistemas de refrigeración y su respectiva caracterización. Una de las alternativas es el uso de bombas de calor geotérmicas para el circuito de refrigeración que en otras aplicaciones tienen un Factor de Eficiencia Energética (EER) y un Coeficiente de Rendimiento (COP) superior a bombas de calor aerotérmicas o con chillers, lo mismo sucede con los factores como el consumo de energía por tonelada de refrigeración o la eficiencia a carga parcial (NPLV). [18]

Actualmente, en el Centro Nacional del Hidrógeno (CNH2), no se ha evaluado la viabilidad ni caracterizado el uso del sistema con bomba de calor geotérmica como sistema principal de refrigeración del electrolizador y la pila de combustible. En consecuencia, no se dispone de una caracterización de las variables claves del sistema de refrigeración con bombas de calor geotérmicas, y se desconoce cómo estas variables impactan el rendimiento de los electrolizadores y las pilas de combustible de hidrógeno y si la integración de esta tecnología permitiría una mejora en el rendimiento global del sistema de electrolizador y pila de combustible utilizado en la microrred ubicada en el Centro Nacional del Hidrógeno.

Es de relevancia el conocimiento de la viabilidad técnica y la respectiva caracterización del sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica para la valoración de futuras implementaciones de bombas de calor geotérmicas como sistema de refrigeración en microrredes con sistemas de electrolizadores y pilas de combustible de hidrógeno.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Tabla 1.1: Tabla de desviación entre debiera y realidad

	<b>Descripción</b>	<b>Dato Suministrado</b>	<b>Referencias</b>
<b>Debiera</b>	La refrigeración de las pilas de combustible de hidrógeno y los electrolizadores deben de tener el mejor EER (Factor de Eficiencia Energética) posible, un mejor COP, EER y NPLV puede mejorar la eficiencia general del proceso de los electrolizadores y las pilas de hidrógeno.	Un 20 % a 40 % de la potencia inyectada al electrolizador se va a pérdidas térmicas que deben ser disipadas, haciendo el sistema de refrigeración parte importante de la eficiencia general del sistema.	[7]
<b>Desviación</b>	El esquema de refrigeración mediante bomba de calor geotérmica para electrolizadores y pilas de combustible de hidrógeno de la microrred del CNH2 no cuenta con la caracterización para la integración como sistema principal de disipación de calor, desconociendo si es viable su aplicación.		
<b>Realidad</b>	Actualmente, la refrigeración de los electrolizadores y las pilas de combustible de hidrógeno para la producción de hidrógeno se lleva a cabo mediante un sistema de chillers individuales del electrolizador y la pila. Sin embargo, no se dispone de una caracterización completa de la bomba de calor geotérmica como sistema principal de refrigeración que permita conocer su viabilidad en este rol.	El sistema de Refrigeración actual no integra como principal el sistema de bomba de calor geotérmica ni esta caracterizado para saber si es capaz de cumplir esta función. El EER y NPLV de las bombas de calor geotérmicas es superior al del sistema que esta integrado actualmente.	Centro Nacional del Hidrógeno (CNH2) y [18]

## 1.5. Objetivos

### Objetivo General

Desarrollar un estudio de viabilidad técnica para la integración de un sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica para un sistema de electrolizador y pila de combustible de hidrógeno mediante la caracterización de variables críticas, planos electromecánicos, validación por simulación, ensayos en sistema de pila de combustible-electrolizador y elaboración de un presupuesto.

### Objetivos específicos

- Determinar las variables claves para la caracterización del sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica en un sistema de electrolizador y pila de combustible de hidrógeno, en cumplimiento con las normas ISO 22734, UNE-EN 378 e IEC 62282, permitiendo así el establecimiento de criterios de viabilidad para la disipación de calor del sistema electrolizador-pila de combustible a través del sistema con bomba de calor geotérmica.

**INDICADOR DE LOGRO:** Elaboración de un informe completo que documente las variables clave para la caracterización y los criterios para establecer viabilidad del sistema de geotermia como medio de disipación de calor del sistema pila-electrolizador.

- Desarrollar la integración del sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica para su acoplamiento al sistema de electrolizador y pila de combustible de hidrógeno a través del diseño de planos electromecánicos para su futura replicación y adaptación en otros proyectos.

**INDICADOR DE LOGRO:** Elaboración de los planos electromecánicos del sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica, con identificación de las modificaciones técnicas requeridas.

- Validar las variables críticas de caracterización del sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica, mediante el desarrollo de un prototipo simulado y la realización de ensayos en un sistema de pila de combustible-electrolizador, con el fin de la comprobación de la viabilidad técnica de la disipación de calor con el sistema de refrigeración geotérmico.

**INDICADOR DE LOGRO:** Elaboración de un informe con los resultados de la validación de las variables críticas del sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica, obtenidos mediante simulación y de ensayos en el sistema de bomba de calor geotérmica, pila de combustible y electrolizador, incluyendo las curvas de polarización.

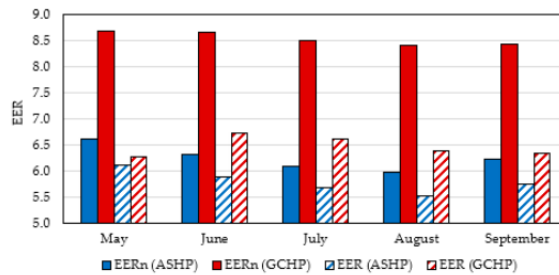
- Elaborar un presupuesto del sistema de bomba de calor geotérmica de refrigeración del sistema de electrolizador y pila de combustible de hidrógeno para su futura replicación en otros proyectos mediante un listado de componentes y tareas requeridas.

**INDICADOR DE LOGRO:** Elaboración de informe con el presupuesto del sistema de bomba de calor geotérmica de refrigeración del sistema de electrolizador y pila de combustible de hidrógeno.

## 1.6. Justificación

La transición hacia una matriz energética des carbonizada como forma de mitigación del cambio climático es un desafío que requiere de nuevas soluciones tecnológicas de alta eficiencia. [20]. En este contexto, el hidrógeno se presenta como un vector energético de gran impacto si es producido de forma limpia, como es el caso de su producción mediante electrolisis con electrolizadores y su reconversión en fuente de generación eléctrica mediante pilas de combustible. [2] Sin embargo, para tener alta eficiencia y competitividad en la tecnología, es necesaria la optimización de los subsistemas de apoyo también llamados balance de planta, como es el caso del sistema de refrigeración de los electrolizadores y pilas de combustible.

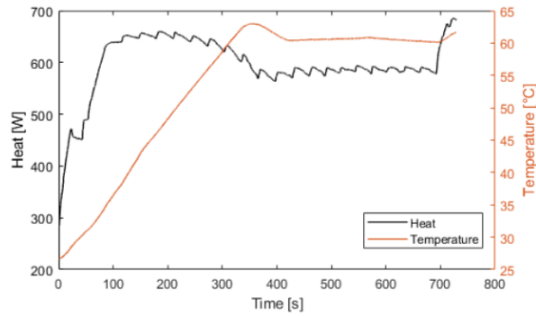
La integración de un sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica en una microrred con un sistema de electrolizador y pila de combustible de hidrógeno ofrece múltiples ventajas. Las bombas de calor geotérmicas utilizan como sumidero el subsuelo, lo que no solo contribuye a la reducción de la huella de carbono, sino también mejora la eficiencia operativa de los equipos al gestionar de manera más efectiva la temperatura de funcionamiento, aprovechando la temperatura constante en el subsuelo. [15] Las bombas de calor geotérmicas (GCHP) tienen un EER (Factor de Eficiencia Energética) que las bombas de calor aerotérmicas (ASHP) como se muestra en la **Figura 1.5**. Lo anterior convierte a las bombas de calor geotérmicas en una opción ideal para aplicaciones de gran escala como puede ser el caso de sistemas de generación de hidrógeno mediante electrolizadores y pilas de combustible de hidrógeno dentro de microrredes de índole residencial, comercial o industrial.



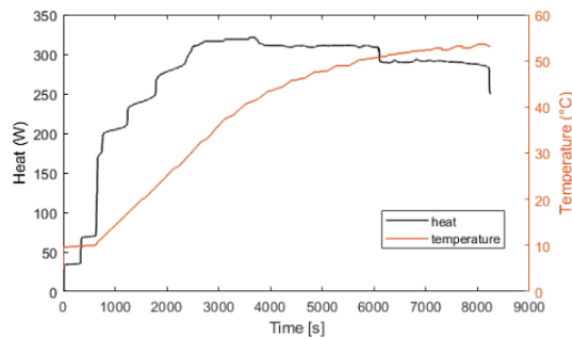
**Figura 1.5:** Comparación de EER de GCHP vrs ASHP [18]

El control térmico preciso es crítico en procesos de electrolisis y en el almacenamiento de hidrógeno, ya que influye directamente en el rendimiento y en la vida útil de los equipos. [13] Además, la regulación de temperatura es crítica para evitar sobrecalentamientos que tengan un impacto en la seguridad del sistema. [9] En las **Figuras 1.6 y 1.7** se presenta la disipación de calor a lo largo del tiempo para un electrolizador y una pila de combustible.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN



**Figura 1.6:** Curva de Generación de Calor Pila de Combustible [21]



**Figura 1.7:** Curva de generación de calor Electrolizador [21]

Esta investigación tiene como objetivo desarrollar un estudio exploratorio de la viabilidad técnica de integrar un sistema de refrigeración basado en bomba de calor geotérmica en un sistema de electrolizador y pila de combustible como medio de refrigeración principal, mediante la caracterización de variables claves, validación a través de simulaciones, y la elaboración de un presupuesto para su futura implementación, siguiendo las normas ISO 22734, UNE-EN 378, IEC 62282. Este estudio proporcionará la caracterización de un sistema con bomba de calor geotérmica para la refrigeración de un sistema de pila de combustible-electrolizador.

Este proyecto también busca establecer un caso de referencia para futuras implementaciones residenciales, comerciales o industriales de sistemas de hidrógeno dentro de microrredes en combinación con soluciones de refrigeración con bombas de calor geotérmicas. La integración de una bomba de calor geotérmica en un sistema de electrolizador y pila de combustible de hidrógeno podría marcar un hito en el desarrollo de tecnología de producción de hidrógeno verde, proporcionando una solución que no solo mejore el rendimiento de los equipos, sino que también reduzca significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero. Asimismo, se espera que los resultados obtenidos en este estudio contribuyan al avance del conocimiento en este campo y fomenten la incorporación de tecnologías energéticas más eficientes y sostenibles.

## 1.7. Alcance

Este proyecto tiene como objetivo evaluar la viabilidad técnica de integrar un sistema de refrigeración basado en una bomba de calor geotérmica en un conjunto compuesto por un electrolizador y una pila de combustible de hidrógeno como medio principal de disipación de calor.

El análisis abarca la caracterización del sistema de refrigeración en función de las necesidades térmicas y energéticas del electrolizador y la pila de combustible, identificando las variables críticas que afectan su funcionamiento y rendimiento. Se definirán criterios que permitan establecer la viabilidad técnica de integrar las bombas de calor geotérmicas como sistema de refrigeración principal. Además, se desarrollarán planos electromecánicos que sirvan como futura referencia para una futura replicación del sistema en tecnologías de generación de hidrógeno de índole comercial.

Asimismo, se validarán, a través de simulaciones y ensayos físicos, las variables clave que influyen en el desempeño del sistema de refrigeración geotérmico en relación con el electrolizador y la pila de combustible. Finalmente, se elaborará un presupuesto detallado, basado en una lista de equipos críticos y tareas requeridas para la integración del sistema, proporcionando una base para la posible replicación en proyectos industriales futuros.

Con lo anterior, el proyecto tendrá un alcance descriptivo y correlacional en su desarrollo.

## 1.8. Viabilidad

El CNH2 está equipado con electrolizadores y pilas de combustible, integrados a un sistema de refrigeración con chillers, sistemas de recuperación de calor con bombas de calor aerotérmicas, y un sistema de ventilador-radiador. Además, dispone de un sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica, parcialmente integrado al electrolizador y pila de combustible, pero no caracterizado como sistema principal. Esto permite determinar las variables críticas para caracterizar el sistema geotérmico y su validación a partir de datos simulados y de experimentación, así como una referencia de la instalación para la elaboración de planos electromecánicos.

El CNH2 también cuenta con equipos y software de simulación, además de sistemas demostrativos para validación, y software ampliamente utilizado disponible en la web de acceso general para simular sistemas con bomba de calor geotérmica.

Asimismo, el CNH2 tiene el talento humano, la experiencia y el acceso a datos que podrían ser útiles en el proceso de desarrollo del proyecto.

### 1.9. Limitaciones

La principal limitación encontrada fue el tiempo de desarrollo del TFG; esto limitó la cantidad de ensayos que se pudieron realizar. De igual manera, hizo que no fuera posible obtener una caracterización completa del sistema en todas las estaciones del año en Puertollano.

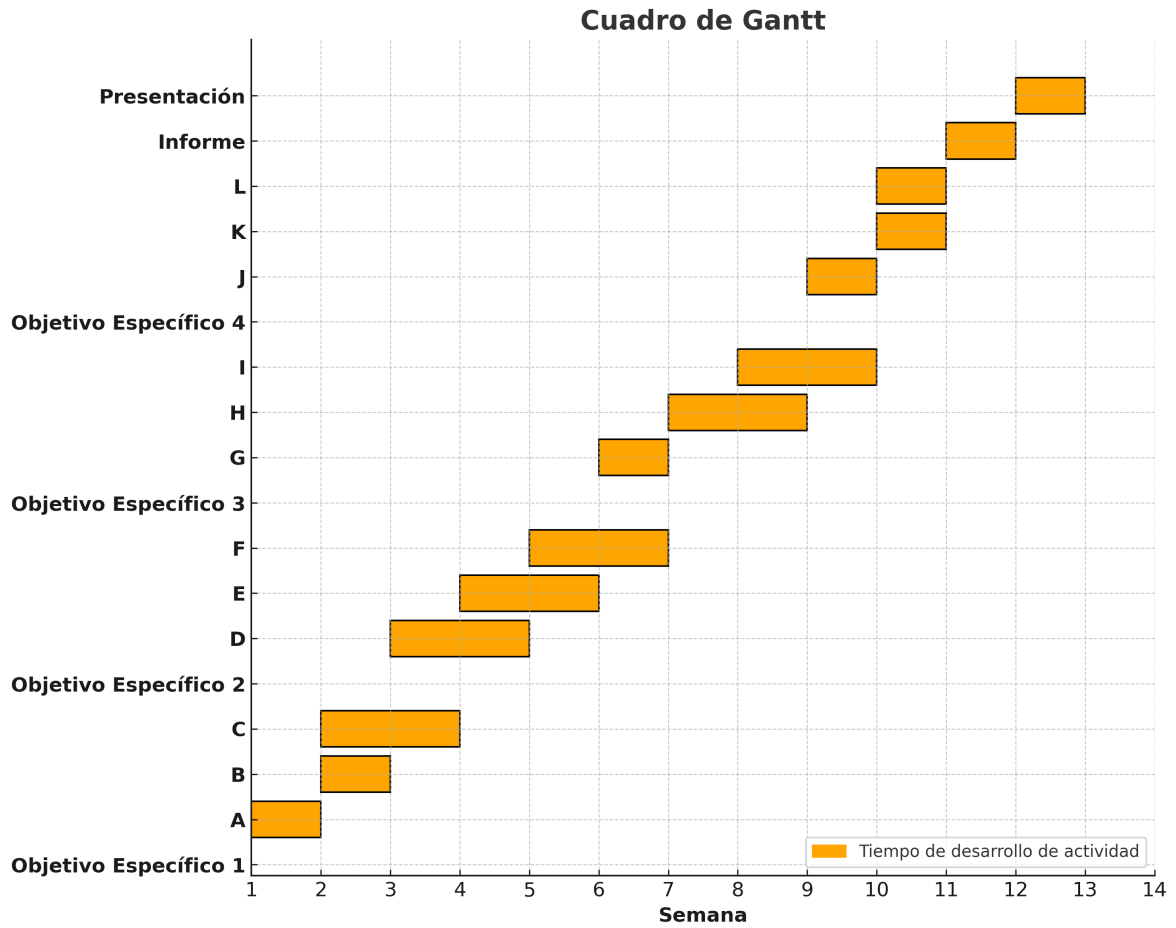
En el desarrollo de las simulaciones, el CNH2 no contaba con la librería de geotermia en el software de simulación de flujos de energía llamado TRNSYS. TRNSYS es una de las herramientas más utilizadas en sistemas de refrigeración geotérmicos a nivel comercial. Al no contar con esta herramienta, se tuvo que optar por utilizar librerías abiertas de Python para la modelación del pozo geotérmico y SIMULINK para la simulación de la dinámica del tanque de inercia con base en los datos experimentales. Esto puede tener un efecto en las simulaciones, al ser herramientas que no ofrecen una versatilidad y una precisión tan alta como la de TRNSYS.

En el desarrollo del TFG no pudo darse la instalación de sensores de temperatura y caudal en el circuito de refrigeración de la pila de combustible, y en el electrolizador los mismos eran inaccesibles por lo que la estimación de la carga térmica se hizo de manera indirecta a partir de la eficiencia.

Por cuestiones de tiempo de desarrollo del TFG no fue posible realizar el ensayo del electrolizador y la pila de combustible acoplados al sistema de refrigeración geotérmico, a pesar de ser viables y estar los sistemas preparados, era necesaria la realización de la limpieza de las tuberías al electrolizador y la instalación de una válvula termo-estática mezcladora dentro del circuito de refrigeración de la pila de combustible y, debido a la naturaleza de equipo crítico y el tiempo de procesamiento de compras o adquisiciones públicas, no existió espacio para hacerlo dentro del cronograma del TFG. No obstante, esto no impidió la caracterización del sistema geotérmico mediante otros tipos de ensayos físicos y el uso de la simulación para evaluar la respuesta del sistema integrado con base en los datos experimentales obtenidos de manera aislada.

## 1.10. Cronograma

En la **Figura 1.8** se presenta el Cuadro de Gantt con las etapas de la realización del proyecto, y en la Tabla 1.2, el listado de tareas realizadas.



**Figura 1.8:** Cuadro de Gantt

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Tabla 1.2: Listado de Tareas por Realizar en el Proyecto

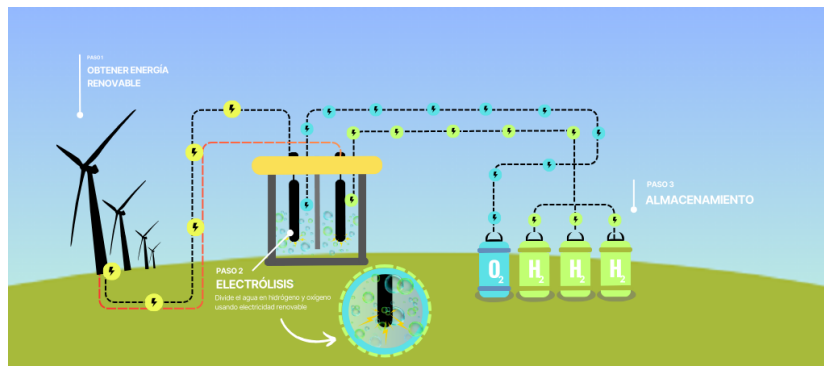
Actividad	Descripción de Actividad	Semana de Inicio	Duración(Días)	Semana de Finalización
<b>A</b>	Estudio e investigación de documentos, fichas técnicas, planos existentes, normativas.	1	6	1
<b>B</b>	Identificación y definición de variables clave para caracterización.	2	6	2
<b>C</b>	Definición de criterios para la determinación de la viabilidad técnica	2	10	3
<b>D</b>	Análisis detallado del sistema, diagramas de bloques y flujos.	4	5	4
<b>E</b>	Diseño detallado de planos electromecánicos del sistema	4	10	5
<b>F</b>	Revisión y ajuste de planos en consulta con expertos del CNH2.	6	7	6
<b>G</b>	Inicio de ensayos y preparación de simulaciones.	7	6	7
<b>H</b>	Desarrollo de simulaciones, pruebas iniciales en bomba de calor, pila de combustible y electrolizador.	7	10	8
<b>I</b>	Simulaciones finales, ajustes del modelo, pruebas en pila de combustible y electrolizador, estructuración de datos obtenidos.	9	10	10
<b>K</b>	Elaboración de presupuesto de sistema geotérmico.	10	5	10
<b>L</b>	Estructuración y análisis de datos obtenidos de ensayos	10	10	11
<b>M</b>	Revisiones finales y retroalimentación por parte del CNH2.	11	10	12
<b>Informe</b>	Redacción de informe final.	11	10	12
<b>Presentación</b>	Preparación de presentación final.	13	15	15

## Capítulo 2

# Marco Teórico

### 2.1. Hidrógeno Verde

La definición de *hidrógeno verde* varía según el marco normativo de cada país, lo que influye en su categorización y regulación. En este proyecto, se adopta la normativa vigente en España, lugar de realización del proyecto, alineada con la definición establecida por la Comisión Europea, órgano de la Unión Europea. Actualmente, la Comisión Europea define el hidrógeno verde más propiamente como hidrógeno renovable, *aquel obtenido a través de electrolisis del agua utilizando electricidad proveniente de fuentes renovables*. [3] En la **Figura 2.1** se muestra el proceso de generación de hidrógeno verde de manera conceptual y en concordancia con la definición establecida.



**Figura 2.1:** Proceso de Generación de Hidrógeno Verde [22]

#### 2.1.1. Costo Nivelado del Hidrógeno(LCOH)

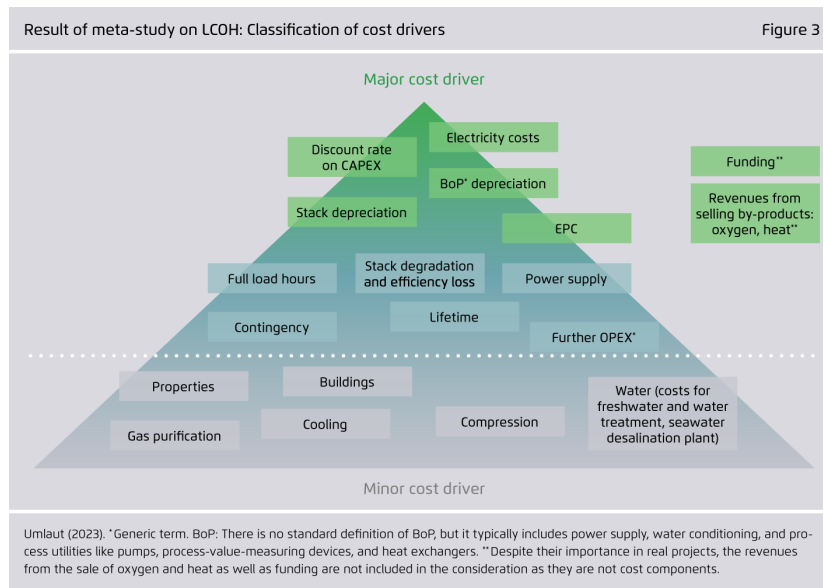
En cualquier proyecto que involucre hidrógeno verde, es necesario conocer el concepto de Costo Nivelado del Hidrógeno, conocido como LCOH por sus siglas en inglés. Este se define como *un método utilizado para evaluar el total de los costos implicados en la producción de hidrógeno durante su ciclo de vida, incluyendo los CAPEX y los OPEX*. [23]

De acuerdo con el Manual de cálculo de costo nivelado de hidrógeno del Observatorio Europeo de Hidrógeno [24], su cálculo se realiza de la siguiente forma:

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

$$\begin{aligned}
 \text{LCOH}_{\text{total}} = & \text{CAPEX} + \text{Costo de Electricidad} + \text{Otros OPEX} \\
 & + \text{Tasas de red eléctrica} + \text{Impuestos} \\
 & + \text{Subsidios} + \text{Precio de Venta de Oxígeno}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

En la **Figura 2.2** se muestra una pirámide de los elementos.



**Figura 2.2:** LCOH [8]

## 2.2. Microrredes

Las microrredes se definen como un sistema de energía autónomo que puede generar, distribuir y controlar electricidad localmente. [25]

A diferencia de las redes eléctricas centralizadas tradicionales, las microrredes son de menor escala y pueden funcionar de forma independiente o junto con la red principal. Consisten en una combinación de fuentes de energía, como paneles solares, turbinas eólicas y generadores de combustibles fósiles, junto con sistemas de almacenamiento de energía, aprovechamiento del calor y tecnologías de control. [25]

En la **Figura 2.3** se muestra un esquema típico de la arquitectura de microrredes. En la **Figura 2.4** se presenta la arquitectura de la microrred ubicada en el edificio demostrador del CNH2.

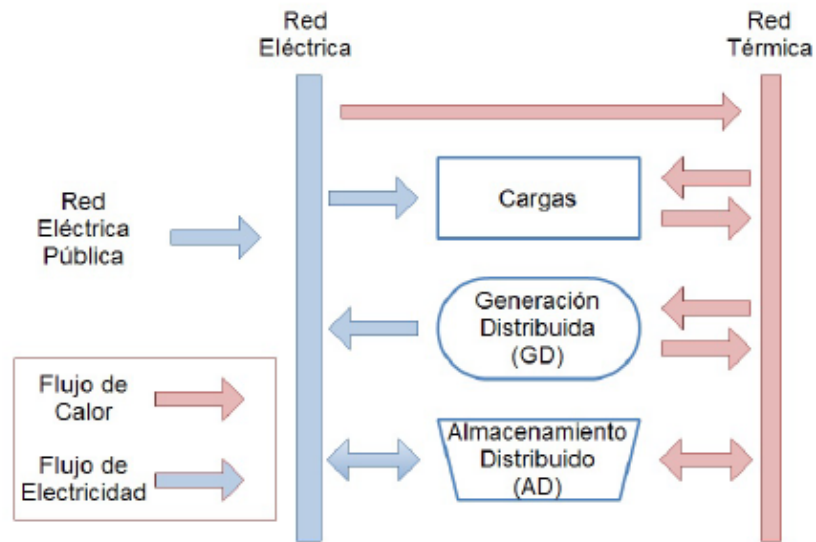


Figura 2.3: Esquema de Microrred [26]

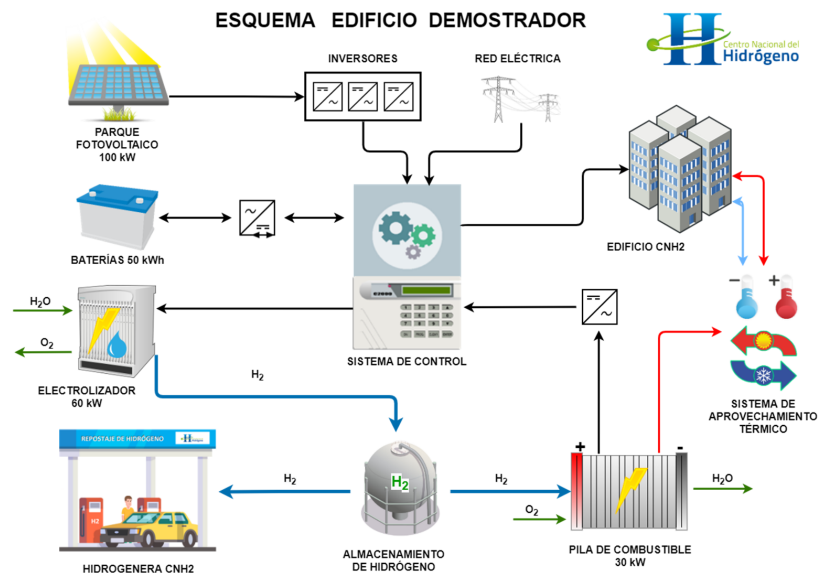


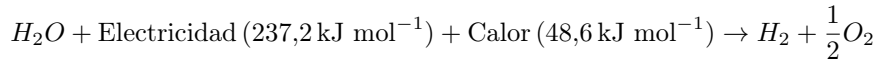
Figura 2.4: Microrred del CNH2

### 2.3. Electrolisis, Electrolizadores y Pilas de Combustible

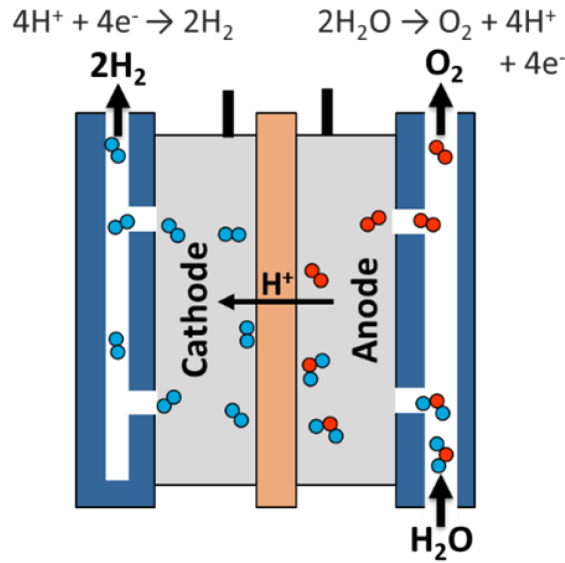
Dentro de la generación de hidrógeno verde, es clave el proceso de electrolisis, si bien no es el único método de generación de hidrógeno verde, es el que muestra mayor madurez tecnológica. Electrolisis se define como *una técnica de separación electroquímica del agua para generación de hidrógeno* [27]

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

Sigue la reacción:



En la **figura 2.5**, se muestra el proceso electro químico de la electrólisis.



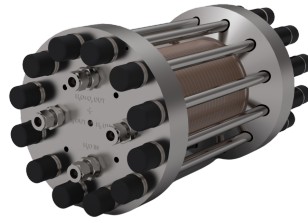
**Figura 2.5:** Electroquímica de Electrólisis [28]

El proceso de electrólisis en la práctica se realiza mediante electrolizadores (para la generación de hidrógeno) o en pilas de combustible (para la obtención de electricidad a partir de hidrógeno).

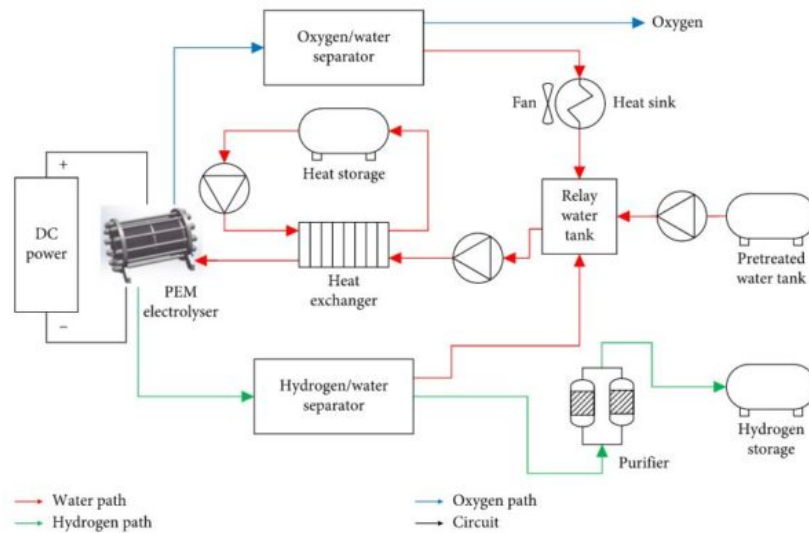
### 2.3.1. Electrolizadores

Un electrolizador es un dispositivo que utiliza una corriente eléctrica para separar moléculas de agua en oxígeno e hidrógeno gaseoso. [29] Los electrolizadores, en su forma más básica están compuestos de una celda electrolítica con dos electrodos, un ánodo, un cátodo y una membrana. Además tiene elementos adicionales necesarios para un funcionamiento seguro del sistema llamados balance de planta, tales como ensambles de celdas electrolíticas, bombas, tanques, válvulas, fuentes de potencia, entre otros. [29].

Existen algunas terminologías utilizadas a lo largo de la investigación que resulta imprescindible definir. Cuando se emplea la palabra *stack* hace referencia exclusivamente al componente principal del electrolizador en donde sucede la reacción electroquímica, mismo que se muestra en la **Figura 2.6**. Los elementos que rodean al stack se denominan balance de planta. En la **Figura 2.7** se muestra un diagrama de bloques con los sistemas que componen el balance de planta de un electrolizador.



**Figura 2.6:** Stack Electrolizador PEM [30]



**Figura 2.7:** Balance de planta electrolizador PEM [31]

Existen varios tipos de tecnología de electrolizadores, en la **Figura 2.8** se muestran los tres principales con sus respectivas reacciones y diferencias electroquímicas. Las diferencias electroquímicas tienen repercusiones en eficiencia, asimismo los electrodos de tecnología SOEC no tienen aún madurez comercial. En la **Tabla 2.1** se muestra un resumen del estado de la tecnología y sus especificaciones.

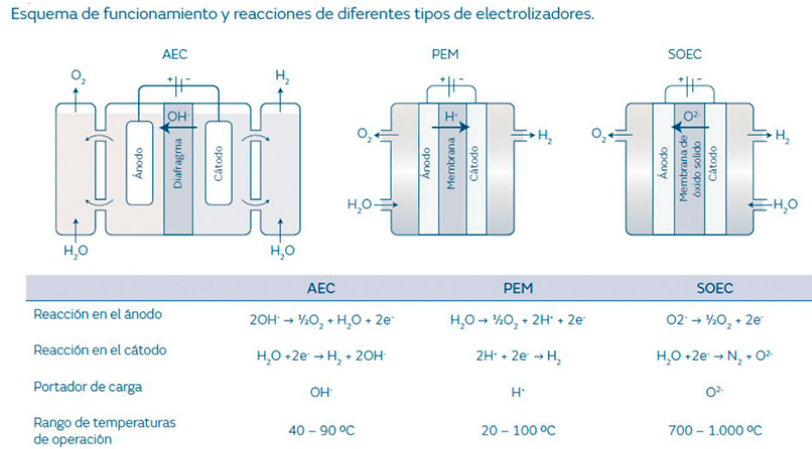


Figura 2.8: Tipos de Electrolizador y reacciones [32]

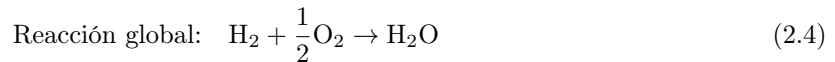
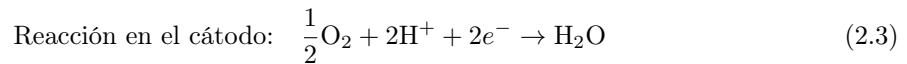
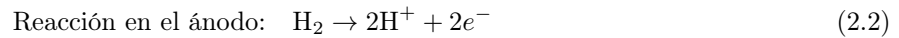
Tabla 2.1: Información técnica de cuatro tecnologías de electrolizadores [33]

Siglas	Nombre	Desarrollo	Eficiencia (%)	Tensión (V)	Densidad Corriente (A/cm <sup>2</sup> )	Vida útil (h)
AEL	Alcalina	Maduro	50-78	1.4-3.0	0.2-0.8	>60,000
AEM	Membrana de Intercambio Aniónico	I+D	57-59	1.4-2.0	0.2-2.0	20,000-60,000
PEM	Membrana de Intercambio Protónico	Comercializado	50-83	1.4-2.5	1.0-2.0	50,000-80,000
SOEC	Óxido Sólido	I+D	50-89	1.0-1.5	0.3-1.0	20,000

### 2.3.2. Pilas de Combustible

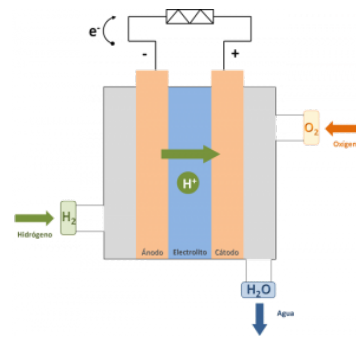
Las pilas de combustible, contrarias a los electrolizadores, utilizan hidrógeno y oxígeno para la generación de corriente eléctrica. Se define como un dispositivo electroquímico que transforma de forma directa la energía química en eléctrica. Parte de un combustible (generalmente hidrógeno) y de un comburente (en muchos casos oxígeno o aire atmosférico) para producir agua, electricidad en forma de corriente continua y calor. [34]

Las pilas de combustible tienen electrodos, un electrolito y placas bipolares. La reacción electroquímica se sitúa en el electrodo [34], siguiendo las siguientes reacciones:



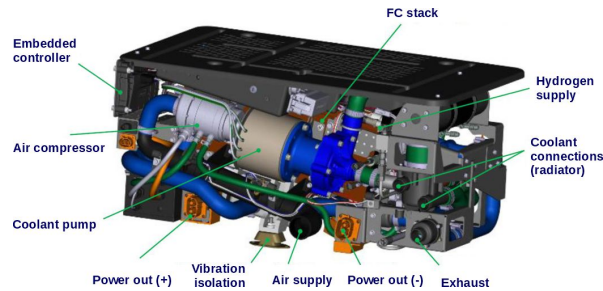
En la Figura 2.9, se presenta un esquema de la pila de combustible.

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO



**Figura 2.9:** Esquema de Pila de Combustible [34]

Las pilas de combustible tienen diversos sistemas más allá del stack (donde sucede la reacción electroquímica), en la **Figura 2.10**, se muestran subsistemas que componen una pila de combustible para aplicaciones de movilidad.



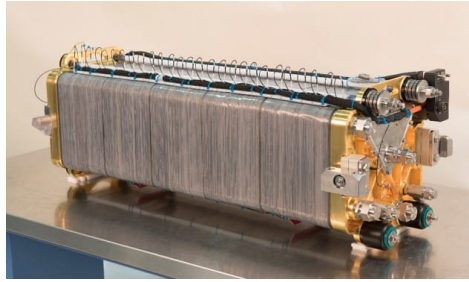
**Figura 2.10:** Subsistemas de una pila de combustible [35]

Existen diversos tipos de pilas de combustible, clasificadas según su electrolito, en particular para hidrógeno, se muestran en la **Tabla 2.11**.

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
<b>Electrolito</b>	Membrana de Polímero Sólido	Solución Alcalina	Ácido Fosfórico	Carbonatos Fundidos	Óxido Sólido	Membrana de Polímero Sólido
<b>Temperatura Operación (°C)</b>	60 - 80	100 - 120	200 - 250	600 - 700	800 - 1000	50 - 120
<b>Rango potencia</b>	5 - 250 kW	5 - 150 kW	50 kW - 11 MW	100 kW - 2 MW	100 - 250 kW	5 kW
<b>Ventajas</b>	Baja Temperatura Arranque rápido Baja corrosión y mantenimiento	Mayor eficiencia Reacción catódica más rápida	Acepta H <sub>2</sub> impuro	Reformado interno Cogeneración	Reformado interno Cogeneración	No necesita reformador de combustible
<b>Aplicaciones</b>	Transporte Portátiles Residencial	Espaciales	Generación eléctrica distribuida y calor	Generación eléctrica distribuida y calor	Generación eléctrica distribuida y calor	Portátiles

**Figura 2.11:** Tipos de Pila de Combustible [34]

En la **Figura 2.12**, se presenta la apariencia física de una pila de combustible comercial.



**Figura 2.12:** Stack de Pila de Combustible [36]

### 2.3.3. Caracterización de Electrolizadores y Pilas de Combustible

Existen varios métodos para la caracterización de electrolizadores y las pilas de combustible desde un punto de vista operativo también llamado *in situ*, los más utilizados son las curvas de polarización y la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). Siendo el primero, el método más sencillo y comúnmente utilizado, y además el de interés para esta investigación. [37].

