



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Investigación Experimental del Proceso Termoquímico de Dos Pasos CO_2 Splitting

Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico

Maximiliano André Quezada Escobar

Profesores Patrocinantes:

Profesor Guía:	Dr. Ing. Mario Toledo T.
Profesora Correferente:	MSc. Ing. Paula Rojas A.

Valparaíso, Agosto 2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): **X**☐ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Investigación experimental del proceso termoquímico de dos pasos CO2 splitting

Nombre del candidato(a): Maximiliano André Quezada Escobar

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Mecánica

Campus: Campus Casa Central Valparaíso **Departamento:** Departamento de Ingeniería Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Mario Gonzalo Toledo Torres, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

X☐ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

_____

_____

_____

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: _07-09-2026_____ **Firma:** _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: _07-09-2026_____ **Firma:** _____

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Agradecimientos

Gracias a Dios por apoyarme y cuidarme siempre a lo largo de este camino. Gracias también a toda mi familia por respaldar cada locura que decidí emprender; saber que creían en mí fue mi mayor fuerza.

A mis amigos, por acompañarme en todo este camino y por estar siempre presentes. Aunque seamos un grupo pequeño, el cariño, la complicidad y la lealtad que compartimos son inmensos. Que la vida nos encuentre siempre celebrando juntos y triunfando en nuestros propios caminos.

Un agradecimiento muy especial a quienes me acompañaron fielmente en cada noche de desvelo y estudio: a mi perrita Doris, por demostrarme un amor puro y silencioso en los momentos de más estrés, y a Salvatore, mi segundo perrito, que llegó después para sumar más alegría a mi vida. Gracias a mis mascotas por recordarme la felicidad simple y hacer que cada descanso en casa valiera la pena.

A mi profesor guía, Mario Toledo, por ser un excelente referente académico y profesional, y por esa complicidad única que nació gracias a que el fútbol nos unió en el camino. A la Señorita Paula Rojas, gracias por brindarme al final su voto de confianza y ser paciente conmigo.

Quiero hacer una mención muy especial a alguien que no conocí durante la carrera, pero que llegó en la etapa final para acompañarme incondicionalmente a lo largo de todo el desarrollo de mi tesis. Muchas gracias, David, por todo. Gracias por tu alegría, tu tremendo compromiso y por ser todo un "Mago" para hacer funcionar los proyectos; tu guía en este proceso fue fundamental y te convertiste en un verdadero referente para mi vida.

Finalmente, me agradezco a mí mismo. Por la resiliencia de nunca tirar la toalla, por el coraje de volver a empezar de cero cada vez que fue necesario y por mantener la fe en que todo esfuerzo vale la pena.

Dedicatoria

A mis padres, Pamela y Jorge, por haberme dado absolutamente todo en la vida, y por haber entregado cada segundo de su tiempo para criarme y amarme. Sé perfectamente que a veces el hijo del medio puede ser un desafío y difícil de criar, pero yo sentí cada gramo del amor incondicional que me dieron durante todo este tiempo. Le doy muchas gracias a Dios por haberme bendecido con unos padres tan excelentes, trabajadores, y llenos de amor y sabiduría.

A mis hermanos, Jorge y Vicente, por estar siempre presentes cada vez que los necesité y por brindarme su apoyo incondicional. A mi tía y a mis abuelitos, quienes me vieron crecer y me regalaron sus sabios consejos. Un recuerdo lleno de amor para quienes no me acompañan hoy en este mundo; gracias por formarme y amarme en su corto tiempo de vida, fueron y son fundamentales para mí.

A Josefa Rivas Silva, el amor de mi vida, por darme la valentía para arriesgarme y aventurarme, y por caminar a mi lado en este trayecto siendo mi compañera incondicional tanto en los días difíciles como en las alegrías. Nos conocimos antes de que esta carrera empezara, y desde entonces creíste en mí desde cero, incluso cuando a mí me asustaba la sola idea de haber quedado; tú siempre supiste cómo iba a terminar todo esto. Gracias por acompañarme en cada noche de estudio y por no soltar nunca mi mano. De igual forma, a sus padres, Mario y Ghyllian, por acogerme como a un hijo más y brindarme siempre su cariño.

"Al final, lo que importa no son los años de vida, sino la vida de los años."

"Que la vida es muy corta para no disfrutarla."

Resumen

La conversión de CO_2 en monóxido de carbono mediante energía solar ofrece una vía para descarbonizar sectores donde la electrificación directa resulta inviable, como la aviación y el transporte pesado. De las rutas disponibles, el ciclo termoquímico redox de dos pasos con óxido de cerio (CeO_2) resulta especialmente atractivo, pues produce los gases por separado y aprovecha el espectro solar completo. Esta Memoria investiga experimentalmente dicho proceso (CO_2 splitting, CDS) en el Reactor WS, utilizando resistencias eléctricas Kanthal A-1 como sustituto controlado del aporte solar, con el fin de caracterizar el sistema e identificar sus condiciones óptimas de operación.

Sobre una carga fija de 280 g de CeO_2 poroso, monitoreada con nueve termocuplas tipo B y un analizador Testo 350, se llevó a cabo una campaña de doce experimentos. Para evaluar la repetibilidad del sistema, diez de ellos se organizaron en tres grupos según su protocolo operacional; el protocolo de reducción extendida operado a mayor temperatura (Grupo G4) exhibió el mejor desempeño en producción específica y tasa de producción de CO. El hallazgo central es que la producción no depende únicamente de la temperatura máxima, sino del grado de reducción efectivamente logrado antes de la inyección. Un análisis cromatográfico independiente permitió caracterizar la composición del gas de proceso y su razón CO:CO_2, mientras que las métricas de producción, obtenidas de la señal continua del analizador, constituyen valores conservadores del desempeño real del reactor.

Palabras clave: CeO_2, CO_2 splitting, ciclo termoquímico redox, combustible solar, repetibilidad experimental, Reactor WS, monóxido de carbono.

Abstract

The conversion of CO_2 into carbon monoxide using solar energy offers a pathway to decarbonize sectors where direct electrification is unfeasible, such as aviation and heavy transport. Among the available routes, the two-step redox thermochemical cycle with cerium oxide (CeO_2) is particularly attractive, as it produces the gases separately and harnesses the full solar spectrum. This work experimentally investigates this process (CO_2 splitting, CDS) in the Reactor WS, using Kanthal A-1 electrical resistances as a controlled substitute for solar input, in order to characterize the system and identify its optimal operating conditions.

Over a fixed load of 280 g of porous CeO_2, monitored with nine type-B thermocouples and a Testo 350 analyzer, a campaign of twelve experiments was carried out. To assess the system's repeatability, ten of them were organized into three groups according to their operating protocol; the extended-reduction protocol operated at higher temperature (Group G4) showed the best performance in specific yield and CO production rate. The central finding is that production depends not only on the maximum temperature, but on the reduction degree effectively achieved before injection. An independent chromatographic analysis made it possible to quantify the sampling-line dilution and the CO_2 conversion, revealing that the analyzer readings represent conservative lower bounds of the reactor's real performance.

Keywords: CeO_2, CO_2 splitting, redox thermochemical cycle, solar fuel, experimental repeatability, Reactor WS, carbon monoxide.

Índice

Nomenclatura y Abreviaciones **13**

1. Introducción **15**
1.1. Contexto energético global . . . 15
1.2. Contexto energético nacional: Chile y el potencial de los combustibles solares . . . 17
1.3. Combustible solar: el ciclo termoquímico de dos pasos . . . 17

2. Objetivos **21**
2.1. Objetivo general . . . 21
2.2. Objetivos específicos . . . 21

3. Fundamentos y antecedentes **22**
3.1. Métodos de producción de CO a partir de CO_2 . . . 22
3.2. Materiales de reducción-oxidación (redox) para ciclos de dos pasos . . . 26
3.2.1. Ciclos con óxidos volátiles . . . 27
3.2.2. Ciclos con óxidos no volátiles . . . 28
3.3. Óxido de cerio (CeO_2): material de referencia . . . 29
3.4. Tecnologías de concentración solar y diseño de reactores . . . 32
3.5. Termodinámica del CO_2 splitting: límites fundamentales . . . 33
3.6. Cinética de las reacciones de reducción y oxidación del CeO_2 . . . 34
3.6.1. Cinética de reducción térmica (TR) . . . 34
3.6.2. Cinética de oxidación con CO_2 (CDS) . . . 35
3.7. Grado de no estequiometría (δ): definición y medición . . . 35
3.8. Presión parcial de oxígeno y el rol del gas de barrido (N_2) . . . 36
3.9. Trabajos experimentales de referencia . . . 37
3.10. Trabajos previos sobre el Reactor WS . . . 40
3.10.1. Modelación numérica y validación experimental del ciclo . . . 40
3.10.2. Primera campaña experimental del sistema . . . 41
3.11. Síntesis: posicionamiento del presente trabajo . . . 42

4. Sistema experimental y metodología **43**
4.1. Descripción general del Reactor WS . . . 43
4.2. Implementación y puesta en marcha del Reactor WS . . . 45
4.2.1. Planificación del trabajo . . . 45
4.2.2. Desarme e inspección inicial . . . 45
4.2.3. Limpieza y reacondicionamiento de componentes . . . 46
4.2.4. Armado del reactor . . . 47
4.2.5. Prueba térmica de validación . . . 48
4.3. Sistema de calentamiento eléctrico . . . 49
4.3.1. Límites de operación de las resistencias . . . 51
4.4. Incidente operacional: falla de las resistencias por sobretemperatura . . . 51
4.5. Material reactivo: CeO_2 poroso en trozos . . . 55
4.6. Sistema de medición de gases: Testo 350 y cromatografía . . . 56
4.6.1. Analizador Testo 350 . . . 56
4.6.2. Análisis cromatográfico independiente . . . 57
4.7. Sistema de medición de temperatura . . . 58
4.8. Sistema de control de flujos . . . 58
4.9. Protocolo experimental: ciclo TR–CDS . . . 59

4.10. Variables operacionales y diseño de experimentos . . . 60
4.11. Metodología de procesamiento de datos . . . 61
4.11.1. Parámetros de cálculo . . . 61
4.11.2. Agrupación por protocolo y promediado . . . 61
4.11.3. Cuantificación de la producción de CO . . . 62
4.11.4. Corrección de línea base de la señal de CO . . . 63
4.11.5. Métricas de rendimiento . . . 63
4.11.6. Conversión del reactor y caracterización cromatográfica . . . 64

5. Resultados **66**
5.1. Perfiles del protocolo 40/40 (Grupo G2) . . . 66
5.2. Protocolo 40/20 de referencia (Grupo G3) . . . 68
5.3. Perfiles del protocolo 40/20, mejor caso (Grupo G4) . . . 71
5.4. Temperaturas alcanzadas por grupo . . . 73
5.5. Comparación de la producción de CO entre protocolos . . . 74
5.6. Métricas de rendimiento . . . 74
5.7. Conversión del reactor y razón CO:CO_2 por grupo . . . 75
5.8. Composición del gas por cromatografía . . . 75
5.9. Comparación con la literatura . . . 76