#### Curvas I-V

Una curva I-V también llamada curva de polarización hace referencia a la curva Corriente-Voltaje que muestra el comportamiento de la pila bajo ciertas condiciones operativas. Este mismo ofrece datos relevantes de la pila, tales como tensión de circuito abierto (OCV), densidad de potencia pico y la intensidad de corriente limitante. [38]

Las curvas de polarización se modela de manera teórica a partir de las siguiente ecuación para el caso de las pilas de combustible y la explicación de cada uno de sus términos en la **Tabla 2.2** [39] : La ecuación de la tensión de la pila:

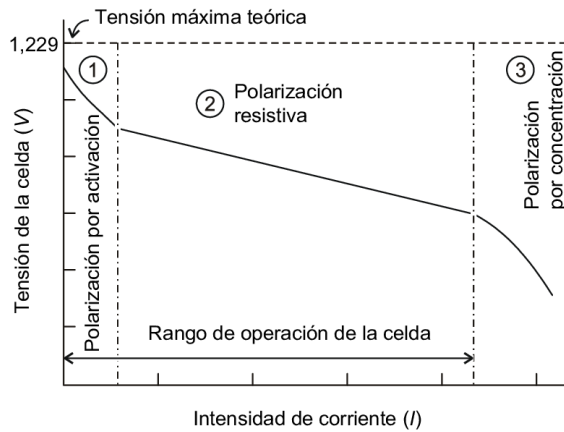
$$V_{fc} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (2.5)$$

Tabla 2.2: Descripción de términos de la ecuación de voltaje de pila de combustible

Término	Descripción
$V_{fc}$	Voltaje de salida neto de la pila de combustible
$E$	Voltaje reversible ideal sin pérdidas, calculado a partir de la energía libre de Gibbs; representa el máximo voltaje teórico sin pérdidas
$V_{act}$	Sobretensión de activación, asociada a la lentitud de las reacciones electroquímicas
$V_{ohm}$	Sobretensión óhmica, debida a la resistencia eléctrica de los materiales
$V_{conc}$	Sobretensión por concentración, generada por limitaciones en el transporte de masa

La curva I-V de las pilas de combustible tiene el comportamiento que se observa en la **Figura 2.13**.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO



**Figura 2.13:** Curva I-V de Pila de Combustible [39]

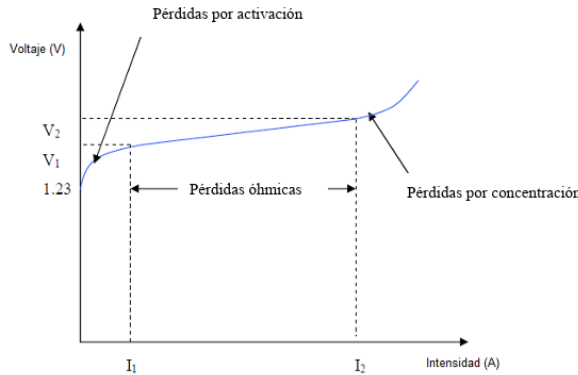
En el caso de electrolizadores la curva de polarización o curva I-V, la ecuación de tensión se modela como:

$$V_e = V_{rev} + V_{act} + V_{ohmic} + V_{conc} \quad (2.6)$$

Tabla 2.3: Descripción de términos de la ecuación de voltaje del electrolizador

Término	Descripción
$V_{rev}$	Tensión reversible, representa el voltaje mínimo teórico necesario para dividir el agua, basado en la energía libre de Gibbs
$V_{act}$	Sobretensión de activación, relacionada con la energía requerida para iniciar las reacciones electroquímicas en los electrodos
$V_{ohmic}$	Sobretensión óhmica, causada por la resistencia eléctrica del electrolito y otros componentes internos del sistema
$V_{conc}$	Sobretensión por concentración, producto de gradientes de concentración de reactivos cerca de los electrodos

La curva I-V de un electrolizador tiene el comportamiento como el que se muestra en la **Figura 2.14**.



**Figura 2.14:** Curva I-V de Electrolizador [40]

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

Experimentalmente, las curvas I-V se realizan mediante rampas de subida y bajada de potencia eléctrica (consumida o generada según sea el caso) con escalones de tiempo entre cambios de potencia para permitir la estabilización del sistema. Las curvas I-V se desarrollan cuando el sistema se encuentra ya en estado estable.

Las curvas I-V permiten observar la variación en el rendimiento de la pila a lo largo de su ciclo de vida, así como servir como base comparativa para el rendimiento de la pila bajo diferentes cargas y ambientes operacionales.

### Caracterización de eficiencia y cargas térmicas de pilas de combustible de hidrógeno y electrolizadores

Existen diversos métodos para la determinación de la eficiencia en pilas de combustible y electrolizadores, para esta investigación, es pertinente la eficiencia eléctrica del sistema, en donde se hace una relación entre el hidrógeno consumido/generado y la potencia eléctrica consumida/generada. Se muestra la relación en la ecuación a continuación. Para una pila de combustible de hidrógeno [41]:

$$\eta_{pila} = \frac{P_{el}}{P_{H_2}} \quad (2.7)$$

Donde:

$$P_{el} = V_{stack} * I_{stack} \quad (2.8)$$

$$P_{H_2} = \dot{m}_{H_2} * LHV \quad (2.9)$$

$$LHV = 241,83kJ/kmol \quad (2.10)$$

A la ecuación anterior se le denomina formalmente, potencia útil del hidrógeno. [41]

Para un electrolizador, la ecuación es la misma, pero a la inversa.

$$\eta_{electrolizador} = \frac{P_{H_2}}{P_{el}} \quad (2.11)$$

La potencia eléctrica depende de las características de la alimentación eléctrica del electrolizador, la misma puede ser C.C o C.A según sea el modelo.  $P_{el} = V * I$  o  $P_{el} = \sqrt{3} * V_L * I_L * \cos \phi$ .

Al tomar la potencia eléctrica de alimentación se debe considerar que incluye la potencia de los auxiliares del electrolizador. Por lo que si se desea encontrar la eficiencia meramente del stack es recomendable utilizar la ecuación 2.8.

La potencia de hidrógeno utiliza el mismo método de cálculo que el de la pila de combustible de hidrógeno mostrado en ecuaciones 2.9 y 2.10.

En lo que respecta a las cargas térmicas consideradas en esta investigación, estas se calculan a partir de la eficiencia instantánea del sistema; es decir, se asume que la diferencia entre la potencia eléctrica de entrada y la potencia útil de salida corresponde íntegramente a pérdidas térmicas que deben ser disipadas. Sin embargo, cabe señalar que, en un análisis más detallado, debe contemplarse que una fracción de dichas pérdidas térmicas se disipa directamente en el stack y no es transferida al circuito de refrigeración (tanto en electrolizadores como en pilas de combustible). Además, parte del calor también se pierde a través de los gases residuales o del vapor de agua en el flujo de salida. Para los fines de esta investigación, estos efectos se consideran despreciables en comparación con la carga térmica gestionada por el sistema de refrigeración.

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

### Normas UNE-EN IEC 62282 y ISO 22734

Las normas UNE-EN IEC 62282 hacen referencia a sistemas con pila de combustible en de aplicación de distinta índole, involucra aspectos de seguridad, instalación y ensayos. Para aplicaciones como la mencionada en este TFG, es de mayor relevancia la IEC 62282-3-200 y IEC 62282-3-201 aplicables para sistemas estacionarios [42].

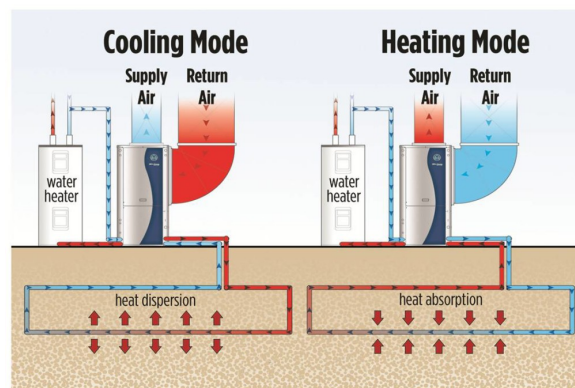
La norma ISO 22734 se refiere a sistemas de generación de hidrógeno mediante electrolisis de agua. Cubre aspectos de seguridad, rangos de operación, especificaciones técnicas de auxiliares. Su aplicabilidad es a múltiples escalas abarcando sistemas residenciales, comerciales e industriales [43].

### 2.4. Sistemas de refrigeración y calefacción geotérmicos

Los sistemas de refrigeración y calefacción geotérmicos funcionan a partir del concepto fundamental de utilizar el subsuelo como sumidero o fuente de calor según la necesidad. Estos sistemas están compuestos de una bomba de calor geotérmica, un intercambiador de calor enterrado, y un sistema de distribución del refrigerante [44].

Existen dos tipos principales de sistemas geotérmicos, clasificados según la profundidad del sumidero, cercano a la superficie (shallow geothermal) o de pozos de profundidad (deep geothermal) [44].

En la **Figura 2.15**, se presenta un esquema de los modos de operación de los sistemas de climatización geotérmicos.



**Figura 2.15:** Modos de Operación de Sistema Geotérmico [45]

#### 2.4.1. Bombas de calor geotérmicas

Las bombas de calor geotérmicas son el corazón de la refrigeración geotérmica. Se definen como un dispositivo de refrigeración y calefacción de alta eficiencia que utiliza las temperaturas constantes del subsuelo terrestre para regular la temperatura de un espacio u objeto [46]. Incluye diversos sistemas que utilizan el subsuelo como fuente de calor o sumidero. Se categorizan según su disposición de intercambiador de calor enterrado. Su función es impulsar un fluido refrigerante de tal forma que genere un intercambio de calor entre dos puntos a distinta temperatura, la unidad a refrigerar o calentar y el sumidero o fuente de calor que es el subsuelo [46]. En la **Figura 2.16**, se presentan las tipologías principales.

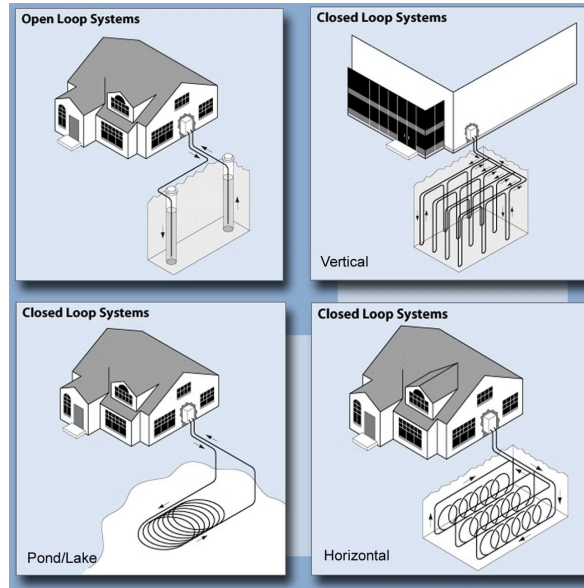


Figura 2.16: Tipos de bombas de calor geotérmicas [46]

Las bombas de calor siguen el ciclo termodinámico mostrado en **Figura 2.17**

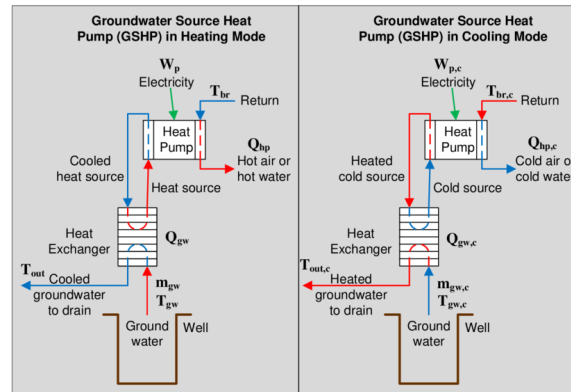


Figura 2.17: Ciclos de Bombas de Calor Geotérmicas [47]

### 2.4.2. Intercambiadores geotérmicos

Los intercambiadores geotérmicos (también llamados pozos geotérmicos) son elementos fundamentales de los sistemas de bomba de calor geotérmica. Tienen la función de generar intercambio térmico entre el subsuelo y el refrigerante (habitualmente agua con anticongelante). El refrigerante circula por una red de tuberías enterradas que pueden tener distintas topologías (como se muestran en la **Figura 2.16**), en el proceso de circulación del refrigerante se da una conducción del calor desde/hacia el subsuelo según corresponda [14].

Los intercambiadores geotérmicos son claves en la alta eficiencia de las bombas de calor geotérmicas, principalmente derivado a que a profundidades 10-15 m la temperatura del subsuelo se mantiene relativamente constante y a la temperatura media anual de su punto geográfico. El siguiente atributo reduce el consumo de la bomba de calor geotérmica al tener menos necesidades de compresión [53].

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

### Parámetros físicos de un intercambiador geotérmico

Los intercambiadores geotérmicos se modelan a través de distintos parámetros físicos que permiten su diseño o caracterización, en la **Tabla 2.4** se describen algunos de los parámetros principales [53].

Tabla 2.4: Variables físicas clave para el diseño y caracterización de intercambiadores geotérmicos [53]

Variable	Descripción	Unidad	Fuente de Obtención
$T_m$	Temperatura media anual del terreno a profundidad estable.	°C	Medición in situ, análisis histórico, literatura técnica
$k_s$	Conductividad térmica del terreno: capacidad del suelo para conducir calor.	W/m·K	Tablas, laboratorio, o ensayo TRT
$\rho_s c_s$	Capacidad térmica volumétrica: energía que puede almacenar un volumen de suelo.	J/m <sup>3</sup> ·K	Ensayo o tabla según tipo de suelo
$\alpha$	Difusividad térmica: relación entre $k_s$ y $\rho_s c_s$ .	m <sup>2</sup> /s	Cálculo: $\alpha = \frac{k_s}{\rho_s c_s}$
$R_b$	Resistencia térmica del pozo: oposición al paso de calor entre fluido y terreno.	m·K/W	Modelado analítico, ensayo TRT (respuesta térmica del suelo) o simulación
$L$	Longitud de cada perforación vertical.	m	Diseño del sistema / obra civil
$N_b$	Número de perforaciones en el campo geotérmico.	–	Diseño del sistema
$d_s$	Separación entre perforaciones: reduce interferencia térmica.	m	Diseño geométrico del campo
$r_{in}, r_{out}$	Radios interior y exterior de la tubería de intercambiador.	m	Catálogo técnico del tubo
$k_p$	Conductividad térmica del material de la tubería.	W/m·K	Ficha técnica del fabricante
$\dot{m}$	Caudal másico del refrigerante	kg/s	Diseño hidráulico del sistema
$c_p$	Capacidad calorífica específica del fluido.	J/kg·K	Ficha técnica del fluido utilizado

### 2.4.3. Caracterización de circuitos con bombas de calor geotérmicas

La caracterización de bombas de calor se da a través de diferentes parámetros clave de rendimiento, los cuales se definen en las siguientes secciones.

#### Potencias Térmicas

En la caracterización de sistemas de refrigeración en general y de bombas de calor geotérmicas en específico, deben definirse los conceptos de potencias térmicas.

Las potencias térmicas para fines de esta investigación se dividen en cargas térmicas y en potencia térmica disipada. Esencialmente se definen como el calor a disipar y el calor disipado por el sistema [48].

Para fines de esta investigación la carga térmica se estima según el apartado 2.3.3, que trata sobre

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

electrolizadores y pilas de combustible.

Para la potencia disipada por el sistema, en el caso de la bomba de calor, se toma como:

$$Q = \dot{m} * C_p * \Delta T \quad (2.12)$$

Donde el  $C_p$  es calor específico a presión constante y dependiente de cada refrigerante.

El  $\Delta T$  es la diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida del sistema.

Las potencias térmicas son centrales en el cálculo de los indicadores definidos a continuación.

### Coefficiente de Rendimiento (COP)

Se define como la razón entre la potencia de salida de refrigeración o calefacción y la potencia de entrada al sistema [48].

Para calefacción:

$$COP = \frac{\dot{Q}_h}{\dot{W}}$$

Para refrigeración:

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}}$$

### Razón de Eficiencia Energética (EER)

Se define como la razón de disipación generada entre la potencia de entrada para que el sistema mantenga una temperatura específica [48].

$$EER = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}}$$

### Factor de Rendimiento (PF)

Se define como la razón de la energía de calefacción, refrigeración o la combinación de ambos y la energía recibida para ello [48].

$$PF_{h,1} = \frac{\dot{Q}_{h,1}}{\dot{W},1}$$

para calefacción,

$$PF_{c,1} = \frac{\dot{Q}_{c,1}}{\dot{W},1}$$

para refrigeración, y

$$PF_{hc,1} = \frac{\dot{Q}_{h,1} + \dot{Q}_{c,1}}{\dot{W},1}$$

para calefacción y refrigeración combinadas en el nivel de frontera del sistema  $i$ .

Los valores de  $PF$  se basan en datos de desempeño medidos *in situ* de un sistema de bomba de calor durante un período de tiempo definido, por ejemplo, una hora, un día, un mes o un año, y para un límite de sistema definido, como la unidad de la bomba de calor en sí o el sistema completo de bomba de calor, incluyendo los circuitos del lado de la fuente y de la carga [48].

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

### Valor de Carga Parcial No Estándar (NPLV)

El Valor de Carga Parcial No Estándar, conocido como el NPLV, se define como una medida de la eficiencia de una bomba de calor, aire acondicionado o chiller basado en el estándar ARI 550/590 - 1998. [49] Su cálculo es una ponderación del  $COP_R$  o del  $EER$  a distintas cargas térmicas. En la **Tabla 2.5** se muestra la ponderación del NPLV [49].

Tabla 2.5: Fórmula y ponderación del NPLV (Non-Standard Part Load Value)

Carga (%)	Factor de ponderación
100 %	0.01
75 %	0.42
50 %	0.45
25 %	0.12

#### Fórmula general del NPLV:

$$\text{NPLV} = \left( \frac{0,01}{COP_{R100\%}} + \frac{0,42}{COP_{R75\%}} + \frac{0,45}{COP_{R50\%}} + \frac{0,12}{COP_{R25\%}} \right)^{-1}$$

El NPLV produce una caracterización de la eficiencia del sistema al incluir el rendimiento a distintas cargas térmicas y bajo condiciones específicas reales del contexto operativo.

### Tasa Específica de Extracción de Calor

Se define como el calor extraído por unidad de longitud del intercambiador de calor en el suelo:

$$\text{Tasa Específica de Extracción de Calor} = \frac{\dot{Q}_h}{L} \quad [W/m]$$

Depende de factores como la conductividad térmica del suelo, el tipo de intercambiador de calor, las horas anuales de operación de la bomba de calor, el número de perforaciones vecinas y el flujo de agua subterránea. [48]

### Funciones G

Las *funciones g* se pueden usar como método de modelación termodinámica de campos de pozos geotérmicos. Una *función g* se define como un factor adimensional de respuesta térmica que produce el cambio de temperatura de la superficie entre los pozos geotérmicos y la tierra, producido por la carga térmica aplicada de manera cuasi-constante a la tierra en la superficie [50]. En la **Figura 2.18**, se presenta una curva de función g para un determinado arreglo de pozos geotérmicos.

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

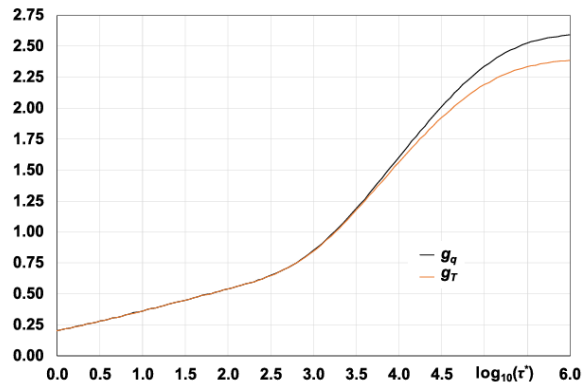


Figura 2.18: Gráfica de funciones G [50]

### 2.4.4. Normas UNE-EN 378, RITE - RD 1027/2007, ASHRAE RP - 1674, Guía del IDAE

La norma UNE-EN 378 hace referencia a los requerimientos de seguridad y sostenibilidad de sistemas de refrigeración y de bombas de calor. Es de aplicación a las fases de diseño, construcción, instalación, operación, mantenimiento y descarte de los equipos antes mencionados [51].

El decreto real RITE - RD 1027/2007 de aplicación a España, establece los requerimientos de eficiencia y seguridad que deben cumplir las instalaciones térmicas en edificios. Es de aplicación en las fases de diseño, ejecución, mantenimiento y uso de sistemas como calefacción, climatización y producción de agua caliente sanitaria [52].

ASHRAE RP - 1674 es una guía de acatamiento opcional pero de utilidad en sistemas con bombas de calor geotérmicas. La misma establece directrices de diseño, operación y mantenimiento de bombas de calor geotérmicas [14].

La guía técnica de diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) establece recomendaciones para el diseño, instalación y mantenimiento de sistemas con bomba de calor geotérmica en sus distintas tipologías [53].

## 2.5. Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)

El **Mantenimiento centrado en la confiabilidad** conocido también como *RCM* se define como una estrategia que busca garantizar que los sistemas físicos continúen cumpliendo sus funciones dentro de un contexto operativo específico. Su objetivo es identificar las políticas de mantenimiento más eficaces para preservar la confiabilidad, seguridad y disponibilidad de los activos, con un enfoque en las consecuencias de las fallas y sus modos de falla [54].

Según Moubray, el RCM se centra en la preservación de las funciones de un sistema, no simplemente en el mantenimiento de los componentes y se basa en responder siete preguntas fundamentales, entre ellas: ¿cuáles son las funciones del sistema?, ¿de qué manera puede fallar?, ¿cuáles son las consecuencias de cada falla? y ¿qué se puede hacer para prevenir o mitigar estas consecuencias? [54]. En la **Figura 2.19** se muestra una descripción gráfica del mantenimiento centrado en confiabilidad.

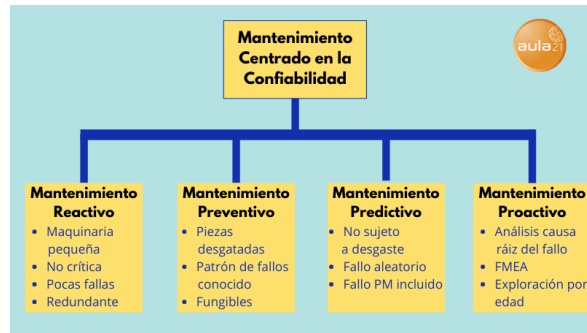


Figura 2.19: Descripción del mantenimiento centrado en confiabilidad [55]

### 2.5.1. Normas UNE-EN 60706 y IEC 60300

La norma UNE-EN 60706 establece las directrices para incorporar la *mantenibilidad* como criterio técnico en el diseño, desarrollo y operación de equipos y sistemas, con el objetivo de minimizar el tiempo y recursos requeridos para su mantenimiento. Define la mantenibilidad tanto como la capacidad de restaurar un sistema a su estado operativo bajo condiciones establecidas, como la probabilidad de que dicha acción pueda realizarse en un tiempo determinado. Esta norma, compuesta por seis partes, abarca desde requisitos en fase de diseño, verificación de datos, facilidad de diagnóstico, hasta métodos estadísticos de evaluación [56].

La norma UNE-EN IEC 60300 establece un marco integral para la gestión de la confiabilidad de productos, sistemas, procesos o servicios. Su objetivo principal es garantizar que estos elementos funcionen de manera fiable y segura a lo largo de su ciclo de vida, considerando aspectos técnicos, económicos y organizacionales. Proporciona directrices para planificar e implementar actividades de confiabilidad, incluyendo la identificación de requisitos, análisis de riesgos, selección de herramientas adecuadas y evaluación del desempeño [57].

## Capítulo 3

# Metodología

Tabla 3.1: Metodología empleada en el desarrollo del proyecto.

Objetivo Específico Planteado	Actividad Por Realizar	Fuente de Información	Análisis de datos con criterios estadísticos	Indicador de Logro
<b>Objetivo Específico #1</b>	Determinación de las variables clave de caracterización y criterios de viabilidad técnica del sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica en función al electrolizador y pila de combustible.	Identificación a partir de papers, normas, planos, casos de ejemplo, guías, fichas técnicas y asesoría de expertos del CNH2.	Determinación de las variables clave que caracterizan el sistema y de sus rangos esperados.	Informe que documente las variables clave para la caracterización y la definición de criterios de viabilidad.
<b>Objetivo Específico #2</b>	Desarrollo de la integración del sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica acoplada al electrolizador y pila de combustible.	Normas, guías de diseño, software AutoCAD, documentación proveída por el CNH2.	Diseño electromecánico para la integración del sistema.	Planos electromecánicos (diagrama de flujo, planta y especificaciones técnicas) del sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica.
<b>Objetivo Específico #3</b>	Validación de las variables críticas del sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica en función al electrolizador y pila de combustible.	Artículos, Python, Matlab. Ensayos en: Pila de combustible de 30 kW del CNH2, electrolizador 60 kW, circuito de refrigeración de edificio demostrador.	Datos de variables críticas de rendimiento y seguridad para el sistema diseñado.	Informe completo con los resultados de las variables críticas del sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica y los datos de los criterios de viabilidad técnica establecidos.
<b>Objetivo Específico #4</b>	Elaboración del presupuesto del sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica para el electrolizador y pila de combustible.	Cotizaciones, catálogos, Información del CNH2.	Costos de adquisición de partes, mano de obra y costos totales.	Informe con el presupuesto del sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica para el electrolizador y pila de combustible.

## Capítulo 4

# Resultados

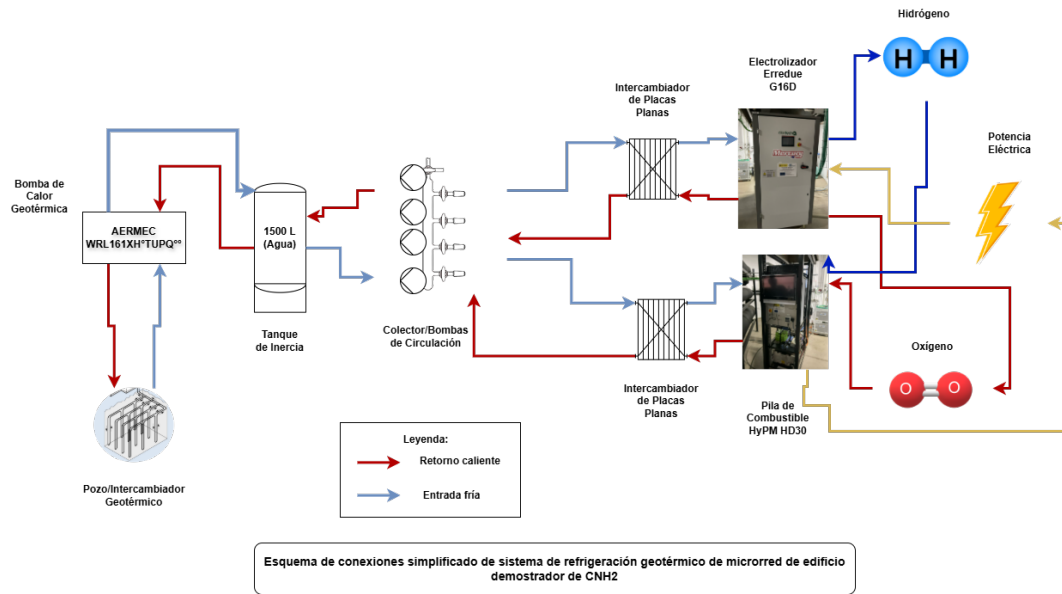
El estudio de viabilidad técnica de la integración del sistema con bomba de calor geotérmica como sistema de refrigeración principal de un electrolizador y una pila de combustible se centró en primer lugar en determinar si el sistema de refrigeración tiene la capacidad de regular adecuadamente la temperatura requerida por el electrolizador y la pila de combustible; posteriormente, su eficiencia contrastada al sistema actualmente activo como principal; finalmente, se analizó también el rendimiento de la pila de combustible y el electrolizador. Dentro del estudio de viabilidad técnica también se contempla el análisis de la mantenibilidad a través de un *RCM* de los equipos críticos del sistema de refrigeración geotérmico, así como una identificación de las intervenciones técnicas requeridas para completar la integración del sistema geotérmico ubicado en la microrred del edificio demostrador del CNH2.

Para ello, como indican los objetivos específicos, se determinaron una serie de variables de caracterización relacionadas con la capacidad y la eficiencia, variables que posteriormente fueron validadas a través de simulación y ensayos realizados en el sistema físico del edificio demostrador presente en el CNH2, así como los planos electromecánicos del sistema con bombas de calor geotérmicas con el fin de generar documentación para su futura replicación en proyectos y también como base para los análisis de *RCM* de los equipos críticos y las intervenciones técnicas requeridas para completar la integración.

En la sección 7, correspondiente a los anexos, se incluye un recorrido fotográfico de toda la instalación geotérmica y sus respectivos equipos ubicados en el CNH2. Apartado que puede ser pertinente para el entendimiento de los resultados de este informe del proyecto.

Primeramente, sin embargo, en la **Figura 4.1** se muestra, un esquema de los bloques principales que componen todo el sistema de refrigeración geotérmico y del electrolizador y la pila de combustible de hidrógeno, elementos que son la carga térmica aplicada al sistema de refrigeración geotérmico. En la sección 4.2 se presenta un plano con el diagrama de flujo en detalle que incorpora elementos de seguridad y equipos secundarios.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS



**Figura 4.1:** Esquema simplificado de sistema de refrigeración geotérmico del edificio demostrador en el CNH2.

### 4.1. Objetivo I

Determinar las variables claves para la caracterización del sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica en un sistema de electrolizador y pila de combustible de hidrógeno, en cumplimiento con las normas ISO 22734, UNE-EN378, e IEC 62282, permitiendo así el establecimiento de criterios de viabilidad para la disipación de calor del sistema electrolizador-pila de combustible a través del sistema con bomba de calor geotérmica.

Dentro del estudio de viabilidad técnica se estableció como uno de sus objetivos específicos determinar las variables claves para caracterizar el sistema de refrigeración con la integración del sistema de bomba de calor geotérmica para la pila de combustible y electrolizador del edificio demostrador del Centro Nacional de Hidrógeno(CNH2), con el fin de poder establecer criterios de viabilidad.

Primeramente se realizó una revisión de normativa, guías técnicas y otra bibliografía relevante para poder tener una base en el establecimiento de las variables de caracterización y los criterios de viabilidad.

#### 4.1.1. Revisión bibliográfica y normativa aplicable.

El estudio de viabilidad técnica implica dos sistemas de naturaleza distinta: el sistema de disipación de calor mediante bomba de calor geotérmica y, por otro lado, el sistema de generación y conversión de hidrógeno de la microrred del edificio demostrador del CNH2, compuesto de un electrolizador y una pila de combustible.

Por ello, en la revisión de normativa se tomaron dichos sistemas por separado, con conocimiento de que la interfaz de operación entre ellos yace en el intercambio de calor de la pila y el electrolizador hacia el sistema de refrigeración geotérmico.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

### Normativa y bibliografía relevante a la caracterización de Sistemas con Bomba de Calor Geotérmica

Para la caracterización de sistemas con bombas de calor geotérmicas existen varias normativas y guías técnicas aplicables a España, país de realización del proyecto.

En la **Tabla 4.1** se hace un listado acerca de las normas y guías técnicas con su respectiva descripción sobre su aplicabilidad.

Tabla 4.1: Normativas y Guías Aplicables a la Caracterización de Sistemas con Bombas de Calor Geotérmicas

Norma/Guía Técnica	Descripción
<i>Guía Técnica Diseño de Sistemas de Intercambio Geotérmico de Circuito Cerrado</i>	Guía de Diseño para Sistemas Geotérmicos del IDAE
<i>UNE-EN 14511</i>	Acondicionadores de aire, enfriadoras de líquido y bombas de calor para la calefacción y la refrigeración de locales y enfriadoras de procesos con compresores accionados eléctricamente.
<i>UNE-EN 15316</i>	Método para el cálculo de las demandas energéticas y de las eficiencias de los sistemas.
<i>UNE-EN 17522:2023</i>	Diseño y construcción de intercambiadores de calor geotérmicos verticales rellenos y cementados.
<i>UNE-EN 378</i>	Ensayos en sistemas de refrigeración y bombas de calor.
<i>Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) - RD 1027/2007</i>	Decreto Real sobre Instalaciones Térmicas
<i>UNE-EN 60706</i>	Mantenibilidad de equipos
<i>IEC 60300</i>	Gestión de la confiabilidad

Asimismo, existe bibliografía que si bien no es de carácter estrictamente normativo, resulta útil en el ejercicio de la ingeniería de los sistemas de disipación de calor con geotermia. En particular se resaltan algunas de ellas en la **Tabla 4.2**.

Tabla 4.2: Bibliografía relevante a la caracterización de bombas de calor geotérmicas.

Documento	Descripción
<b>IEA HPT Annex 52 - Long-term performance monitoring of GSHP systems for commercial, institutional, and multifamily buildings</b>	Guía para el análisis y reporte de KPIs de sistemas con bomba de calor geotérmica desarrollada por la IEA (Agencia Internacional de la Energía).
<b>ASHRAE RP-1674 Design of Ground Source Heat Pump Systems</b>	Guía completa de ASHRAE para el diseño de instalaciones geotérmicas en edificios comerciales e institucionales.
<b>Reliability Centered Maintenance</b>	Libro de Moubray para gestión del mantenimiento basado en confiabilidad.

### Normativa y bibliografía relevante a caracterización de electrolizadores y pila de combustible

Para el caso de los electrolizadores y la pila de combustible existen también normativas y bibliografía relevante para la caracterización de estos sistemas, mostradas en la **Tabla 4.3**.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Tabla 4.3: Normativas y guías aplicables a la caracterización de Pilas de Combustible y Electrolizadores.

<b>Norma/Guía Técnica</b>	<b>Descripción</b>
<i>UNE-EN IEC 62282</i>	Tecnologías de pilas de combustible. Sistemas estacionarios de generación de energía por pila de combustible.
<i>ISO 22734</i>	Generadores de Hidrógeno utilizando electrolisis del agua para aplicaciones industriales, comerciales y residenciales.

### 4.1.2. Variables claves para la caracterización

Las variables claves para la caracterización se dividieron en dos clasificaciones, cada una perteneciente a los sistemas por integrar. Por un lado, el sistema de refrigeración geotérmico y, por otro, el electrolizador alcalino de 60 kW y la pila de combustible de 30 kW.

#### Sistema de refrigeración geotérmico

Para el sistema de refrigeración geotérmico se establecieron primeramente todas las variables de relevancia para la caracterización del sistema, con el fin de establecer la viabilidad técnica de su integración como sistema de refrigeración principal.

En la **Tabla 4.4** se presenta el resumen de las variables claves determinadas para el sistema de refrigeración geotérmico.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Tabla 4.4: Variables clave del sistema de refrigeración geotérmico

Variable	Descripción	Fuente de Obtención
Temperatura del subsuelo	Promedio a profundidad de operación	Simulación
Conductividad térmica del suelo ( $\lambda$ )	Capacidad del suelo para disipar calor	Información geotécnica, simulaciones
Resistencia térmica del intercambiador ( $R_b$ )	Influye en la eficiencia de transferencia térmica	Cálculo teórico, simulaciones
COP	Coefficiente de rendimiento	Ensayos físicos
EER	Índice de eficiencia energética	Ensayos físicos
Parámetros termodinámicos del refrigerante	Propiedades físicas y caudal	Datos del fabricante, ensayos físicos
Parámetros de presión del sistema	Presión en distintos puntos	Ensayos físicos
Caudal del fluido refrigerante	Influye en la transferencia térmica	Ensayos físicos
Temperaturas de operación de la bomba de calor	Entrada y salida del refrigerante	Ensayos físicos
Temperaturas de operación del electrolizador y pila	Temperaturas clave del sistema	Ensayos físicos
Potencia eléctrica	Consumo energético del sistema	Ensayos físicos
Capacidad de refrigeración	Potencia térmica máxima del sistema	Ensayos físicos, cálculos de transferencia de calor

La selección de estas variables de caracterización se da bajo las recomendaciones de las normas y bibliografía mencionada en las **Tablas 4.1 y 4.2**. Asimismo, Bakirci [58], en un estudio de carácter similar, incorpora como variables: medición de presiones en evaporador y condensador, humedad, radiación y temperatura ambiente, potencia eléctrica suministrada a la bomba de calor, temperatura de refrigerante de entrada y salida de radiadores y de bomba de calor, flujo másico de refrigerante, temperatura de subsuelo. Variables que coinciden con las normas, y hacen que su estudio sirva como base para la caracterización del sistema con bomba de calor geotérmica.

Algunas de las variables son de medición directa en ensayos físicos, y otras son el resultado de cálculos u obtenidas mediante simulación.

### Electrolizador y Pila de Combustible

Para el electrolizador y la pila de combustible se establecieron variables que permiten caracterizar el rendimiento de la pila y el electrolizador como las cargas térmicas aplicadas al sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica.

En la **Tabla 4.5** se presenta el resumen de las variables clave para la caracterización de la pila y el electrolizador. Su selección tiene como objetivo principal poder obtener las curvas I-V (también llamadas curvas de polarización) esto debido a que, para términos de los objetivos del proyecto, solo

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

es necesario caracterizar el rendimiento de la pila y electrolizador como cargas térmicas en distintos rangos y modos de operación.

Tabla 4.5: Variables claves para la caracterización mediante curva I-V

<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>	<b>Fuente de obtención</b>
<b>Tensión de Stack (<math>V</math>)</b>	Voltaje medido en la pila o electrolizador según la corriente aplicada.	Ensayos físicos
<b>Corriente eléctrica de Stack (<math>I</math>)</b>	Intensidad de corriente aplicada o generada en la celda.	Ensayos físicos
<b>Temperatura de operación (<math>T</math>)</b>	Temperatura de la pila/electrolizador, influida por la refrigeración.	Ensayos físicos
<b>Flujo Másico de Hidrógeno</b>	Flujo másico de hidrógeno que afecta la cinética de reacción.	Ensayos físicos
<b>Potencia de Hidrógeno Generado/Consumido</b>	Potencia asociada al hidrógeno obtenido o consumido, calculada a partir del flujo másico y la entalpía de la reacción.	Ensayos físicos
<b>Potencia Eléctrica Consumida/Generada</b>	Potencia eléctrica producida o consumida por el stack de la pila o el electrolizador.	Ensayos físicos
<b>Eficiencia</b>	Relación entre la potencia eléctrica y la potencia de hidrógeno, o viceversa, según corresponda.	Ensayos físicos
<b>Potencia Térmica</b>	Potencia térmica a disipar, generada como calor residual en el electrolizador o pila de combustible.	Ensayos físicos

Con las variables anteriores se obtuvo la base para realizar una caracterización, que permita establecer la viabilidad técnica de integración del sistema de refrigeración geotérmico como medio de disipación de calor principal del electrolizador y la pila de combustible. La selección de las variables se dio a partir de las normas mencionadas en la **Tabla 4.3**, que dan pautas para los ensayos en pilas de combustible y electrolizadores, así como las variables necesarias para establecer una caracterización.

En la sección 4.3, se presentan los resultados obtenidos para dichas variables de caracterización, obtenidos mediante ensayos en el edificio demostrador o mediante simulación por software.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

### 4.1.3. Criterios para determinar la viabilidad técnica del sistema geotérmico

La definición de criterios de viabilidad técnica del sistema geotérmico como medio de disipación de calor de la pila de combustible y el electrolizador se centra en:

- **Eficiencia energética**, seleccionado a partir del Decreto Ley 1027/2007, la UNE 378 y las recomendaciones de ASHRAE.
- **Capacidad de refrigeración adecuada del Sistema Geotérmico**, a partir de los requerimientos de seguridad de pilas de combustible y electrolizadores de las normas UNE-EN 62282 e ISO 22734.
- **Rendimiento de la Pila y Electrolizador bajo el sistema de disipación de calor geotérmico**, seleccionado para asegurar que el rendimiento de la pila y electrolizador no se vea afectado con la integración del sistema geotérmico y cumpla con lo dispuesto en UNE-EN IEC 62282 e ISO 22734 [43].
- **Escalabilidad y replicabilidad**, seleccionado a partir de recomendaciones de expertos al ser un sistema con un fin demostrativo y de experimentación para futuras replications.
- **Nivel de Modificación Requerido para la Integración del Sistema Geotérmico**, seleccionado a partir de sugerencias de expertos del CNH2.
- **Mantenibilidad del sistema geotérmico**, definido a partir de recomendaciones de ASHRAE RP-1674, UNE EN 60706, y IEC 60300.

Los seis criterios definidos se contrastan con las características de los chillers individuales actualmente instalados (en pila y electrolizador), los cuales funcionan como sistema principal de disipación térmica. Esta comparación se realiza en el marco del análisis de viabilidad técnica del sistema propuesto como medio principal de refrigeración. Dichos criterios han sido establecidos a partir del estudio de la normativa vigente, los requerimientos térmicos de los electrolizadores y la pila de combustible, así como de las recomendaciones proporcionadas por expertos del CNH2.

A continuación, se detalla cada criterio con su justificación de elección.

#### **Eficiencia energética**

La elección del criterio de eficiencia energética se sustenta en la normativa vigente del Decreto Ley 1027/2007 [52] y la UNE-EN 378 [51], las cuales establecen requerimientos de mejora en eficiencia energética en sistemas térmicos en particular. Asimismo, se sabe que para que el hidrógeno sea una herramienta viable en el esquema de transición energética debe mejorar su *LCOH*, del cual los sistemas térmicos representan alrededor del 5% del consumo energético de sistemas con electrolizadores, que es el principal OPEX de estos sistemas [59], por lo que es de alta relevancia en el establecimiento de la viabilidad técnica.

Se sabe que las bombas de calor geotérmicas tienen un COP y EER superior al de alternativas como los chiller; sin embargo, para términos del sistema geotérmico como medio de disipación de calor del sistema electrolizador-pila resulta esencial su validación experimental como comprobación de que realmente existe una mejora en eficiencia con respecto a los sistemas actualmente operativos como refrigeración principal. En la **Tabla 4.6**, se presentan los indicadores seleccionados para la evaluación de la viabilidad bajo el criterio de eficiencia energética.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Tabla 4.6: Indicadores de eficiencia energética considerados para la evaluación técnica del sistema de refrigeración

Indicador de eficiencia energética	Fuente de obtención
$COP_R$ del sistema	Ensayos físicos
$NPLV$	Ensayos físicos

### Capacidad de refrigeración adecuada del sistema geotérmico

El criterio de capacidad de refrigeración va ligado a las necesidades de disipación de la pila y del electrolizador. Las normas UNE-EN 62282 [42] e ISO 22734 [43] determinan al sistema de refrigeración como parte de los requisitos de seguridad en la operación de la pila y del electrolizador.

Para su determinación se establecieron cuatro escenarios operacionales basados en los posibles ciclos de trabajo de la pila de combustible y electrolizador dentro del contexto operacional del CNH2 en su edificio demostrador. En la **Tabla 4.7** se presentan los escenarios operacionales planteados tras consulta con expertos del CNH2. La evaluación del criterio radica principalmente en que la temperatura del tanque de inercia (donde están integrados los circuitos de refrigeración de la pila y electrolizador a la bomba de calor geotérmica) no sobrepase los límites definidos como seguros para la operación del sistema. En la **Tabla 4.8** se presentan estos límites y su justificación de elección.

Escenario	Descripción	Fuente de obtención
Operación máxima	Electrolizador y Pila en ciclo de 8 horas a carga térmica plena.	Simulaciones, Pruebas experimentales.
Operación óptima	Electrolizador y Pila operando en sus puntos de máxima eficiencia por 8 horas.	Simulaciones, Pruebas experimentales.
Operación de experimentación	Electrolizador y Pila operando en simultaneidad en realización de curvas I-V.	Simulaciones, Pruebas experimentales.
Operación solitaria	Electrolizador y Pila operando sin simultaneidad.	Simulaciones, Pruebas experimentales.

Tabla 4.7: Escenarios de operación del sistema electrolizador–pila de combustible.

Límite de temperatura	Valor [°C]	Justificación técnica
Temperatura máxima admisible	35	Temperatura límite establecida por el fabricante del electrolizador. Superar este valor en el agua de entrada puede comprometer la seguridad del equipo y su eficiencia operativa.
Temperatura mínima admisible	20	Umbral definido por especialistas del CNH2. Temperaturas inferiores pueden causar una disminución del rendimiento de la pila de combustible o provocar el apagado automático del sistema por protección térmica.

Tabla 4.8: Rangos seguros de temperatura del tanque de inercia para el correcto funcionamiento del sistema de refrigeración.

El análisis del criterio de capacidad examina la tasa de disipación media obtenida de ensayos

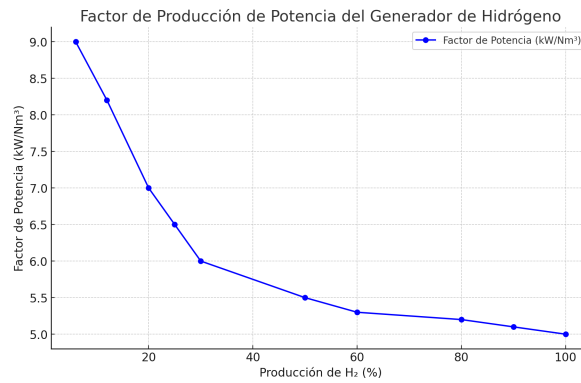
## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

experimentales de la caracterización de la bomba de calor y la contrasta con las cargas térmicas caracterizadas experimentalmente del electrolizador y la pila de combustible. Asimismo, en torno a cada escenario se evalúan mediante simulación los efectos en las temperaturas del tanque de inercia.

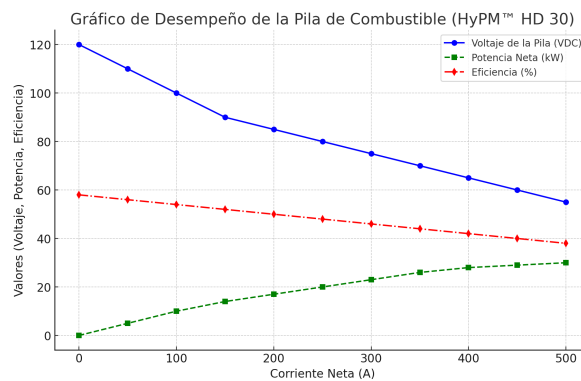
### Rendimiento de la pila de combustible y el electrolizador

El criterio de rendimiento de la pila y el electrolizador busca establecer que el rendimiento y funcionamiento del electrolizador y de la pila no se vea afectado al operar con el sistema geotérmico como medio de disipación de calor principal. Para ello la pila y el electrolizador deben tener un rendimiento similar antes y después de integrar el sistema geotérmico como medio de refrigeración principal. Este criterio está respaldado por las normas UNE-EN 62282 e ISO 22734 .

El rendimiento del electrolizador y la pila es medido a través de las Curvas I-V o información extraída a partir de sensores durante la realización de estas. Las curvas I-V y la eficiencia de la pila y el electrolizador, obtenidas antes de la integración de la geotermia como medio de refrigeración principal se muestran en la sección 4.3. En las **Figuras 4.2 y 4.3** se presentan las curvas proveídas originalmente por los fabricantes del electrolizador y la pila de combustible.



**Figura 4.2:** Curva de Generación  $H_2$  del Electrolizador - Fabricante



**Figura 4.3:** Curva de Rendimiento de Pila de Combustible HyPM HD 30 - Fabricante

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

### Nivel de modificación requerido para la integración del sistema geotérmico

Aunque el sistema actual cuenta con una infraestructura previamente acoplada a nivel de diagrama funcional y montaje físico en el edificio demostrador del CNH2, es indispensable evaluar si la integración de la geotermia como medio principal de refrigeración para la pila de combustible y el electrolizador requiere acciones o intervenciones adicionales. Esto se debe a que, hasta la fecha, la geotermia no ha sido utilizada como solución térmica activa en este contexto. Por lo tanto, se considera necesario establecer un criterio específico de viabilidad técnica que permita valorar estas posibles adaptaciones e incorporarlo dentro del análisis global de viabilidad técnica del sistema de geotermia como medio principal de refrigeración de la pila y el electrolizador.

Para ello se define el criterio de Índice de Intervención Técnica (IIT). En la **Tabla 4.9** se muestra el sistema de puntuaciones para evaluar el criterio.

Tabla 4.9: IIT para evaluar modificaciones requeridas en el sistema actual

Nivel	Descripción	Puntaje (0 a 1)
Bajo	El sistema actual es compatible sin necesidad de modificaciones adicionales.	1.0-0.7
Medio	Se requieren ajustes menores, como limpieza de tuberías o calibración de sensores.	0.7-0.5
Alto	Se requieren modificaciones físicas significativas, como instalación de válvulas o sistemas de control.	0.5-0.3
Inviabile	El sistema requiere rediseño completo o presenta incompatibilidades críticas con la geotermia.	0.3-0.0

En la sección de 4.2 se muestran los resultados de este indicador para la integración con la pila y la integración con el electrolizador.

### Mantenibilidad del sistema geotérmico

Dentro del análisis de viabilidad técnica es de relevancia considerar la mantenibilidad del sistema geotérmico integrado a la pila y el electrolizador; para ello, se estableció un listado de equipos críticos del sistema y se optó por un análisis de RCM de ellos para determinar el criterio de mantenibilidad del sistema de disipación de calor geotérmico. Los resultados se presentan en la sección 4.2.

### Escalabilidad y replicabilidad

Uno de los objetivos subyacentes de la instalación geotérmica como sistema principal para la disipación de calor de un sistema de electrolizador y pila de combustible, es servir de instalación de demostración para su futuro escalado y replicación en otras instalaciones que busquen una producción de índole comercial y no solamente de referencia técnica o de investigación. Por ello, resulta importante el establecimiento de estos dos aspectos como parte de los criterios de evaluación de viabilidad. En la **Tabla 4.10** se presentan los indicadores seleccionados para la evaluación del criterio de escalabilidad y replicabilidad, en la sección 4.5 se presentan los resultados obtenidos para estos indicadores; algunos son de carácter cualitativo y otros de carácter cuantitativo.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Tabla 4.10: Indicadores técnicos considerados para la evaluación de escalabilidad y replicabilidad del sistema geotérmico

Indicador	Descripción	Unidad de Medida	Fuente de Datos
Capacidad de refrigeración ajustable	Posibilidad de ampliar la capacidad de disipación térmica mediante la adición de más pozos o intercambiadores.	kW adicionales por módulo	Simulación
Eficiencia energética en distintas escalas	Cómo varía el COP y el EER a medida que aumenta la carga térmica.	% de cambio en COP/EER	Pruebas experimentales
Flexibilidad de carga térmica	Rango de operación eficiente del sistema geotérmico ante variaciones de la carga térmica.	% de variación de carga soportada	Pruebas experimentales
Compatibilidad con diferentes tipos de suelos y condiciones ambientales	Evaluación de la efectividad del sistema en distintos tipos de suelo, condiciones geológicas y ambientales.	Conductividad térmica del suelo (W/mK) / % de variación de temperatura del subsuelo en diferentes estaciones	Simulación

### 4.2. Objetivo II

**Desarrollar la integración del sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica para su acoplamiento al sistema de electrolizador y pila de combustible de hidrógeno a través del diseño de planos electromecánicos para su futura replicación y adaptación en otros proyectos.**

Entre los objetivos del proyecto, se encuentra el desarrollo de la integración del sistema de refrigeración geotérmico con el sistema de generación y procesamiento de hidrógeno compuesto de un electrolizador y una pila de combustible. El sistema está actualmente instalado, por lo que se desarrollan los planos como futura referencia para su replicación en distintos proyectos que cuenten con pilas de combustible y electrolizadores, así como para poder establecer el indicador de necesidad de intervención técnica (IIT) para la integración y los indicadores que componen el indicador de mantenibilidad. Aunque las intervenciones requeridas son menores, no dejan de ser de relevancia.

En general, se presentan seis láminas de planos electromecánicos (en **Figuras 4.6,4.7,4.8,4.9,4.10**), una como portada, el diagrama de flujo, la distribución de planta de la instalación, la ubicación de planta y las especificaciones técnicas de cada uno de los componentes del sistema de refrigeración. Además se presentan los resultados obtenidos para el IIT y los RCM de los equipos críticos para determinar la mantenibilidad.

En las **figuras 4.4 y 4.5** se presenta el diagrama de flujo proveído por el CNH2 para la realización del proyecto; en las siguientes secciones se presentan capturas de cada lámina incluida junto con una

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

breve descripción. En el Capítulo 8 se encuentran los planos a página completa.

Cabe destacar que el edificio demostrador está equipado con dos sistemas de refrigeración alternativos y un sistema de recuperación de calor, los cuales pueden operar de manera independiente. Por un lado, el sistema de refrigeración geotérmico, que aún no ha sido caracterizado como el principal y único medio de refrigeración de la pila y el electrolizador. Por otro lado, las unidades chiller individuales para cada equipo y el sistema de recuperación de calor, que aprovecha parte del calor generado por la pila y el electrolizador para transferirlo a un tanque de almacenamiento, el cual está conectado al sistema de climatización del edificio del CNH2.

Como se mencionó en secciones anteriores, este proyecto se centra en evaluar la viabilidad del sistema geotérmico como método principal de disipación térmica, por lo que no se profundiza en el análisis de los otros sistemas como el de recuperación de calor para climatización, a pesar de que se muestran en los planos electromecánicos.

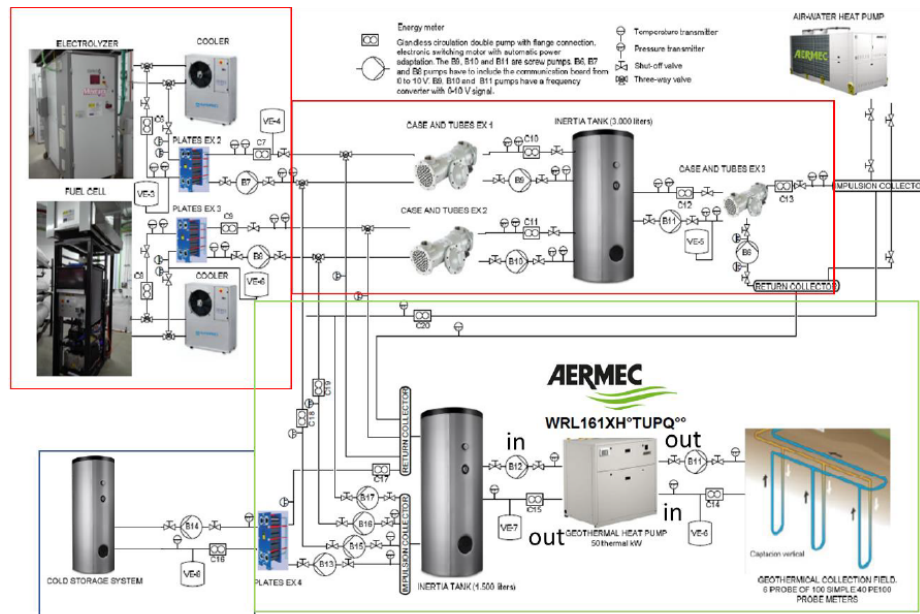


Figura 4.4: Diagrama de Flujo con Equipos (proveído por el CNH2)





## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

### 4.2.3. Lámina de distribución de planta

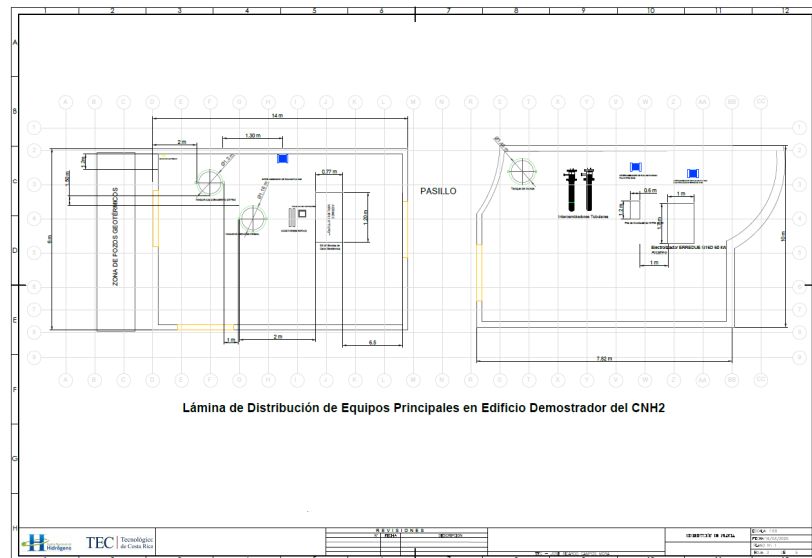


Figura 4.8: Distribución de Planta

### 4.2.4. Lámina de ubicación de edificio demostrador

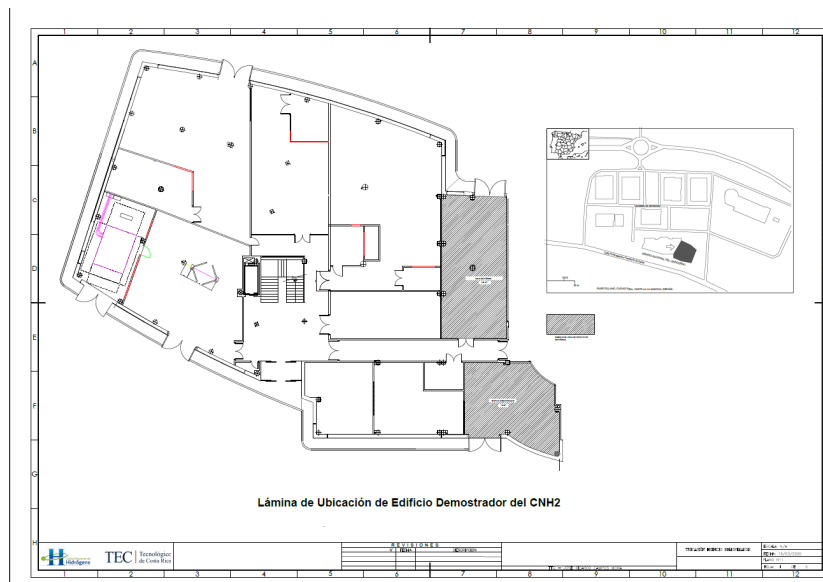


Figura 4.9: Lámina de Ubicación de Edificio Demostrador

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

### 4.2.5. Lámina de especificaciones técnicas de equipos principales

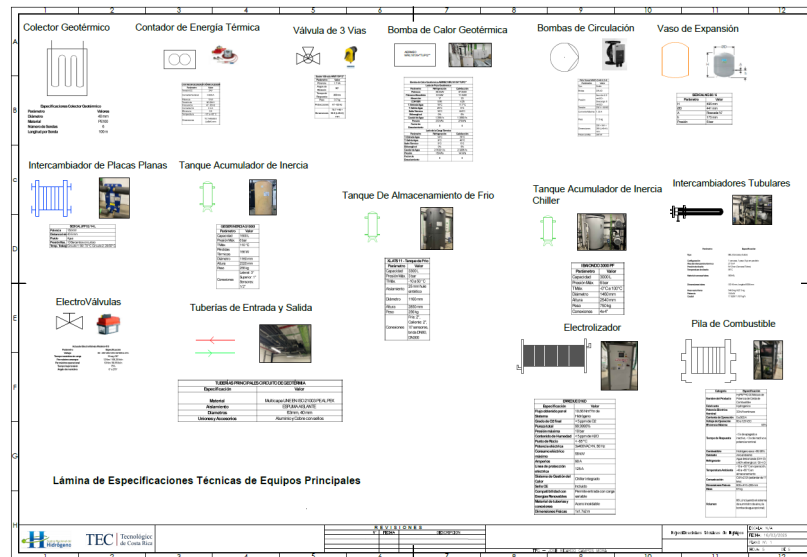


Figura 4.10: Lámina de especificaciones técnicas de equipos principales

### 4.2.6. Determinación de índices de intervención técnica (IIT) de la integración del sistema geotérmico con la pila y electrolizador

En la **Tabla 4.11** se presentan los resultados del análisis de las necesidades de intervención técnica para poder completar la integración del sistema de disipación de calor mediante bomba de calor geotérmica.

Tabla 4.11: Evaluación del IIT por componente del sistema

Componente	Descripción específica de la intervención requerida	IIT (0 a 1)
Integración con Electrolizador	Requiere de desmontaje y limpieza de las tuberías desde el intercambiador con geotermia al electrolizador para garantizar la integridad del electrolizador	0.7
Integración con Pila de Combustible	Requiere la instalación de una válvula termo estática mezcladora de acuerdo con normativa de la pila de combustible.	0.4
Pozo Geotérmico y Bomba de Calor Geotérmica	No requiere de intervenciones, el sistema está operativo.	1.0
Tanque de Inercia y Tanque de Almacenamiento	No requiere de intervenciones, el sistema está operativo	1.0

En la realización del TFG se encontró que para poder completar la integración de la pila de combustible era necesaria la introducción de un mecanismo de válvula que pudiera regular el caudal entrante de refrigerante, la pila de combustible necesita primero alcanzar una temperatura óptima de operación (para este caso 50°C) y posteriormente la refrigeración debe iniciar su operación para

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

disipar calor y mantener esta temperatura. Para ello se determinó que debería incluirse una válvula termo-estática mezcladora compatible con operación de sistemas con hidrógeno. A continuación, en la **Figura 4.11** se muestra la válvula termo-estática mezcladora seleccionada para su inclusión en el circuito de refrigeración de la pila de combustible y su especificación en la **Tabla 4.12**:



**Figura 4.11:** Válvula termo-estática mezcladora regulable [60]

Tabla 4.12: Especificaciones de válvula termo-estática mezcladora

Parámetro	Valor
Diámetro nominal (NPT)	1"
Material del cuerpo	Acero Inoxidable 316 (SS)
Clase ANSI del cuerpo	150 Class
Peso	2.27 kg
Factor Cv	10.00
Presión máx. de operación	250 PSIG (17.2 bar)
Temperatura máx. de operación	250°F (121°C)
Configuración de puertos	3 vías (A-B-C)
Aplicaciones comunes	Mezcla y desvío térmico

La válvula seleccionada debía de cumplir con la compatibilidad de material para sistemas que interoperen con pilas de combustible, el requerimiento principal es que no afectara la conductividad del agua de refrigeración. Los materiales que tienen compatibilidad son: Aceros inoxidables austeníticos, aleaciones de aluminio, aceros ferríticos de baja aleación, aceros ferríticos al carbono-manganeso (C-Mn), aleaciones de cobre. [61]

Para el caso del electrolizador se identificó la necesidad de limpieza interna de las tuberías (debido a que había pasado tiempo desde la instalación), debido a la criticidad y susceptibilidad del electrolizador, y para ello se requería la apertura de las mismas. El electrolizador necesita refrigerarse con agua des-ionizada; de lo contrario, pueden existir problemas de conductividad con afectación a la reacción electroquímica.

El sistema geotérmico (pozo, tanques y bomba de calor) no requería ninguna modificación mayor para su integración. Sin embargo, a pesar de no ser un requerimiento para completar la integración del sistema, el sistema de refrigeración geotérmico carece de medición y tratamiento de dureza del agua del circuito de refrigeración interconectado a la bomba de calor geotérmica, el tanque de inercia y los intercambiadores de la pila de combustible y electrolizador. La inclusión del sistema podría reducir costes derivados de necesidad de sustitución de intercambiadores y en escenarios críticos, evitar la contaminación del electrolizador y la pila de combustible dado que el agua de refrigeración de circulación interna debe ser des-ionizada. En el apartado 4.2.7 se hace alusión a este hallazgo encontrado

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

a partir del RCM.

### 4.2.7. Evaluación de la mantenibilidad del sistema geotérmico

Para la determinación de la mantenibilidad se realizó un análisis de *RCM* del sistema de refrigeración geotérmico a un nivel de subsistema con el fin de obtener un insumo para la valoración del criterio de mantenibilidad establecido en la sección 4.1.

Para su realización se tomó como insumo las normas IEC 60300 y UNE-EN 60706, así como el aporte bibliográfico de Moubray (1997) sobre Reliability-Centered Maintenance. El enfoque del RCM también se centra en sus efectos y consecuencias en la seguridad e integridad de la interoperación del sistema de refrigeración geotérmico con la pila de combustible y electrolizador. El enfoque a la seguridad se remite a los requerimientos implicados en la operación de sistemas con hidrógeno.

En la identificación de las fallas se tomó como referencia los criterios de expertos del CNH2, así como los manuales y fichas técnicas de los equipos. En cuanto a los criterios de mantenibilidad se aproxima mediante un método más cualitativo, ya que no existen datos de mantenimientos previos que permitan calcular indicadores pertinentes.

#### Equipos y funciones

La función general identificada para todo el sistema de refrigeración corresponde a: *Mantener las temperaturas de entrada del agua de refrigeración de la pila y electrolizador entre 20°C y 35°C con alimentación a pila y electrolizador a un caudal de 10m<sup>3</sup>/h ± 2.*

En la **Tabla 4.13** se presenta un resumen de los equipos que conforman el sistema de refrigeración, así como sus funciones respectivas.

Equipo	Función
Bomba de Calor Geotérmica	Transferir eficientemente la potencia térmica al pozo geotérmico y proporcionar disipación adicional mediante compresores para la carga térmica demandada.
Bombas de Circulación	Garantizar un caudal constante de agua de refrigeración de 10m <sup>3</sup> /h ± 2 desde el tanque de inercia a los intercambiadores de pila y electrolizador.
Intercambiador Geotérmico	Disipar el calor extraído hacia el subsuelo mediante los pozos geotérmicos, circulación de agua a 6,7m <sup>3</sup> /h ± 0,1
Intercambiadores de Placas Planas	Intercambiar el calor del agua des-ionizada sin mezclar los fluidos del circuito y manteniendo temperaturas entre 20°C ± 5°C – > 35°C ± 1°C
Tanque de Inercia	Almacenar y estabilizar el agua del sistema de refrigeración a una presión de salida de 2 bares.
Vasos de Expansión	Purgar el sistema en caso de sobrepresión (según especificación de cada línea, entre 2-10 bar) para proteger los equipos.
Electro válvulas de 3 Vías	Cambiar selectivamente el flujo entre el circuito geotérmico y el circuito interno de refrigeración.
Contadores de Energía	Medir parámetros térmicos relevantes como caudal, temperatura y presión.
Tuberías, Uniones y Conexiones	Transportar el refrigerante a través del circuito sin pérdidas ni entrada de calor.
Gabinete de Potencia y Control	Controlar el sistema mediante sensores, actuadores y alimentación eléctrica.

Tabla 4.13: Listado de equipos del sistema de refrigeración geotérmico y sus funciones.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

### Análisis RCM

En la **Tabla 4.14** se muestra el análisis de RCM realizado para los subsistemas anteriormente listados.

Equipo	Falla Funcional	Modo de Falla	Efecto / Consecuencia	S	O	C
Bomba de Calor Geotérmica	No suministra agua a temperatura adecuada	Falla en compresor o bomba circuladora	Interrupción del servicio, activación de alarmas y protocolos de seguridad	2	4	8
	No transfiere potencia térmica	Fuga en línea de refrigeración o válvula defectuosa	Pérdida de eficiencia térmica, aumento del consumo energético	1	4	4
	No se activa automáticamente	Pérdida de comunicación con sistema de control	Imposibilidad de arranque automático del sistema	2	4	8
Bombas de Circulación	No circula el caudal requerido	Fallo en motor o acoplamientos	Interrupción de flujo, riesgos de sobrecalentamiento	2	2	4
	No mantiene presión mínima	Desgaste de componentes hidráulicos	Reducción de caudal y pérdida de presión	1	2	2
Intercambiador Geotérmico	Caudal insuficiente de retorno	Acumulación de sedimentos o incrustaciones	Detención del ciclo térmico	3	1	3
	No disipa calor al terreno	Pérdida de capacidad de intercambio térmico	Disminución sostenida del COP del sistema	1	1	1
Intercambiador Placas Planas	No transfiere calor eficientemente	Fouling en superficies internas	Elevación no deseada de temperatura en subsistemas de hidrógeno	2	4	8
	Mezcla de fluidos	Ruptura interna por corrosión o fatiga	Riesgo crítico por mezcla de fluidos, peligro de explosión o corto circuito entre placas por corrientes parásitas	3	4	12
Tanque de Inercia	No mantiene presión estable	Fugas internas o malfunción en válvula de alivio	Inestabilidad en la entrega térmica y presión	2	4	8
	No estabiliza temperatura	Aislamiento térmico deteriorado	Pérdida de capacidad de almacenamiento térmico	1	2	2
Vasos de Expansión	No purga presión excesiva	Ruptura de membrana interna	Posible fallo de seguridad por presión no contenida	3	2	6
	No regula el volumen	Presurización inadecuada	Disparo prematuro de sistemas de alivio	3	2	6
Electroválvula 3 Vías	No conmuta correctamente	Malfunción por señal defectuosa o bloqueo mecánico	Distribución errónea de caudal	1	3	3
Contadores de Energía	No mide parámetros o da lecturas erróneas	Error de lectura o comunicación	Imposibilidad de monitoreo y gestión energética efectiva	2	2	4
Tuberías y Conexiones	Fugas en uniones	Fisuras o fallos de sellado	Caída de presión, pérdida de fluido y eficiencia del sistema	3	3	9
	Aumento de pérdidas térmicas	Aislamiento físico ineficaz	Incremento de pérdidas térmicas	1	1	1
Gabinete de Potencia-Control	No comunica señales ni datos	Pérdida de señal por fallo eléctrico o lógico	Fallo en gestión de automatización	2	3	6
	No alimenta correctamente los equipos	Disparo de protección eléctrica	Corte de energía y parada parcial o total	2	2	4

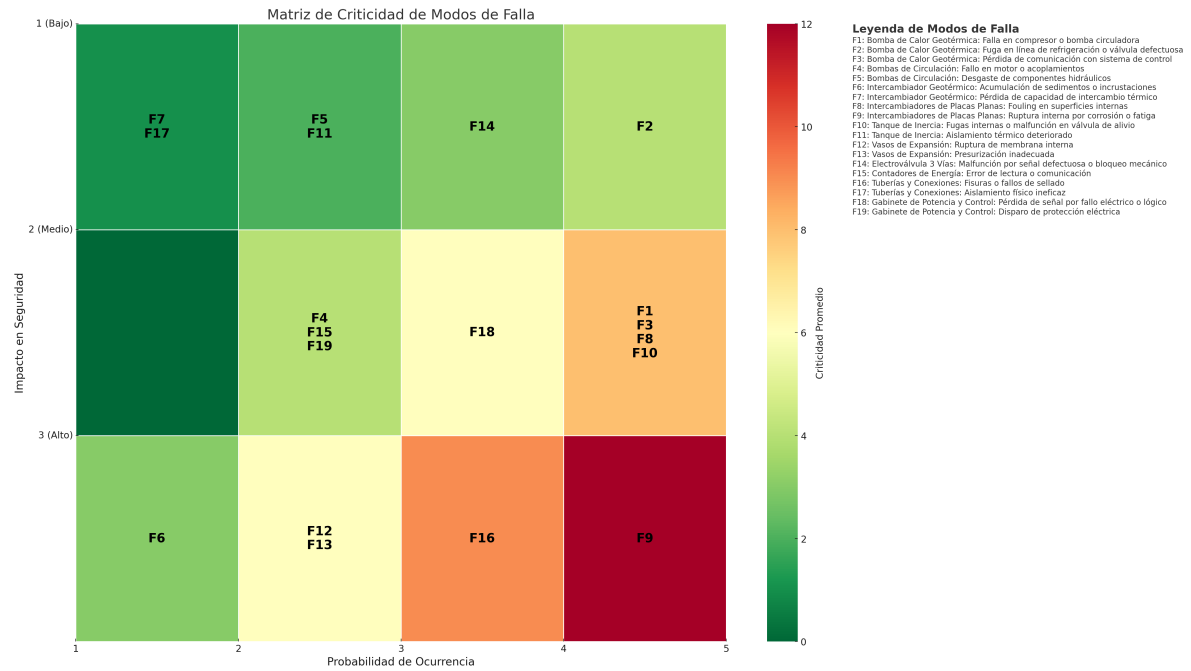
Tabla 4.14: Análisis RCM del sistema de refrigeración geotérmico

Para el análisis de criticidad se utiliza la fórmula de impacto en la seguridad o severidad (1=bajo, 2=medio, 3=alto)  $\times$  Probabilidad de Ocurrencia (1=nula probabilidad, 2=poca probabilidad, 3=media probabilidad, 4=probabilidad media alta, 5=probablemente ocurra), donde la calificación más alta posible define un modo de falla crítico dentro de cada falla funcional.

En la **Figura 4.12** se presenta una representación gráfica de la criticidad de todos los modos de falla determinados; el mismo tiene como objetivo ilustrar el diferente grado de impacto en la seguridad

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

de cada modo de falla.



**Figura 4.12:** Matriz de Criticidad con énfasis en impacto a la seguridad

### Evaluación de la mantenibilidad según modos de falla

Para la evaluación de los modos de falla obtenidos a partir del análisis del RCM se establecieron tres criterios: facilidad de acceso para la intervención del equipo, complejidad de la reparación (asociado a la cantidad de tiempo que podría tomar la reparación) y la disponibilidad de repuestos para la reparación.

En la **Figura 4.13** se muestran las puntuaciones asignadas a cada equipo según sus modos de falla. En el caso del criterio de accesibilidad, a mayor puntuación, más fácil es la accesibilidad al equipo para la reparación. En cuanto a la complejidad, a mayor puntuación más tiempo lleva la reparación de los modos de falla identificados para el equipo, y en disponibilidad de repuestos, a mayor puntuación se presenta mayor disponibilidad de repuestos.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

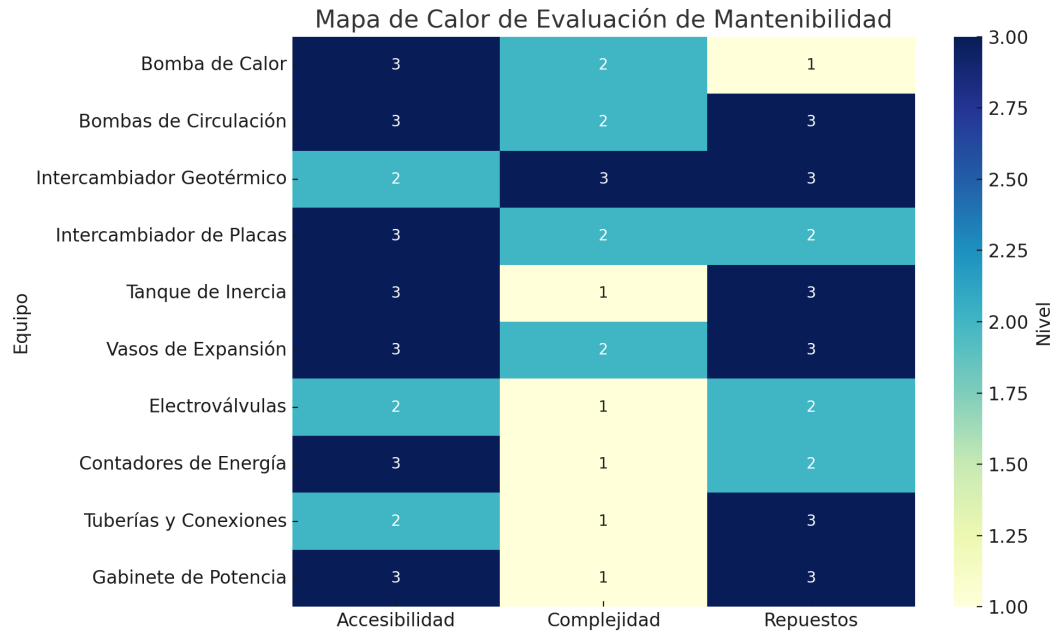


Figura 4.13: Mapa de calor de la mantenibilidad del sistema geotérmico.

### 4.3. Objetivo III

**Validar las variables críticas de caracterización del sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica, mediante el desarrollo de un prototipo simulado y la realización de ensayos en un sistema de pila de combustible-electrolizador, con el fin de comprobación de la viabilidad técnica de la disipación de calor con el sistema de refrigeración geotérmico.**

Para la validación de las variables de caracterización definidas en la sección 4.1 con el fin de obtener la viabilidad de la disipación de calor del sistema de electrolizador y pila de combustible del edificio demostrador del CNH2 mediante el sistema con bomba de calor geotérmica. Se optó por una metodología mixta de simulación y ensayos físicos con el fin de tener una información lo más completa posible para el establecimiento de la viabilidad y cubrir las limitaciones de ambas metodologías de acuerdo con los criterios establecidos en la sección 4.1. La simulación se utiliza como medio para la evaluación del rendimiento del sistema acoplado que no fue observado directamente mediante experimentación y también para la evaluación de aquellos criterios que tienen un componente de estacionalidad que no fue posible analizar experimentalmente debido a las limitaciones en el tiempo de realización del TFG, así como a la caracterización del intercambiador geotérmico. En las siguientes secciones se muestra el proceso de obtención y los resultados obtenidos de la validación mediante el modelo simulado y los ensayos físicos realizados.

#### 4.3.1. Simulaciones de caracterización de pozo geotérmico

Para la caracterización del pozo geotérmico se optó por utilizar un esquema de simulación recibiendo como entradas las características físicas del pozo geotérmico instalado en el CNH2. Para su realización se utilizó la librería de Python *pygfunction* que permite modelar pozos para bombas de calor geotérmicas. Para la modelación del comportamiento de la variación de las temperaturas anuales del subsuelo, se realizó un script en Python a partir de la guía técnica del IDAE. [53]

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

### Simulación de intercambiador de pozo geotérmico

Para el modelado numérico del intercambiador de pozo geotérmico se optó por la librería de Python *pygfunction*, esta implementa funciones *g*, definidas en la sección 2.4.3. La librería permite modelar intercambiadores de calor en pozos geotérmicos para sistemas de refrigeración o calefacción mediante bombas de calor geotérmicas. El mismo permite obtener la respuesta térmica del subsuelo a la inyección o extracción de calor. [62] Para fines de esta simulación, únicamente era de interés la obtención de la resistencia térmica equivalente del intercambiador enterrado con el fin de obtener el coeficiente de transferencia de calor global del intercambiador.

En el apartado de apéndices 76 se muestra, el código utilizado en Python para la obtención de las resistencias y coeficientes.

El código para las variables definidas del intercambiador enterrado en la **Tabla 4.15** generó como resultados lo indicado en la **Tabla 4.16**. Los resultados se toman con un caudal de 1,355l/s de refrigerante, esto según los datos de la ficha técnica de la bomba de calor geotérmica disponible en **Figura7.22**. Algunas de las entradas debieron tomarse como estándar, ya que el CNH2 no podía proporcionar los datos específicos de diseño del intercambiador enterrado, por lo que el modelado es un tanto aproximado en montajes similares de otras instalaciones geotérmicas. En la **Figura 4.14** se muestra la disposición geométrica utilizada en la simulación de la resistencia térmica equivalente de la librería de *Python pygfunction*; en el apartado de apéndices se detalla su código.