6. Análisis y discusión **77**
6.1. Efecto de los parámetros operacionales en la producción de CO . . . 77
6.1.1. Duración de la etapa de oxidación . . . 77
6.1.2. Temperatura de reducción y grado de reducción efectivo . . . 77
6.2. Limitaciones del sistema de medición y su corrección . . . 79
6.2.1. Naturaleza de la medición del analizador . . . 79
6.2.2. Delimitación de la ventana de inyección . . . 79
6.3. Calentamiento eléctrico frente a solar: diferencias y comparabilidad . . . 79
6.3.1. Interpretación de la conversión cromatográfica . . . 80
6.3.2. Proyección a temperaturas de reducción superiores . . . 80
6.3.3. Contraste con los reactores solares de referencia . . . 80
6.4. Resultados previos . . . 80
6.5. Mejoras y proyecciones para el sistema experimental . . . 81

7. Conclusiones **83**

8. Anexos **86**
.1. Carta Gantt de planificación . . . 86
.2. Informes cromatográficos . . . 89
.2.1. Informe experimento N°4 . . . 90
.2.2. Informe experimento N°10 y N°11 . . . 91
.3. Datos experimentales (gases y temperatura) . . . 93
.3.1. Gráficos del experimento N°1 . . . 94
.3.2. Gráficos del experimento N°2 . . . 95
.3.3. Gráficos del experimento N°3 . . . 96
.3.4. Gráficos del experimento N°4 . . . 97
.3.5. Gráficos del experimento N°5 . . . 98
.3.6. Gráficos del experimento N°6 . . . 99
.3.7. Gráficos del experimento N°7 . . . 100
.3.8. Gráficos del experimento N°8 . . . 101

.3.9. Gráficos del experimento N°9 . . . 102
.3.10. Gráficos del experimento N°10 . . . 103
.3.11. Gráficos del experimento N°11 . . . 104
.3.12. Gráficos del experimento N°12 . . . 105
.4. Cálculo de límites de operación de las resistencias Kanthal A-1 . . . 106
.4.1. Cálculo de resistencias . . . 107
.5. Especificaciones técnicas del equipo . . . 111
.5.1. Ficha Testo 350 . . . 112
.5.2. Ficha técnica Kanthal A-1 . . . 114
.6. Bitácoras de laboratorio (experimentos) . . . 117
.6.1. Bitácora N°1 . . . 118
.6.2. Bitácora N°2 . . . 121
.6.3. Bitácora N°3 . . . 124
.6.4. Bitácora N°4 . . . 127
.6.5. Bitácora N°5 . . . 130
.6.6. Bitácora N°6 . . . 132
.6.7. Bitácora N°7 . . . 135
.6.8. Bitácora N°8 . . . 138
.6.9. Bitácora N°9 . . . 141
.6.10. Bitácora N°10 . . . 144
.6.11. Bitácora N°11 . . . 147
.6.12. Bitácora N°12 . . . 150

Referencias **153**

Índice de figuras

1. Emisiones históricas de gases de efecto invernadero (GEI) por país (1990–2023). Fuente: Climate Watch, World Resources Institute, 2024 [6]. . . . 16
2. Evolución de las emisiones globales de CO_2 fósil por país, combustible y per cápita (1960–2024). Fuente: Global Carbon Project, Friedlingstein et al., 2024 [4]. . . . 17
3. Ciclo de carbono neutro mediante producción de CO solar. Elaboración con IA, 2026. . . . 18
4. Diagrama de flujo del ciclo termoquímico de dos pasos con CeO_2 (TR–CDS). Elaboración con IA, 2026. . . . 19
5. Variación de ΔH° y ΔG° con la temperatura para la termólisis de CO_2 y H_2O. Fuente: Abanades, *Energies*, 2022 [12]. . . . 23
6. Ciclo termoquímico genérico con óxido metálico (MO). Fuente: Guo et al., *Appl. Energy*, 2024 [11]. . . . 26
7. Sistema solar termoquímico integrado con captura DAC y síntesis GTL. Fuente: Guo et al., *Appl. Energy*, 2024 [11]. . . . 27
8. Morfologías de CeO_2 desarrolladas para ciclos termoquímicos. Fuente: Wei et al., *Chem. Commun.*, 2025 [10]. . . . 31
9. No estequiometría de equilibrio δ_{eq} del CeO_2 según el modelo de Bulfin et al. Elaboración propia con el modelo de [29], 2026. . . . 34
10. Reactor solar de Chueh et al. y microestructura de la ceria tras 500 ciclos. Fuente: Pullar et al., *Front. Chem.*, 2019 [15]. . . . 38
11. Evolución de η_{solar} en ciclos con CeO_2 (2006–2017). Elaboración propia con datos de [17, 18, 24, 25, 26]. . . . 39
12. Sistema experimental del Reactor WS con concentrador PDR y planta fotovoltaica. Fuente: Rojas et al., *Energy Convers. Manag.*, 2025 [38]. . . . 41
13. Esquema en corte transversal del Reactor WS. Elaboración propia, 2026. . . . 44
14. Vista general del sistema experimental instalado. Fotografía propia, Laboratorio de Termofluidos UTFSM, 2026. . . . 45
15. Secuencia de desarme del Reactor WS, etapas (a)–(e). Fotografías propias, Laboratorio de Termofluidos UTFSM, 2026. . . . 46
16. Componentes del reactor antes (a)–(b) y después (c)–(d) de la limpieza. Fotografías propias, Laboratorio de Termofluidos UTFSM, 2026.. . . . 47
17. Reactor WS completamente armado. Fotografía propia, Laboratorio de Termofluidos UTFSM, 2026. . . . 48
18. Prueba térmica de validación de las termocuplas TC1–TC9. Fuente: elaboración propia, 2026. 49
19. Variac trifásico TSGC2-9000VA. Fotografía propia, Laboratorio de Termofluidos UTFSM, 2026. 50
20. Inspección de las resistencias Kanthal A-1 tras el incidente, etapas (a)–(d). Fotografías propias, Laboratorio de Termofluidos UTFSM, 2026. . . . 52
21. Segundo ladrillo refractario fracturado para inspección. Fotografía propia, Laboratorio de Termofluidos UTFSM, 2026. . . . 53
22. Detalle microscópico de la sección de fractura del alambre Kanthal A-1 tras la falla. Fuente: elaboración propia, 2026. . . . 53
23. Falla eléctrica del variac trifásico TSGC2-9000VA: (a) torre de bobinas; (b) detalle del devanado dañado. Fotografías propias, Laboratorio de Termofluidos UTFSM, 2026. . . . 54
24. Carga de CeO_2 en trozos porosos irregulares (280 g) en la cámara. Fotografía propia, Laboratorio de Termofluidos UTFSM, 2026. . . . 55
25. Línea de muestreo de gases aguas abajo del reactor y analizador Testo 350. Fotografía propia, Laboratorio de Termofluidos UTFSM, 2026. . . . 57

26. Distribución de las termocuplas TC1–TC9 en el Reactor WS. Fotografía propia anotada, Laboratorio de Termofluidos UTFSM, 2026. 58
27. Diagrama de flujo de proceso (PFD) del sistema experimental. Elaboración propia, 2026. . . . 59
28. Perfil de temperatura promedio del Grupo G2 (protocolo 40/40). Fuente: elaboración propia, 2026. 66
29. Señales de gases promedio del Grupo G2. Fuente: elaboración propia, 2026. 67
30. Concentración de O_2 promedio del Grupo G2, con banda $\pm\sigma$. Fuente: elaboración propia, 2026. 67
31. Concentración de CO promedio del Grupo G2, con banda $\pm\sigma$. Fuente: elaboración propia, 2026. 68
32. Concentración de CO_2IR promedio del Grupo G2, con banda $\pm\sigma$. Fuente: elaboración propia, 2026. 68
33. Perfil de temperatura promedio del Grupo G3. Fuente: elaboración propia, 2026. 69
34. Concentración de O_2 promedio del Grupo G3, con banda $\pm\sigma$. Fuente: elaboración propia, 2026. 69
35. Concentración de CO promedio del Grupo G3, con banda $\pm\sigma$. Fuente: elaboración propia, 2026. 70
36. Concentración de CO_2IR promedio del Grupo G3, con banda $\pm\sigma$. Fuente: elaboración propia, 2026. 70
37. Señales de gases promedio del Grupo G3. Fuente: elaboración propia, 2026. 71
38. Perfil de temperatura promedio del Grupo G4 (protocolo 40/20, extensión). Fuente: elaboración propia, 2026. 71
39. Señales de gases promedio del Grupo G4. Fuente: elaboración propia, 2026. 72
40. Concentración de O_2 promedio del Grupo G4, con banda $\pm\sigma$. Fuente: elaboración propia, 2026. 72
41. Concentración de CO promedio del Grupo G4, con banda $\pm\sigma$. Fuente: elaboración propia, 2026. 73
42. Concentración de CO_2IR promedio del Grupo G4, con banda $\pm\sigma$. Fuente: elaboración propia, 2026. 73
43. Comparación de la concentración de CO promedio durante el CDS. Fuente: elaboración propia, 2026. 74
44. Producción específica de CO frente a la temperatura para los tres grupos. Fuente: elaboración propia, 2026. 78
45. Señales de gases del Experimento N°1. Fuente: elaboración propia, 2026. 94
46. Perfiles de temperatura del Experimento N°1. Fuente: elaboración propia, 2026. 94
47. Señales de gases del Experimento N°2. Fuente: elaboración propia, 2026. 95
48. Perfiles de temperatura del Experimento N°2. Fuente: elaboración propia, 2026. 95
49. Señales de gases del Experimento N°3. Fuente: elaboración propia, 2026. 96
50. Perfiles de temperatura del Experimento N°3. Fuente: elaboración propia, 2026. 96
51. Señales de gases del Experimento N°4. Fuente: elaboración propia, 2026. 97
52. Perfiles de temperatura del Experimento N°4. Fuente: elaboración propia, 2026. 97
53. Señales de gases del Experimento N°5. Fuente: elaboración propia, 2026. 98
54. Perfiles de temperatura del Experimento N°5. Fuente: elaboración propia, 2026. 98
55. Señales de gases del Experimento N°6. Fuente: elaboración propia, 2026. 99
56. Perfiles de temperatura del Experimento N°6. Fuente: elaboración propia, 2026. 99
57. Señales de gases del Experimento N°7. Fuente: elaboración propia, 2026. 100
58. Perfiles de temperatura del Experimento N°7. Fuente: elaboración propia, 2026. 100
59. Señales de gases del Experimento N°8. Fuente: elaboración propia, 2026. 101
60. Perfiles de temperatura del Experimento N°8. Fuente: elaboración propia, 2026. 101
61. Señales de gases del Experimento N°9. Fuente: elaboración propia, 2026. 102
62. Perfiles de temperatura del Experimento N°9. Fuente: elaboración propia, 2026. 102
63. Señales de gases del Experimento N°10. Fuente: elaboración propia, 2026. 103
64. Perfiles de temperatura del Experimento N°10. Fuente: elaboración propia, 2026. 103
65. Señales de gases del Experimento N°11. Fuente: elaboración propia, 2026. 104
66. Perfiles de temperatura del Experimento N°11. Fuente: elaboración propia, 2026. 104