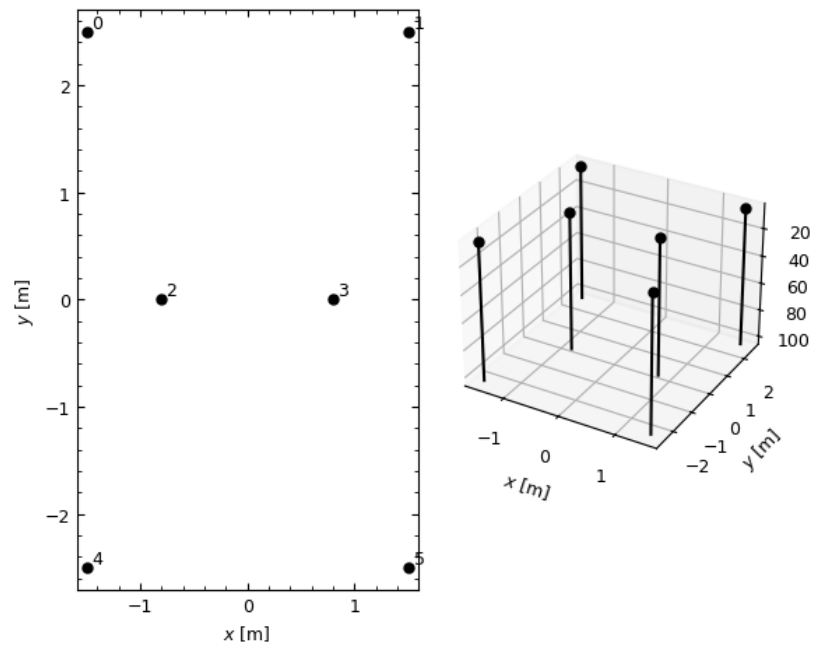
Tabla 4.15: Parámetros claves del intercambiador de calor geotérmico

Parámetro	Símbolo	Valor
Número de perforaciones	$N_b$	6
Profundidad de cada perforación (m)	$L$	100
Radio del pozo geotérmico (m)	$r_b$	0.01485
Conductividad térmica del suelo (W/m·K)	$k_s$	2.0
Conductividad térmica del material de relleno (W/m·K)	$k_g$	2.1
Conductividad térmica de la tubería (W/m·K)	$k_p$	0.4
Radio interno de la tubería (m)	$r_{in}$	0.0326
Radio externo de la tubería (m)	$r_{out}$	0.04
Coefficiente de transferencia de calor del fluido (W/m <sup>2</sup> ·K)	$h_f$	1000
Caudal másico del fluido (kg/s)	$\dot{m}$	1.355
Especificaciones de la tubería	N/A	40mm PN16 PE RC HD100 SDR11
Disposición geométrica	N/A	En U, con repartición de sondas en H

Tabla 4.16: Resultados del cálculo del intercambiador de calor geotérmico

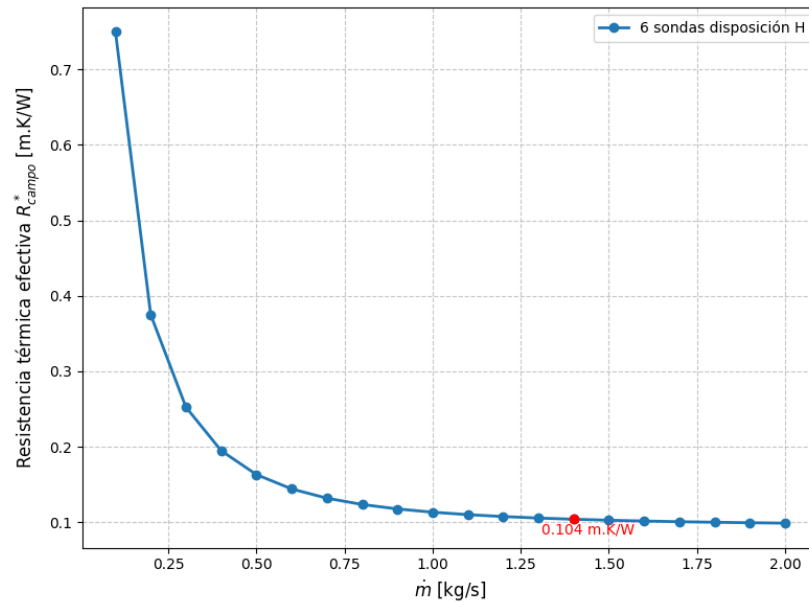
Parámetro	Simulación
Resistencia térmica efectiva del pozo geotérmico (m·K/W)	0.104138
Coefficiente de transferencia de calor global (W/m <sup>2</sup> ·K)	9.602658

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS



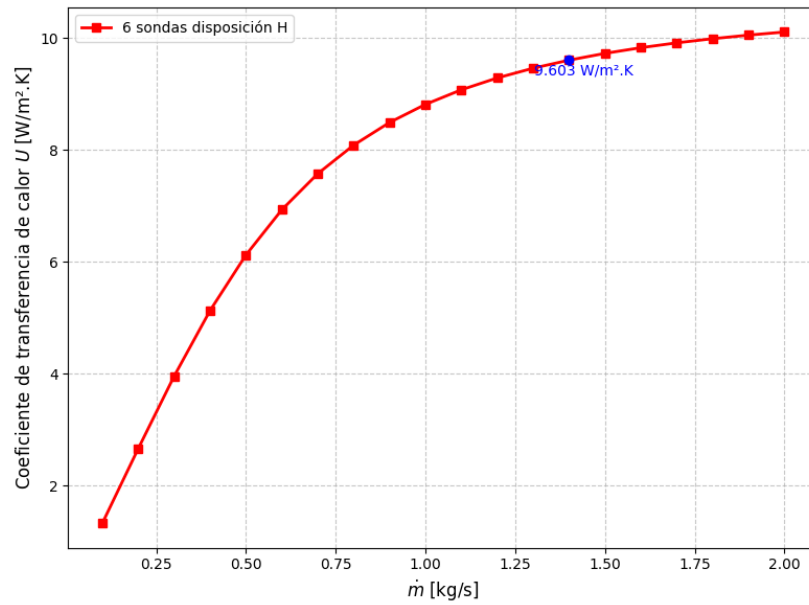
**Figura 4.14:** Disposición Geométrica de Pozos Utilizada en la Simulación

En las **Figuras 4.15 y 4.16** se presenta el comportamiento de la resistencia térmica equivalente y el coeficiente de transferencia de calor con respecto al flujo másico del intercambiador geotérmico. En la **Figura 4.17** se muestra la variación de la resistencia térmica con el cambio en conductividad térmica del suelo.

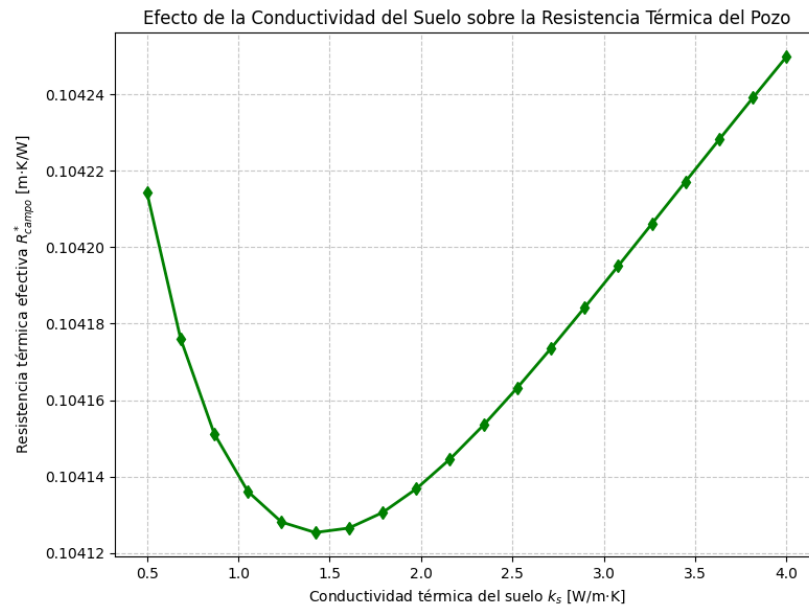


**Figura 4.15:** Comportamiento con respecto a flujo másico simulado de la resistencia térmica equivalente del intercambiador

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS



**Figura 4.16:** Comportamiento con respecto a flujo másico simulado del coeficiente global del intercambiador geotérmico



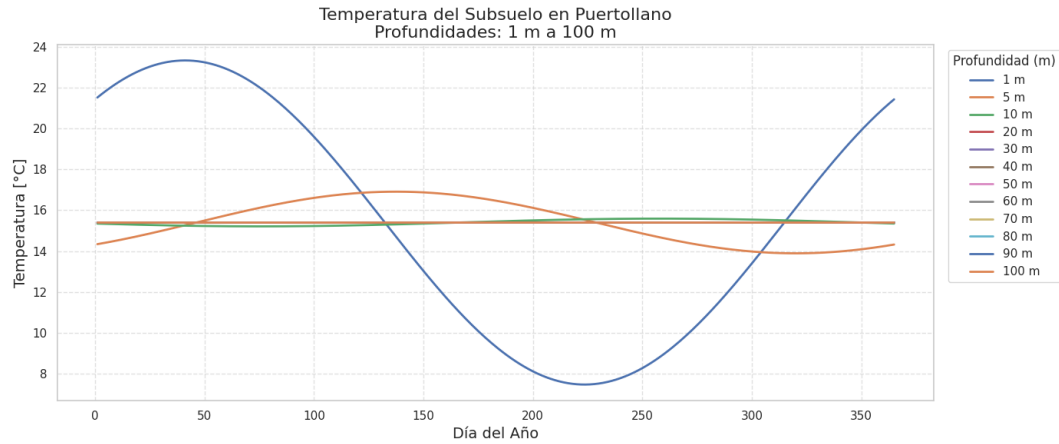
**Figura 4.17:** Efecto de la conductividad del suelo en la resistencia térmica del pozo geotérmico

### Simulación de temperatura del subsuelo a distintas profundidades

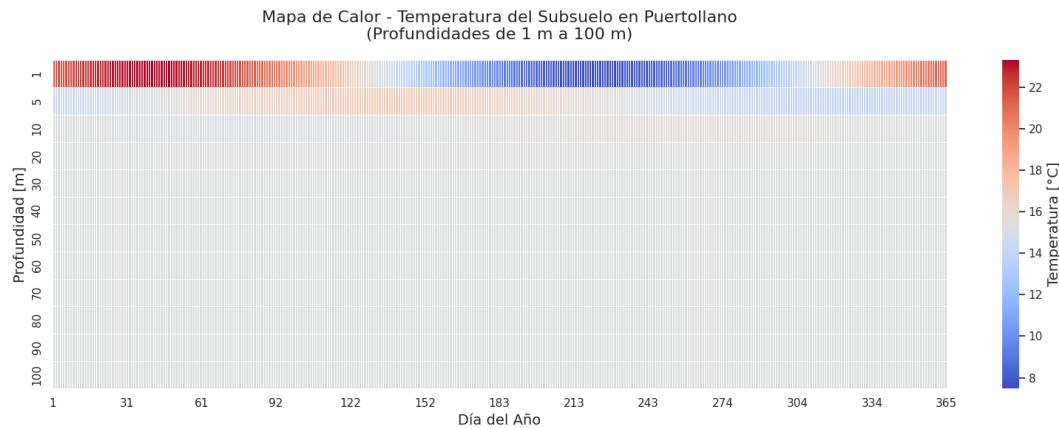
Para la obtención de las temperaturas a distintas profundidades se utilizó la guía técnica del IDAE [53], a partir de la cual se realizó un código en Python para la simulación. El código se adjunta en sección 8.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

En la **figura 4.18** se presenta la gráfica de la variación anual de temperaturas del subsuelo a distintas profundidades. En la **Figura 4.19** se muestra un mapa de calor con las temperaturas a distintas profundidades.



**Figura 4.18:** Variación anual de temperatura del subsuelo a distintas profundidades para Puertollano, España



**Figura 4.19:** Mapa de Calor de las Temperaturas a Distintas Profundidades para Puertollano, España.

### 4.3.2. Ensayo en electrolizador Erredue G16D

Este ensayo consistió en la ejecución de una curva de polarización del electrolizador, iniciando desde una potencia del 50 %—una vez alcanzada la estabilidad operativa, determinada por un nivel de Dew Point adecuado—hasta el 100 %, y posteriormente descendiendo nuevamente hasta el 50 %, en incrementos y decrementos del 5 % cada 5 minutos.

Aunque la normativa sugiere iniciar la prueba desde el 0 % de carga, en la práctica esto no fue posible, ya que el electrolizador no puede operar por debajo del 50 % sin generar alarmas. Esto se debe a que, a cargas reducidas, el sistema es incapaz de alcanzar la presión mínima requerida en la línea hacia el depósito de hidrógeno.

Durante el ensayo, se registraron datos operativos mediante el sistema SCADA del electrolizador

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

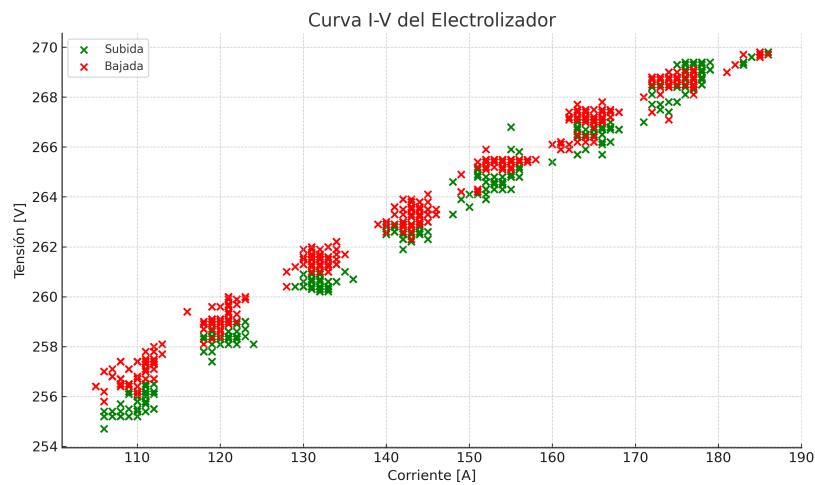
(tensión de stack, corriente de stack, caudal de hidrógeno generado, temperaturas) complementados con mediciones de tensión y corriente obtenidos con equipos Fluke 430-II y 430. Estos dispositivos fueron conectados tanto a la alimentación trifásica principal del electrolizador como a la línea monofásica correspondiente a su sistema de refrigeración integrado.

El objetivo principal de este ensayo fue la estimación experimental de la carga térmica generada por el electrolizador. A continuación, se presentan los resultados obtenidos. En los apéndices se incluyen fotografías del desarrollo del ensayo.

En la sección del apéndice 8, se muestran fotografías del proceso de realización.

### Curva experimental de corriente vs tensión del stack

En la **Figura 4.20**, se muestra la curva I-V obtenida experimentalmente para el electrolizador.



**Figura 4.20:** Curva I-V electrolizador Erredue G16D

### Comportamiento de potencias durante ensayo

En la **Figura 4.21** se muestra la gráfica del comportamiento de la potencia total eléctrica consumida, potencia eléctrica del stack, potencia del hidrógeno producido y la potencia térmica generada durante la realización del ensayo.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

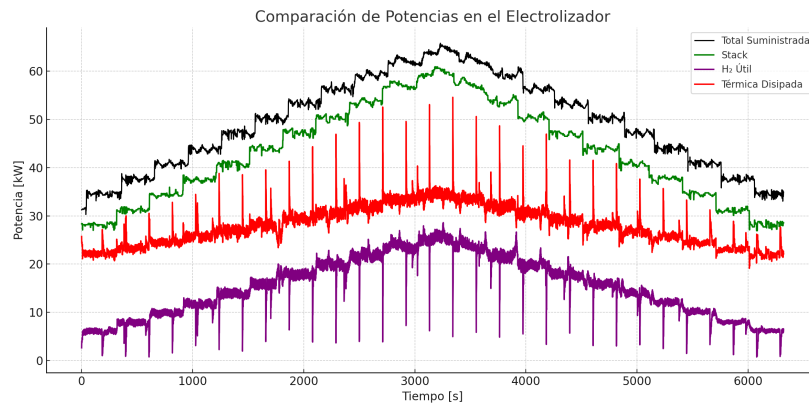


Figura 4.21: Comparación de potencias durante ensayo

En la **Figura 4.22** se presenta el caudal de hidrógeno producido por el electrolizador vrs su potencia consumida por el stack.

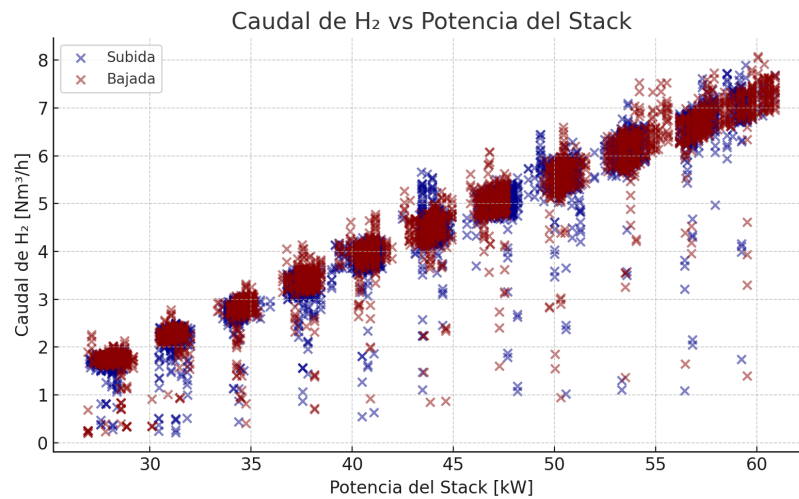
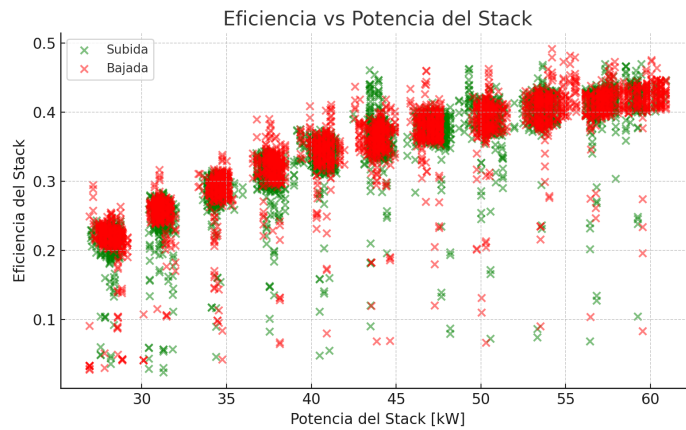


Figura 4.22: Caudal de hidrógeno producido vrs potencia del stack

### Eficiencia experimental de electrolizador

En la **Figura 4.23** se presenta la eficiencia del stack vrs la potencia eléctrica consumida obtenida experimentalmente.

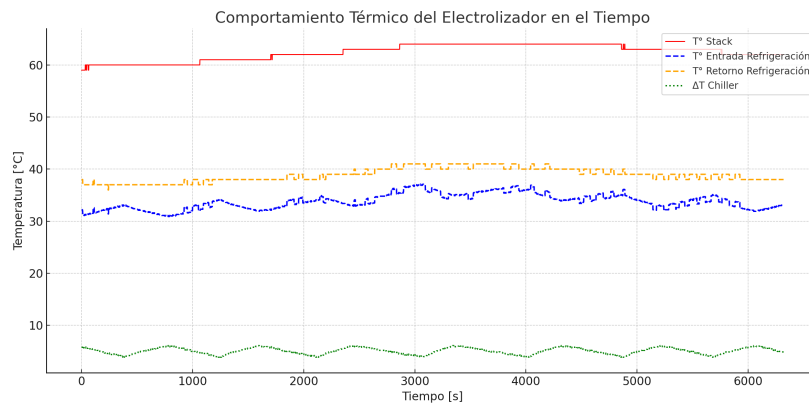
## CAPÍTULO 4. RESULTADOS



**Figura 4.23:** Eficiencia de stack de electrolizador

### Comportamiento térmico del electrolizador

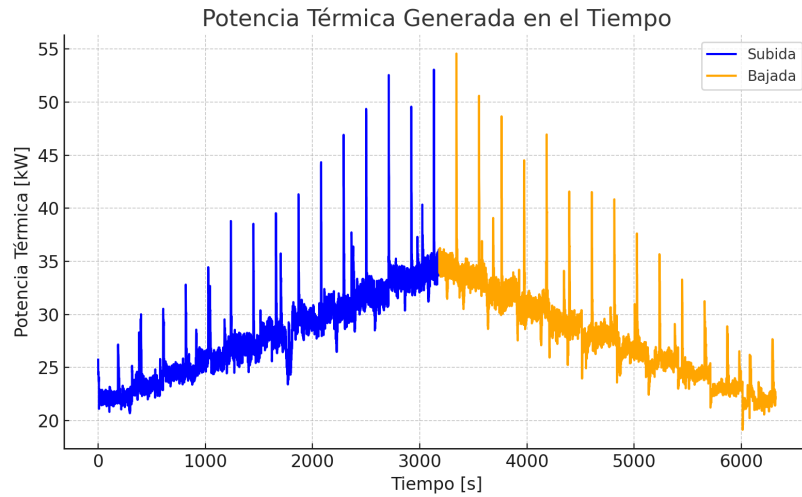
En la **Figura 4.24** se presenta el comportamiento de las temperaturas durante la realización del ensayo.



**Figura 4.24:** Comportamiento de temperaturas durante realización de ensayo

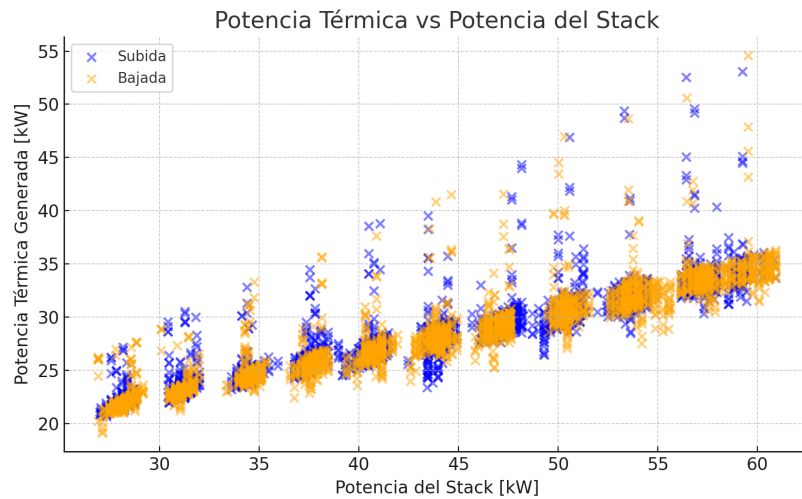
En la **Figura 4.25** se muestra la potencia térmica generada (carga a disipar) durante la realización del ensayo.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS



**Figura 4.25:** Potencia térmica generada durante realización de ensayo.

En la **Figura 4.26** se presenta la potencia térmica generada por el electrolizador vrs la potencia eléctrica consumida por el stack del electrolizador.



**Figura 4.26:** Potencia térmica vrs potencia eléctrica de stack.

### Indicadores principales del ensayo del electrolizador

En la **Tabla 4.17** se muestra los indicadores principales del sistema de refrigeración utilizado como principal (chiller) en el electrolizador. Principalmente se resalta el EER obtenido, que sirve como base para la comparación requerida para establecer el criterio de viabilidad técnica de eficiencia.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Tabla 4.17: Indicadores de refrigeración de electrolizador

Indicador	Valor
$COP_R$	4.67
Potencia térmica total durante el ensayo (kWh)	49.25
Potencia térmica máxima registrada (kW)	54.5

En la **Tabla 4.18** se muestran los valores principales del electrolizador identificados durante el ensayo en su punto de mayor de eficiencia operativa.

Tabla 4.18: Indicadores en eficiencia máxima del electrolizador

Indicador	Valor
Eficiencia (%)	49 %
Potencia eléctrica (kW)	54.19
Potencia térmica generada (kW)	27.54
Caudal de hidrógeno (Nm <sup>3</sup> /h)	7.53
Potencia útil del hidrógeno (kW)	26.65

### Observaciones del ensayo en electrolizador Erredue G16D

- El electrolizador muestra una degradación con respecto a los datos originales del fabricante, misma que indica que debe alcanzar máximos del 60 % pero solo se alcanzó el 49 %.
- La potencia térmica fue determinada de manera indirecta a partir de la eficiencia, misma que se determinó de fuentes experimentales de la medición de la potencia del hidrógeno producido y la potencia eléctrica consumida medida a partir de un Fluke 430 - II.
- El valor del  $COP_R$  obtenido es acorde a valores similares registrados en otros chiller.

### 4.3.3. Ensayo en pila de combustible HyPM HD 30

Para la ejecución del ensayo en la pila de combustible, se estableció un perfil de carga con una rampa de incremento y decrecimiento de potencia con escalones de 1 minuto, alcanzando un máximo de 15 kW. Esta secuencia se inició una vez que la pila alcanzó su estado estable según recomendaciones de la norma UNE-EN IEC 62282, estado estable definido por una temperatura de operación de 50°C y una potencia inicial de 2.5 kW.

Durante el ensayo, se registraron los valores de tensión, corriente y potencia del stack, así como el caudal de hidrógeno suministrado y la carga aplicada.

Cabe destacar que la carga máxima aplicada durante el ensayo fue limitada a 15 kW debido a la capacidad del disyuntor magnetotérmico instalado en la sala del edificio demostrador del CNH2.

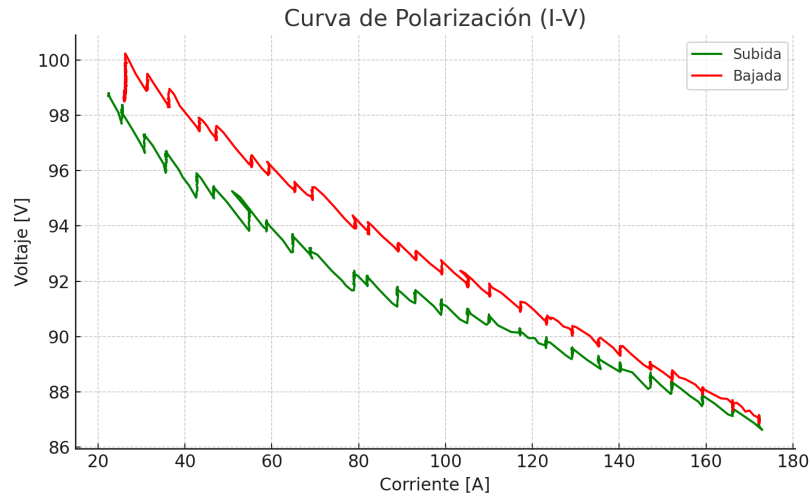
Al igual que en el ensayo del electrolizador, el objetivo principal del ensayo es obtener la carga térmica generada por la pila de combustible a distintas potencias, identificando así los puntos de eficiencia máxima y de carga térmica máxima.

En la sección de apéndice 8, se muestran fotografías del proceso de realización.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

### Curva experimental de corriente vs tensión de stack

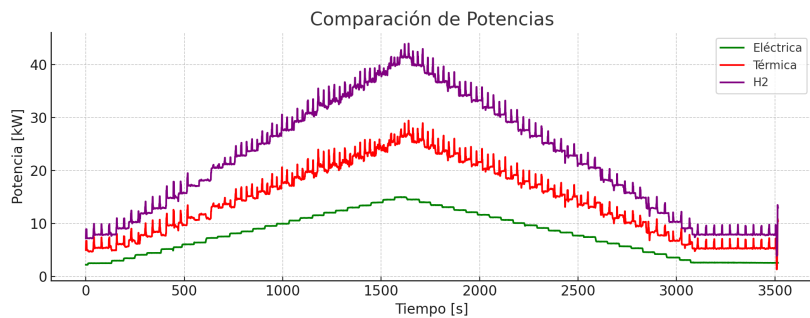
En la **Figura 4.27** se muestra la curva I-V obtenida experimentalmente en rampa de subida y en rampa de bajada.



**Figura 4.27:** Curva I-V experimental de pila de combustible HyPM HD30 desde 2.5 kW hasta 15 kW

### Comparación de potencias de pila durante ensayo

En la **Figura 4.28** se muestra el comportamiento de las potencias registrado experimentalmente durante la realización del ensayo.

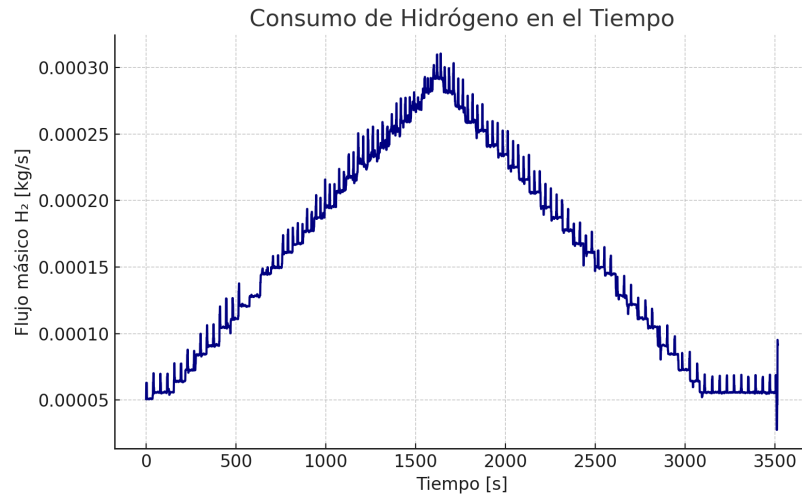


**Figura 4.28:** Comparación de potencias durante ensayo.

### Consumo de hidrógeno

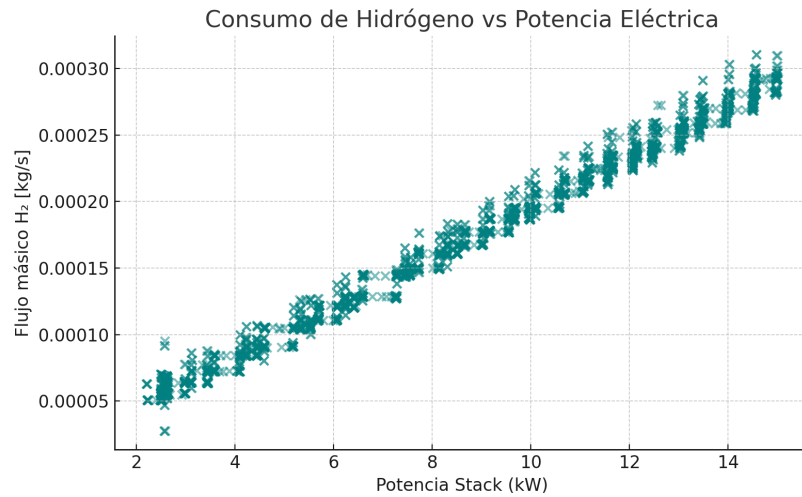
En la **Figura 4.29** se muestra el flujo másico de hidrógeno consumido durante la realización del ensayo de Curva I-V de la pila.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS



**Figura 4.29:** Consumo de hidrógeno durante ensayo.

En la **Figura 4.30** se muestra el flujo másico de hidrógeno consumido vrs la potencia eléctrica del stack durante la realización del ensayo de Curva I-V de la pila.

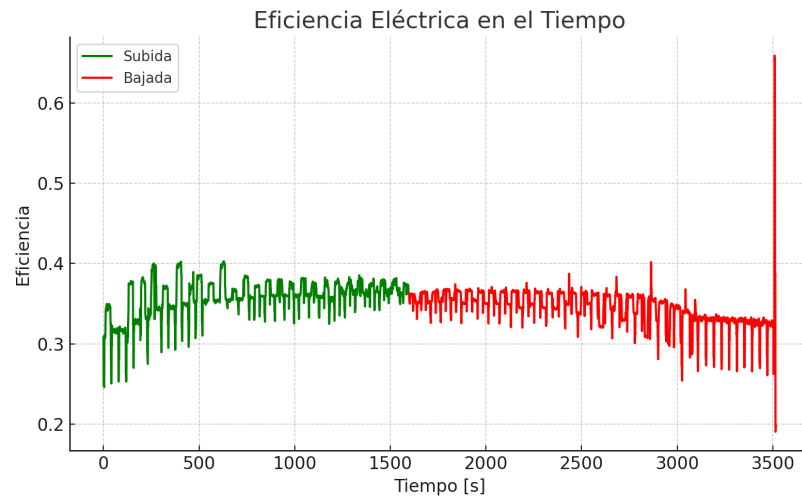


**Figura 4.30:** Consumo de hidrógeno vrs potencia de stack de pila

### Eficiencia de pila de combustible

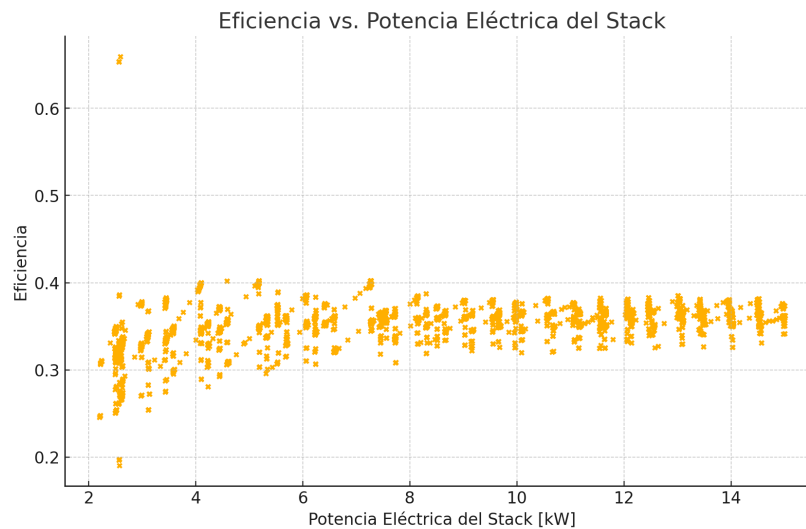
En la **Figura 4.31** se muestra el comportamiento de la eficiencia de la pila de combustible durante todo el tiempo de realización del ensayo.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS



**Figura 4.31:** Comportamiento de eficiencia durante ensayo

En la **Figura 4.32** se muestra la eficiencia registrada experimentalmente en el ensayo en función de la potencia eléctrica del stack registrada.

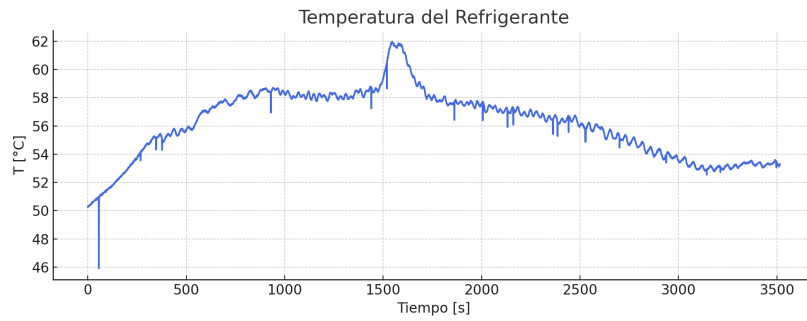


**Figura 4.32:** Eficiencia vrs potencia eléctrica de stack

### Comportamiento térmico de la pila de combustible

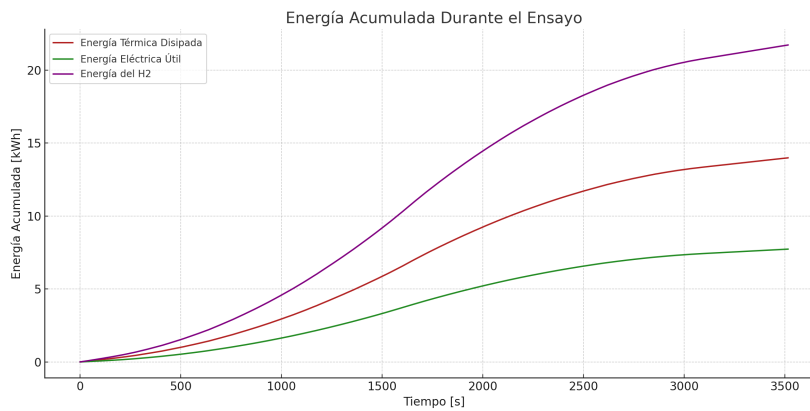
En la **Figura 4.33** se muestra la temperatura registrada en el refrigerante de acuerdo al SCADA de la pila, esta representa la temperatura de la pila durante la realización del ensayo y una vez que se alcanzó estado estable.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS



**Figura 4.33:** Temperatura registrada de la pila durante el ensayo

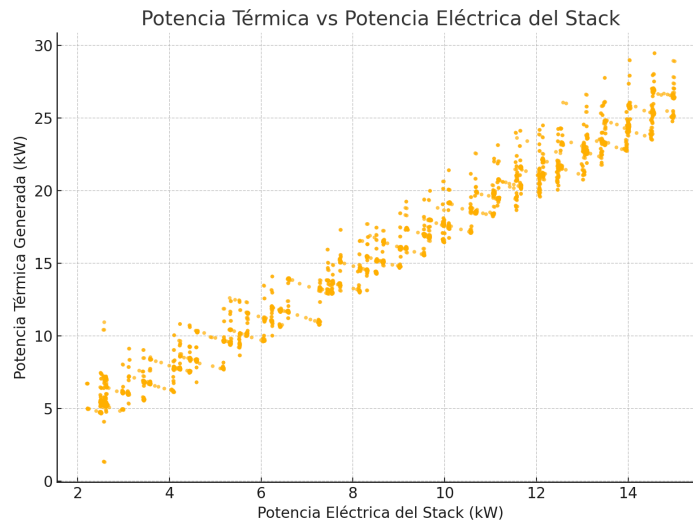
En la **Figura 4.34** se muestran los kWh acumulados durante la realización del ensayo para las distintas potencias.



**Figura 4.34:** Energía acumulada durante la realización del ensayo

En la **Figura 4.35** se presenta el comportamiento de la potencia térmica generada por la pila de combustible en función a la potencia eléctrica generada por dicha pila.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS



**Figura 4.35:** Potencia térmica vrs potencia eléctrica registrada en ensayo

### Indicadores principales de la pila de combustible

En la **Tabla 4.19**, se muestran los principales indicadores hallados experimentalmente para el sistema de refrigeración de la pila de combustible.

Tabla 4.19: Indicadores del sistema de refrigeración de la pila

Indicador	Valor
$COP_R$	2.57
Energía térmica total durante el ensayo (kWh)	14
Potencia térmica generada máxima (kW)	29.46

En la **Tabla 4.20** se resumen los principales indicadores registrados para el punto de máxima eficiencia de la pila de combustible durante la realización del ensayo.

Tabla 4.20: Indicadores de eficiencia máxima registrada de la pila de combustible

Indicador	Valor
Eficiencia máxima (%)	40.24
Potencia eléctrica en el punto de máxima eficiencia (kW)	5.18
Potencia térmica generada en el punto de máxima eficiencia (kW)	7.69
Flujo másico de hidrógeno (kg/s)	0.3863

### Observaciones del ensayo en la pila de combustible

- La limitación de la protección del circuito que recibe la potencia de la carga experimental (*DC sink*), hizo que no pudiera alcanzarse experimentalmente la carga máxima admisible teórica de la pila de combustible.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

- La medición de la carga térmica, al igual que el electrolizador, fue realizada de manera indirecta con datos experimentales de la potencia de hidrógeno consumida y la potencia eléctrica producida.
- La eficiencia de la pila es menor a los valores típicos de pilas de combustible de su clase.

### 4.3.4. Ensayos en bomba de calor geotérmica

Este ensayo tuvo como propósito caracterizar el comportamiento de la bomba de calor geotérmica frente a condiciones térmicas máximas, parciales y mínimas simuladas mediante el tanque de inercia acoplado directamente al lado de carga, replicando los posibles escenarios de operación del electrolizador y la pila de combustible. En particular, se buscó caracterizar el comportamiento de la bomba de calor ante condiciones térmicas que abarcan desde escenarios máximos (alrededor de 50°C) hasta condiciones parciales y mínimas de operación. A través de esta prueba fue posible caracterizar el rendimiento de la bomba de calor, su consumo eléctrico y la respuesta térmica del pozo geotérmico ante una carga térmica simulada.