67. Señales de gases del Experimento N°12. Fuente: elaboración propia, 2026. 105
68. Perfiles de temperatura del Experimento N°12. Fuente: elaboración propia, 2026. 105

Índice de tablas

2. Comparación cuantitativa de métodos de producción de CO a partir de CO_2. Fuentes: [1, 12, 34, 36, 10]. 25
3. Efecto de la morfología del CeO_2 en la producción de CO por CO_2 splitting. Fuente: compilado de [15]. 32
4. Parámetros eléctricos del sistema de calentamiento en las dos condiciones de operación de la campaña. 50
5. Diseño de experimentos de la campaña. Tensión: calentamiento/TR → CDS. 60
6. Parámetros constantes empleados en el procesamiento de datos y el cálculo de rendimientos. Fuente: elaboración propia, 2026. 61
7. Temperatura máxima de reducción (TC7) por grupo. Fuente: elaboración propia, 2026. 74
8. Métricas de rendimiento por grupo: producción total de CO, rendimiento específico, tasa media de producción y eficiencia eléctrica. Fuente: elaboración propia, 2026. 74
9. Conversión base reactor y razón CO:CO_2 por grupo, a partir de la señal del Testo 350. Fuente: elaboración propia, 2026. 75
10. Composición molar del gas de proceso por cromatografía de gases. Los resultados se expresan como valor promedio ± desviación estándar. Fuente: elaboración propia a partir de los Informes QUI-059-26 y QUI-094-26, 2026. 75
11. Posicionamiento del presente trabajo frente a reactores de referencia del estado del arte. Fuente: elaboración propia, 2026. 76
12. Correspondencia entre experimentos (bitácora) y archivos de planilla. Fuente: elaboración propia, 2026. 93

Nomenclatura y Abreviaciones

Compuestos y materiales

CeO_2	Dióxido de cerio (ceria), material reactivo del ciclo.
$CeO_{2-\delta}$	Ceria no estequiométrica (con vacantes de O).
CO	Monóxido de carbono, producto de la etapa CDS.
CO_2	Dióxido de carbono, reactivo de la etapa CDS.
N_2	Nitrógeno, gas de barrido en la etapa TR.
O_2	Oxígeno, producto de la etapa TR.
H_2	Hidrógeno, producto del ciclo WS (no producido aquí).
H_2O	Agua, reactivo del ciclo WS (no estudiado aquí).
MO	Óxido metálico genérico de intercambio de oxígeno.
YSZ	Zirconia estabilizada con itria (electrolito SOEC).
LSM	Perovskita $La_{1-x}Sr_xMnO_3$, redox alternativo.
Kanthal A-1	Aleación Fe-Cr-Al de las resistencias, $T_{\text{máx}} = 1400°C$.
Syngas	Gas de síntesis: mezcla H_2/CO.

Procesos y tecnologías

TR	*Thermal Reduction*: Reducción Térmica (paso 1).
CDS	*CO_2 Splitting*: disociación del CO_2 (paso 2, estudiado).
WS	*Water Splitting*: disociación del agua (paso 2, no abordado).
DRM	*Dry Reforming of Methane*: reformado seco de metano.
SOEC	Celda de electrólisis de óxido sólido.
FT	Fischer-Tropsch: síntesis de combustibles desde syngas.
SNG	Gas natural sintético.
SAF	Combustible de aviación sostenible.
CCS	Captura y almacenamiento de CO_2.
CCU	Captura y utilización de CO_2.
DAC	Captura directa de CO_2 del aire.
GTL	*Gas-to-Liquid*: syngas a combustibles líquidos.
CSP	Energía solar de concentración.
PDR	Receptor solar de plato parabólico.
RPC	Cerámica porosa reticulada.
PCCD	Dopantes pareados de carga compensada.

Instrumentación y equipos

Reactor WS	Reactor de lecho fijo del Lab. de Termofluidos UTFSM.
Testo 350	Analizador de gases (O_2, CO, NO, CO_2IR) a 1 Hz.
CO_2IR	Canal de CO_2 por infrarrojo (NDIR) del Testo 350.
T90	Tiempo de respuesta al 90 % (≈30–40 s).
GC	Cromatografía de gases.
QUI-059-26	Informe cromatográfico (muestra CI 132, Exp. N°4).
TC1–TC9	Termocuplas tipo B del Reactor WS.
TC7	Termocupla más caliente (≈820–837°C a 70 V).
MFC	Controlador de flujo másico (AALBORG).
TSGC2-9000VA	Variac trifásico de las resistencias.
TDGC2-10	Variac monofásico auxiliar.
TGA	Análisis termogravimétrico.
SEM	Microscopía electrónica de barrido.
PFD	Diagrama de flujo de proceso.

Instituciones y contexto

UTFSM	Universidad Técnica Federico Santa María.
VIU	Vicerrectoría de Investigación, Innovación y Vinculación.
CTI	Centro Tecnológico para la Innovación.
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático.
IEA	Agencia Internacional de Energía.
GEI	Gases de efecto invernadero.
TRL	Nivel de madurez tecnológica (escala 1–9).
DNI	Irradiación normal directa [kWh/m^2/año].
NHE	Electrodo normal de hidrógeno.
SSA	Área superficial específica [m^2/g].
ppm	Partes por millón.

Símbolos

Símbolo	Descripción
δ	Grado de no estequiometría del CeO_2 [adimensional].
$\delta_{\text{máx}}$	No estequiometría máxima sin cambio de fase ($\approx 0{,}35$).
X	Avance de la oxidación (fracción de vacantes reoxidadas) [–].
$\Delta H^\circ_{\text{CO}}$	Entalpía de combustión del CO = 283 kJ/mol.
ΔG°	Energía libre de Gibbs estándar [kJ/mol].
ΔS°	Entropía de intercambio de oxígeno [J/mol·K].
η_{elect}	Eficiencia eléctrica: $\eta = (n_{\text{CO}} \cdot \Delta H^\circ_{\text{CO}})/E_{\text{eléct}}$.
η_{CDS}	Eficiencia eléctrica referida solo a la etapa CDS.
η_{completa}	Eficiencia del proceso completo (precalentamiento + inyección).
η_{solar}	Eficiencia solar-to-fuel (literatura, no comparable directa).
n_{CO}	Moles de CO producidos [μmol].
n_{CO}^{neto}	Moles de CO netos, con corrección de línea base [μmol].
$\bar{y}_{\text{CO}}^{base}$	Línea base de CO promediada en la ventana de N_2 previa [ppm].
$y_{\text{CO}}(t)$	Concentración instantánea de CO [ppm].
n_{CeO_2}	Moles de CeO_2 cargados (= 1,627 mol).
m_{CeO_2}	Masa de CeO_2 cargada (= 280 g).
M_{CeO_2}	Masa molar del CeO_2 (= 172,115 g/mol).
$E_{\text{eléct}}$	Energía eléctrica consumida en la inyección [Wh o kJ].
$P_{\text{eléct}}$	Potencia eléctrica total de las resistencias [W].
t_{iny}	Duración del período de inyección de CO_2 [min].
Q	Caudal volumétrico de gas [L/min].
V_m	Volumen molar del gas (= 23,644 L/mol a 15°C, 1 atm).
V, I	Tensión [V] y corriente [A] por fase de alimentación.
p_{O_2}	Presión parcial de oxígeno [bar o atm].
p_{CO_2}	Presión parcial de dióxido de carbono [bar o atm].
E_a	Energía de activación [kJ/mol].
A	Factor preexponencial de Arrhenius.
R	Constante universal de los gases (= 8,314 J/mol·K).
T_{red}, T_{ox}	Temperaturas de reducción y oxidación [°C o K].
$u(\cdot)$	Incertidumbre estándar de la magnitud indicada.

1. Introducción

1.1. Contexto energético global

La historia energética moderna ha estado marcada por una dependencia casi absoluta de los combustibles fósiles. Desde la Revolución Industrial, el carbón, el petróleo y el gas natural impulsaron un crecimiento económico y social sin precedentes, pero al costo de una acumulación sostenida de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. El dióxido de carbono (CO_2) es el principal responsable de este fenómeno: su concentración atmosférica creció desde aproximadamente 270 ppm en la era preindustrial hasta superar los 417 ppm en 2021 [1], y continuó escalando hasta 422.5 ppm en 2024, un nivel 52 % superior al preindustrial y el más elevado en al menos 800.000 años de registro climático [3, 4].

Las emisiones globales de CO_2 asociadas a la energía alcanzaron en 2024 un nuevo máximo histórico de 37.8 Gt CO_2, con un incremento del 0.8 % respecto a 2023 [3]. Esta tendencia se mantiene a pesar del crecimiento récord de las energías renovables: por primera vez en la historia, las fuentes renovables y la energía nuclear cubrieron conjuntamente el 40 % de la generación eléctrica global en 2024 [3], lo que ilustra un desafío fundamental. El aumento de la demanda energética global (2.2 % en 2024) supera la capacidad de desplazamiento de los combustibles fósiles por parte de las renovables, y los sectores de transporte pesado, aviación e industria química no pueden electrificarse directamente en el corto plazo [35]. Es precisamente en ese espacio donde los combustibles solares basados en CO encuentran su mayor relevancia.

La Figura 1 muestra la evolución de las emisiones globales de gases de efecto invernadero desglosadas por país entre 1990 y 2023. Se observa que las emisiones crecieron de forma sostenida desde ≈35 Gt hasta 50.8 Gt, con China como el mayor contribuyente al incremento a partir de la década de 2000, superando a Estados Unidos como principal emisor desde 2006. El descenso temporal registrado en 2020 refleja la reducción de actividad económica asociada a la pandemia de COVID-19, pero fue completamente revertido en los años siguientes, confirmando que la tendencia de largo plazo no ha sido alterada estructuralmente.

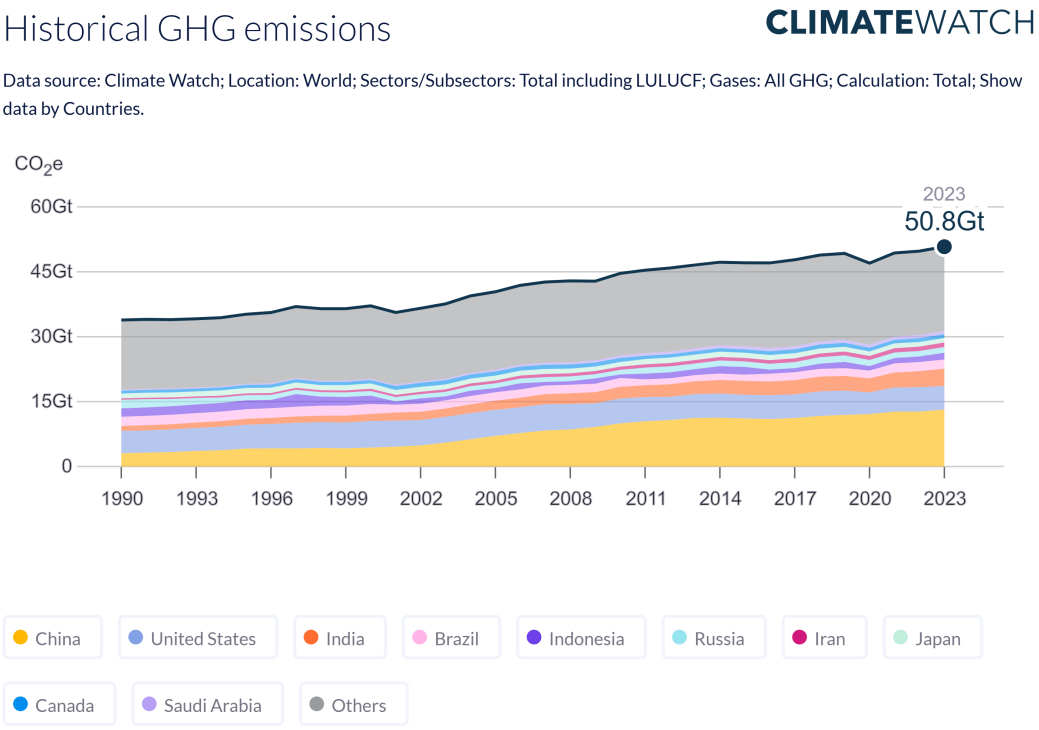


Figura 1: Emisiones históricas de gases de efecto invernadero (GEI) por país (1990–2023). Fuente: Climate Watch, World Resources Institute, 2024 [6].