Las mediciones se realizaron mediante el sistema de control PLC de la bomba de calor geotérmica (temperaturas en intercambiador geotérmico, y tanque de inercia), los contadores de energía asociados al intercambiador geotérmico (caudales de entrada y salida) y a la bomba de calor, así como lecturas de potencia y energía obtenidas con el instrumento Fluke 430-II en el cuadro eléctrico del sistema. La inclusión de este ensayo respondió también a la imposibilidad material, en términos de tiempo, de ejecutar una prueba completa con el sistema de geotermia directamente acoplado al electrolizador y la pila de combustible. Sin embargo, los resultados siguen siendo altamente representativos, ya que tanto la bomba de calor como el intercambiador perciben únicamente la carga térmica impuesta por el tanque de inercia.

En la sección de apéndices 8 se incluyen fotografías del proceso de realización del ensayo. Se llevaron a cabo ciclos de calentamiento y enfriamiento para los rangos de 20°C–50°C, 20°C–42.5°C, 20°C–35°C y 20°C–15°C. Estos ensayos permitieron evaluar el rendimiento del sistema bajo diferentes condiciones de operación, conforme a las recomendaciones de la norma UNE-EN 378 para la determinación del valor NPLV, y por ende el rendimiento de la bomba de calor geotérmica bajo distintas cargas térmicas.

La elección de estos rangos se fundamenta en la necesidad de que tanto la pila de combustible como el electrolizador operen con agua de refrigeración en torno a los 20°C y no superen los 35°C, según recomendaciones de expertos del CNH2 y especificaciones técnicas de los fabricantes. Aunque el objetivo principal fue evaluar la capacidad de enfriamiento de la bomba de calor, también se presentan los resultados obtenidos durante el ciclo previo de calentamiento, ya que son útiles para comprender el comportamiento térmico integral del sistema.

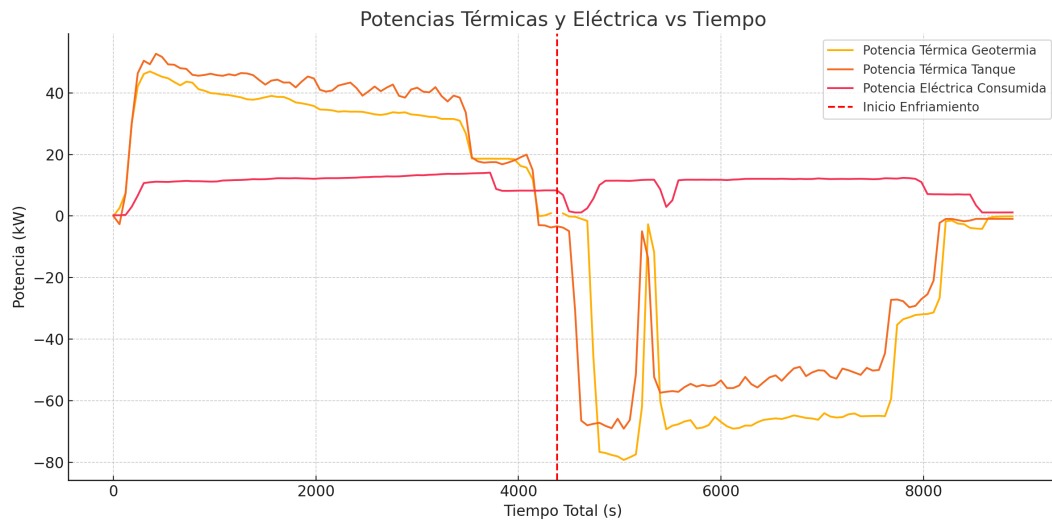
A continuación se presentan los datos obtenidos durante la realización de este ensayo.

#### **Ensayo de calentamiento y enfriamiento entre 20°C y 50 °C representando carga plena (100 %)**

##### **Comportamiento de potencias térmicas y eléctricas**

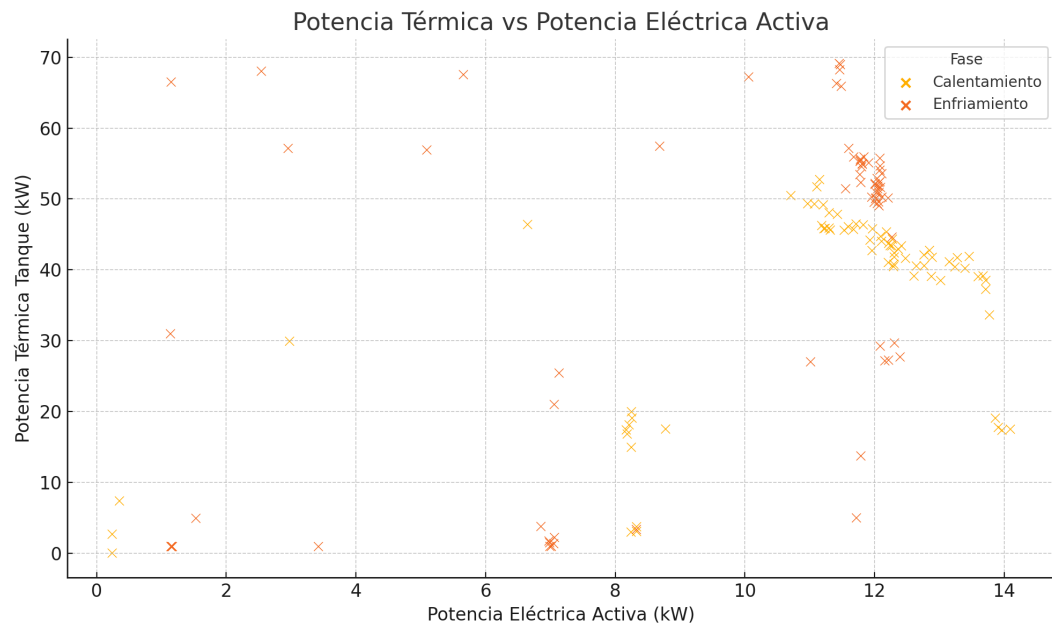
En la **Figura 4.36** se muestra el comportamiento de las potencias durante la fase de calentamiento y enfriamiento del ensayo de la bomba de calor geotérmica.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS



**Figura 4.36:** Comportamiento de potencias registradas en ensayo

En la **figura 4.37** se muestra el comportamiento de la potencia térmica en función a la potencia eléctrica consumida por la bomba de calor.

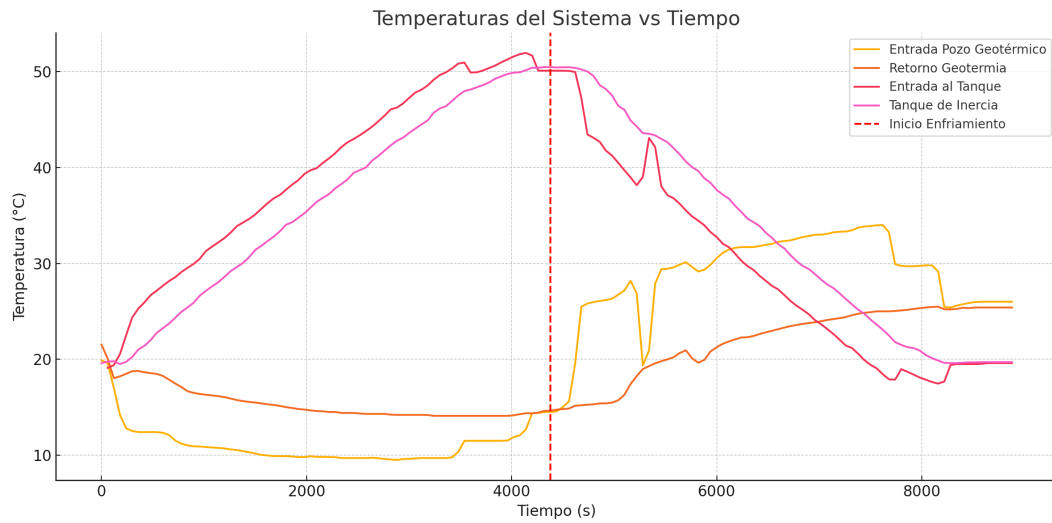


**Figura 4.37:** Potencia térmica en función a potencia eléctrica consumida por la bomba de calor

### Temperaturas y flujos másicos registrados

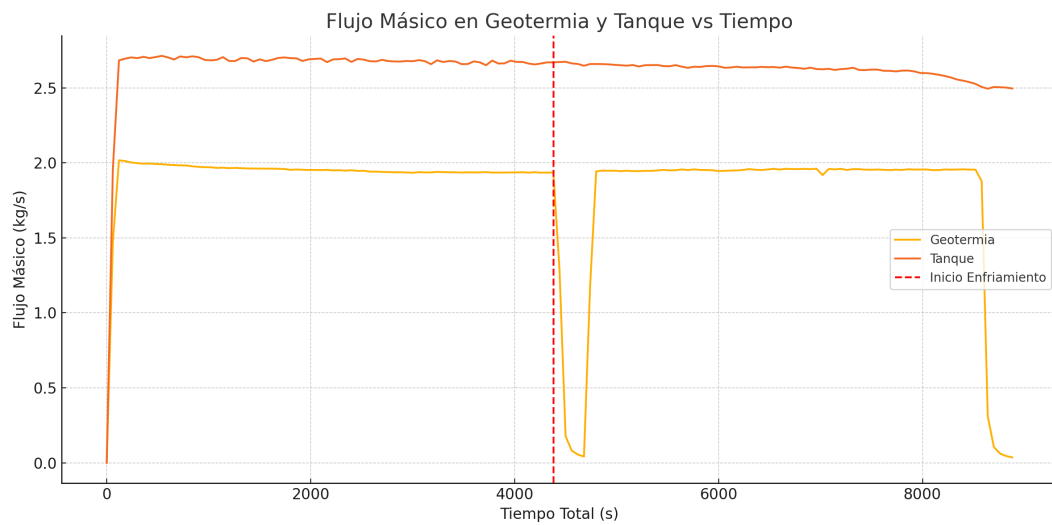
En la **Figura 4.44** se muestra el comportamiento de las temperaturas registradas durante la realización del ensayo, del lado del pozo geotérmico y del lado del tanque de inercia.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS



**Figura 4.38:** Comportamiento de temperaturas durante ensayo

En la **Figura 4.39** se presenta el comportamiento del flujo másico registrado en el ensayo para el lado del pozo geotérmico y el lado del tanque de inercia.



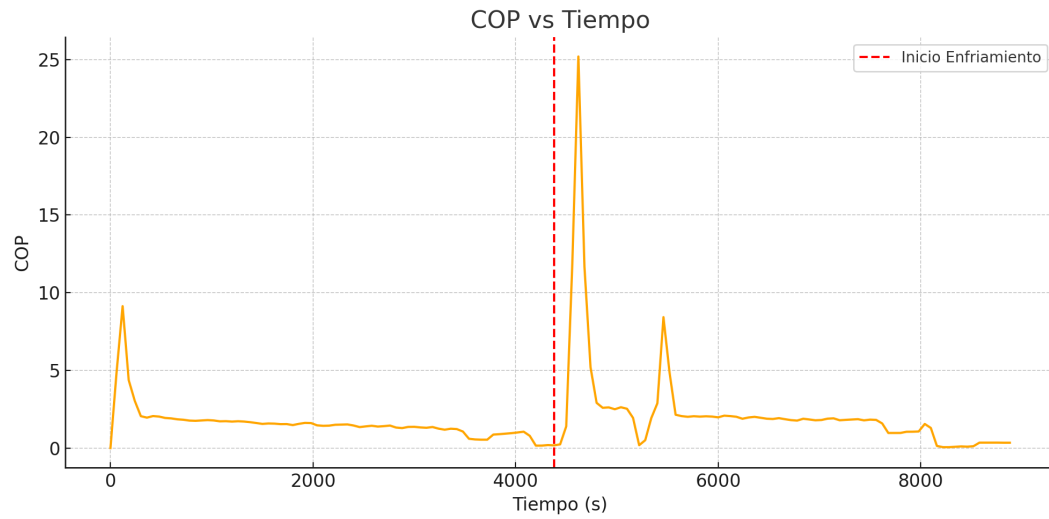
**Figura 4.39:** Comportamiento de flujos másicos durante ensayo

### Comportamiento de COP en ensayo

El comportamiento del COP del sistema fue medido a partir de los datos obtenidos en el tanque de inercia, ya que es el que representa la carga térmica aplicada a la bomba de calor geotérmica.

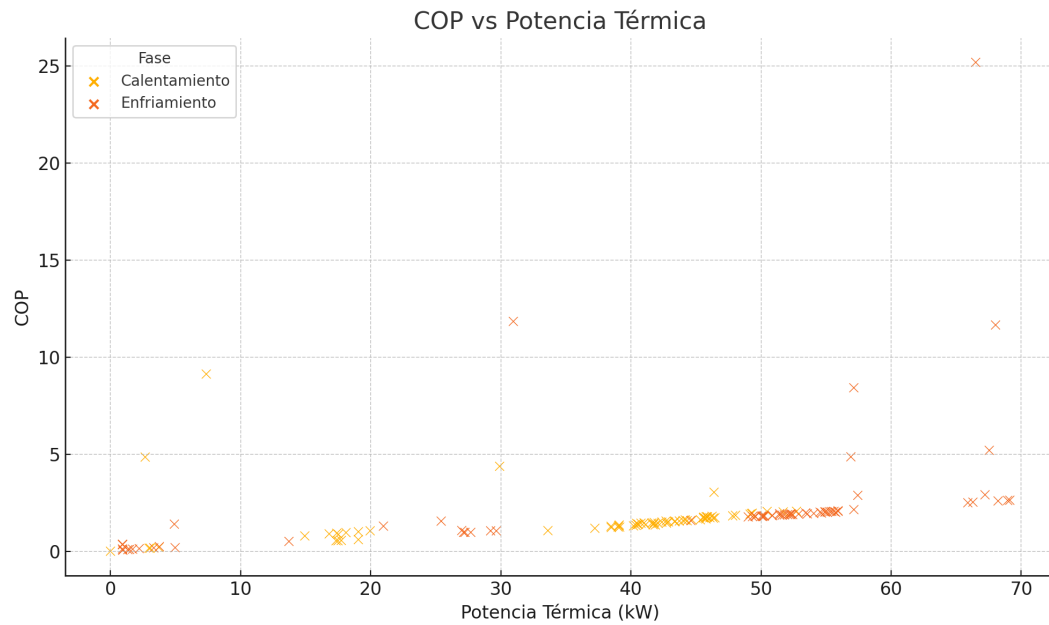
En la **Figura 4.40** se muestra el comportamiento del COP para enfriamiento y calefacción de la bomba de calor geotérmica en el ensayo con rangos de temperatura de 50°C y 20°C.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS



**Figura 4.40:** Comportamiento de COP de calefacción/enfriamiento durante ensayo

En la **Figura 4.41** se muestra el comportamiento del COP para enfriamiento y calefacción de la bomba de calor geotérmica en función a la potencia térmica disipada en el ensayo con rangos de temperatura de 50°C y 20°C.



**Figura 4.41:** Comportamiento de COP de calefacción/enfriamiento vrs potencia térmica registrado en ensayo

### Indicadores principales de refrigeración obtenidos en el ensayo

En la **Tabla 4.21** se muestran los principales indicadores del modo de enfriamiento de la bomba

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

de calor para el ensayo de los rangos de 50°C-20°C.

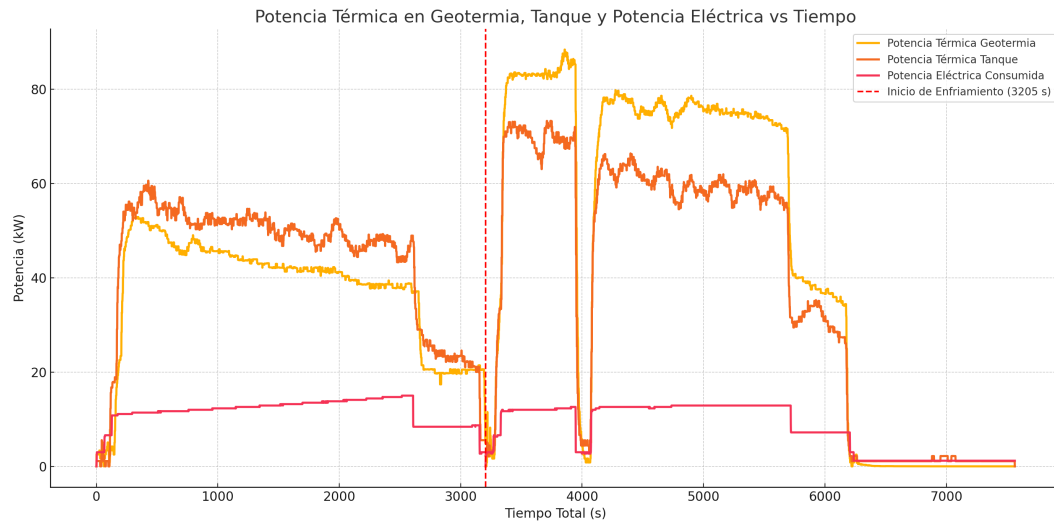
Indicadores de Refrigeración	Valor Experimental Obtenido
$COP_R$	4.07
$EER$	13.91
Consumo eléctrico total (kWh)	12.35
Disipación térmica de tanque total (kWh)	50.35
Tasa de disipación térmica media (kW)	50.25
Tasa de decrecimiento de temperatura de tanque (°C/min)	0.41
Tasa de crecimiento de temperatura de retorno de pozo geotérmico (°C/min)	0.14

Tabla 4.21: Resultados experimentales de los indicadores de refrigeración del sistema geotérmico

### Ensayo de calentamiento y enfriamiento entre 20°C y 42.5 °C representando carga parcial (75 %)

#### Comportamiento de potencias térmicas y eléctricas

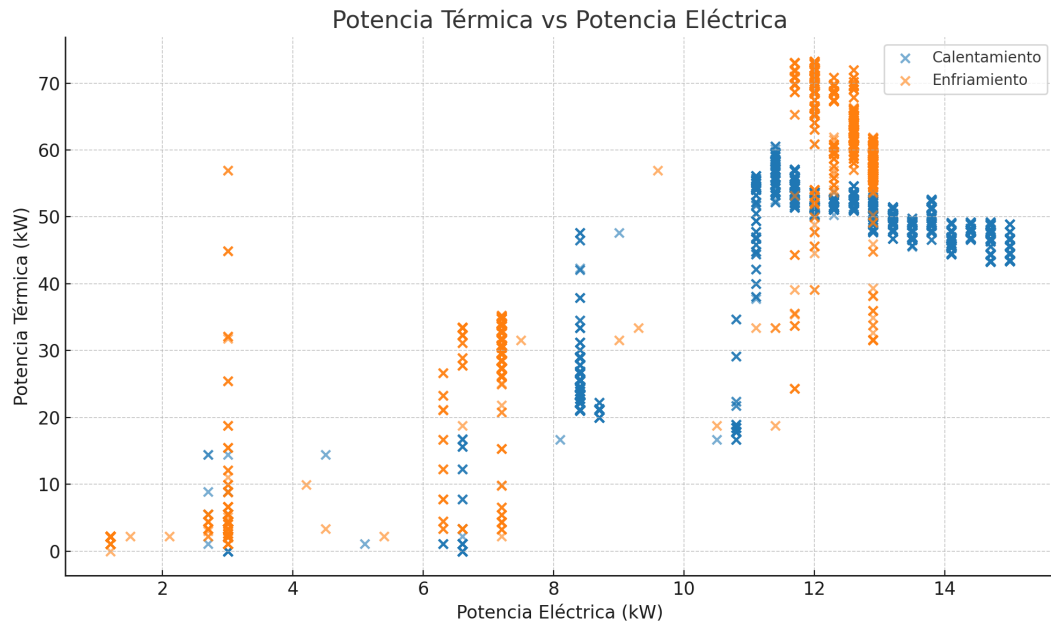
En la **figura 4.42** se muestra el comportamiento de las potencias durante la fase de calentamiento y enfriamiento del ensayo de la bomba de calor geotérmica.



**Figura 4.42:** Comportamiento de potencias registradas en ensayo

En la **Figura 4.43** se muestra el comportamiento de la potencia térmica en función a la potencia eléctrica consumida por la bomba de calor.

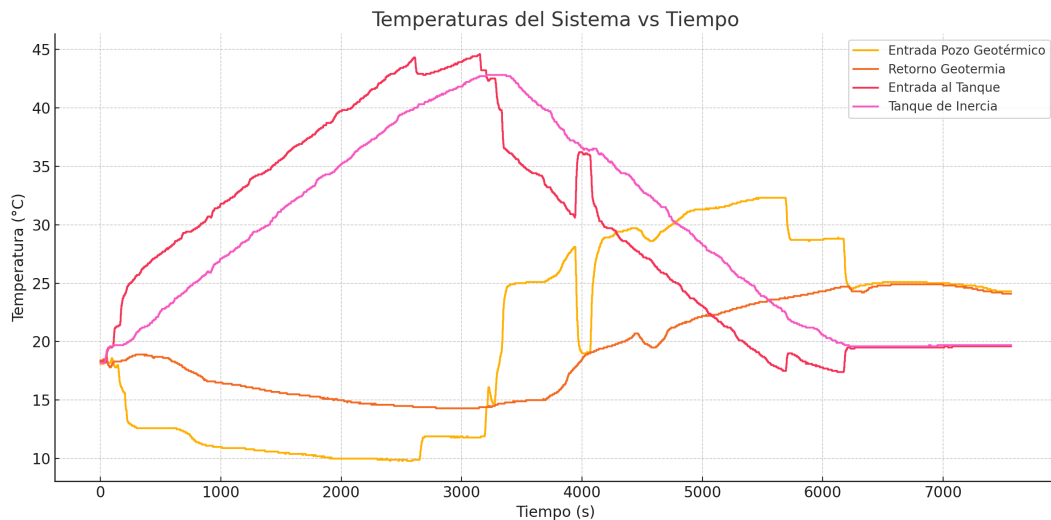
## CAPÍTULO 4. RESULTADOS



**Figura 4.43:** Potencia térmica en función a potencia eléctrica consumida por la bomba de calor

### Temperaturas y flujos máscicos registrados

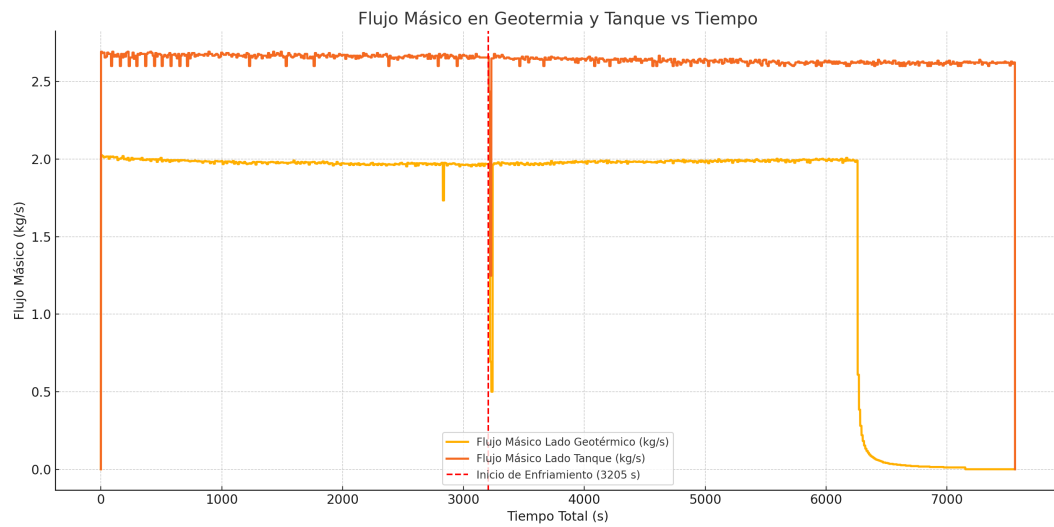
En la **Figura 4.44** se muestra el comportamiento de las temperaturas registradas durante la realización del ensayo, del lado del pozo geotérmico y del lado del tanque de inercia.



**Figura 4.44:** Comportamiento de temperaturas durante ensayo

En la **Figura 4.45** se presenta el comportamiento del flujo máscico registrado en el ensayo para el lado del pozo geotérmico y el lado del tanque de inercia.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

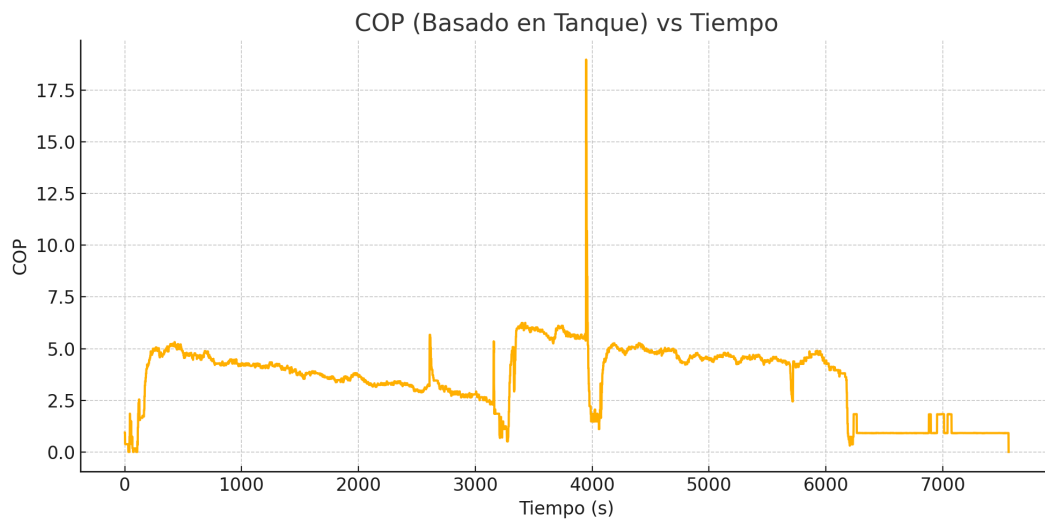


**Figura 4.45:** Comportamiento de flujos másicos durante ensayo

### Comportamiento de COP en ensayo

El comportamiento del COP del sistema fue medido a partir de los datos obtenidos en el tanque de inercia, ya que es el que representa la carga térmica aplicada a la bomba de calor geotérmica.

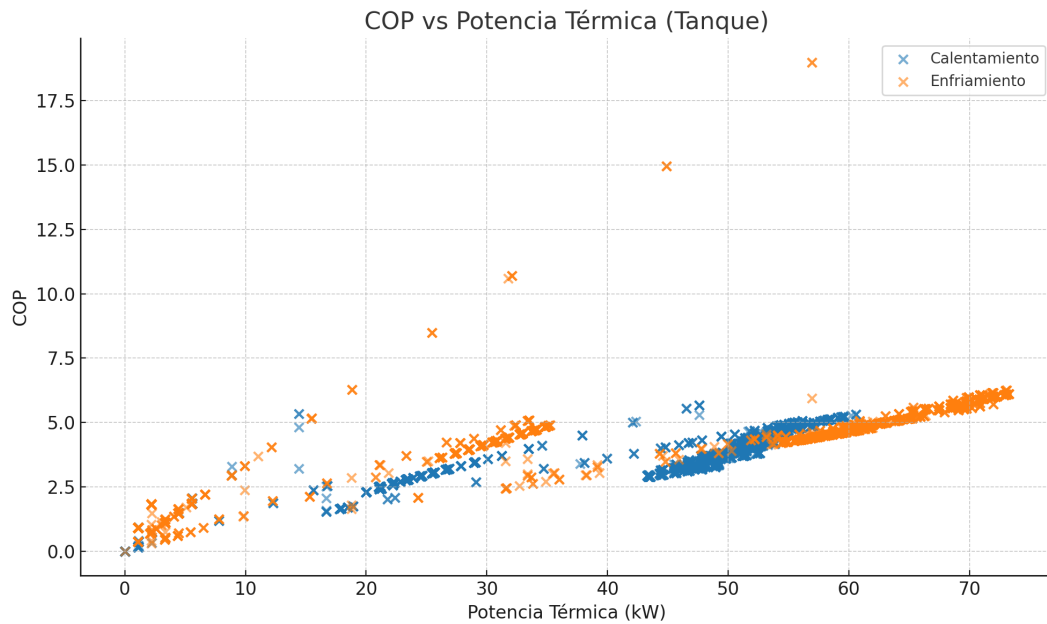
En la **Figura** se muestra el comportamiento del COP para enfriamiento y calefacción de la bomba de calor geotérmica en el ensayo con rangos de temperatura de 42.5°C y 20°C.



**Figura 4.46:** Comportamiento de COP de calefacción/enfriamiento durante ensayo

En la **Figura 4.46** se muestra el comportamiento del COP para enfriamiento y calefacción de la bomba de calor geotérmica en función a la potencia térmica disipada en el ensayo con rangos de temperatura de 42.5°C y 20°C.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS



**Figura 4.47:** Comportamiento de COP de calefacción/enfriamiento vrs potencia térmica registrado en ensayo

### Indicadores principales de refrigeración obtenidos en el ensayo

En la **Tabla 4.22** se muestran los principales indicadores del modo de enfriamiento de la bomba de calor para el ensayo de los rangos de 42.5°C-20°C.

Indicadores de Refrigeración	Valor Experimental Obtenido
$COP_R$	4.59
$EER$ (Sistema Imperial)	15.66
Consumo eléctrico total (kWh)	10.35
Disipación térmica de tanque total (kWh)	44.06
Tasa de disipación térmica media (kW)	54.5
Tasa de decrecimiento de temperatura de tanque (°C/min)	0.48
Tasa de crecimiento de temperatura de retorno de pozo geotérmico (°C/min)	0.13

Tabla 4.22: Resultados experimentales de los indicadores de refrigeración del sistema geotérmico

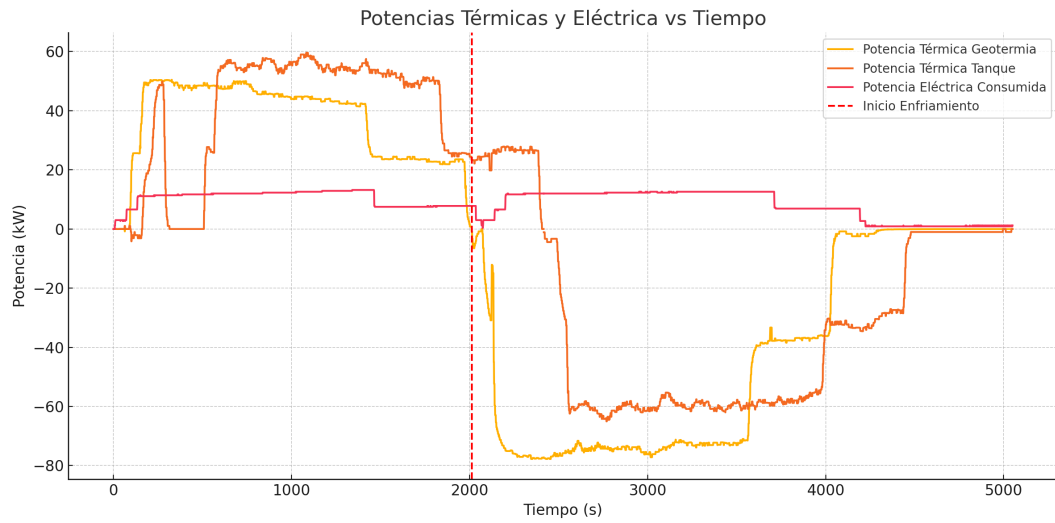
### Ensayo de calentamiento y enfriamiento entre 20°C y 35 °C representando carga parcial (50 %)

#### Comportamiento de potencias térmicas y eléctricas

En la **Figura 4.48** se muestra el comportamiento de las potencias durante la fase de calentamiento

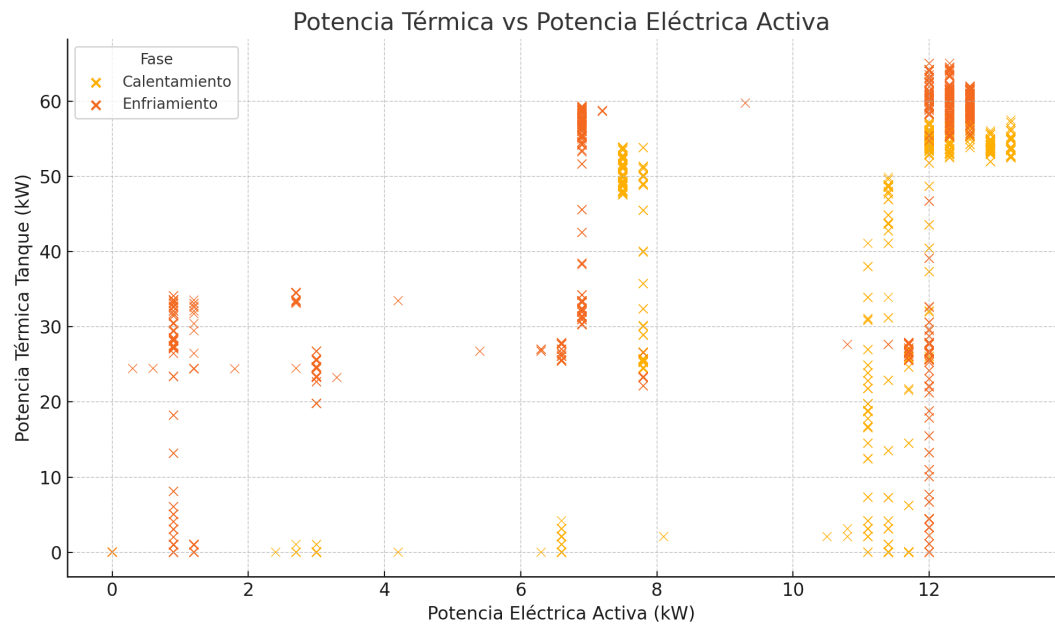
## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

y enfriamiento del ensayo de la bomba de calor geotérmica.



**Figura 4.48:** Comportamiento de potencias registradas en ensayo

En la **Figura 4.49** se muestra el comportamiento de la potencia térmica en función a la potencia eléctrica consumida por la bomba de calor.

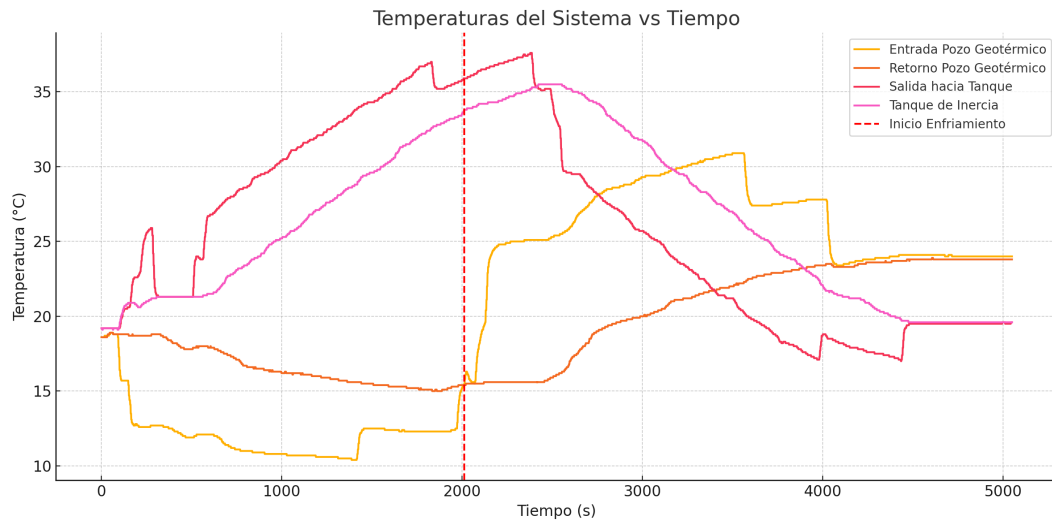


**Figura 4.49:** Potencia térmica en función a potencia eléctrica consumida por la bomba de calor

### Temperaturas y flujos másicos registrados

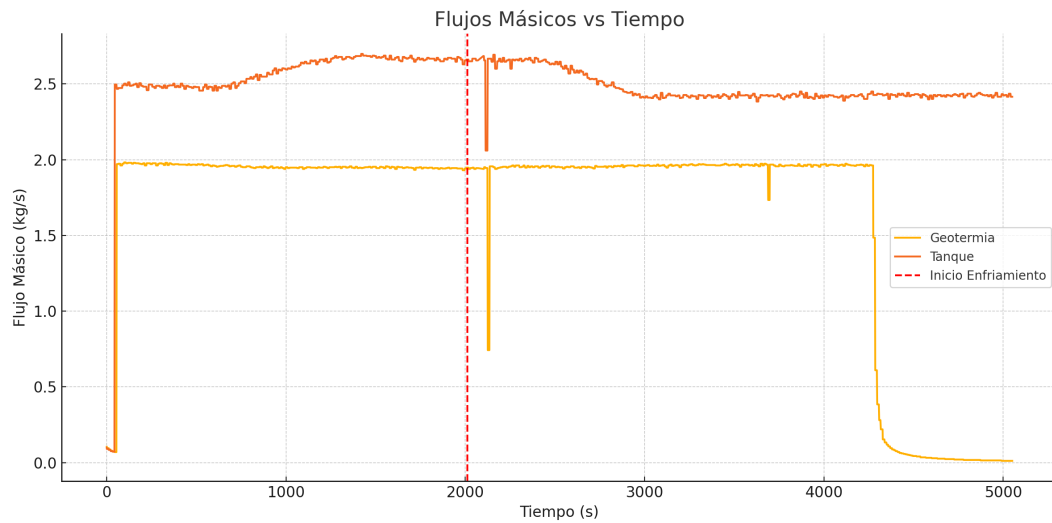
En la **Figura 4.50** se muestra el comportamiento de las temperaturas registradas durante la realización del ensayo, del lado del pozo geotérmico y del lado del tanque de inercia.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS



**Figura 4.50:** Comportamiento de temperaturas durante ensayo

En la **Figura 4.51** se presenta el comportamiento del flujo másico registrado en el ensayo para el lado del pozo geotérmico y el lado del tanque de inercia.



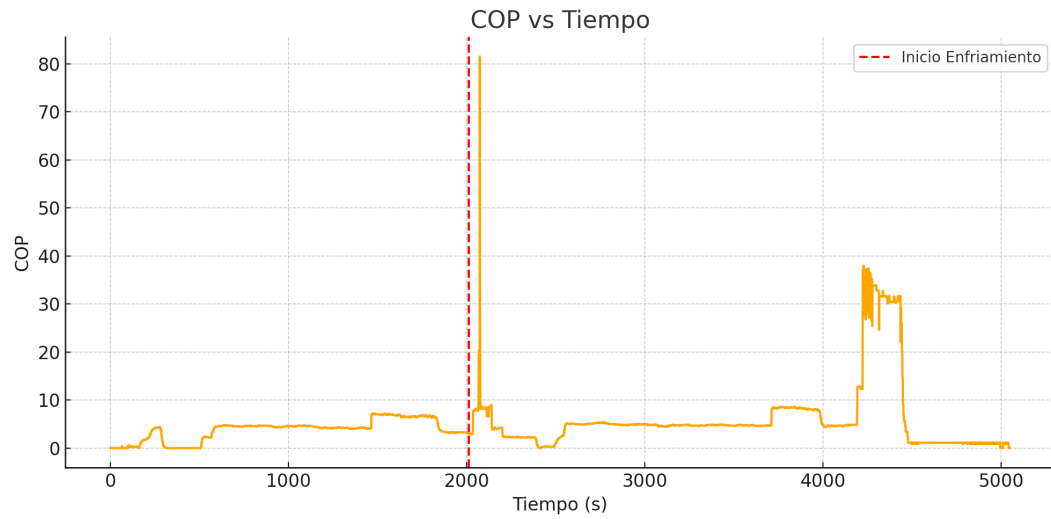
**Figura 4.51:** Comportamiento de flujos másicos durante ensayo

### Comportamiento de COP en ensayo

El comportamiento del COP del sistema fue medido a partir de los datos obtenidos en el tanque de inercia, ya que es el que representa la carga térmica aplicada a la bomba de calor geotérmica.