Las consecuencias de esta acumulación son documentadas con creciente certeza científica. El Sexto Informe de Evaluación del IPCC (AR6, 2021) establece que el calentamiento global es inequívocamente causado por la actividad humana, y que sus efectos (aumento del nivel del mar, acidificación oceánica, eventos climáticos extremos y pérdida acelerada de biodiversidad) se intensificarán de forma no lineal al superar umbrales críticos de temperatura [2]. El Acuerdo de París (COP21, 2015) fijó como objetivo global limitar el aumento de temperatura media a 2 °C respecto a niveles preindustriales, con esfuerzos por contenerlo a 1.5 °C. Sin embargo, al ritmo actual de emisiones, el Global Carbon Project estima que el presupuesto de carbono compatible con el límite de 1.5 °C se agotará en aproximadamente seis años [4].

La Figura 2 complementa la visión anterior con tres perspectivas adicionales. El panel (a) muestra las emisiones por país desde 1960, evidenciando el marcado ascenso de China y la relativa estabilización de Estados Unidos y Europa. El panel (b) desglosa las emisiones por tipo de combustible, confirmando que el carbón sigue siendo el mayor contribuyente individual, seguido del petróleo y el gas natural. El panel (c) presenta las emisiones per cápita, donde se observa que, pese al crecimiento absoluto de China, su huella por habitante aún converge hacia el promedio mundial, mientras que Estados Unidos mantiene los niveles per cápita más elevados. En conjunto, estas tres perspectivas confirman que la descarbonización requiere transformaciones simultáneas en la matriz energética, la estructura industrial y los patrones de consumo a nivel global.

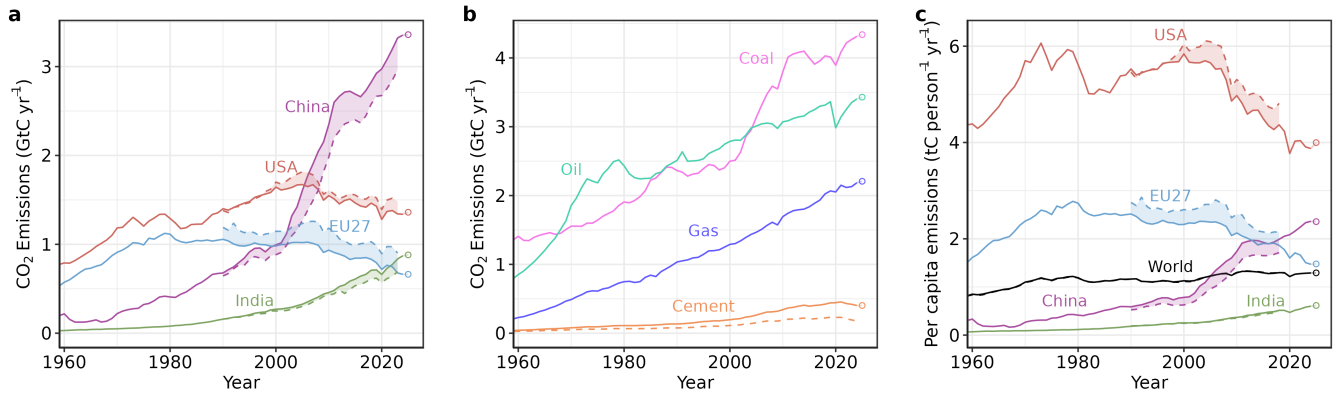


Figura 2: Evolución de las emisiones globales de CO_2 fósil por país, combustible y per cápita (1960–2024). Fuente: Global Carbon Project, Friedlingstein et al., 2024 [4].

Frente a este escenario, se han identificado tres estrategias complementarias de mitigación [1]: (i) la *transición energética*, con sustitución de combustibles fósiles por fuentes renovables; (ii) la *captura y almacenamiento geológico* del CO_2 (CCS), limitada por su alto costo energético, la durabilidad incierta del almacenamiento y el consumo de combustibles fósiles en el propio proceso (20–60 % del carbono tratado); y (iii) la *utilización del CO_2 como materia prima* (CCU, *Carbon Capture and Utilization*), estrategia que resulta 20 a 40 veces más efectiva que el almacenamiento geológico por unidad de CO_2 tratada [1]. Esta última constituye el fundamento tecnológico del presente trabajo.

1.2. Contexto energético nacional: Chile y el potencial de los combustibles solares

Chile se encuentra en una posición singularmente ventajosa en el panorama energético global. El desierto de Atacama posee la mayor radiación solar del planeta, con valores de irradiación normal directa (DNI) que superan los 3.500 kWh/m^2/año en zonas del norte del país [5]. La Patagonia Magallánica añade un recurso eólico de clase mundial, configurando un potencial de energía renovable equivalente a 70 veces la demanda energética nacional [5]. Proyecciones de la Agencia Internacional de Energía sitúan a Chile como uno de los pocos países capaz de producir hidrógeno verde por debajo de los US$ 1.6/kg ya en 2030, con costos estimados entre US$ 0.95/kg y US$ 1.05/kg según estudios encargados por el propio Ministerio de Energía [5].

Reconociendo este potencial, en noviembre de 2020 el Ministerio de Energía de Chile presentó la "Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde", con tres objetivos principales: producir el hidrógeno verde más barato del planeta para 2030, situarse entre los tres principales exportadores para 2040 y contar con 5 GW de capacidad de electrólisis en desarrollo para 2025 [5]. La producción de combustibles solares basados en CO (precursores del syngas para síntesis Fischer-Tropsch y combustibles de aviación sostenibles) constituye una extensión natural de esta estrategia hacia vectores energéticos de alta densidad plenamente compatibles con la infraestructura industrial existente [35].

1.3. Combustible solar: el ciclo termoquímico de dos pasos

La percepción del CO_2 como residuo está siendo reemplazada por su valorización como materia prima: mediante el aporte de energía renovable, la molécula puede convertirse en monóxido de carbono (CO), un portador energético de alto valor. Cuando esa energía proviene del sol, el producto es un *combustible solar*, cuya combustión reintegra exactamente el CO_2 capturado como reactivo y cierra así un ciclo de carbono neutro. El CO_2 es termodinámicamente muy estable ($\Delta G^\circ \approx -394$ kJ/mol [1]), lo que exige superar una barrera considerable para su activación; el CO resultante, en cambio, es un intermediario de amplio uso industrial.

El interés en el CO como combustible solar radica en su versatilidad: es el precursor de la síntesis Fischer-Tropsch, que convierte syngas (H_2/CO) en hidrocarburos líquidos y combustibles de aviación sostenibles (*e-fuels*); permite producir syngas de composición controlada ajustando la razón H_2/CO para obtener metano, metanol o diésel; y es materia prima directa en la producción de ácido acético, fosgeno y aldehídos [11, 1, 14].

La Figura 3 sintetiza el concepto: el CO_2 capturado se convierte en CO mediante energía solar concentrada en el Reactor WS; ese CO se emplea en síntesis química o se transforma en *e-fuels* vía Fischer-Tropsch, y al quemarse re-emite exactamente el CO_2 capturado al inicio, cerrando el ciclo sin emisiones netas.

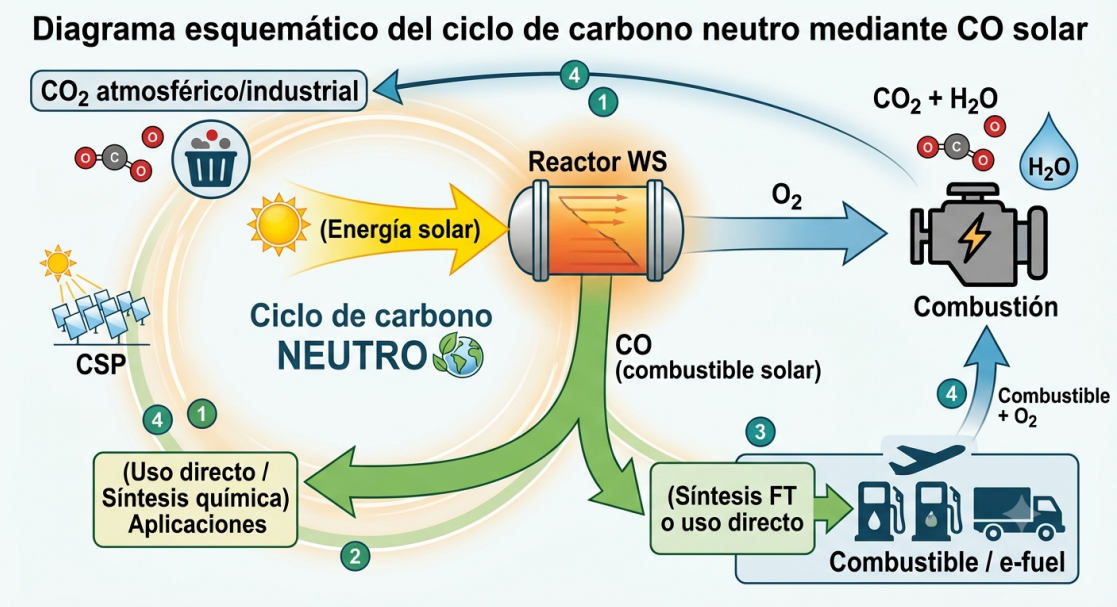


Figura 3: Ciclo de carbono neutro mediante producción de CO solar. Elaboración con IA, 2026.

La conversión de CO_2 en CO puede lograrse por diversas rutas (termólisis directa, reformado seco de metano, electrólisis de alta temperatura, fotocatálisis y ciclos termoquímicos redox de dos pasos), que difieren en su principio físico-químico, temperatura de operación y madurez tecnológica. Su revisión comparada se aborda en el Capítulo 3; el presente trabajo adopta la última de ellas, que se introduce a continuación.