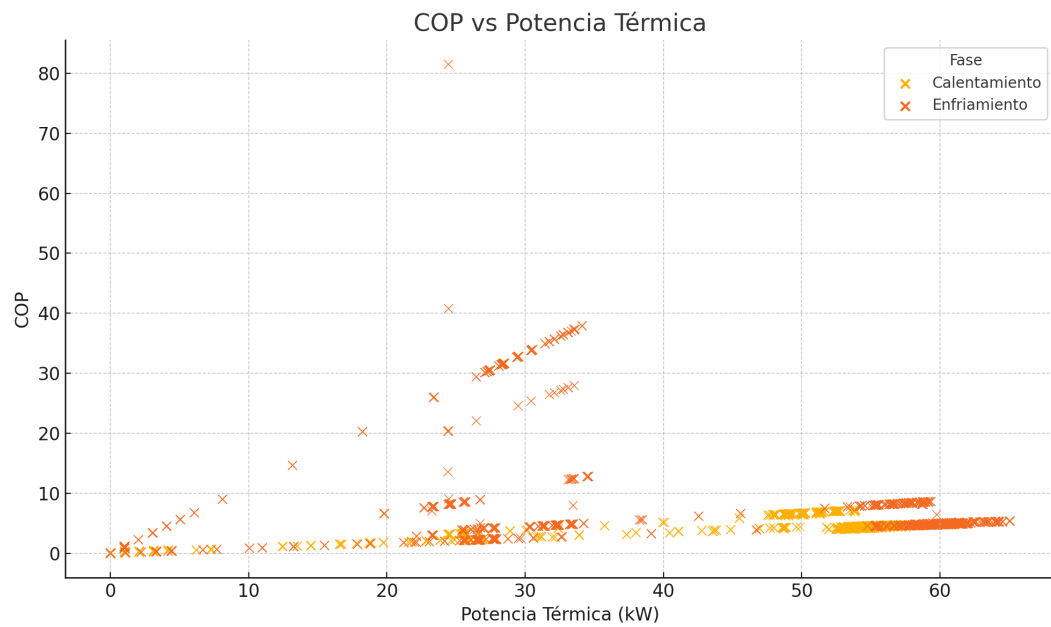
En la **Figura 4.3.4** se muestra el comportamiento del COP para enfriamiento y calefacción de la bomba de calor geotérmica en el ensayo con rangos de temperatura de 35°C y 20°C.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS



**Figura 4.52:** Comportamiento de COP de calefacción/enfriamiento durante ensayo

En la **Figura** se muestra el comportamiento del COP para enfriamiento y calefacción de la bomba de calor geotérmica en función a la potencia térmica disipada en el ensayo con rangos de temperatura de 35°C y 20°C.



**Figura 4.53:** Comportamiento de COP de calefacción/enfriamiento vrs potencia térmica registrado en ensayo

### Indicadores principales de refrigeración obtenidos en el ensayo

En la **Tabla 4.23** se muestran los principales indicadores del modo de enfriamiento de la bomba

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

de calor para el ensayo de los rangos de 35°C-20°C.

Indicadores de Refrigeración	Valor Experimental Obtenido
$COP_R$	5.05
$EER$	17.24
Consumo eléctrico total (kWh)	5.6
Disipación térmica de tanque total (kWh)	28.34
Tasa de disipación térmica media (kW)	56.4
Tasa de decrecimiento de temperatura de tanque (°C/min)	0.48
Tasa de crecimiento de temperatura de retorno de pozo geotérmico (°C/min)	0.25

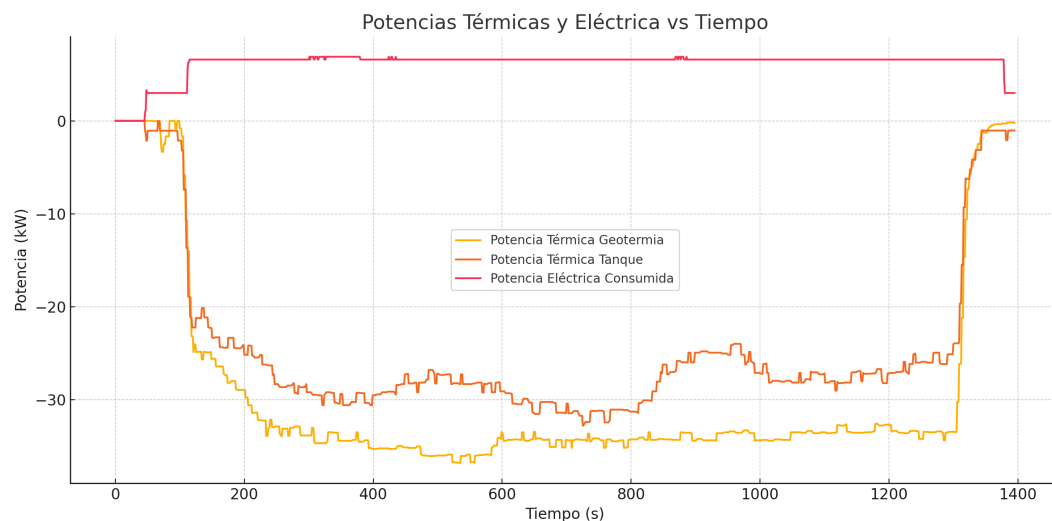
Tabla 4.23: Resultados experimentales de los indicadores de refrigeración del sistema geotérmico

### Ensayo de enfriamiento entre 20°C y 15 °C representando carga mínima (25 %)

El ensayo de 20°C a 15°C, a pesar de estar fuera de los rangos aceptables de temperatura determinados, resultaba de utilidad ya que representaba la disipación térmica mínima, pero también permitía ver el rendimiento de la bomba de calor sin el ciclo de calentamiento previo que se realizó en los demás ensayos para simular una carga térmica aplicada.

### Comportamiento de potencias térmicas y eléctricas

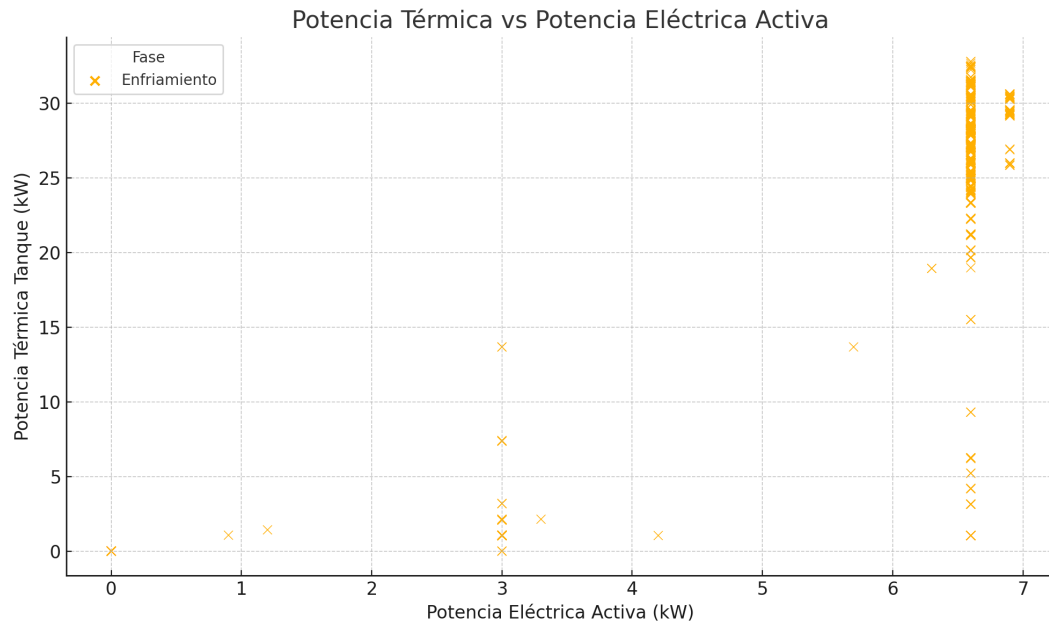
En la **Figura 4.54** se muestra el comportamiento de las potencias durante la fase de calentamiento y enfriamiento del ensayo de la bomba de calor geotérmica.



**Figura 4.54:** Comportamiento de potencias registradas en ensayo

En la **Figura 4.55** se muestra el comportamiento de la potencia térmica en función a la potencia eléctrica consumida por la bomba de calor.

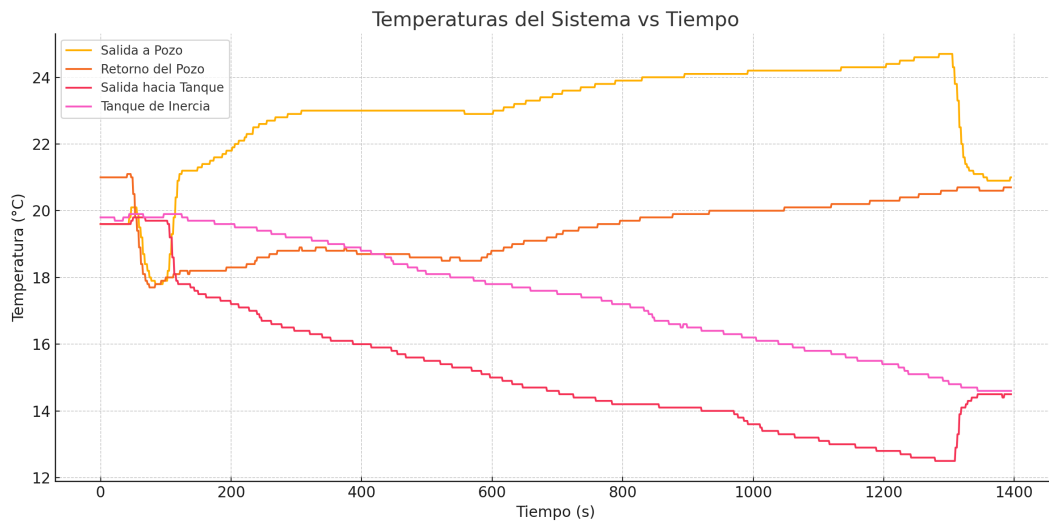
## CAPÍTULO 4. RESULTADOS



**Figura 4.55:** Potencia térmica en función a potencia eléctrica consumida por la bomba de calor

### Temperaturas y flujos másicos registrados

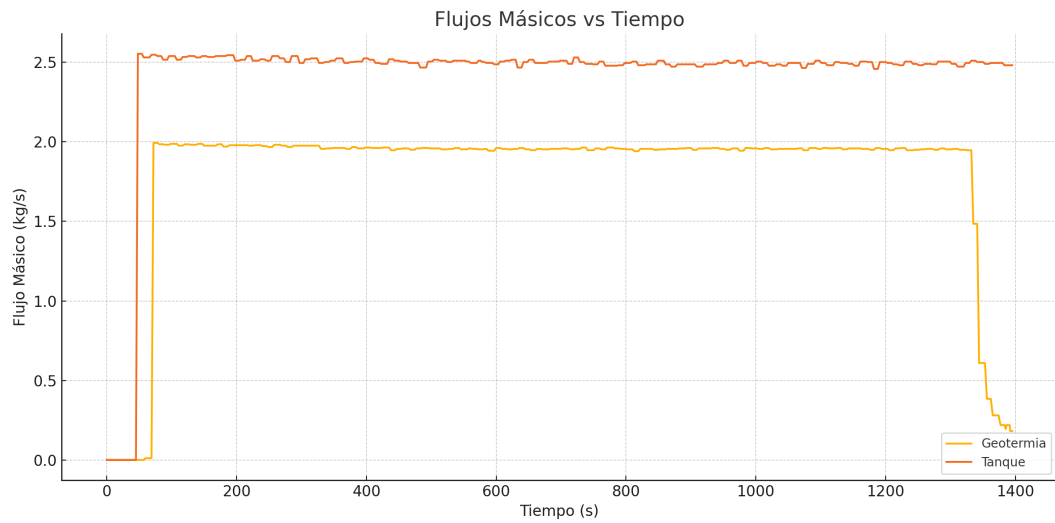
En la **Figura 4.56** se muestra el comportamiento de las temperaturas registradas durante la realización del ensayo, del lado del pozo geotérmico y del lado del tanque de inercia.



**Figura 4.56:** Comportamiento de temperaturas durante ensayo

En la **Figura 4.57** se presenta el comportamiento del flujo másico registrado en el ensayo para el lado del pozo geotérmico y el lado del tanque de inercia.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

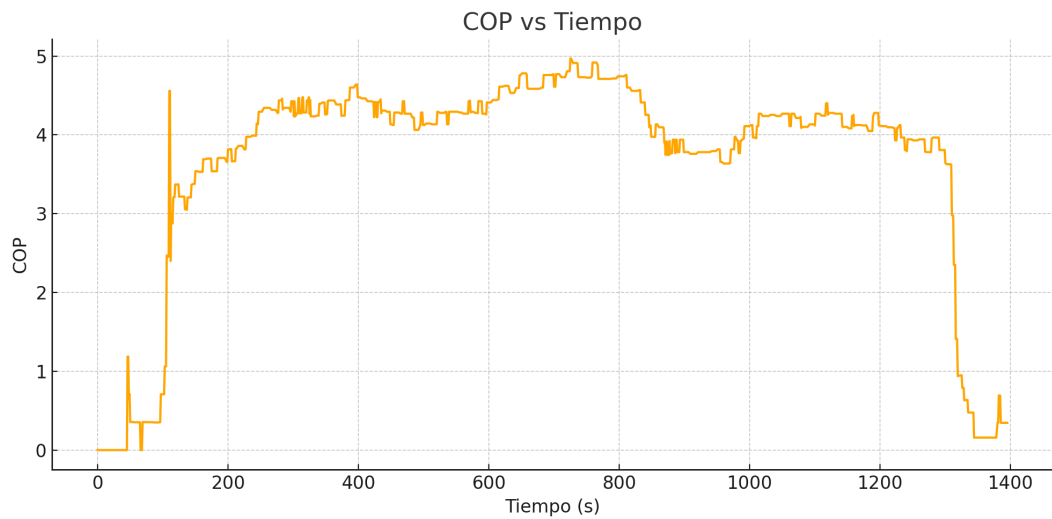


**Figura 4.57:** Comportamiento de flujos másicos durante ensayo

### Comportamiento de COP en ensayo

El comportamiento del COP del sistema fue medido a partir de los datos obtenidos en el tanque de inercia, ya que es el que representa la carga térmica aplicada a la bomba de calor geotérmica.

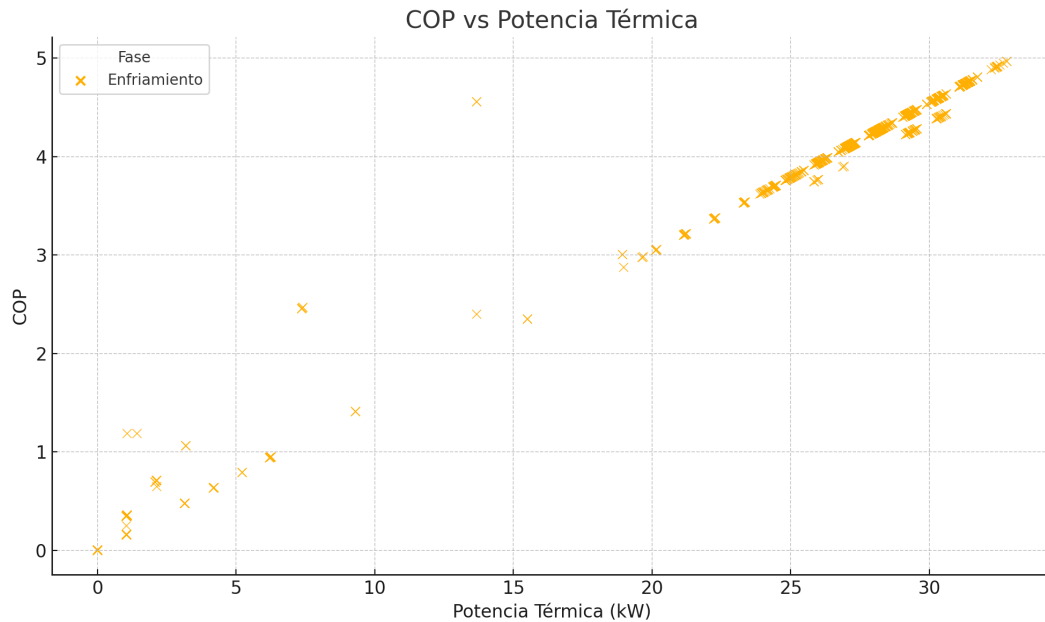
En la **Figura ??** se muestra el comportamiento del COP para enfriamiento y calefacción de la bomba de calor geotérmica en el ensayo con rangos de temperatura de 15°C y 20°C.



**Figura 4.58:** Comportamiento de COP de calefacción/enfriamiento durante ensayo

En la **Figura 4.59** se muestra el comportamiento del COP para enfriamiento y calefacción de la bomba de calor geotérmica en función a la potencia térmica disipada en el ensayo con rangos de temperatura de 35°C y 20°C.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS



**Figura 4.59:** Comportamiento de COP de calefacción/enfriamiento vrs potencia térmica registrado en ensayo

### Indicadores principales de refrigeración obtenidos en el ensayo

En la **Tabla 4.24** se muestran los principales indicadores del modo de enfriamiento de la bomba de calor para el ensayo de los rangos de 20°C-15°C.

Indicadores de Refrigeración	Valor Experimental Obtenido
$COP_R$	3.9
$EER$	13.3
Consumo eléctrico total (kWh)	2.40
Disipación térmica de tanque total (kWh)	9.36
Tasa de disipación térmica media (kW)	27.28
Tasa de decrecimiento de temperatura de tanque (°C/min)	0.23
Tasa de crecimiento de temperatura de retorno de pozo geotérmico (°C/min)	0.35

Tabla 4.24: Resultados experimentales de los indicadores de refrigeración del sistema geotérmico

### Observaciones de los ensayos en la bomba de calor geotérmica

- El NPLV tuvo un valor de 4.67, el fabricante reportaba alrededor de 5.95 bajo sus condiciones propias de ensayo.
- La pendiente de la curva de decrecimiento de temperatura/disipación de energía térmica no tuvo variación en los ensayos de mayor potencia térmica. Se mantuvo alrededor de 0.4-0.5 °C/min y

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

50 kW de media en todos los ensayos. La única variación fue en el ensayo de 25 % de demanda, presumiblemente porque la caída de temperatura requerida era solo de 5°C.

- La tasa de calentamiento del pozo geotérmico bajo disipación continuada rondó los 0.1-0.2 °C/min.
- En algunas de las gráficas se aprecian elevaciones repentinas del COP o caídas repentinas de caudal, esto se debe a que en los ensayos se debía apagar la bomba de calor para poder cambiar al modo de enfriamiento.

### 4.3.5. Simulación de dinámica de tanque de inercia y bomba de calor a partir de datos experimentales

Para la determinación del criterio de capacidad de refrigeración, de acuerdo con lo definido en la sección 4.1 es necesario modelar el comportamiento de las temperaturas del tanque de inercia, conociendo la disipación media generada por la bomba de calor geotérmica en los distintos ensayos, así como las cargas térmicas de la pila y electrolizador determinadas experimentalmente. Para su simulación, se utiliza un modelo en MatLab Simulink implementando un modelo termodinámico simplificado con masa térmica. Se realizaron análisis para cada escenario determinado en 4.1.

En la sección 8 se muestra el modelo termodinámico utilizado, así como el modelo de Simulink empleado. Al ser un modelo simplificado, lo que busca ilustrar es que a la potencia de disipación media registrada en los ensayos realizados en la bomba de calor geotérmica, si este cumple o no con los umbrales de temperatura registrados. En los escenarios donde la carga térmica es menor a la disipación, la caída de temperatura no es de carácter real, ya que el sistema de control detendría la circulación de la bomba de calor al alcanzar el umbral de 20°C.

En general, las simulaciones son un modelo simplificado idealizado, aspecto que se justifica en el apartado de limitaciones 1.9; en la práctica, el sistema opera bajo un control PID que crea variaciones en la potencia disipada instantánea e intenta mantener la temperatura dentro de los umbrales definidos; no obstante, el comportamiento de la disipación media se mantiene, como se demostró a través de todos los ensayos realizados a las distintas cargas térmicas.

#### Simulación de temperaturas de tanque de inercia para escenario de operación máxima

Para el escenario de operación máxima, se tomó la disipación media experimental registrada de la bomba de calor de 50 kW y se le aplicó la carga máxima registrada experimentalmente de la pila de combustible y electrolizador, si estuvieran operando en simultaneidad, partiendo de que el tanque estará al inicio a la temperatura mínima permitida de 20 °C y la operación será de 8 horas continuas.

En la **Figura 4.60** se muestra el comportamiento de la temperatura del tanque.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

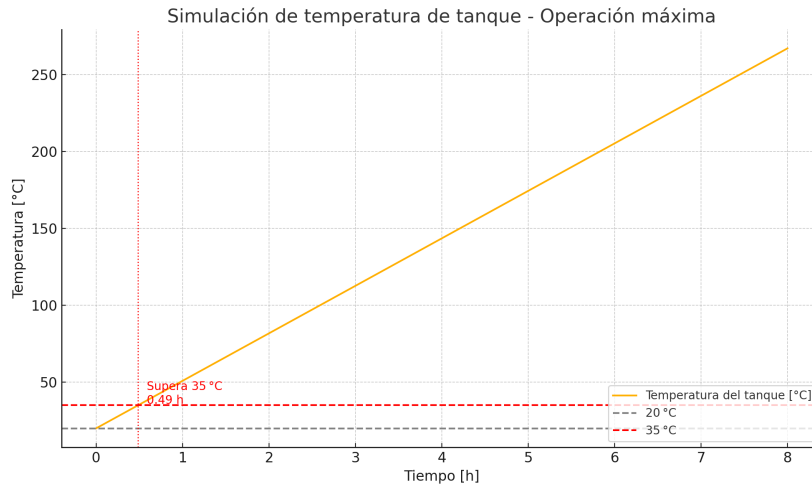


Figura 4.60: Temperatura de Tanque de Inercia bajo operación máxima

### Simulación de temperaturas de tanque de inercia para escenario de operación óptima

Para el escenario de operación óptima, se tomó la disipación media experimental registrada de la bomba de calor de 50 kW y se le aplicó la carga térmica registrada experimentalmente en los puntos de mayor eficiencia del electrolizador y la pila de combustible en un ciclo de operación de 8 horas y con temperatura inicial de 20°C.

En la Figura 4.61 se muestra el comportamiento de la temperatura del tanque.

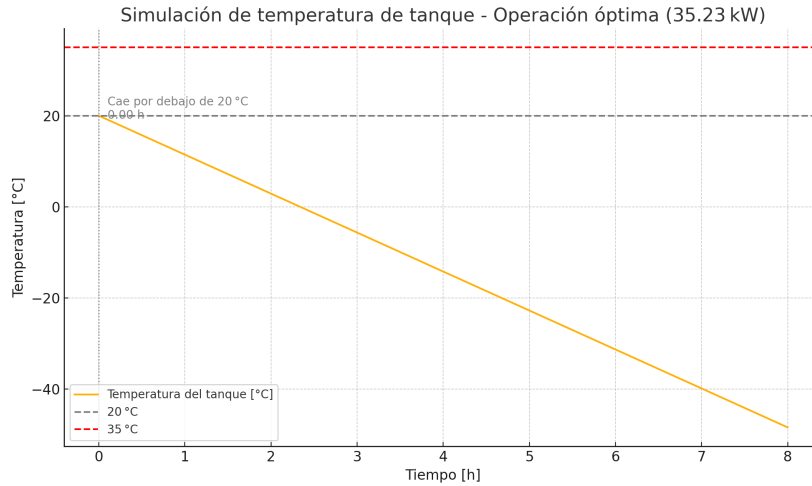


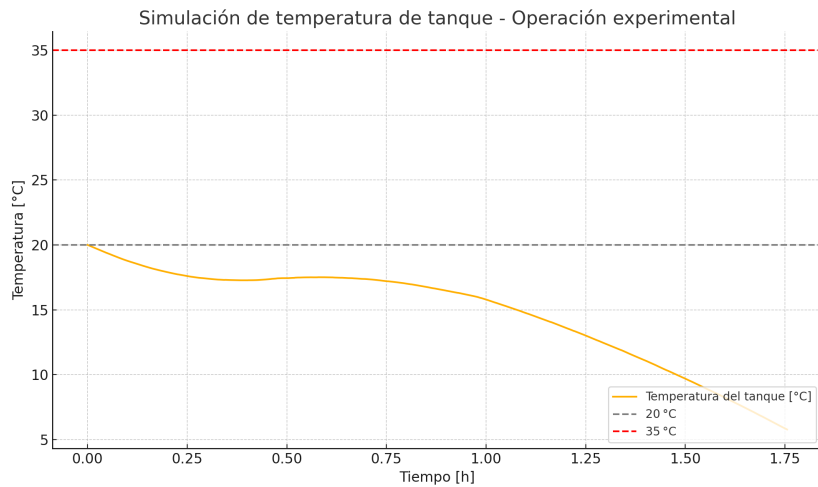
Figura 4.61: Temperatura de Tanque de Inercia bajo operación óptima

### Simulación de temperaturas de tanque de inercia para escenario de operación experimental

Para el escenario de operación experimental se tomaron las cargas térmicas de la pila de combustible y electrolizador obtenidas experimentalmente durante la realización de los ensayos de curva I-V y fueron aplicadas al modelo de tanque de inercia con la disipación media registrada experimentalmente.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

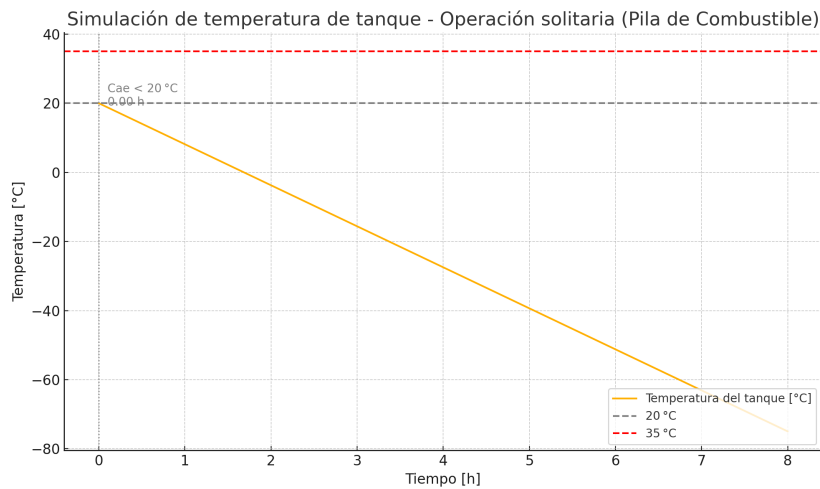
En la **Figura 4.62** se muestra el comportamiento de la temperatura del tanque.



**Figura 4.62:** Temperatura de Tanque de Inercia bajo operación experimental

### Simulación de temperaturas de tanque de inercia para escenario de operación aislada

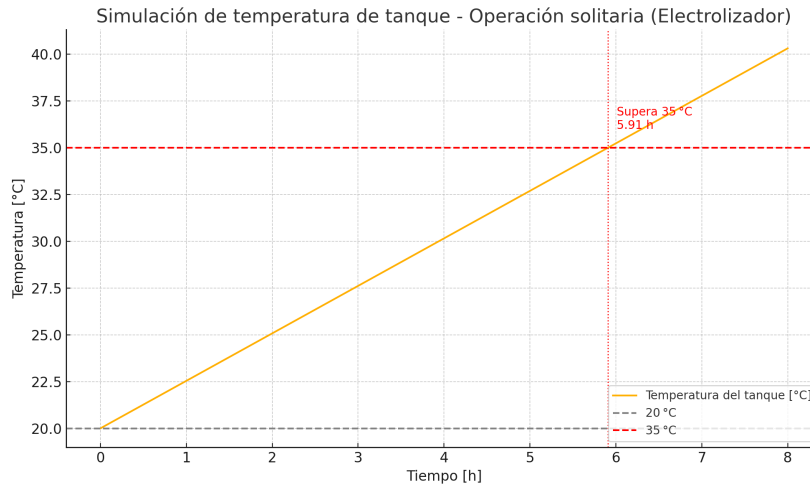
Para el escenario de operación aislada se tomaron las cargas térmicas máximas registradas por separado del electrolizador y la pila de combustible, y se aplicaron individualmente al modelo del tanque de inercia. Se simuló un ciclo de 8 horas con una temperatura inicial de 20°C. En la **Figura 4.63** se muestra el comportamiento de la temperatura del tanque para la carga aplicada de la pila de combustible.



**Figura 4.63:** Temperatura de Tanque de Inercia bajo operación aislada para pila de combustible

En la **Figura 4.64** se muestra el comportamiento de la temperatura del tanque para la carga aplicada del electrolizador.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS



**Figura 4.64:** Temperatura de Tanque de Inercia bajo operación aislada para el electrolizador

### 4.4. Objetivo IV

**Elaborar un presupuesto del sistema de bomba de calor geotérmica de refrigeración del sistema de electrolizador y pila de combustible de hidrógeno para su futura replicación en otros proyectos mediante un listado de componentes y tareas requeridas.**

En esta sección se muestra el presupuesto requerido para la instalación de la geotermia del edificio demostrador del CNH2. La elaboración del presupuesto resulta de utilidad para la replicación del mismo en otros proyectos. La metodología seguida consistió en meramente una recopilación de cotizaciones de proveedores de equipos y mano de obra para la instalación del sistema geotérmico del edificio demostrador del CNH2 con un ajuste por inflación a los precios estipulados en la documentación proporcionada por el CNH2.

#### 4.4.1. Presupuesto general de partes y costos asociados

Para la elaboración del presupuesto, se tomó como base información suministrada por el CNH2 de cotizaciones para la compra e instalación de equipos relacionados con el sistema de geotermia, pila de combustible y electrolizador. En la **Tabla 4.65** se presenta el presupuesto conteniendo la adquisición de equipos, construcción del pozo geotérmico, los costes de instalación y de puesta en marcha. Al presupuesto se le aplicó una corrección a los costes por inflación a través de la relación entre IPC de distintos períodos de tiempo. En la **Figura 7.23** de los anexos 7.3 se presenta un gráfico con la variación del IPC de los últimos diez años en España, utilizado como base en el desarrollo del presupuesto. El presupuesto de integración de la geotermia únicamente asciende a **83 753.33 €** (corregido con el IPC) y el total, incluyendo el electrolizador y la pila, asciende a **490 618.66€**.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

PRESUPUESTO DE INSTALACIÓN DE GEOTERMIA								
ITEM	Descripción	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total de Compra	Año de Compra	IPC - Año de Compra	IPC - Febrero 2025	Costo Ajustado por Inflación
<b>Equipos</b>								
Bomba de Calor Geotérmica	AERMEC WRL1630XHTUPQ**	1	10 083.54 €	10 083.54 €	2020	96.94	117.2	12 190.95 €
Tanque de Inercia G1500	GEISER 1500 CON MATERIAL CAMBIO FASE	1	1 635.82 €	1 635.82 €	2021	97.6	117.2	1 964.32 €
Vasos de Expansión	SEDICAL N50	5	94.40 €	472.00 €	2021	97.6	117.2	566.79 €
Intercambiadores	SEDICAL UFP 52/14	3	894.94 €	894.94 €	2021	97.6	117.2	1 074.66 €
Bombas de Circulación	WILLYONOS MAXO UFP 40 0.5-6	4	550.00 €	2 200.00 €	2021	97.6	117.2	2 641.80 €
Contador de Energía	ZENNER POTENCIAPRESION-TEMP	7	453.96 €	3 184.94 €	2021	97.6	117.2	4 017.20 €
Válvulas de 3 Vías	ALVILA DE BOLA 3 VÍAS CON SERVOMOTO	4	441.00 €	1 764.00 €	2021	97.6	117.2	2 065.08 €
Tanque de Frio 3300 L	ANQUE DE FRIO CON AISLAMIENTO XLATS	1	7 049.49 €	7 049.49 €	2021	97.6	117.2	8 465.17 €
Electrolizador	Electrolizador EREDDUE G16D	1	31 000.00 €	37 510.00 €	2014	92	117.2	47 784.48 €
Pila de Combustible	HyPM HD30	1	288 000.00 €	288 000.00 €	2016	94	117.2	359 080.85 €
<b>Instalación de Equipos</b>								
Instalación Depósito Inercia	Instalación Vertical sobre suelo de G1500	1	143.21 €	143.21 €	2019	97.2	117.2	172.68 €
Instalación de Bomba de Bomba de calor y conexión hidraulica	Bomba de calor y conexión hidraulica	1	8 704.00 €	8 704.00 €	2019	97.2	117.2	10 494.95 €
Instalación de Bombas de Bombas de impulsión con todos los accesorios	Bombas de impulsión con todos los accesorios	4	250.00 €	1 000.00 €	2019	97.2	117.2	1 205.76 €
Instalación de Contadores de Energía	Contadores de energía para calor y frío	7	41.60 €	291.20 €	2019	97.2	117.2	351.12 €
Instalación de Vasos de Expansión	Instalación de Vasos de Expansión	5	45.00 €	225.00 €	2019	97.2	117.2	271.30 €
Instalación de Válvulas de Tres Vías	DN50, tres vías con actuador	4	250.00 €	1 000.00 €	2019	97.2	117.2	1 205.76 €
Instalación de Intercambiador de Calor	Con conexiones	3	540.00 €	1 620.00 €	2019	97.2	117.2	1 953.33 €
<b>Pozos Geotérmicos</b>								
Perforación de Sondas	Metros de Perforación de las sondas	600	28.40 €	17 040.00 €	2019	97.2	117.2	20 546.17 €
Material de Relleno	Toneladas Energequid H2O, 1 W/m, K	12.8	196.35 €	2 514.01 €	2019	97.2	117.2	2 983.07 €
Transporte	Transportes de Material/Equipo para sondas	1	1 100.00 €	1 100.00 €	2019	97.2	117.2	1 326.34 €
Tubos de Sondas 40 mm	Sonda Simple 40x3,7mm PN16 PE HD100	6	433.75 €	2 602.50 €	2019	97.2	117.2	3 117.99 €
Despiece de Sondas	Pesas, Tubos de Llenado, Manguitos	6	147.00 €	882.00 €	2019	97.2	117.2	1 063.48 €
Tubos de Tubería de Conexión	Tuberías de 40 mm	124	1.96 €	243.04 €	2019	97.2	117.2	293.05 €
Tubos de Tubería de Conexión	Tuberías de 63 mm	50	4.81 €	240.50 €	2019	97.2	117.2	289.99 €
Colector	Arqueta Colector 6 tomas	1	1 668.90 €	1 668.90 €	2019	97.2	117.2	2 012.30 €
Anticongelante Propilenglicol	Litros de Anticongelante	300	2.36 €	708.00 €	2019	97.2	117.2	853.68 €
<b>Otros</b>								
Aseguramiento de Calidad	Calidad de Perforaciones - Ingeniero de Mina	1	566.00 €	566.00 €	2019	97.2	117.2	682.46 €
Puesta en Marcha	Pruebas Estanqueidad, revisión de	1	685.00 €	685.00 €	2019	97.2	117.2	825.95 €
<b>TOTAL DE PRESUPUESTO</b>								
Total sin corrección por inflación (impuestos incluidos)								395 018.63 €
Total con corrección por inflación (impuestos incluidos)								490 618.66 €
Total con Corrección Solo la Geotermia (sin pila o electrolizador)								83 753.33 €

Figura 4.65: Presupuesto de Instalación de Intercambio de Calor Geotérmico en el CNH2

En las Figuras 4.66 y 4.67 se presenta la distribución porcentual por rubros del presupuesto de la instalación en el edificio demostrador del CNH2. En uno de los casos, incluyendo la pila y el electrolizador; en el otro gráfico se excluyen estos dos elementos para evidenciar mejor los costos adicionales de la integración del sistema de intercambio geotérmico.

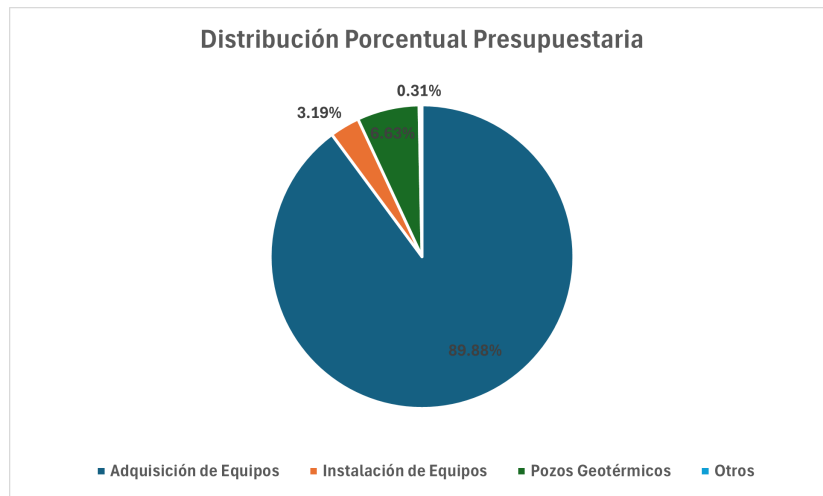
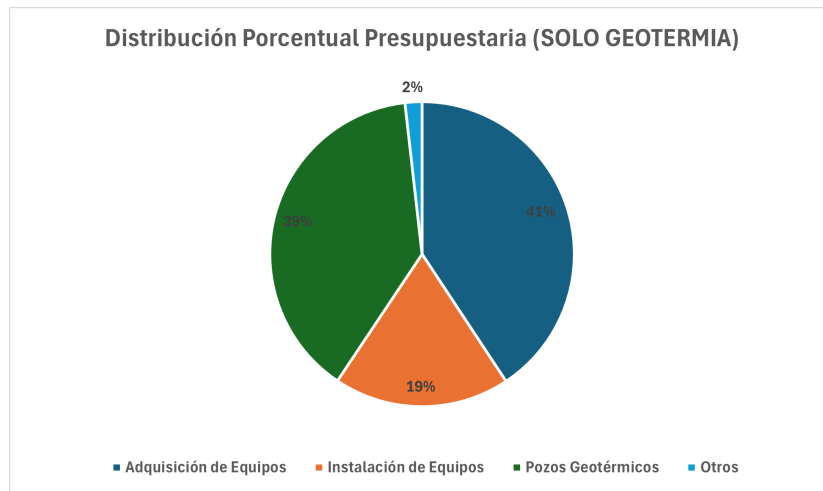


Figura 4.66: Distribución porcentual presupuestaria de instalación de geotermia con pila y electrolizador

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS



**Figura 4.67:** Distribución porcentual presupuestaria de solamente instalación geotérmica

Resulta importante denotar que al ser un presupuesto simple, no toma en cuenta que algunos de los equipos ya no existen en el mercado y algunos han sufrido una tendencia de reducción de costos de la tecnología a pesar del incremento del IPC.

### 4.5. Resumen y análisis de resultados finales obtenidos de criterios previamente definidos del estudio de viabilidad técnica

#### 4.5.1. Eficiencia

A partir de los datos obtenidos en los ensayos del electrolizador, de la pila de combustible y la bomba de calor geotérmica, se obtuvieron los siguientes resultados más relevantes para los indicadores definidos en la sección 4.1.

En la **Tabla 4.25** se muestran los COP obtenidos experimentalmente para los sistemas de refrigeración que operan como principales actualmente.

Tabla 4.25: Indicadores de COP en sistemas actuales de refrigeración

Indicador	Chiller de Electrolizador	Radiador de Pila
$COP_R$	4.67	2.57

En la **tabla 4.26** se muestran los COP de refrigeración obtenidos en los distintos ensayos realizados en la bomba de calor geotérmica. Asimismo, se muestra el NPLV, cuyo cálculo y trasfondo teórico se detalla en la sección 2.

Tabla 4.26: Resultados de COP y NPLV en ensayos de bomba de calor geotérmica

Ensayo	50°C→20°C (100 % Carga)	42.5°C→20°C (75 % Carga)	35°C→20°C (50 % Carga)	20°C→15°C (25 % Carga)
$COP_R$	4.07	4.59	5.05	3.90
NPLV (Refrigeración)	4.67			

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

A partir de los resultados obtenidos, se puede observar que al comparar el NPLV, no existe mejoría real con el sistema principal actual del electrolizador, pero si con el de la pila de combustible.

### 4.5.2. Capacidad de Refrigeración

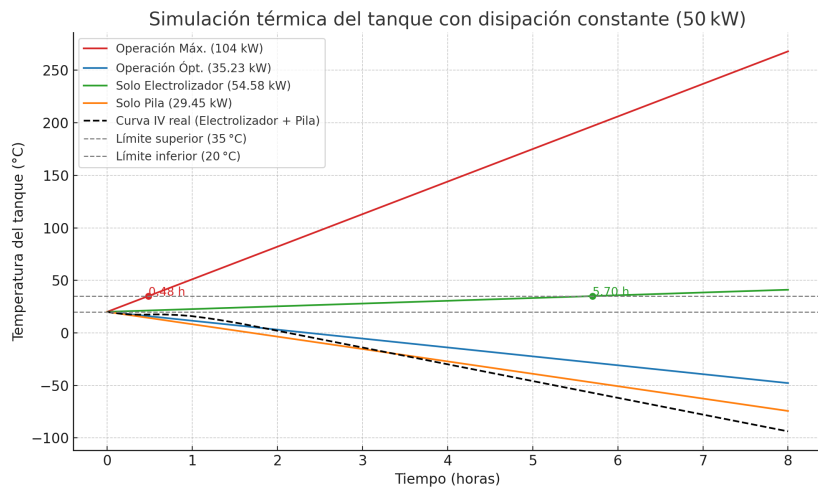
Para el criterio de capacidad de refrigeración, mediante ensayos físicos y simulaciones se examinó la capacidad de refrigeración del sistema mediante múltiples escenarios operativos planteados conjunto con los expertos del CNH2.

En la **Tabla 4.27** se muestra la comparativa entre la carga térmica aplicada en cada escenario y la disipación térmica media registrada durante los ensayos físicos.

Tabla 4.27: Comparativa entre carga térmica y capacidad de disipación en distintos escenarios de operación

Escenario de Operación	Carga Térmica Total (kW)	Disipación Media Bomba de Calor (kW)	Diferencia (kW)	¿Cumple con la disipación?
Operación Máxima	104.3	50.0	-54.3	No
Operación Óptima	35.23	50.0	+14.77	Sí
Operación de Experimentación	41.60	50.0	+8.40	Sí
Operación Solitaria (Electrolizador)	54.58	50.0	-4.58	Parcialmente
Operación Solitaria (Pila)	29.45	50.0	+20.55	Sí

Asimismo, en la **Figura 4.68** se muestra la simulación de temperaturas del tanque bajo los distintos escenarios operativos en un ciclo de dos horas. En la sección 4.3 se detalla con mayor énfasis dicho comportamiento en cada escenario.



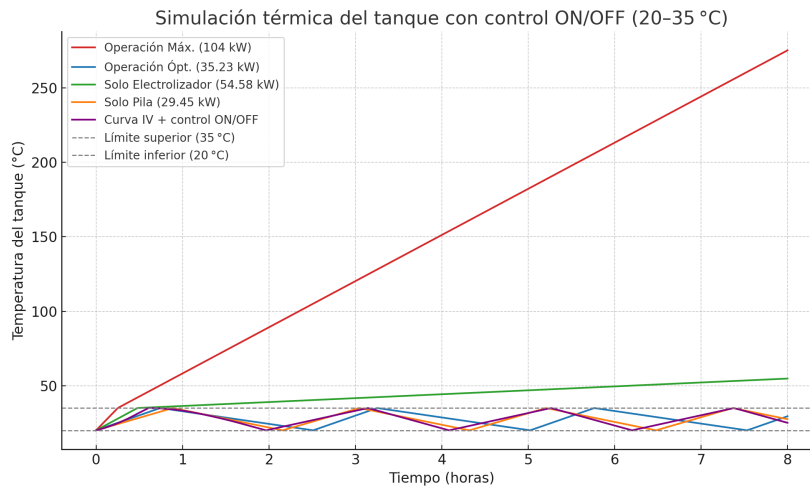
**Figura 4.68:** Comparativa de temperaturas de tanque de inercia bajo los cuatro escenarios

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

A partir de los resultados obtenidos, se puede ver que el sistema no es capaz de disipar en el escenario de operación máxima, y logra solo mantener la temperatura del tanque dentro de los umbrales definidos durante solo 0.54 horas.

El sistema puede hacerlo para los escenarios de operación óptima, experimentación y solitaria. En las gráficas de la sección 4.3 se muestra que la temperatura decrecería más allá de 20°C, esto es solo una limitante de la simulación que no muestra los arranques y pares de la bomba de calor para mantener los *setpoints* definidos como seguros para la pila y el electrolizador.

En la **Figura 4.69** se muestra una simulación bajo un esquema de control ON/OFF en los *setpoints* de 20°C y 35°C. Esta simulación permite obtener una aproximación más real para el comportamiento de los escenarios en los cuales la capacidad media de disipación excede a la carga térmica aplicada.



**Figura 4.69:** Comparativa de temperaturas de tanque de inercia bajo los cuatro escenarios

Cabe destacar que este análisis es válido únicamente para la configuración actual de la bomba de calor geotérmica instalada en el CNH2, no obstante si bien está fuera del alcance de este TFG, el escenario de operación máxima puede llegar a ser viable si se hace una optimización de las temperaturas de *setpoints* y los parámetros del controlador PID de la bomba de calor geotérmica. Lo anterior forma parte de las recomendaciones de este TFG.

### 4.5.3. Rendimiento de Pila de Combustible y Electrolizador

En la sección 4.3 se mostraron las curvas I-V experimentales de la pila de combustible y electrolizador. Con la integración del sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica no se espera que estas sufran una variación. Siempre y cuando:

- La modificación requerida de incluir una válvula termo-estática hace que la pila de combustible no se vea afectada en el periodo transitivo mientras alcanza su temperatura nominal de operación, por lo que con esta válvula no existe variación en el rendimiento de la pila de combustible.
- El electrolizador no ve afectado su rendimiento, siempre que la temperatura de entrada del agua de refrigeración no supere el umbral de los 35°C, dato dado por el fabricante del electrolizador.

En la realización de los ensayos fue posible la obtención experimental de la eficiencia máxima del electrolizador y la pila de combustible. En la **Tabla 4.28** se muestra una comparativa entre valores

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

obtenidos en los ensayos comparados con los valores esperados de acuerdo con los fabricantes y un análisis de los motivos de su desviación.

Tabla 4.28: Comparativa de eficiencia máxima: valores experimentales vs. esperados

<b>Eficiencia máxima</b>	<b>Valor Experimental (%)</b>	<b>Valor Esperado (%)</b>	<b>Causa probable de desviación</b>
Electrolizador Erredue G16D	49.0	60	El equipo cuenta con más de 10 años de uso, por lo que se encuentra avanzado en su ciclo de vida, lo cual afecta negativamente su eficiencia máxima.
Pila de combustible HyPM HD30	40.24	55	El equipo estuvo inactivo durante un tiempo prolongado, lo cual pudo afectar el estado de las membranas. Además, las pruebas no alcanzaron los 30 kW de carga máxima por limitaciones de la carga aplicada, lo que afecta el valor máximo de eficiencia observable.

### 4.5.4. Nivel de modificación requerido para la integración

Las modificaciones requeridas se detallaron en la sección 4.2, estas no implican una intervención que haga inviable o requiera un rediseño completo del sistema ya instalado en el edificio demostrador del CNH2. Sin embargo, se destacan algunos aspectos:

- Se requiere la inclusión de una válvula termo-estática mezcladora en el circuito interno de refrigeración de la pila de combustible. Su función principal es prevenir afectaciones durante la fase transitoria de arranque y estabilización, momento en el que el sistema debe alcanzar su temperatura nominal de operación. Dado que la pila no posee capacidad de regulación electrónica del caudal de refrigeración suministrado por la bomba, la ausencia de esta válvula podría provocar una caída excesiva de temperatura, lo cual generaría alarmas y una posible detención del sistema por condiciones fuera del rango operativo.
- Se requiere la limpieza y reajuste de tuberías para la integración con el electrolizador. El electrolizador tiene un requerimiento estricto de utilizar agua des-ionizada para refrigeración a fin de evitar efectos nocivos de una alta conductividad del agua de refrigeración en todos los subsistemas del electrolizador.
- En concordancia con los resultados obtenidos en el *RCM*, debe considerarse la inclusión de un

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

sistema de medición y tratamiento de dureza del agua de alimentación al tanque de inercia, para la reducción de riesgos ligados a la afectación de los equipos por incrustaciones.

### 4.5.5. Mantenibilidad del sistema geotérmico

La mantenibilidad, detallada en el apartado 4.2, arrojó una serie de hallazgos importantes sobre la mantenibilidad del sistema geotérmico ubicado en la microrred de edificio demostrador del CNH2.

- Los intercambiadores de calor de placas planas tienen una probabilidad de ocurrencia de fallo alta y una severidad de moderada a alta. La falta de tratamiento de dureza al agua del circuito de refrigeración además de los ciclos de temperatura a los cuales podría estar sometido el sistema supone un riesgo elevado en la generación de incrustaciones que pueden llevar a fallo catastrófico con efectos en los equipos críticos de electrolizador y pila de combustible. Asimismo podría suceder con los intercambiadores contenidos dentro de la bomba de calor geotérmica.
- Las intervenciones en la bomba de calor geotérmica pueden presentar problemas en la gestión de los repuestos al depender de un solo proveedor que a su vez depende de un fabricante localizado fuera de España.
- La mayoría de modos de falla no tiene una consecuencia crítica para la seguridad de los sistemas con hidrógeno, principalmente porque tanto la pila de combustible como el electrolizador tienen lógicas de control y sensores para la prevención de estos escenarios críticos, solo se pararía su operación.

### 4.5.6. Escalabilidad y replicabilidad

A partir de los ensayos físicos y simulaciones realizadas en el apartado 4.3, los criterios de escalabilidad y replicabilidad obtuvieron los siguientes indicadores y análisis cualitativos.

En la **Tabla 4.29** se muestran los indicadores determinados para el criterio de escalabilidad y replicabilidad.

Tabla 4.29: Indicadores de escalabilidad y adaptabilidad del sistema geotérmico

Indicador	Valor
Capacidad de refrigeración ajustable	~8 kW por pozo adicional de 100 m (basado en 0.104 m <sup>3</sup> *K/W)
Variación de eficiencia energética bajo distinta carga térmica aplicada	8.17 %
Flexibilidad de carga térmica	25 % a 100 % carga <b>operativa</b> , con COP (Refrigeración) > 3.9
Compatibilidad con diferentes tipos de suelos y condiciones ambientales	<b>No existe variación en temperaturas del pozo geotérmico por efecto estacional, 0.0%. La variación a distintas conductividades térmicas de suelo es mínima, ±0,00012.</b>

El sistema es altamente replicable y escalable, siempre y cuando se consideren desde la etapa del diseño del sistema la carga térmica y las condiciones geológicas del sitio. Se sabe que una de las principales ventajas de los sistemas geotérmicos es su poca variabilidad estacional [53].

# Capítulo 5

## Conclusiones

- Se llevó a cabo una exhaustiva investigación y recopilación bibliográfica de normativas, guías técnicas y documentos oficiales, con el propósito de identificar las variables clave de caracterización del electrolizador, la pila de combustible de hidrógeno y el sistema de refrigeración mediante bomba de calor geotérmica instalada en el CNH2. Este proceso permitió establecer una base técnica que condujo a la definición de seis criterios para evaluar la viabilidad técnica de integrar la bomba de calor geotérmica como sistema principal de refrigeración de la microrred compuesta de un electrolizador y pila de combustible del CNH2.
- La integración del sistema de refrigeración geotérmico se desarrolló mediante el levantamiento de los planos electromecánicos del sistema, lo cual permitió identificar con precisión las intervenciones técnicas necesarias para su integración completa. Adicionalmente, se evaluó el criterio de mantenibilidad del sistema a través de un análisis centrado en la confiabilidad (RCM), aplicado a los principales equipos que conforman el sistema de refrigeración geotérmico, identificando modos de falla relevantes y sus consecuencias con un enfoque a la seguridad de los sistemas que operan con hidrógeno.
- Se realizaron ensayos físicos sobre el electrolizador, la pila de combustible y la bomba de calor geotérmica, complementados con simulaciones del intercambiador geotérmico (pozo) y del tanque de inercia. Esto permitió validar las variables de caracterización previamente definidas, así como establecer los criterios de eficiencia energética, capacidad de refrigeración, rendimiento del sistema pila-electrolizador, y escalabilidad y replicabilidad. En conjunto, estos criterios proporcionan una base integral para valorar la viabilidad técnica de la integración del sistema de refrigeración geotérmico a la microrred de electrolizador y pila de combustible del CNH2.
- Se elaboró un presupuesto detallado del sistema de refrigeración geotérmico analizado, con el objetivo de que sirva como insumo técnico y económico para futuras implementaciones de bombas de calor geotérmicas en microrredes con una arquitectura similar a la del CNH2, facilitando así su futura replicabilidad.

El estudio realizado demuestra que la integración de un sistema de refrigeración con bomba de calor geotérmica en la microrred del CNH2 es técnicamente viable, especialmente para la refrigeración de la pila de combustible, donde se evidencian mejoras en eficiencia. Aunque no se superan las prestaciones del sistema actual del electrolizador, el sistema geotérmico permite mantener temperaturas seguras en la mayoría de escenarios, con requerimientos mínimos de modificación para su implementación. Se confirma su compatibilidad, escalabilidad y replicabilidad para futuras implementaciones en otras microrredes, siempre que se considere adecuadamente la carga térmica desde la etapa de diseño. A nivel de mantenibilidad, debe tenerse especial consideración a los intercambiadores de calor de la pila de combustible y electrolizador.

## Capítulo 6

# Recomendaciones

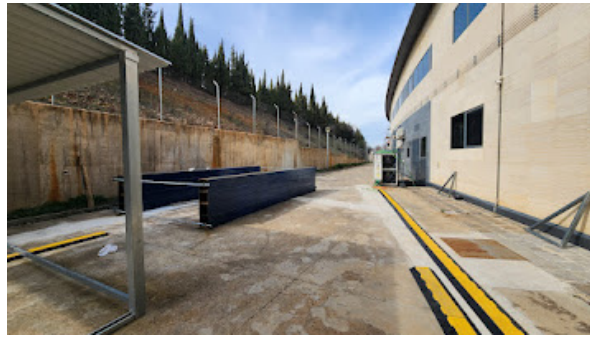
- En el contexto de la instalación del CNH2, se recomienda evaluar la posibilidad de incorporar un esquema de recuperación parcial del calor generado por la pila de combustible y el electrolizador, con el fin de aprovecharlo en el sistema de climatización del edificio, en vez de su disipación directa al intercambiador geotérmico. Este análisis permitiría estimar su impacto sobre la eficiencia global del sistema y los ciclos de operación de la bomba de calor geotérmica. Asimismo, una vez completada la integración física de la bomba de calor geotérmica, sería conveniente llevar a cabo un estudio de optimización de los umbrales de temperatura de *setpoint* y del control PID de la bomba de calor, orientado a mejorar su desempeño energético para la carga térmica específica.
- Desde el enfoque investigativo, se sugiere ampliar el alcance experimental mediante la ejecución de ensayos durante distintas estaciones del año y con ciclos de operación más prolongados, lo cual permitiría obtener indicadores más representativos. Se sugiere también la prueba del sistema bajo el esquema de *freecooling* (un bypass de los compresores y únicamente operar la bomba del pozo geotérmico) el mismo podría tener un impacto positivo en la eficiencia. Además, realizar ensayos con el sistema completamente integrado fortalecería la validez de los resultados obtenidos. Paralelamente, se recomienda considerar el desarrollo de un gemelo digital o el empleo de una herramienta de modelado especializada, que facilite una caracterización dinámica y detallada del comportamiento del sistema.
- A nivel operativo, se propone utilizar el análisis de *RCM* desarrollado como punto de partida para la elaboración de un modelo de gestión del mantenimiento, que permita sistematizar las acciones preventivas y correctivas, optimizando así la disponibilidad y confiabilidad del sistema de refrigeración geotérmico.

# Capítulo 7

## Anexos

### 7.1. Recorrido fotográfico de la instalación en el CNH2.

#### 7.1.1. Zona de pozo geotérmico



**Figura 7.1:** Zona de pozo geotérmico



**Figura 7.2:** Colectores de pozo geotérmico

## CAPÍTULO 7. ANEXOS

### 7.1.2. Entrada desde pozo geotérmico



**Figura 7.3:** Entrada y Retorno a Pozo Geotérmico

### 7.1.3. Bomba de calor geotérmica



**Figura 7.4:** Bomba de calor geotérmica



**Figura 7.5:** Bomba de calor geotérmica



**Figura 7.6:** Bomba de calor geotérmica

## CAPÍTULO 7. ANEXOS

### 7.1.4. Tanque de inercia



Figura 7.7: Tanque de inercia

### 7.1.5. Colectores (Manifold)



Figura 7.8: Colectores

## CAPÍTULO 7. ANEXOS

### 7.1.6. Tanque de almacenamiento de frío



**Figura 7.9:** Tanque de almacenamiento de frío

### 7.1.7. Intercambiador de placas planas



**Figura 7.10:** Intercambiador de almacenamiento de frío

## CAPÍTULO 7. ANEXOS

### 7.1.8. Tuberías a sala de electrolizador y pila



Figura 7.11: Tuberías a sala de Electrolizador y Pila

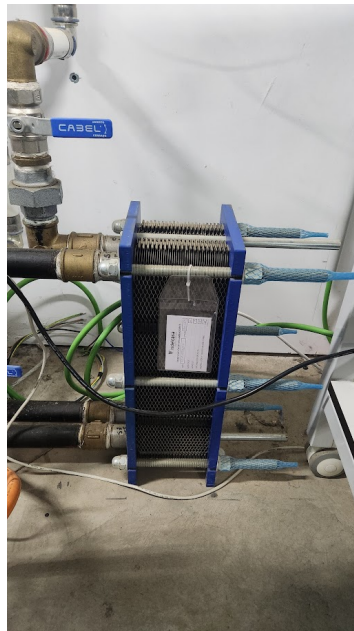
### 7.1.9. Intercambiador placas planas de pila



Figura 7.12: Intercambiador placas planas de Pila

## CAPÍTULO 7. ANEXOS

### 7.1.10. Intercambiador placas planas de electrolizador



**Figura 7.13:** Intercambiador placas planas de Electrolizador

### 7.1.11. Intercambiadores tubulares de circuito (prevista de integración no completa) para recuperación y aprovechamiento del calor en climatización



**Figura 7.14:** Intercambiadores tubulares

## CAPÍTULO 7. ANEXOS

### 7.1.12. Electrolizador



**Figura 7.15:** Electrolizador Erredue G16D 60 kW



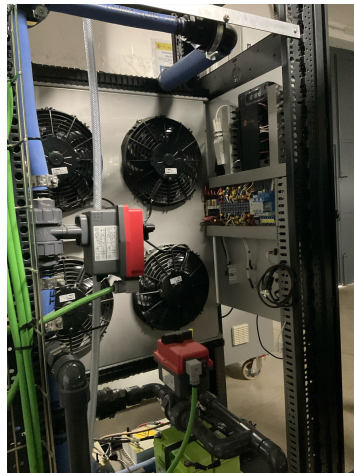
**Figura 7.16:** Electrolizador Erredue G16D 60 kW

## CAPÍTULO 7. ANEXOS

### 7.1.13. Pila de combustible



**Figura 7.17:** Pila de combustible Heliocentris HyPM HD 30



**Figura 7.18:** Pila de combustible Heliocentris HyPM HD 30

## CAPÍTULO 7. ANEXOS


### 7.1.14. Gabinete de conexiones de sala de geotermia



**Figura 7.19:** Gabinete de conexiones

## 7.2. Fichas Técnicas

### 7.2.1. Pila de Combustible HyPM HD 30



Advanced Hydrogen Solutions

## HyPM™ HD 30

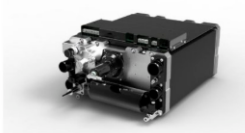
### Heavy Duty Fuel Cell Power Module

- Liquid-cooled advanced MEA PEM stack
- Integral Balance of Plant
- Advanced onboard controls and diagnostics
- Comes with low pressure cathode air delivery
- -46°C sub-zero shutdown capability

#### Technical Data

Rated Electrical Power	33 kW continuous
Operating Current	0 to 500 A <sub>cc</sub>
Operating Voltage	60 to 120 V <sub>oc</sub>
Peak Efficiency	55% <sup>1)</sup>
Response	< 5 s from off to idle < 3 s from idle to rated power
Fuel	Dry Hydrogen >99.98%
Oxidant	Ambient Air
Coolant	De-ionized water (DI H <sub>2</sub> O) or 50% ethylene glycol / DI H <sub>2</sub> O
Ambient Temperature	-10 to +55°C operating -40 to +65°C storage (-2°C with automated freeze shutdown feature)
Communication	CAN v2.0A (standard 11 bit)

<sup>1)</sup> Efficiency based on LHV of H<sub>2</sub>, 25°C, 101.3 kPa, including onboard parasitic loads, excluding radiator fan and water pump.



- Rapid start-up and dynamic response
- Unlimited start-stop cycling
- Robust, rugged and reliable
- No water for humidification required
- No nitrogen required for shutdown

#### Physical

Dimensions L x W x H <sup>2)</sup>	605 x 410 x 265 mm
Mass <sup>3)</sup>	61 kg
Volume <sup>3)</sup>	66 L

<sup>2)</sup> Excluding air delivery and optional water pump.  
<sup>3)</sup> Including air delivery and optional water pump.

#### Includes

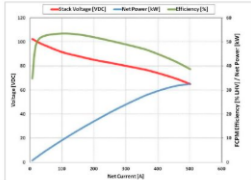
- Air delivery unit (low pressure blower)
- Integration and operation manual
- Product Warranty

#### Optional

- Coolant pump
- Thermal management kit
- Diagnostics software
- Power electronics components

#### Applications

- Urban transit buses
- Heavy duty commercial fleet vehicles
- Marine
- Aerospace



HyPM™ HD30 Typical Performance<sup>1)</sup>

Actual delivered product may differ in appearance.  
Specifications subject to change without prior notification.  
Printed in Canada © Hydrogenics Corporation 2012-04-16

[www.hydrogenics.com](http://www.hydrogenics.com)  
[fuelsales@hydrogenics.com](mailto:fuelsales@hydrogenics.com)

Figura 7.20: Ficha Técnica Pila HyPM HD 30

CAPÍTULO 7. ANEXOS

7.2.2. Electrolizador ClanTech Erredue G16D 60 kW

Modello	G13	G16	G18
Dimensioni mm Dimensions mm	950x2000x2000	950x2000x2000	1650
Peso kg Weight kg	1550	1700	
Produzione idrogeno m <sup>3</sup> /h Hydrogen production m <sup>3</sup> /h	8,66	10,66	
Produzione ossigeno m <sup>3</sup> /h Oxygen production m <sup>3</sup> /h	4,33	5,33	
Pressione idrogeno e ossigeno Mod. STD (MP/HP barg) Hydrogen and oxygen pressure Mod. STD (MP/HP barg)	* 5/12/30	* 5/12/30	*
Purezza idrogeno % Hydrogen purity %	99,5%	99,5%	
Purezza idrogeno versione D % Hydrogen purity (model D) %	99,9995%	99,9995%	†
Purezza ossigeno % Oxygen purity %	99%	99%	
Punto di rugiada STD °C Dew point °C	** -10/-20/-30	** -10/-20/-30	**
Alimentazione elettrica Power supply	3x400Vac+N-50/60Hz	3x400Vac+N-50/60Hz	3x
Potenza installata Kwh Power consumption Kwh	46	57	
Consumo acqua demi alla massima potenza litri/h Demineralized water consumption at the maximum power liters/h	7,4	9	

\* Disponibile in tre differenti pressioni per lo stesso modello / Available in three different pressures  
\*\* In funzione della pressione del generatore / Depending on the generator's pressure

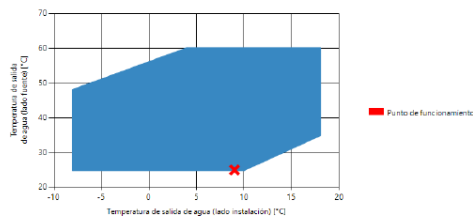
Figura 7.21: Ficha Técnica Electrolizador ClanTech Erredue G16D 60 kW

## CAPÍTULO 7. ANEXOS

### 7.2.3. Bomba de Calor Geotérmica AERMEC WRL161XH°TUPQ°°

**AERMEC** WRL161XH°TUPQ°°

Enfriamiento		
Potencia	kW	49,5
Potencia absorbida	kW	8,3
Absorción	A	17
EER	WW	5,95
Círculo lado fuente		
Temperatura de entrada de agua	°C	15,0
Temperatura de salida de agua	°C	25,0
Salto térmico de agua	°C	10,0
Etilenoglicol	%	0
Caudal de agua	l/s	1,355
Presión disponible	kPa	272
Factor de ensuciamiento	(m² K)/W	0
Círculo lado instalación		
Temperatura de entrada de agua	°C	14,0
Temperatura de salida de agua	°C	9,0
Salto térmico de agua	°C	5,0
Etilenoglicol	%	0
Caudal de agua	l/s	2,3531
Presión disponible	kPa	150
Factor de ensuciamiento	(m² K)/W	0



The certified standard performances, conditions and the certification of the software can be verified in [www.eurovent-certification.com](http://www.eurovent-certification.com).

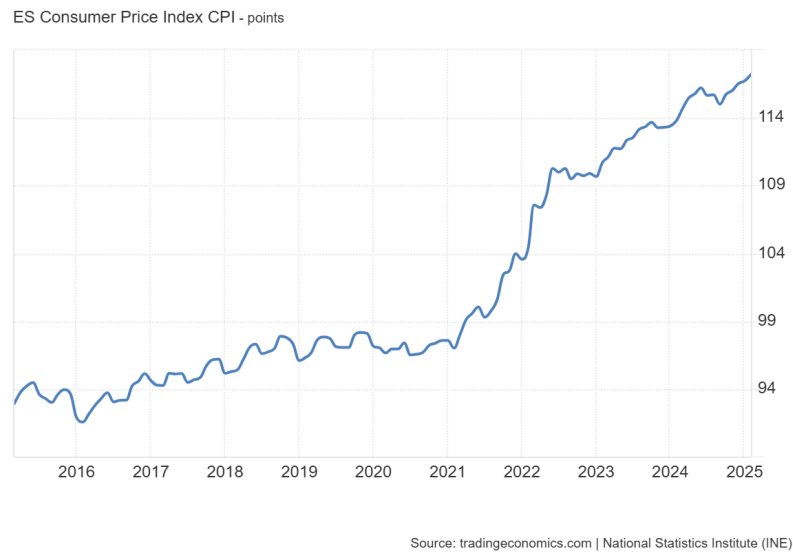
18/05/2020

Aermecc S.p.A. - Magellano v6.1.1

2 / 6

**Figura 7.22:** Ficha Técnica AERMEC WRL161XH°TUPQ°°

### 7.3. Variación del IPC en España de los últimos 10 años



**Figura 7.23:** Variación Mensual del IPC en España del INE. [63]

### 7.4. Proceso de realización de ensayos físicos

#### 7.4.1. Ensayo de Electrolizador



**Figura 7.24:** Ensayo de Electrolizador



**Figura 7.25:** Refrigeración integrada de Electrolizador

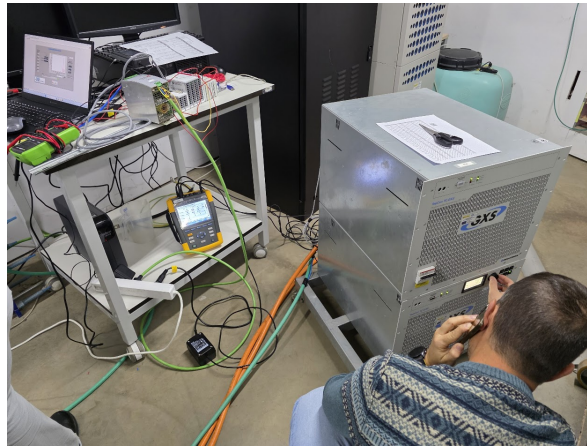


**Figura 7.26:** Refrigeración integrada de Electrolizador



**Figura 7.27:** Chiller de Electrolizador

#### 7.4.2. Ensayo de Pila de Combustible



**Figura 7.28:** Ensayo de pila de combustible



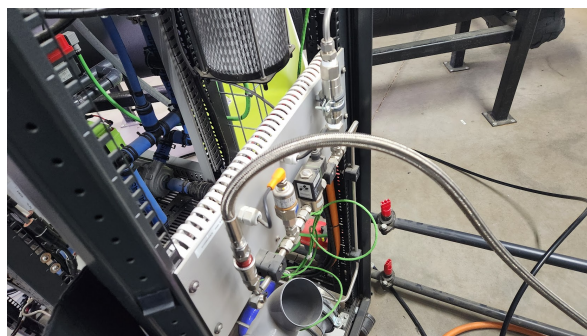
**Figura 7.29:** Ensayo de pila de combustible



**Figura 7.30:** Ensayo de pila de combustible



**Figura 7.31:** Ensayo de pila de combustible



**Figura 7.32:** Ensayo de pila de combustible



**Figura 7.33:** Ensayo de pila de combustible

**7.4.3. Ensayo de sistema geotérmico con tanque de inercia simulando carga térmica de electrolizador y pila**



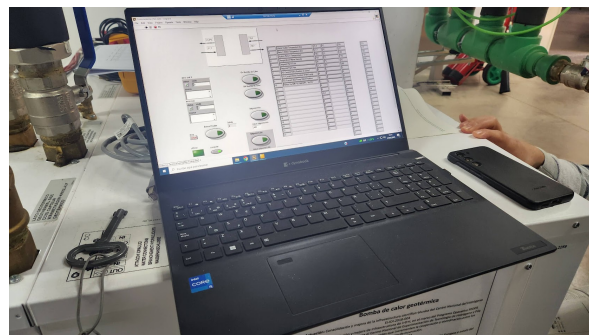
**Figura 7.34:** Ensayo de sistema geotérmico



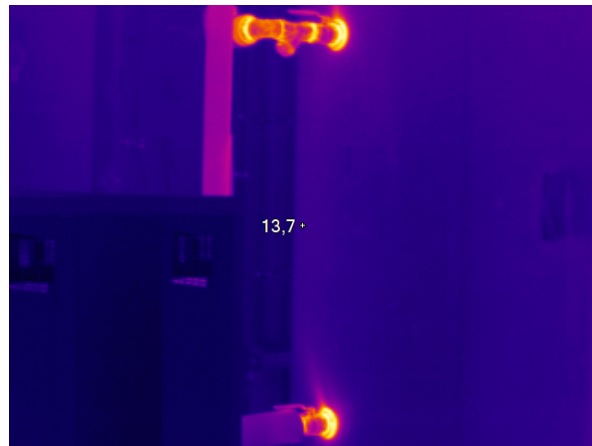
**Figura 7.35:** Ensayo de sistema geotérmico



**Figura 7.36:** Ensayo de sistema geotérmico



**Figura 7.37:** Ensayo de sistema geotérmico



**Figura 7.38:** Vista térmica de tanque de inercia



**Figura 7.39:** Vista térmica de bomba de calor geotérmica

# Capítulo 8

## Apéndice

### 8.1. Simulaciones

#### 8.1.1. Código para resistencia equivalente de intercambiador geotérmico

```
1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import numpy as np
3 from numpy import pi
4 import pygfunction as gt
5
6 def calculate_resistance(nBoreholes, H, r_b, B, pos_pipes, r_in, r_out, k_p, k_s, k_g,
7                          m_flow_network, fluid, cp_f, rho_f, mu_f, k_f, epsilon):
8     boreField = []
9     bore_connectivity = []
10    for i in range(nBoreholes):
11        x = i * B
12        borehole = gt.boreholes.Borehole(H, 4.0, r_b, x, 0.)
13        boreField.append(borehole)
14        bore_connectivity.append(i - 1)
15
16    R = np.zeros((nBoreholes, len(m_flow_network)))
17    for i in range(nBoreholes):
18        for j, m_flow_network_j in enumerate(m_flow_network):
19            m_flow_pipe = m_flow_network_j
20            R_p = gt.pipes.conduction_thermal_resistance_circular_pipe(r_in, r_out,
21                               k_p)
21            h_f = gt.pipes.convective_heat_transfer_coefficient_circular_pipe(
22                m_flow_pipe, r_in, mu_f, rho_f, k_f, cp_f, epsilon)
23            R_f = 1.0 / (h_f * 2 * pi * r_in)
24
25            UTubes = [gt.pipes.SingleUTube(pos_pipes, r_in, r_out, borehole, k_s, k_g,
26                                           R_f + R_p)
27                       for borehole in boreField]
28
29            network = gt.networks.Network(
30                boreField[:i+1], UTubes[:i+1], bore_connectivity[:i+1])
31
32            R_field = gt.networks.network_thermal_resistance(network, m_flow_network_j
33                , cp_f)
34            R[i, j] = R_field
35
36    return R
37
38 def main():
```

## CAPÍTULO 8. APÉNDICE

```
37     config = {"6_boreholes": (6, 100, 0.09, 7.5)}
38
39     r_out, r_in, D_s, epsilon = 0.04, 0.035, 0.05, 1.0e-6
40     pos_pipes = [(-D_s, 0.), (D_s, 0.)]
41
42     k_s, k_g, k_p = 2.0, 1.0, 0.4
43     m_flow_network = 10*np.arange(-2, 0.301, 0.05)
44
45     fluid = gt.media.Fluid('Water', 15.)
46     cp_f, rho_f, mu_f, k_f = fluid.cp, fluid.rho, fluid.mu, fluid.k
47
48     results = {label: calculate_resistance(*params, pos_pipes, r_in, r_out, k_p,
49                                         k_s, k_g, m_flow_network, fluid, cp_f,
50                                         rho_f, mu_f, k_f, epsilon)}
51
52     for label, params in config.items():
53
54         R_6_boreholes = results["6_boreholes"][-1, :]
55         U_overall = 1 / R_6_boreholes
56         idx = (np.abs(m_flow_network - 1.335)).argmin()
57
58         print(f"Resistencia t rmica a 1.335 kg/s: {R_6_boreholes[idx]:.6f} m.K/W")
59         print(f"Coeficiente de transferencia de calor total: {U_overall[idx]:.6f} W/m .K")
60         print(f"Coeficiente total del intercambiador: {U_overall[idx]*6*100:.6f} W/K")
61
62     fig, ax1 = plt.subplots()
63     ax1.set_xlabel(r'$\dot{m}$ [kg/s]')
64     ax1.set_ylabel(r'Resistencia t rmica efectiva $R^*_{campo}$ [m.K/W]')
65     ax1.plot(m_flow_network, R_6_boreholes, label="6_sondas")
66     ax1.legend()
67     plt.show()
68
69     fig, ax2 = plt.subplots()
70     ax2.set_xlabel(r'$\dot{m}$ [kg/s]')
71     ax2.set_ylabel(r'Coeficiente de transferencia de calor $U$ [W/m .K]')
72     ax2.plot(m_flow_network, U_overall, label="6_sondas U")
73     ax2.legend()
74     plt.show()
75
76 if __name__ == '__main__':
77     main()
```

Listing 8.1: Cálculo de resistencia térmica con pygfunction.

### 8.1.2. Código para obtención de disposición geométrica de pygfunction

```
1 import pygfunction as gt
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 def generate_H_shaped_borehole_geometry(H=100.0, D=4.0, r_b=(0.0326 / 2) + 0.0032):
5     """
6     Generate and visualize an H-shaped 6-borehole field based on the previous borehole
7     configuration.
8
9     Parameters:
10    - H (float): Borehole depth (m) (default = 100m).
11    - D (float): Borehole buried depth (m) (default = 4m).
12    - r_b (float): Borehole radius (m) (default = computed from pipe diameter).
13
14    Returns:
15    - fig (matplotlib.figure.Figure): The figure object containing borehole
16    visualization.
17    """
```

## CAPÍTULO 8. APÉNDICE

```
16
17     # Define borehole positions for the H-shaped configuration
18     boreholes = [
19         gt.boreholes.Borehole(H, D, r_b, x=-1.5, y= 2.5),
20         gt.boreholes.Borehole(H, D, r_b, x= 1.5, y= 2.5),
21         gt.boreholes.Borehole(H, D, r_b, x=-0.8, y= 0.0),
22         gt.boreholes.Borehole(H, D, r_b, x= 0.8, y= 0.0),
23         gt.boreholes.Borehole(H, D, r_b, x=-1.5, y=-2.5),
24         gt.boreholes.Borehole(H, D, r_b, x= 1.5, y=-2.5)
25     ]
26
27     # Visualize borehole field
28     fig = gt.boreholes.visualize_field(boreholes, viewTop=True, view3D=True, labels=
29         True, showTilt=True)
30     plt.show()
31
32     return fig
33
34 # Call the function to generate and visualize the H-shaped borehole field
35 generate_H_shaped_borehole_geometry()
```

Listing 8.2: Disposición geométrica de pozos geotérmicos con pygfunction.