El ciclo termoquímico de dos pasos con óxidos metálicos fue propuesto por primera vez por Funk y Reinstrom en 1966 en el contexto de reactores nucleares de alta temperatura (≈950 °C) para producir hidrógeno [12]. Experimentó un resurgimiento activo a partir del año 2000, impulsado por el potencial de la energía solar concentrada para suministrar el calor de alta temperatura necesario de forma renovable y continua [12, 33]. El principio consiste en utilizar un óxido metálico (MO) como mediador que absorbe y libera oxígeno de forma cíclica. Las reacciones que describen el ciclo de forma genérica son [10, 11]:

$$\text{Paso 1 – Reducción Térmica (TR):} \qquad \mathrm{MO}_x \xrightarrow{T_{\text{red}},\, \Delta H>0} \mathrm{MO}_{x-y} + \frac{y}{2}\,\mathrm{O}_2 \tag{1.1}$$

$$\text{Paso 2 – } \mathrm{CO}_2 \text{ Splitting (CDS):} \qquad \mathrm{MO}_{x-y} + y\,\mathrm{CO}_2 \xrightarrow{T_{\text{ox}},\, \Delta H<0} \mathrm{MO}_x + y\,\mathrm{CO} \tag{1.2}$$

La reacción neta es equivalente a $CO_2 \rightarrow CO + \frac{1}{2}O_2$, idéntica a la termólisis directa, pero ejecutada en dos pasos secuenciales a temperaturas significativamente menores y con producción separada de los gases [10]. En la variante *Water Splitting* (WS), el reactivo de la Ecuación 1.2 es H_2O en lugar de CO_2, produciendo H_2. Ambas variantes pueden ejecutarse en el mismo reactor para producir syngas (H_2/CO) de composición

controlada, compatible directamente con la síntesis Fischer-Tropsch [11]. El presente trabajo se enfoca exclusivamente en la variante CO_2 Splitting (CDS).

La Figura 4 ilustra el esquema completo del ciclo termoquímico con dióxido de cerio (CeO_2), en adelante también denominado *ceria*. En la Etapa 1 (reducción térmica, TR), la ceria es calentada hasta su temperatura de reducción, liberando O_2 y formando la ceria reducida $CeO_{2-\delta}$. Esta etapa puede operarse con concentración solar real ($T_{red} \approx 1400$ °C) o con calentamiento eléctrico como en el presente trabajo, alcanzando temperaturas de reducción en torno a los 800 °C en el anillo superior del lecho. En la Etapa 2 (CO_2 splitting, CDS), se inyecta CO_2 sobre el material reducido, que lo oxida produciendo CO y regenerando el CeO_2 original, listo para un nuevo ciclo. El diagrama destaca que la fuente de calor puede ser solar concentrada (CSP), de carácter renovable, o eléctrica, y que el CO producido tiene aplicaciones directas en síntesis de combustibles, petroquímica y transporte.

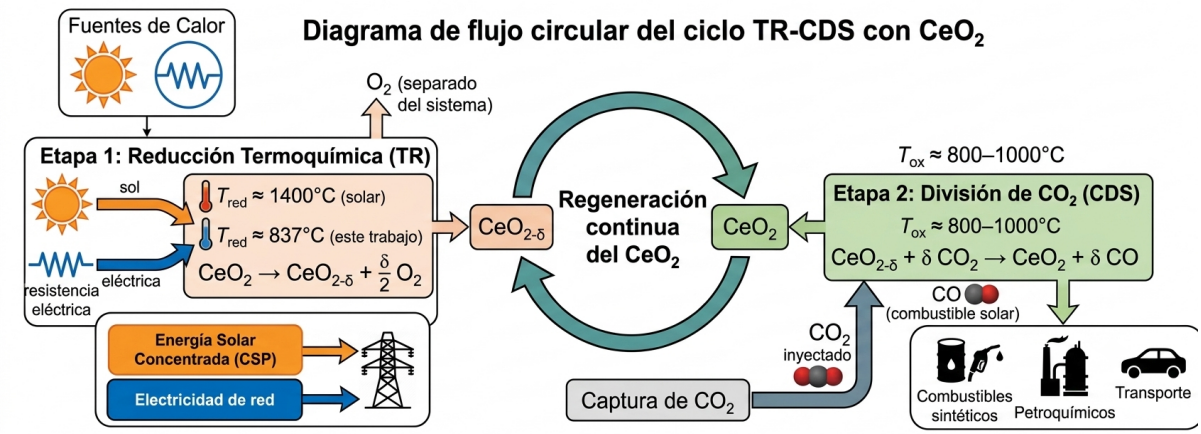


Figura 4: Diagrama de flujo del ciclo termoquímico de dos pasos con CeO_2 (TR–CDS). Elaboración con IA, 2026.

Las ventajas fundamentales del ciclo de dos pasos frente a la termólisis directa son tres. En primer lugar, reduce la temperatura máxima de operación requerida: mientras la termólisis exige $T > 3000$ °C, el ciclo de dos pasos con CeO_2 opera a $T_{red} \approx 1400$–1600 °C, temperatura alcanzable con concentradores solares tipo torre o plato parabólico con razón de concentración $C > 2000$ soles [10, 33]. En segundo lugar, produce O_2 y CO en etapas temporalmente separadas, eliminando el riesgo de mezcla explosiva que hace inviable la termólisis directa y simplificando la recuperación de los productos [10]. En tercer lugar, el MO absorbe la energía solar como calor de alta temperatura, aprovechando el espectro solar completo sin las restricciones de banda espectral que limitan los sistemas fotovoltaicos y fotocatalíticos [12, 36].

El principal desafío tecnológico actual del ciclo es su baja eficiencia *solar-to-fuel*. El máximo experimental reportado es de solo 5.25 % [10], frente al ≈20 % estimado como límite termodinámico y umbral mínimo de viabilidad comercial. Esta brecha se explica principalmente por el diseño del reactor y sus pérdidas térmicas: la pérdida dominante es el calor sensible rechazado al ciclar el reactor entre T_{red} y T_{ox} (que puede superar el 60 % de la energía solar absorbida [10]), a la que se suman las pérdidas ópticas del sistema de concentración (≈20 % de la energía incidente [10]) y las pérdidas por re-radiación a través de la apertura del reactor. La recuperación de este calor sensible entre etapas es considerada hoy la prioridad tecnológica más urgente para escalar el ciclo hacia la viabilidad comercial [10, 32].

La investigación experimental que se presenta en esta Memoria opera con calentamiento eléctrico mediante resistencias Kanthal A-1, lo que permite un control preciso y reproducible de las condiciones operacionales. Esta elección implica temperaturas de reducción menores (en torno a los 800 °C en el anillo superior del lecho) respecto a los reactores solares de referencia, pero es coherente con el objetivo de caracterizar el sistema a

escala de laboratorio y establecer los parámetros óptimos de operación de cara a una futura integración con fuente de calor solar. La campaña experimental abarcó doce pruebas, de las cuales diez se organizaron en tres grupos según su protocolo operacional para obtener resultados promediados y evaluar la repetibilidad del sistema, mientras que las dos restantes se tratan de forma independiente por su carácter exploratorio o incidental. El trabajo se enmarca en la continuación de los experimentos de Rojas et al. [38] y Porras (2024) [37] en el Laboratorio de Termofluidos de la UTFSM, y representa un paso más en la construcción de la capacidad experimental necesaria para desarrollar esta tecnología en Chile.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

En el marco del proyecto CTI250019, denominado "Centro Tecnológico para la Innovación en Transición Energética Sostenible", el objetivo general del presente trabajo de titulación es investigar experimentalmente el proceso termoquímico de dos pasos utilizando óxido de cerio (CeO_2) para la producción de monóxido de carbono (CO) a partir de dióxido de carbono (CO_2) en un reactor solar.

2.2. Objetivos específicos

1. Revisar el estado del arte referente a la producción de monóxido de carbono utilizando energía solar.
2. Implementar un reactor solar de óxido de cerio junto con sus sistemas de medición y control de flujos, temperaturas y análisis de gases.
3. Desarrollar pruebas experimentales variando parámetros como el flujo de nitrógeno y CO_2, tiempo de oxidación, y potencia eléctrica de operación.
4. Analizar los resultados obtenidos identificando puntos óptimos de operación y mejoras para investigaciones futuras.

Cabe precisar que el Reactor WS del Laboratorio de Termofluidos forma parte de una plataforma experimental concebida para operación solar (concentrador PDR, [38]); en la presente campaña el aporte térmico se realiza mediante resistencias eléctricas Kanthal A-1, lo que permite un control preciso y reproducible de las condiciones operacionales como paso previo a la integración solar.

3. Fundamentos y antecedentes

Este capítulo integra los fundamentos físico-químicos que sustentan la investigación con la revisión del estado del arte en el campo. Se organiza en tres bloques: primero se revisan las rutas de producción de CO y los materiales de intercambio de oxígeno que definen el panorama tecnológico; luego se desarrollan los fundamentos teóricos del ciclo termoquímico (termodinámica, cinética y grado de no estequiometría) que gobiernan el proceso; y finalmente se examinan los trabajos experimentales de referencia y los antecedentes directos del Reactor WS, cerrando con el posicionamiento del presente trabajo. El objetivo es entregar, en una sola narrativa, tanto las herramientas conceptuales como el contexto científico necesarios para interpretar el diseño experimental y los resultados.

3.1. Métodos de producción de CO a partir de CO_2

Existen múltiples rutas tecnológicas para convertir el CO_2 en CO, cada una con su propio principio físico-químico, rango de temperatura y fuente de energía. Las subsecciones siguientes describen cada método, sus ventajas, limitaciones y el estado actual de su desarrollo, con el fin de fundamentar la elección del ciclo termoquímico redox como estrategia de este trabajo.

- **Termólisis Directa del CO_2**
  La ruta más directa para producir CO a partir de CO_2 es la disociación térmica directa, en la que la molécula de CO_2 se descompone espontáneamente al recibir suficiente energía calorífica:

$$\mathrm{CO_{2(g)}} \longrightarrow \mathrm{CO_{(g)}} + \frac{1}{2}\,\mathrm{O_{2(g)}} \qquad \Delta H^{\circ}_{298} = +283\ \mathrm{kJ/mol} \tag{3.1}$$

  La reacción es fuertemente endotérmica, lo que significa que requiere una aportación continua de calor para avanzar. Como se aprecia en la Figura 5, la energía libre de Gibbs (ΔG°) de esta reacción es positiva a temperaturas ordinarias y solo se hace negativa (condición de espontaneidad) a temperaturas superiores a ≈3.000 °C. En términos prácticos, esto implica que la termólisis directa requiere una fuente de calor de altísima intensidad, alcanzable únicamente mediante concentración solar extrema o plasmas de alta temperatura.

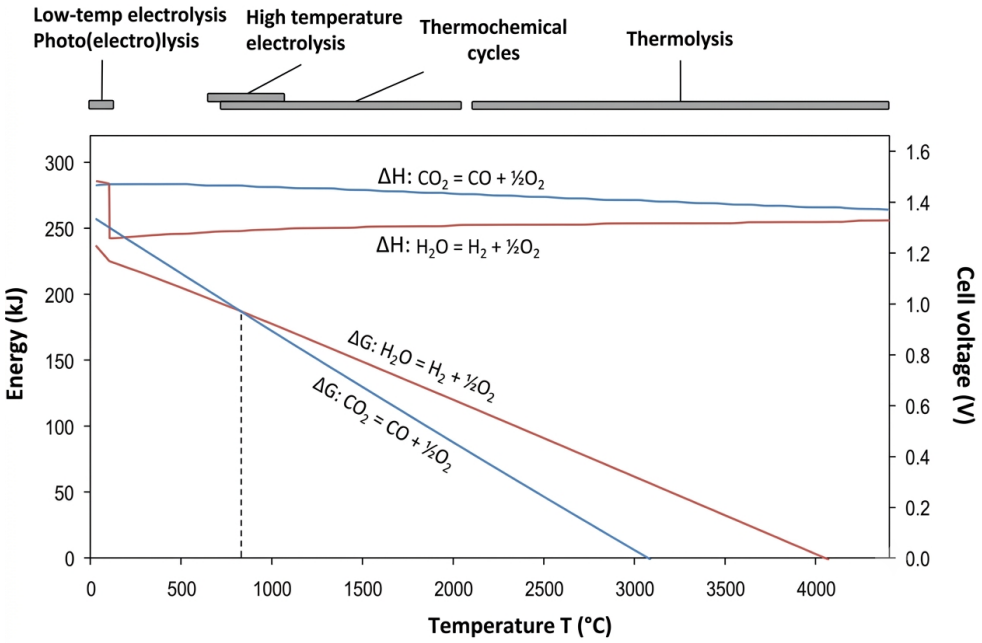


Figura 5: Variación de ΔH° y ΔG° con la temperatura para la termólisis de CO_2 y H_2O. Fuente: Abanades, *Energies*, 2022 [12].

La Figura 5 permite comparar visualmente las ventanas de temperatura operacional de las distintas rutas de producción: la electrólisis a baja temperatura opera entre 0–500°C, la electrólisis de alta temperatura entre 500–1000°C, los ciclos termoquímicos entre 800–2000°C, y la termólisis directa requiere temperaturas superiores a los 3.000°C. Esta perspectiva evidencia por qué la termólisis directa es difícilmente escalable: a esas temperaturas los materiales de construcción del reactor pierden propiedades mecánicas, las pérdidas radiativas crecen con la cuarta potencia de la temperatura absoluta (ley de Stefan-Boltzmann), y lo más crítico, la mezcla de CO y O_2 producida simultáneamente es potencialmente explosiva y su separación a esas temperaturas es técnicamente inviable [12].

Estudios experimentales han intentado superar este último obstáculo mediante membranas separadoras: Itoh et al. utilizaron una membrana de zirconia estabilizada con itria a 1.782 K obteniendo solo 0.5 % de conversión; Zhang et al. lograron un 20 % con una membrana triple a 900°C; y Fan et al. obtuvieron 10 % con un reactor de membrana de óxido sólido a 1.213 K [1]. En todos los casos, las conversiones son insuficientes para aplicaciones industriales, confirmando que la termólisis directa no es viable como ruta de producción de CO a gran escala.

- **Reformado Seco de Metano (DRM)**

El reformado seco de metano (DRM, *Dry Reforming of Methane*) es la tecnología más madura para producir syngas a partir de CO_2. El proceso combina CO_2 con metano (CH_4) a alta temperatura en presencia de un catalizador, produciendo una mezcla de CO e H_2:

$$\mathrm{CH_{4(g)} + CO_{2(g)} \longrightarrow 2\,CO_{(g)} + 2\,H_{2(g)} \qquad \Delta H^\circ_{298} = +247\ \mathrm{kJ/mol}} \tag{3.2}$$

La reacción es endotérmica y requiere temperaturas de 700–1000°C para operar con tasas de conversión aceptables. A estas temperaturas el catalizador activa simultáneamente la ruptura de los enlaces C–H

del metano y C=O del CO_2, permitiendo la reorganización de los átomos en CO e H_2. Sin embargo, la reacción de Boudouard opera en competencia directa con el DRM:

$$\text{Boudouard:} \quad 2\,CO_{(g)} \longrightarrow C_{(s)} + CO_{2(g)} \qquad \Delta H^{\circ}_{298} = -172\ \text{kJ/mol} \tag{3.3}$$

La reacción de Boudouard (Ecuación 3.3) es exotérmica y ocurre espontáneamente a temperaturas menores de ≈700°C. El carbono sólido (C) producido se deposita sobre la superficie del catalizador, bloqueando los sitios activos y desactivándolo progresivamente, fenómeno denominado "coquización". El níquel (Ni) es el metal catalítico más utilizado en DRM por su bajo costo y alta actividad, pero es el más susceptible a la coquización. Los catalizadores de metales nobles como rodio (Rh), rutenio (Ru) y platino (Pt) son más resistentes pero su alto costo limita su aplicación industrial [1]. Adicionalmente, si el calor de reacción proviene de combustibles fósiles, el proceso genera emisiones netas de CO_2, anulando su ventaja ambiental.

Aunque el DRM es la tecnología más madura industrialmente (con plantas comerciales operativas), su dependencia de un co-reactivo fósil (el metano) y su balance de carbono no neutro lo alejan del objetivo de producir combustibles solares limpios: el CO obtenido arrastra la huella de carbono del gas natural empleado. Por ello, para la producción de CO verdaderamente renovable a partir de CO_2, resultan más prometedoras las rutas que prescinden de reactivos fósiles, como la electrólisis y los ciclos termoquímicos que se describen a continuación.

- **Electrólisis de CO_2 (SOEC)**

La electrólisis de CO_2 utiliza energía eléctrica para impulsar la disociación de la molécula en CO y O^{2-} en una celda electroquímica. La variante de mayor interés para alta temperatura es la celda de óxido sólido (SOEC, *Solid Oxide Electrolysis Cell*), en la que el CO_2 se reduce en el cátodo según:

$$CO_{2(g)} + 2e^{-} \longrightarrow CO_{(g)} + O^{2-} \qquad \text{(cátodo SOEC, 700–900°C)} \tag{3.4}$$

Los iones O^{2-} migran a través del electrolito sólido (típicamente zirconia estabilizada con itria, YSZ) hacia el ánodo, donde se oxidan y liberan O_2. La separación de CO y O_2 es inherente al diseño de la celda, lo que elimina el problema de mezcla explosiva presente en la termólisis directa. Las SOEC pueden alcanzar eficiencias faradaicas de hasta el 90 % en la conversión de CO_2 a CO, y su operación a alta temperatura reduce la energía eléctrica requerida al compensar parte del trabajo eléctrico con calor [36].

No obstante, dos limitaciones frenan su escalamiento industrial: la degradación del material de cátodo (principalmente perovskitas tipo LSC) bajo ciclos térmicos repetidos, y la dependencia crítica del costo de la electricidad verde. Solo en regiones con recursos renovables muy abundantes y baratos (como el norte de Chile con su recurso solar del desierto de Atacama) la electrólisis SOEC puede ser económicamente competitiva [36].

- **Fotocatálisis Heterogénea**

La fotocatálisis heterogénea utiliza fotones de la fracción ultravioleta y visible del espectro solar para activar un catalizador semiconductor que impulsa la reducción del CO_2. La reacción general en presencia de agua como agente reductor es:

$$\mathrm{CO_2} + 2\mathrm{H^+} + 2e^- \xrightarrow{h\nu,\ \text{catalizador}} \mathrm{CO} + \mathrm{H_2O} \tag{3.5}$$

La irradiación del semiconductor (TiO_2, g-C_3N_4, ZnO, entre otros) genera pares electrón-hueco (e^-/h^+) que deben migrar a la superficie del material y reaccionar con el CO_2 antes de recombinarse. La recombinación ultrarrápida de estos pares es la principal limitación del proceso: en la mayoría de los semiconductores, más del 99 % de los pares fotogenerados se recombinan sin llegar a participar en la reacción química [1]. Como resultado, la eficiencia cuántica experimental es todavía inferior al 1 % en condiciones de laboratorio, lo que hace que la fotocatálisis sea la ruta con menor densidad de producción de CO de todas las consideradas.

- **Ciclos Termoquímicos Redox de Dos Pasos**

El ciclo termoquímico de reducción-oxidación (*redox*) de dos pasos con óxido metálico (MO) es la ruta que supera de forma más directa los obstáculos de las alternativas anteriores. En lugar de disociar el CO_2 en un solo paso, introduce un mediador sólido (el óxido metálico) que actúa como "transportador" de oxígeno entre dos etapas operadas a temperaturas diferentes [10]:

$$\text{TR (Reducción Térmica):} \quad \mathrm{MO}_x \xrightarrow{T_{\mathrm{red}}} \mathrm{MO}_{x-y} + \frac{y}{2}\,\mathrm{O_2} \quad (\Delta H > 0) \tag{3.6}$$

$$\text{CDS (CO_2 Splitting):} \quad \mathrm{MO}_{x-y} + y\,\mathrm{CO_2} \xrightarrow{T_{\mathrm{ox}}} \mathrm{MO}_x + y\,\mathrm{CO} \quad (\Delta H < 0) \tag{3.7}$$

En la primera etapa, la Reducción Térmica (TR), el MO se calienta a alta temperatura absorbiendo energía solar, libera O_2 y queda en un estado reducido (MO_{x-y}) con vacantes de oxígeno en su red cristalina. En la segunda etapa, el CO_2 Splitting (CDS), el MO reducido se expone al CO_2 a una temperatura menor: las vacantes de oxígeno capturan el átomo de O del CO_2, regenerando el MO original y liberando CO como producto. El resultado neto ($CO_2 \rightarrow CO + \frac{1}{2}O_2$) es idéntico a la termólisis directa, pero ejecutado en dos etapas con producción separada de CO y O_2, eliminando el riesgo de mezcla explosiva, reduciendo la temperatura máxima requerida y aprovechando el espectro solar completo sin restricciones espectrales [10, 12].

La Tabla 2 resume la comparación cuantitativa de las cinco rutas de producción de CO descritas.

Tabla 2: Comparación cuantitativa de métodos de producción de CO a partir de CO_2. Fuentes: [1, 12, 34, 36, 10].

Método	**T °C**	**η típica**	**TRL**	**Escala**	**Limitación principal**
Termólisis directa	> 3000	$< 1\,\%$	1–2	Lab	Mezcla explosiva; separación inviable
DRM	700–1000	70–90 %*	7–8	Industrial	Coquización; no carbono-neutro
Electrólisis SOEC	700–900	50–90 %	5–6	Piloto	Costo electricidad; durabilidad
Fotocatálisis	25–100	$< 1\,\%$	2–4	Lab	Eficiencia cuántica; recombinación
Ciclo redox	800–1600	$\leq$5.25 %	3–5	Demo	Alta T reducción; baja η_{solar}

* Eficiencia de conversión del DRM, no solar-to-fuel.

La Tabla 2 evidencia que el ciclo redox es el único método que aprovecha el espectro solar completo para producir CO a partir de CO_2 sin necesitar un co-reactivo fósil (como el CH_4 en el DRM) ni depender

de electricidad verde (como la SOEC). Su principal desventaja es la baja eficiencia solar-to-fuel actual ($\leq$5.25 %), lo que define el problema central que la investigación en este campo busca resolver. Es precisamente ese espacio donde se inserta el presente trabajo.