### 8.1.3. Código de cálculo de temperaturas del subsuelo

El código se desarrolló en torno a las recomendaciones de la guía técnica del IDAE para sistemas de intercambio geotérmico. [53]

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 import seaborn as sns
4 import pandas as pd
5
6 # Estilo visual elegante y profesional
7 sns.set(style="whitegrid")
8 plt.rcParams.update({
9     'font.size': 12,
10    'axes.titlesize': 16,
11    'axes.labelsize': 14,
12    'xtick.labelsize': 11,
13    'ytick.labelsize': 11,
14    'legend.fontsize': 11
15 })
16
17 # Par metros de Puertollano
18 Ta = 15.4          # Temperatura media anual del aire [ C ]
19 Ao = 12.0          # Amplitud anual superficial [ C ]
20 alpha = 0.05      # Difusividad térmica [ m / d a ]
21 t0 = 17           # D a del a o con temperatura mínima
22 omega = 2 * np.pi / 365 # Frecuencia angular [1/d a]
23 d = np.sqrt(2 * alpha / omega) # Profundidad de amortiguamiento
24
25 # D as y profundidades de interés
26 days = np.arange(1, 366)
27 depths = [1, 5] + list(range(10, 101, 10)) # 1 m, 5 m, 10 100 m cada 10
28
29 # C lculo de temperatura en cada profundidad
30 temps = {}
31 for z in depths:
32     Tz = Ta + Ao * np.exp(-z/d) * np.cos(omega * (days - t0) - z/d)
33     temps[z] = Tz
34
35 # Imprimir temperatura a 100 m cada 30 d as
```

## CAPÍTULO 8. APÉNDICE

```
36 print("\nTemperatura del subsuelo a 100m de profundidad:")
37 for i in range(0, 365, 30):
38     print(f" D a {i+1}>3}: {temps[100][i]:.2f} C ")
39
40 # =====
41 # GR FICA DE L NEAS
42 # =====
43 plt.figure(figsize=(14, 6))
44 for z in depths:
45     plt.plot(days, temps[z], label=f'{z}m', linewidth=2)
46
47 plt.title('Temperatura del Subsuelo en Puertollano\nProfundidades: 1m a 100m')
48 plt.xlabel('D a del A o')
49 plt.ylabel('Temperatura [ C ]')
50 plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6)
51 plt.legend(title='Profundidad (m)', bbox_to_anchor=(1.01, 1), loc='upper left')
52 plt.tight_layout()
53 plt.show()
54
55 # =====
56 # MAPA DE CALOR
57 # =====
58 temp_matrix = np.array([temps[z] for z in depths])
59
60 plt.figure(figsize=(16, 6))
61 ax = sns.heatmap(
62     temp_matrix,
63     xticklabels=30,
64     yticklabels=depths,
65     cmap='coolwarm',
66     linewidths=0.5,
67     linecolor='white',
68     cbar_kws={'label': 'Temperatura [ C ]'})
69 )
70
71 ax.set_title('Mapa de Calor - Temperatura del Subsuelo en Puertollano\n(Profundidades
72     de 1m a 100m)', pad=20)
73 ax.set_xlabel('D a del A o')
74 ax.set_ylabel('Profundidad [m]')
75 ax.set_xticks(np.linspace(0, 365, 13))
76 ax.set_xticklabels([f'{int(x)}' for x in np.linspace(1, 365, 13)])
77 plt.tight_layout()
78 plt.show()
```

Listing 8.3: Código de cálculo de temperaturas del subsuelo.

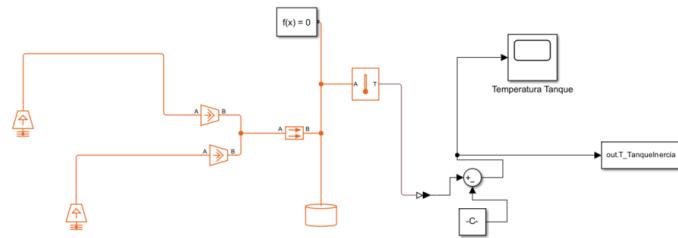
### 8.1.4. Modelo de SIMULINK para la simulación de temperaturas del tanque de inercia

Para la simulación de las temperaturas del tanque de inercia presentadas en la sección 4.3, se desarrolló un modelo en SIMULINK empleando la librería SIMSCAPE. El modelo adoptado es simplificado: el contenido del tanque se representa mediante una masa térmica que simula el comportamiento del agua de refrigeración. A partir de los ensayos experimentales, se constató que los flujos másicos de entrada y salida del tanque son prácticamente equivalentes, lo que valida el uso de esta aproximación.

Al modelo se le aplicaron distintas cargas térmicas según el escenario analizado. En los casos de operación máxima, óptima y operación solitaria (electrolizador o pila), se introdujo una carga térmica constante. Para el escenario experimental, en cambio, se incorporaron directamente los datos de potencia térmica obtenidos en los ensayos del electrolizador y la pila de combustible, los cuales se utilizaron como entrada dinámica al modelo.

## CAPÍTULO 8. APÉNDICE

En la Figura 8.1 se muestra el modelo empleado.



**Figura 8.1:** Modelo de SIMULINK de tanque de inercia

### 8.2. Planos en página completa del Circuito de Disipación de Calor de la Pila y Electrolizador

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA - CENTRO NACIONAL DEL HIDRÓGENO  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN  
MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

**Estudio de Viabilidad Técnica para la Integración de un Sistema de  
Refrigeración con Bomba de Calor Geotérmica en un Sistema de  
Electrolizador y Pila de Combustible de Hidrógeno**

**Trabajo Final de Graduación para optar por el título de:  
Ingeniería en Mantenimiento Industrial**

**Con el grado académico de:  
Licenciatura**

**REALIZADO POR:  
Jose Ricardo Campos Mora**

**I SEMESTRE 2025**

**PLANOS DE DIAGRAMA DE FLUJO, DISTRIBUCIÓN DE PLANTA Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS**

123



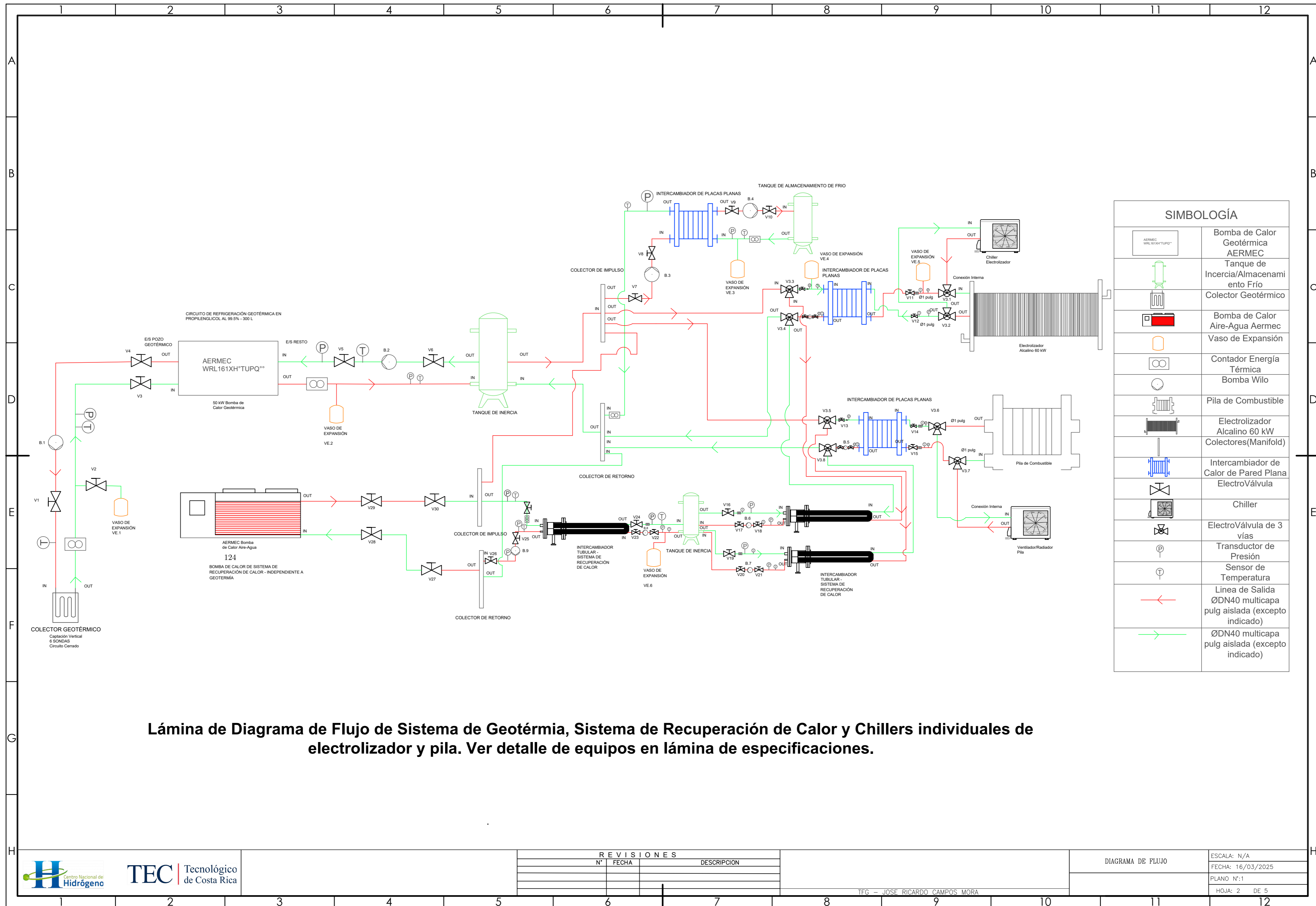
**REVISIONES**

N°	FECHA	DESCRIPCION

TFG - JOSE RICARDO CAMPOS MORA

Portada

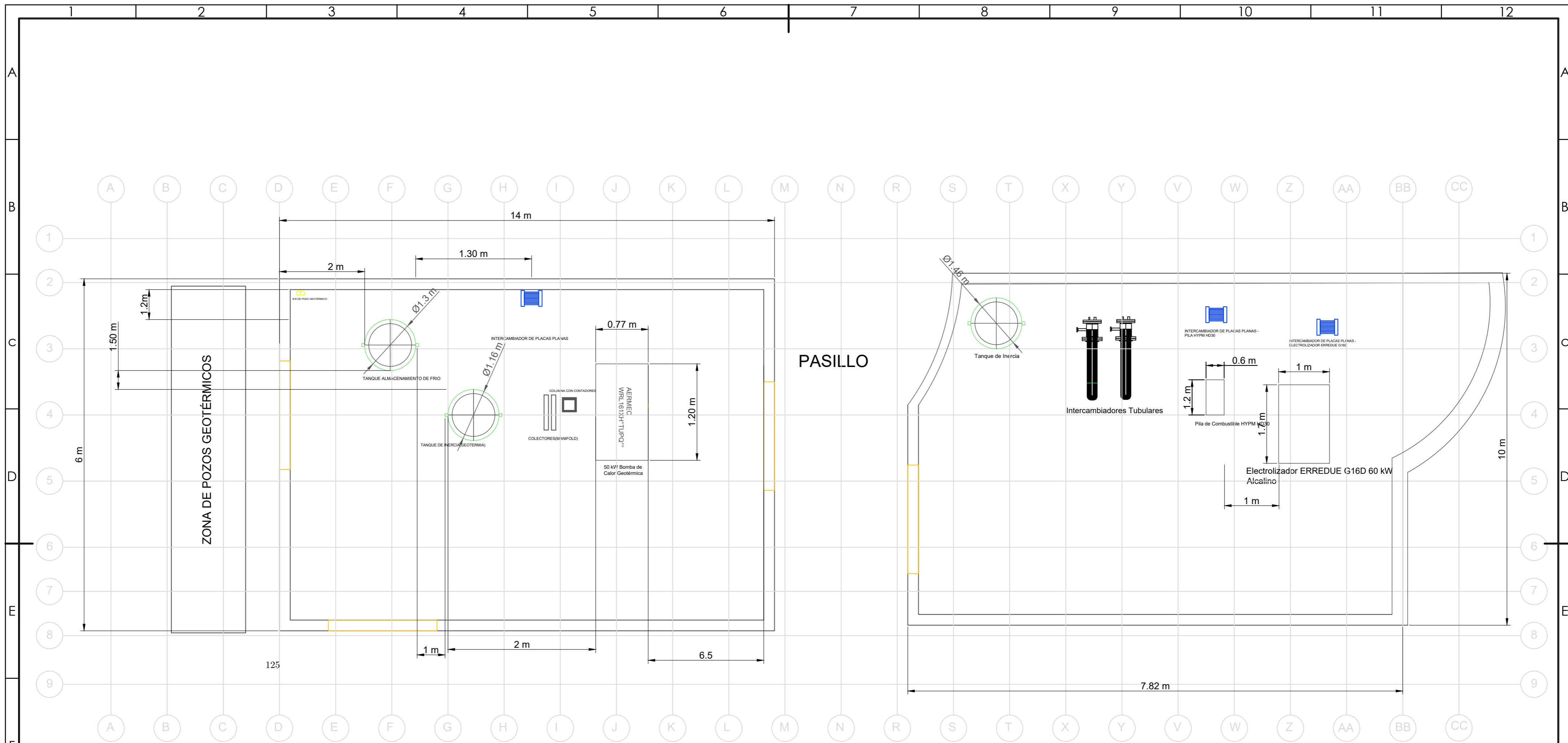
ESCALA: N/A  
FECHA: 06/3/2025  
PLANO N°: 001  
HOJA: 1 DE 4



SIMBOLOGÍA	
	Bomba de Calor Geotérmica AERMEC
	Tanque de Inercia/Almacenamiento Frio
	Colector Geotérmico
	Bomba de Calor Aire-Agua Aermec
	Vaso de Expansión
	Contador Energía Térmica
	Bomba Wilo
	Pila de Combustible
	Electrolizador Alcalino 60 kW
	Colectores(Manifold)
	Intercambiador de Calor de Pared Plana
	ElectroVálvula
	Chiller
	ElectroVálvula de 3 vías
	Transductor de Presión
	Sensor de Temperatura
	Línea de Salida ØDN40 multicapa pulg aislada (excepto indicado)
	ØDN40 multicapa pulg aislada (excepto indicado)

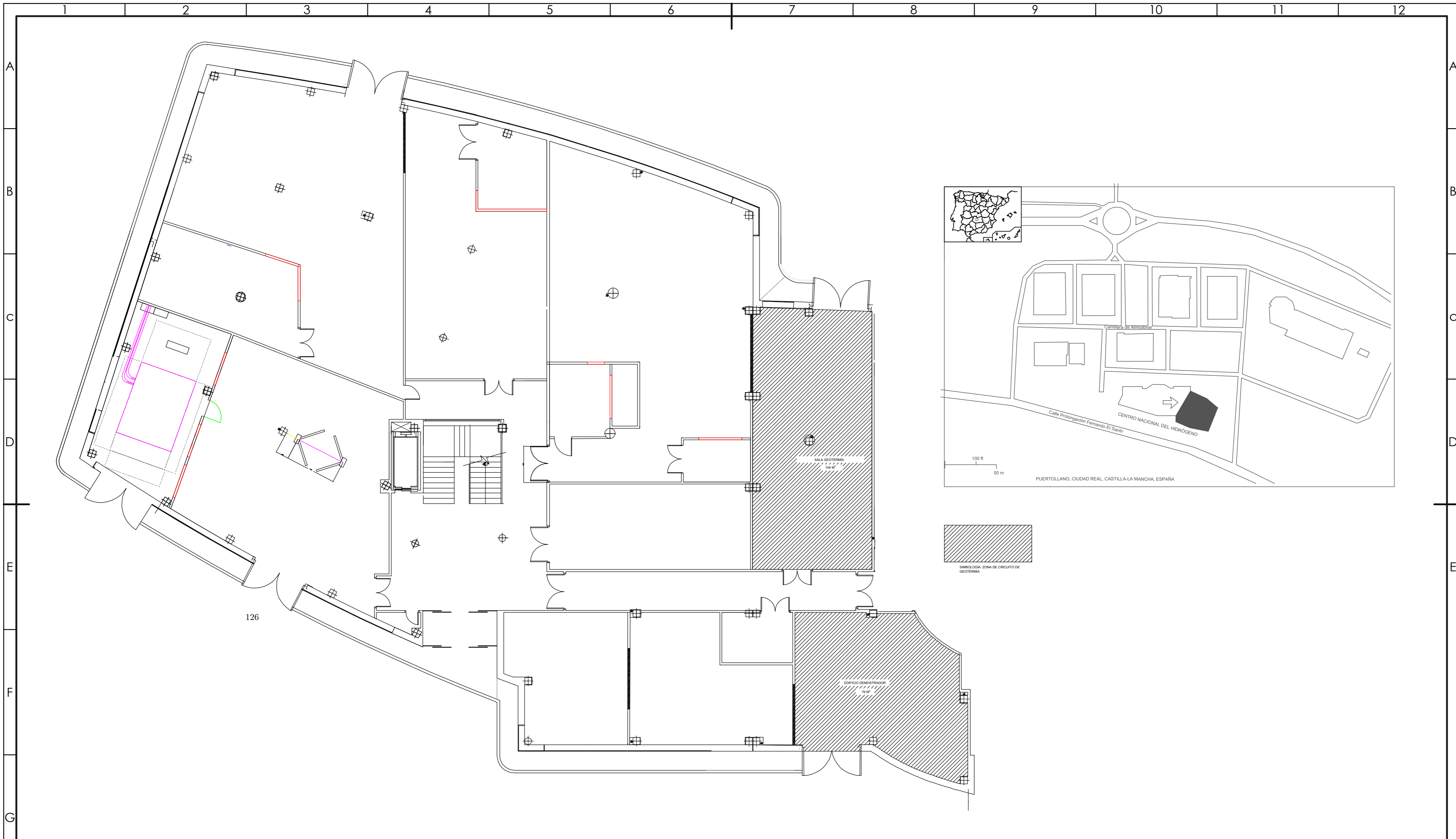
Lámina de Diagrama de Flujo de Sistema de Geotermia, Sistema de Recuperación de Calor y Chillers individuales de electrolizador y pila. Ver detalle de equipos en lámina de especificaciones.

REVISIONES		
N°	FECHA	DESCRIPCION



**Lámina de Distribución de Equipos Principales en Edificio Demostrador del CNH2**

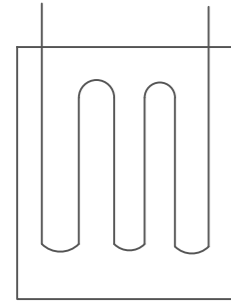
REVISIONES		
N°	FECHA	DESCRIPCION



### Lámina de Ubicación de Edificio Demostrador del CNH2

REVISIONES		
N°	FECHA	DESCRIPCION

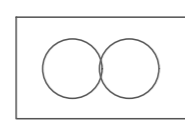
### Colector Geotérmico



**Especificaciones Colector Geotérmico**

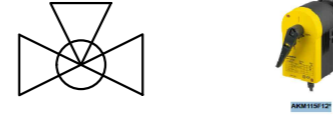
Parámetro	Valores
Diámetro	40mm
Material	PE100
Número de Sondas	6
Longitud por Sonda	100m

### Contador de Energía Térmica



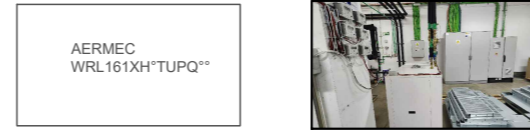
Parámetro	Valor
Tensión DC	24V
Corriente Nominal	0.625 A
Potencia	15 W
Tensión de	30-284 V
Frecuencia	47-53 Hz
Corriente CA	0.4 A
Isolencia	1.8
Temperatura	-10° a +50° C
Dimensiones	70.7x40x8 (LxBxH) mm

### Válvula de 3 Vías



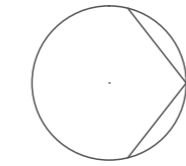
Parámetro	Valor
Potencia	1.7 VA
Ángulo de Rotación	90°
Tiempo de Respuesta	200 ms
Peso	0.7 kg
Protecciones	70.7 x 40 x 8 mm

### Bomba de Calor Geotérmica



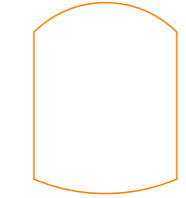
Parámetro	Refrigeración	Calefacción
Potencia	45.5 kW	47.9 kW
Potencia Absorbida	8.3 kW	11.3 kW
Absorción	17	23
COP/EER	5.95	4.25
T. Entrada Agua	15°C	11.7°C
T. Salida Agua	25°C	5°C
Salto Térmico	10°C	6.8°C
Bilinéaridad	0%	0%
Caudal de Agua	1.355 l/s	1.350 l/s
Presión	272 kPa	270 kPa
Factor de Envasamiento	0	0

### Bombas de Circulación



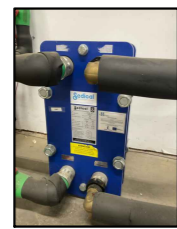
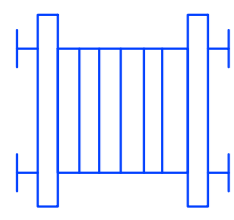
Parámetro	Valor
Tipo	Doble
Bridas	DN 40
Presión	Succión 0.5 mH <sub>2</sub> O- Descarga 0 mH <sub>2</sub> O
Tensión	230 V-50/60
Corriente Máxima	1.33 A
Peso	17.5 kg
Dimensiones	220 x 341 x 280 (LxBxH) mm
Potencia Máx.	305 W

### Vaso de Expansión



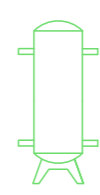
Parámetro	Valor
H	495 mm
ØD	441 mm
A	Flascada 3/4"
h	175 mm
Presión	6 bar

### Intercambiador de Placas Planas



Parámetro	Valor
Potencia	160 kW
Distancia Int	40.6 mm
Fluido	Agua
Presión Máx.	10 Bar (ambos circuitos)
Temp. Trabajo	Circuito 1: 80/70°C Circuito 2: 20/50°C

### Tanque Acumulador de Inercia



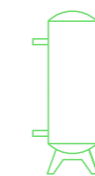
Parámetro	Valor
Capacidad	1500 L
Presión Máx.	6 bar
TMáx	110°C
Pérdidas Térmicas	156 W
Diámetro	1160 mm
Altura	2320 mm
Peso	256 kg
Conexiones	Lateral: 3" Superior: 1" Sensores: 1/2"

### Tanque De Almacenamiento de Frio



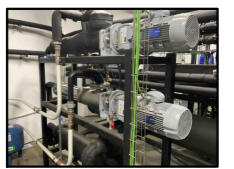
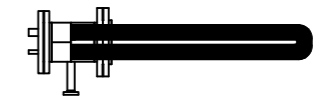
Parámetro	Valor
Capacidad	3300 L
Presión Máx.	3 bar
TMáx	-10 a 50 °C
Aislamiento	25 mm hule sintético
Diámetro	1160 mm
Altura	2850 mm
Peso	256 kg
Conexiones	Fria: 2", Caliente: 2", 1/2" sensores, brida DN80, DN300

### Tanque Acumulador de Inercia Chiller



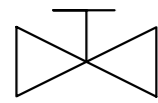
Parámetro	Valor
Capacidad	3000 L
Presión Máx.	6 bar
TMáx	-0°C a 100°C
Diámetro	1460 mm
Altura	2540 mm
Peso	750 kg
Conexiones	4x4"

### Intercambiadores Tubulares



Parámetro	Especificación
Tipo	EBU (Carcasa y tubos)
Configuración	1 carcasa, 1 paso, flujo en paralelo
Área de Intercambio Térmico	27.5 m²
Presión de diseño	10/12 bar (Carcasa/Tubos)
Temperatura de diseño	95°C
Material carcasa/tubos	323/316L
Dimensiones tubos	ØD: 16 mm, longitud: 3000 mm
Peso acido/litro	546.8 kg/ 627.3 kg
Potencia	104 kW
Caudal	17.625/11.167 kg/h

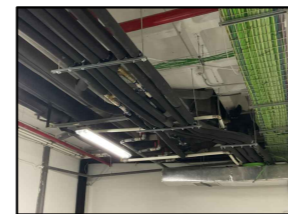
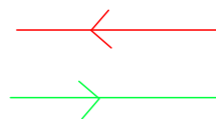
### ElectroVálvulas



Parámetro	Especificación
Voltaje	85-240 VDC/VAC 50/60 Hz ±5%
Temporización sin carga	15 seg/10"
Par máximo arranque	12 Nm/108.50 lb/in
Par máximo operacional	10 Nm/ 88.55 lb/in
Tiempo bajo tensión	75%
Ángulo de maniobra	0° a 270°

127

### Tuberías de Entrada y Salida



Especificación	Valor
Material	Multicapa UNEB ISO 21003 PEAL PEX
Aislamiento	ESPUMA AISLANTE
Diámetros	63mm, 40mm
Uniones y Accesorios	Aluminio y Cobre con sellos

## Lámina de Especificaciones Técnicas de Equipos Principales

Especificación	Valor
Flujo obtenido por el Sistema	10,66 Nm³/hr de Hidrógeno
Grado de O2 final	< 5 ppm de O2
Pureza total	99,9995%
Presión máxima	10 bar
Contenido de Humedad	< 5 ppm de H2O
Punto de Rocío	< -65 °C
Potencia eléctrica	3x400VAC+N, 50 Hz
Consumo eléctrico máximo	58 kW
Amperios	90 A
Línea de protección eléctrica	125 A
Sistema de Gestión del Calor	Chiller integrado
Sello CE	Incluido
Compatibilidad con Energías Renovables	Permite entrada con carga variable
Material de tuberías y conexiones	Acero inoxidable
Dimensiones Físicas	1x1.7x2 m

Categoría	Especificación
Nombre del Producto	HyFM™HD30 Módulo de Potencia de Celda de Combustible
Fabricante	Hydrogenics
Potencia Eléctrica Nominal	33 kW/continuos
Corriente de Operación	0 a 500 A
Voltaje de Operación	60 a 120 VDC
Eficiencia Máxima	55%
Tiempo de Respuesta	< 5 s de apagado a inactivo, < 3 s de inactivo a potencia nominal
Combustible	Hidrógeno seco > 99.98%
Oxidante	Aire ambiente
Refrigerante	Agua desionizada (D.H.O) < 60% etilenglicol / D.H.O -10 a +55 °C en operación, -40 a +65 °C en almacenamiento
Temperatura Ambiente	
Comunicación	CAN V2.0A (estándar de 11 bits)
Dimensiones Físicas	605 x 410 x 285 mm
Masa	61 kg
Volumen	66 L (incluyendo el sistema de suministro de aire y la bomba de agua opcional)

### REVISIONES

N°	FECHA	DESCRIPCION

Especificaciones Técnicas de Equipos	ESCALA: N/A
	FECHA: 16/03/2025
	PLANO N°: 1
	HOJA: 5 DE 5

# Bibliografía

- [1] International Energy Agency, "World Energy Outlook 2023", París, Francia: Agencia Internacional de Energía, 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- [2] World Economic Forum, "Green Hydrogen: The Last Mile in the Net Zero Journey", 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.weforum.org/agenda/2024/01/green-hydrogen-the-last-mile-in-the-net-zero-journey/>
- [3] European Commission, "Hydrogen – Energy", en *Energy Systems Integration*, 2024. [En línea]. Disponible: [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en)
- [4] R. Scita, P. P. Raimondi, y M. Noussan, "Barriers to the Implementation of a Clean Hydrogen Economy", en *Green Hydrogen: The Holy Grail of Decarbonisation? An Analysis of the Technical and Geopolitical Implications of the Future Hydrogen Economy*, M. Hafner, Ed., París, Francia: Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM), 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.jstor.org/stable/resrep26335.5>
- [5] EECA, "Hydrogen", en *Energy's Role in Climate Change*, 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.eeca.govt.nz/insights/energys-role-in-climate-change/renewable-energy/hydrogen/>
- [6] Y. Wang, Y. Pang, H. Xu, A. Martinez, y K. S. Chen, "PEM fuel cell and electrolysis cell technologies and hydrogen infrastructure development – a review", *Energy Environ. Sci.*, vol. 15, no. 6, pp. 2022–2040, 2022. [En línea]. Disponible: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2022/ee/d2ee00790h>
- [7] N. Frassl, N. R. Sistani, Y. Wimmer, J. Kapeller, K. Maggauer, y J. Kathan, "Techno-economic assessment of waste heat recovery for green hydrogen production: a simulation study", *e+i Elektrotech. Infotech.*, vol. 141, pp. 288–298, 2024. [En línea]. Disponible: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00502-024-01231-y>
- [8] F. Nigbur, M. Robinius, P. Wienert, y M. Deutsch, "Levelised Cost of Hydrogen: Making the Application of the LCOH Concept More Consistent and More Useful", Agora Energiewende, 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.agora-energiewende.org/publications/levelised-cost-of-hydrogen>
- [9] M. Ramezanizadeh, M. Alhuyi Nazari, M. H. Ahmadi, y L. Chen, ".^ review on the approaches applied for cooling fuel cells", *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 139, pp. 517–525, 2019. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.032>

## BIBLIOGRAFÍA

- [10] N. F. Guerrero-Rodríguez, D. A. De La Rosa-Leonardo, R. Tapia-Martel, F. A. Ramírez-Rivera, J. Faxas-Guzmán, A. B. Rey-Boué, y E. Reyes-Archundia, "An overview of the efficiency and long-term viability of powered hydrogen production", *Sustainability*, vol. 16, no. 13, p. 5569, 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/13/5569>
- [11] FinH2, "Electrolyser Technologies", FinH2, 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.finh2.fi/electrolyser-technologies/>
- [12] S. Shahsavari, "Thermal Analysis of Air-Cooled Fuel Cells", Tesis de máster, Simon Fraser University, Canadá, 2011. [En línea]. Disponible: [https://www.sfu.ca/~mbahrami/pdf/Theses/Thesis\\_S.%20Shahsavari.pdf](https://www.sfu.ca/~mbahrami/pdf/Theses/Thesis_S.%20Shahsavari.pdf)
- [13] A. Franco y C. Giovannini, "Recent and future advances in water electrolysis for green hydrogen generation: Critical analysis and perspectives", *Sustainability*, vol. 15, no. 24, p. 16917, 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/su152416917>
- [14] S. Kavanaugh y K. Rafferty, "Geothermal Heating and Cooling: Design of Ground-Source Heat Pump Systems", American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2011. ISBN: 978-1936504855.
- [15] R. Li, S. You, J. Han, Q. Zheng, y B. Zhang, "Optimization and performance analysis of geothermal heat pump systems: A review on current status and perspectives", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 143, p. 110964, 2021. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110964>
- [16] J. W. Lund, A. N. Toth, A. Lapanje, y D. H. Freeston, "Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review", *Geothermics*, vol. 80, pp. 101–134, 2019. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.01.001>
- [17] Grupo Visiona, "Funcionamiento de una bomba de calor geotérmica", Grupo Visiona, 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.grupovisiona.com/es/geotermia/funcionamiento-de-una-bomba-de-calor-geotermica>
- [18] M. Dongellini, C. Natale, C. Naldi, E. Rossi di Schio, P. Valdiserri, y G. L. Morini, "Energy and environmental performance comparison of heat pump systems working with alternative refrigerants", *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 12, p. 7238, 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/app13127238>
- [19] G. Romero, J. F. Urchueguía, H. Witte, W. Cambien, y T. Magraner, "Comparative study between a geothermal heat pump system and an air-to-water heat pump system for heating and cooling in typical conditions of the European Mediterranean coast", Instituto de Ingeniería Energética – IIE, Univ. Politéc. de Valencia – UPV, Valencia, España, 2024.
- [20] International Energy Agency, "Energy Efficiency and Demand", 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.iea.org/energy-system/energy-efficiency-and-demand/energy-efficiency>
- [21] H. Lambert, R. Roche, S. Jemeš, P. Ortega, y D. Hissel, "Combined cooling and power management strategy for a standalone house using hydrogen and solar energy", *Hydrogen*, vol. 2, no. 2, pp. 207–224, 2021. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/hydrogen2020011>
- [22] ITCL Centro Tecnológico, "Hidrógeno verde: qué es y para qué sirve", ITCL Blog, 2025. [En línea]. Disponible: <https://itcl.es/blog/hidrogeno-verde-que-es-para-que-sirve/>
- [23] Clean Hydrogen Observatory, "Manual – Levelised Cost of Hydrogen (LCOH) Calculator", Comisión Europea, jun. 2024. [En línea]. Disponible: <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/sites/default/files/2024-06/Manual%20-%20Levelised%20Cost%20of%20Hydrogen%20%28LCOH%29%20Calculator.pdf>

## BIBLIOGRAFÍA

- [24] European Hydrogen Observatory, "Levelised Cost of Hydrogen (LCOH) Calculator Manual", 2024. [En línea]. Disponible: <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/sites/default/files/2024-06/Manual%20-%20Levelised%20Cost%20of%20Hydrogen%20%28LCOH%29%20Calculator.pdf>
- [25] WTS Energy, "Microrredes: cómo funcionan, sus beneficios, aplicaciones y más", WTS Energy, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.wtsenergy.com/es/glossary/microrredes/>
- [26] A. Medina, R. Salas, D. Sira, R. Cárdenas, y E. Figueredo, "Microrredes basadas en electrónica de potencia: características, operación y estabilidad", ResearchGate, 2014. [En línea]. Disponible: [https://www.researchgate.net/publication/276465445\\_Microrredes\\_basadas\\_en\\_Electronica\\_de\\_Potencia\\_Caracteristicas\\_Operacion\\_y\\_Estabilidad](https://www.researchgate.net/publication/276465445_Microrredes_basadas_en_Electronica_de_Potencia_Caracteristicas_Operacion_y_Estabilidad)
- [27] S. Shiva Kumara y H. Lim, "An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production", *Mater. Today: Proc.*, vol. 94, pp. 610–616, 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722020625>
- [28] U.S. Department of Energy, "Hydrogen Production: Electrolysis", Office of Energy Efficiency Renewable Energy, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>
- [29] Accelerazero, "What is an electrolyzer and what is it used for?", 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.accelerazero.com/news/what-is-an-electrolyzer-and-what-is-it-used-for>
- [30] Hyfindr, "20 PEM Electrolyser Stack Customizer – 40 Bar", 2025. [En línea]. Disponible: <https://hyfindr.com/en/shop/products/pem-electrolyser-stack-customizer-40-bar>
- [31] E. Alonso, "PEM electrolysis coupled with thermal energy storage", PV Magazine, 11-jul-2022. [En línea]. Disponible: <https://www.pv-magazine.com/2022/07/11/pem-electrolysis-coupled-with-thermal-energy-storage/>
- [32] Grupo Elektra, "Hidrógeno verde: una alternativa limpia", 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.grupoelektra.es/es/blog/articulo-tecnico-hidrogeno-verde-alternativa-limpia>
- [33] X. Wei, S. Sharma, A. Waeber, M. Margni, F. Maréchal, y J. Van Herle, "Comparative life cycle analysis of electrolyzer technologies for hydrogen production: Manufacturing and operations", *Joule*, vol. 8, pp. 3347–3372, 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.06.005>
- [34] Centro Nacional del Hidrógeno, "Pilas de combustible", CNH2, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>
- [35] DieselNet, "Fuel Cells", DieselNet Technical Report, Ecopoint Inc., 2024. [En línea]. Disponible: [https://dieselnet.com/tech/energy\\_powertrains\\_fuel-cell.php](https://dieselnet.com/tech/energy_powertrains_fuel-cell.php)
- [36] Collins Aerospace, "Bespoke PEM Fuel Cell Power Systems", 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.collinsaerospace.com/what-we-do/industries/military-and-defense/submarine-s-and-surface-ships/bespoke-pem-fuel-cell-power-systems>
- [37] P. P. Gallego, "Caracterización experimental de una pila de combustible con metanol directo", Proyecto Fin de Carrera, Esc. Politéc. Sup., Univ. Carlos III de Madrid, Leganés, España, sep. 2013.
- [38] S. Basu, "Polarization Curves", en *Materials for Supercapacitor Applications*, 1.<sup>a</sup> ed., Elsevier, 2023, pp. 25–50. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323911160000031>

## BIBLIOGRAFÍA

- [39] C. Kunusch, P. F. Puleston, M. A. Mayosky, y J. J. More, "Characterization and experimental results in PEM fuel cell electrical behaviour", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 11, pp. 5876–5881, 2010.
- [40] M. Sánchez Delgado, "Desarrollo y validación de un modelo para la simulación de sistemas de electrólisis alcalina para la producción de hidrógeno", Tesis de Máster, Univ. Politéc. de Madrid, 2019. [En línea]. Disponible: <https://oa.upm.es/62567/>
- [41] A. Kabza, *Fuel Cell Formulary*, 2015. [En línea]. Disponible: [https://www.pemfc.de/FCF\\_A4.pdf](https://www.pemfc.de/FCF_A4.pdf)
- [42] AENOR, *UNE-EN 62282: Tecnologías de pilas de combustible. Sistemas estacionarios de generación de energía por pila de combustible*, Asoc. Esp. de Normalización, 2019.
- [43] ISO, *ISO 22734: Generadores de hidrógeno utilizando electrólisis del agua para aplicaciones industriales, comerciales y residenciales*, Org. Int. de Normalización, 2019.
- [44] M. Soltani, F. M. Kashkooli, A. R. Dehghani-Saniij, A. R. Kazemi, N. Bordbar, M. J. Farshchi, M. Elmi, K. Gharali, y M. B. Dusseault, ".<sup>A</sup> comprehensive study of geothermal heating and cooling systems", *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 31, pp. 389–417, 2019. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670718306838>
- [45] FSE, "Geothermal Heating and Cooling in Commercial Construction". [En línea]. Disponible: [https://fse-ok.com/geothermal\\_heating\\_and\\_cooling\\_in\\_commercial\\_construction/](https://fse-ok.com/geothermal_heating_and_cooling_in_commercial_construction/)
- [46] U.S. Department of Energy, "Geothermal Heat Pumps", 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.energy.gov/energysaver/geothermal-heat-pumps>
- [47] X. Lu, D. Larson, y T. Holm, "Preliminary feasibility study of groundwater source geothermal heat pumps in Mason County and the American Bottoms Area, Illinois", en *Proc. ASME 2014 8th Int. Conf. Energy Sustain.*, Boston, MA, EE. UU., jun. 2014, pp. V001T05A002. [En línea]. DOI: 10.1115/ES2014-6342
- [48] International Energy Agency. Heat Pumping Technologies, *Key Performance Indicators for Large Heat Pump Systems: Guidelines and Recommendations*, Annex 52, abr. 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.23697/xa7z-vd92>
- [49] ARANER, *Aplicación del sistema de calificación NPLV en plantas de agua helada*, Blog de ARANER, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.araner.com/blog/nplv-rating-system-application-for-chilled-water-plants>
- [50] J. D. Spitler, S. Rees, y C. D. Fisher, ".<sup>A</sup> g-function is a mathematical representation of the temperature response of a borehole field to a step change in heat input or extraction at the borehole wall", *Geothermics*, vol. 76, pp. 48–64, nov. 2018. [En línea]. DOI: 10.1016/j.geothermics.2018.06.002
- [51] AENOR, *UNE-EN 378: Sistemas de refrigeración y bombas de calor – Requisitos de seguridad y medioambientales*, Asoc. Esp. de Normalización, 2021.
- [52] Gobierno de España, *Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE)*, Real Decreto 1027/2007, BOE, España, 2007.
- [53] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), *Guía técnica: Diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado*, 2012. [En línea]. Disponible: <https://www.idae.es/publicaciones/guia-tecnica-diseno-de-sistemas-de-intercambio-geotermico-de-circuito-cerrado>
- [54] J. Moubray, *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*, 2.<sup>a</sup> ed., Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999.

## BIBLIOGRAFÍA

- [55] Aula21, *Qué es el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)*, Aula21, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.cursosaula21.com/que-es-el-mantenimiento-centrado-en-la-confiabilidad>
- [56] Asociación Española de Normalización (UNE), *UNE-EN 60706: Mantenibilidad de equipos. Partes 1 a 6*, Madrid: AENOR, 2011.
- [57] Asociación Española de Normalización (UNE), *UNE-EN IEC 60300-1:2024. Gestión de la fiabilidad. Parte 1: Directrices para la gestión y su aplicación*, Madrid: AENOR, 2024. [En línea]. Disponible: <https://tienda.aenor.com/norma-une-en-iec-60300-1-2024-n0073276>
- [58] K. Bakirci, "Evaluation of the performance of a ground-source heat-pump system with series GHE (ground heat exchanger) in the cold climate region", *Energy*, vol. 35, no. 7, pp. 3088–3096, jul. 2010. DOI: 10.1016/j.energy.2010.03.054
- [59] Z. Ren, J. Wang, Z. Yu, C. Zhang, S. Gao, y P. Wang, "Experimental studies and modeling of a 250-kW alkaline water electrolyzer for hydrogen production", *J. Power Sources*, vol. 544, p. 231886, 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775322008734>
- [60] ThermOmegaTech, *Thermostatic Mixing Valve*, ThermOmegaTech, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.thermomegatech.com/product/thermostatic-mixing-valve/>
- [61] Pacific Northwest National Laboratory, *Material Compatibility*, H2Tools, 2025. [En línea]. Disponible: <https://h2tools.org/bestpractices/material-compatibility>
- [62] International Ground Source Heat Pump Association, *Research Conference Proceedings, IGSHPA Annual Conference 2022*, Las Vegas, NV, EE. UU., dic. 2022. DOI: 10.22488/okstate.22.000010
- [63] Trading Economics, *Spain Consumer Price Index (CPI)*, TradingEconomics.com, 2025. [En línea]. Disponible: <https://tradingeconomics.com/spain/consumer-price-index-cpi>