3.2. Materiales de reducción-oxidación (redox) para ciclos de dos pasos

Los materiales de reducción-oxidación (redox) (también denominados materiales de intercambio de oxígeno) son el componente central del ciclo termoquímico. Su función es absorber energía solar en la etapa TR para liberar O_2 y almacenar esa energía en forma de vacantes cristalinas, que luego utilizan en la etapa CDS para capturar el oxígeno del CO_2 y producir CO. Las propiedades del material determinan directamente la temperatura de operación, la cantidad de CO producible por ciclo y la estabilidad a largo plazo del sistema. Los materiales redox se clasifican en dos grandes grupos según el comportamiento de fase durante la reducción [12, 11].

La Figura 6 ilustra el principio de operación del ciclo termoquímico con MO: el MO oxidado (MO_{ox}) absorbe energía solar concentrada a alta temperatura (T_{red}), libera O_2 y forma el MO reducido (MO_{red}). Este último reacciona con H_2O o CO_2 a temperatura menor (T_{ox}) produciendo H_2 o CO respectivamente, y regenerando el MO_{ox} para iniciar un nuevo ciclo.

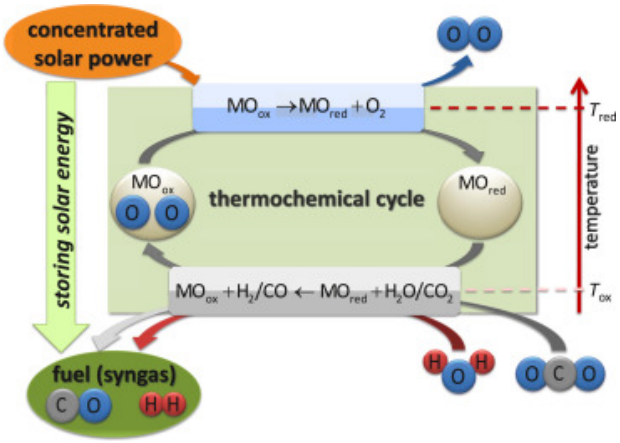


Figura 6: Ciclo termoquímico genérico con óxido metálico (MO). Fuente: Guo et al., *Appl. Energy*, 2024 [11].

La Figura 7 muestra la implementación integrada del sistema completo: el reactor solar de doble cámara con ceria RPC conectado a un concentrador parabólico, una unidad DAC (*Direct Air Capture*, captura directa de CO_2 del aire) que suministra CO_2 capturado directamente del aire, y una unidad GTL (*Gas-to-Liquid*) que convierte el syngas producido en hidrocarburos líquidos compatibles con la infraestructura existente de combustibles.

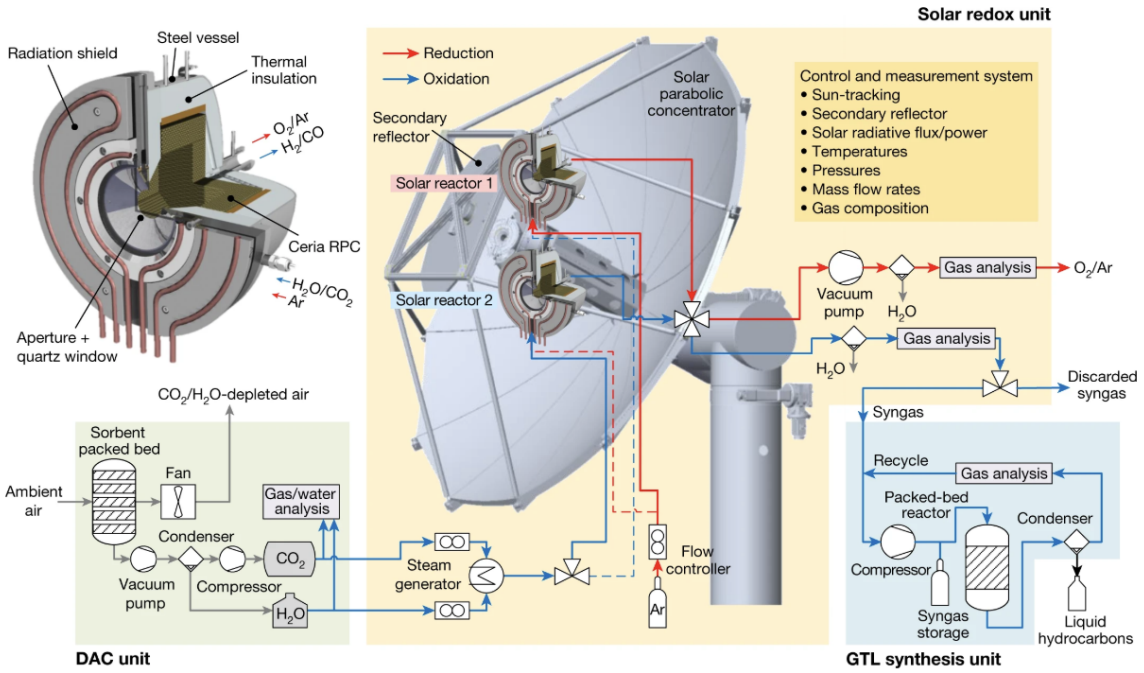


Figura 7: Sistema solar termoquímico integrado con captura DAC y síntesis GTL. Fuente: Guo et al., *Appl. Energy*, 2024 [11].

3.2.1. Ciclos con óxidos volátiles

En los ciclos con óxidos volátiles, el producto de la etapa TR es una especie que se encuentra en estado gaseoso o líquido a la temperatura de reducción. Esto facilita su separación del O_2 co-producido, pero introduce el desafío de recuperar la especie reducida para la etapa CDS. Los dos pares más estudiados son:

- **Par ZnO/Zn:**

$$\text{TR:} \quad \mathrm{ZnO_{(s)}} \xrightarrow{T>1800\,\mathrm{K}} \mathrm{Zn_{(g)}} + \frac{1}{2}\,\mathrm{O_{2(g)}} \tag{3.8}$$

$$\text{CDS:} \quad \mathrm{Zn_{(s)}} + \mathrm{CO_{2(g)}} \rightarrow \mathrm{ZnO_{(s)}} + \mathrm{CO_{(g)}} \tag{3.9}$$

Como muestra la Ecuación 3.8, el zinc (Zn) se produce en fase gaseosa durante la TR ($T > 1800$ K). La eficiencia teórica del ciclo es de 35–50 % con recuperación de calor, la más alta entre los materiales redox estudiados [12]. Sin embargo, el Zn gaseoso debe condensarse en menos de 1 ms para evitar que reaccione de nuevo con el O_2 co-producido (reoxidación), lo que requiere un proceso de enfriamiento ultrarrápido técnicamente muy difícil de implementar a escala industrial. Adicionalmente, la superficie del Zn sólido tiende a pasivarse con una capa de ZnO que limita la cinética de la etapa CDS (Ecuación 3.9) [12].

- **Par SnO_2/SnO:**

$$\text{TR:} \quad \mathrm{SnO_{2(s)}} \xrightarrow{T\approx1600\,\mathrm{C}} \mathrm{SnO_{(g)}} + \frac{1}{2}\,\mathrm{O_{2(g)}} \tag{3.10}$$

$$\text{CDS:} \quad \mathrm{SnO_{(s)}} + \mathrm{CO_{2(g)}} \rightarrow \mathrm{SnO_{2(s)}} + \mathrm{CO_{(g)}} \tag{3.11}$$

El par SnO_2/SnO (Ecuaciones 3.10 y 3.11) opera a temperatura de reducción inferior al par ZnO/Zn y el punto de ebullición del SnO es más alto (1.425°C versus 907°C del Zn), lo que facilita la condensación del producto reducido. Sin embargo, comparte los mismos desafíos fundamentales de separación de productos volátiles y la sensibilidad a la reoxidación durante el enfriamiento [12].

3.2.2. Ciclos con óxidos no volátiles

En los ciclos con óxidos no volátiles, el material redox permanece en estado sólido durante toda la operación, eliminando la necesidad de separación de fases y permitiendo que las etapas TR y CDS ocurran en el mismo reactor simplemente alternando los gases de entrada. Esta característica es fundamental para el diseño de reactores continuos y escalables.

- **Ferritas Fe_3O_4/FeO:**

$$\text{TR:} \quad \mathrm{Fe_3O_{4(s)}} \xrightarrow{T>2100\,\mathrm{K}} 3\,\mathrm{FeO_{(s,l)}} + \frac{1}{2}\,\mathrm{O_{2(g)}} \tag{3.12}$$

$$\text{CDS:} \quad 3\,\mathrm{FeO_{(s)}} + \mathrm{CO_{2(g)}} \rightarrow \mathrm{Fe_3O_{4(s)}} + \mathrm{CO_{(g)}} \tag{3.13}$$

El par Fe_3O_4/FeO fue el primer ciclo no volátil propuesto (Nakamura, 1977) [12]. Las Ecuaciones 3.12 y 3.13 muestran la reducción de la magnetita (Fe_3O_4) a wüstita (FeO) y su posterior reoxidación con CO_2. La temperatura de reducción ($T > 2100$ K) supera el punto de fusión de la FeO (1.811 K), lo que genera una fase líquida que sinteriza la superficie activa del material y reduce dramáticamente el área disponible para la reacción de oxidación en ciclos sucesivos. Para mitigar este efecto, se han desarrollado ferritas sustituidas ($NiFe_2O_4$, $CoFe_2O_4$, $MnFe_2O_4$) en las que cationes de transición reemplazan parcialmente el Fe, reduciendo la temperatura de operación a 1.400–1.600°C con mejor estabilidad [11].

- **Ceria $CeO_2/CeO_{2-\delta}$:**

$$\text{TR:} \quad \mathrm{CeO_2} \xrightarrow{T_{\mathrm{red}}\gtrsim 1400\mathrm{C}} \mathrm{CeO_{2-\delta}} + \frac{\delta}{2}\,\mathrm{O_2} \tag{3.14}$$

$$\text{CDS:} \quad \mathrm{CeO_{2-\delta}} + \delta\,\mathrm{CO_2} \xrightarrow{T_{\mathrm{ox}}\approx 800\text{–}1000\mathrm{C}} \mathrm{CeO_2} + \delta\,\mathrm{CO} \tag{3.15}$$

La ceria opera mediante un mecanismo de reducción parcial no estequiométrica, donde δ representa la cantidad de O liberado por mol de CeO_2. A diferencia de las ferritas, la ceria no requiere cambio de fase durante la operación (su punto de fusión es ≈2.400°C), lo que garantiza la estabilidad estructural del material durante miles de ciclos. Este material se analiza en profundidad en la sección siguiente.

- **Perovskitas ABO_3:**

Las perovskitas con estructura general ABO_3 (donde A y B son cationes de diferente radio iónico) representan la frontera actual de investigación. Materiales como $La_{0,6}Sr_{0,4}MnO_3$ (LSM) y sus variantes dopadas logran producciones de CO superiores a 200 μmol/g a 1.400°C, superando en actividad a la ceria pura [11, 10]. Sin embargo, su estabilidad cíclica es generalmente inferior y son más susceptibles a la sinterización. La amplia posibilidad de sustitución en los sitios A y B abre un gran espacio de diseño, actualmente siendo explorado con asistencia de inteligencia artificial.

3.3. Óxido de cerio (CeO_2): material de referencia

Entre todos los materiales redox estudiados para ciclos termoquímicos de dos pasos, el dióxido de cerio (CeO_2), conocido como *ceria*, ha emergido como el material de referencia del campo. Su combinación única de estabilidad estructural, cinética favorable y versatilidad de morfología lo ha posicionado como el material más ampliamente investigado desde 2006. Las siguientes subsecciones describen sus propiedades fundamentales, las estrategias de dopado para mejorar su rendimiento, y el efecto de la morfología sobre la producción de CO.

- **Propiedades que lo Convierten en el Material de Referencia**

  La estructura cristalina de la ceria corresponde a la fluorita cúbica (grupo espacial $Fm\bar{3}m$), en la que los cationes Ce^{4+} ocupan las posiciones de una red FCC y los aniones O^{2-} llenan todos los sitios tetraédricos. Esta estructura presenta una propiedad inusual: puede tolerar una reducción parcial extensiva (con pérdida de hasta un 25 % de los iones O^{2-}) sin sufrir un cambio de fase, formando la ceria no estequiométrica $CeO_{2-\delta}$ con vacantes de oxígeno distribuidas en la red. Las propiedades que la convierten en el material de referencia son [15, 16]:

  - **No volatilidad:** la ceria permanece en estado sólido durante toda la operación ($T_{\text{fusión}} \approx 2400$°C), lo que elimina la necesidad de condensación de productos y simplifica enormemente el diseño del reactor.
  - **Alta entropía de intercambio de oxígeno:** $\Delta S_O \approx 2000$ J/mol·K, inusualmente alta comparada con otros óxidos no volátiles. Un alto ΔS_O significa que la diferencia de temperatura necesaria entre las etapas TR y CDS para que el ciclo sea termodinámicamente favorable es menor, reduciendo las pérdidas por calor sensible y mejorando la eficiencia del ciclo [15].
  - **Estabilidad estructural:** la estructura de fluorita cúbica se mantiene intacta durante el ciclado redox, evitando la formación de fases secundarias que degraden el rendimiento con el número de ciclos. El punto de sinterización de la ceria (≈950°C) es suficientemente alto para operar en la etapa CDS sin pérdida significativa de área superficial a corto plazo.
  - **Cinética rápida de reoxidación:** para partículas menores de 0.4 mm de radio a 1.500°C, los tiempos de difusión del oxígeno en el bulk son menores de 10 s, demostrando que la reacción química es intrínsecamente rápida cuando el calor está disponible [15].
  - **Tolerancia a la reducción parcial:** a diferencia de las ferritas, la ceria puede operar con valores de δ pequeños y reproducibles (0.01–0.05), lo que hace predecible y controlable su comportamiento en cada ciclo.

- **CeO_2 Dopado: Mejora de las Propiedades Termodinámicas y Cinéticas**

  A pesar de sus ventajas, la ceria pura requiere temperaturas de reducción superiores a 1.400°C para alcanzar valores de δ prácticos, lo que limita su integración con concentradores solares de menor razón de concentración. La incorporación de dopantes catiónicos en la red de fluorita modifica la energía de formación de vacantes de oxígeno y, por tanto, las propiedades termodinámicas y cinéticas del material [10, 16]:

  - **Zr^{4+}, Hf^{4+}** (dopantes tetravalentes): al sustituir Ce^{4+} por cationes de menor radio iónico, se introduce tensión en la red que facilita la formación y movilidad de vacantes de oxígeno, permitiendo alcanzar mayor δ a menor temperatura. La composición $Ce_{0,75}Zr_{0,25}O_2$ demostró la mejor combinación de alta producción de CO y estabilidad cíclica entre todos los dopantes estudiados [10].

- **Sm^{3+}, Gd^{3+}, La^{3+}** (dopantes trivalentes): la sustitución de Ce^{4+} por cationes trivalentes genera vacantes de oxígeno compensadoras de carga de forma intrínseca, sin necesidad de reducción térmica. Sin embargo, el efecto neto sobre la temperatura de reducción y la producción de CO es ambiguo y depende fuertemente de la concentración del dopante y del método de síntesis del material [16].
- **Dopados PCCD** (pares de cargas compensadas, *Paired Charge-Compensating Dopants*): la combinación simultánea de un dopante trivalente y uno pentavalente, como en $Ce_{0,9}Sc_{0,05}Nb_{0,05}O_2$, mantiene la neutralidad de carga global mientras introduce mayor densidad de defectos activos, logrando altas extensiones de reducción [16].

- **Morfología y Microestructura: Impacto en el Desempeño**

La morfología del CeO_2 es un factor determinante del rendimiento del ciclo, ya que controla directamente el área superficial específica (SSA, *Specific Surface Area*, expresada en m^2/g) disponible para la etapa CDS y la capacidad de absorción de la radiación solar en la etapa TR. Pullar et al. [15] demostraron que la etapa TR (Reducción Térmica) está limitada por la "transferencia de calor" hacia el interior del material, mientras que la etapa CDS está limitada por la *cinética superficial* de la reacción con CO_2: mayor SSA implica más sitios activos disponibles y mayor tasa de producción de CO.

La Figura 8 muestra el panorama completo de morfologías de CeO_2 investigadas. Los paneles (a)–(l) presentan imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) de partículas de ceria con distintos esquemas de dopado catiónico (Sr, Ba, Ca, Sn, La, Pr, Nd, Gd, Dy, Er, Tb), donde se aprecian las diferencias en microestructura superficial que determinan el SSA efectivo de cada material. Los paneles (m)–(p) muestran las estructuras porosas tridimensionales de mayor relevancia: la espuma RPC (*Reticulated Porous Ceramics*) de escala simple (m), la espuma microestructurada (n), la RPC de doble escala de porosidad que combina macro y microporosidad (o) y las estructuras con porosidad ordenada tipo diamante (p). En el presente trabajo se utiliza CeO_2 puro en trozos porosos irregulares, morfología más cercana a las estructuras porosas no diseñadas (como la monolítica porosa del panel m) que a los polvos de los paneles (a)–(d). Su porosidad natural ofrece un SSA mayor que el de un sólido denso, aunque menor que el de las RPC con porosidad de doble escala, y permite el estudio paramétrico del ciclo a escala de laboratorio con gran simplicidad de carga y manipulación.

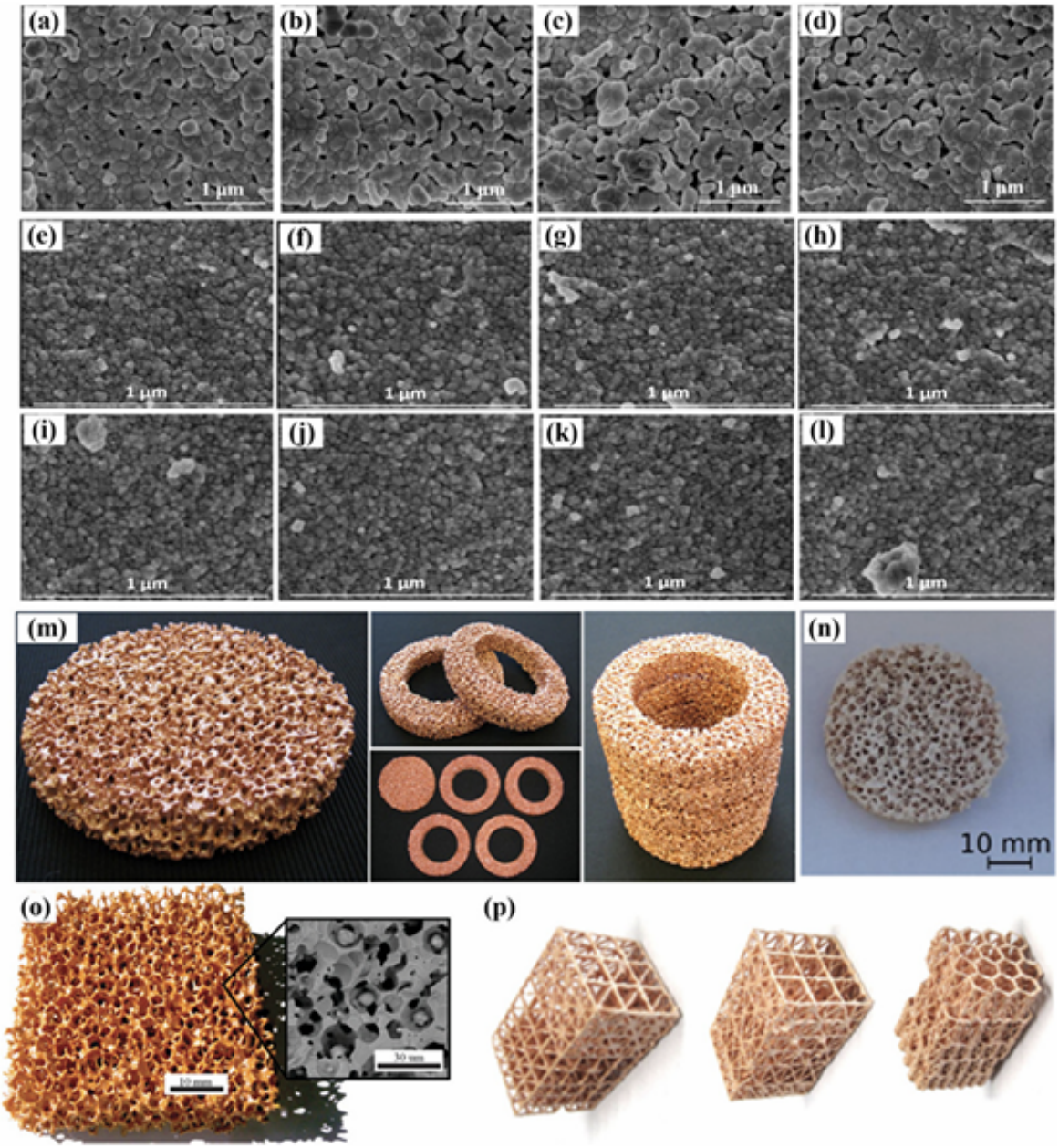


Figura 8: Morfologías de CeO_2 desarrolladas para ciclos termoquímicos. Fuente: Wei et al., *Chem. Commun.*, 2025 [10].

La Tabla 3 cuantifica el impacto de la morfología sobre la producción de CO, comparando resultados reportados en la literatura para distintas estructuras bajo condiciones comparables de temperatura.

Tabla 3: Efecto de la morfología del CeO_2 en la producción de CO por CO_2 splitting. Fuente: compilado de [15].

Morfología	T_{TR} **°C**	T_{CDS} **°C**	δ **[-]**	**CO [mL/g]**	**Calentamiento**
Polvo (TGA)	1400	1000	0.037	2.28	Eléctrico (IR)
Polvo (TGA)	1500	1000	0.088	5.47	Eléctrico (IR)
Monolítica porosa	1581–1624	800		4.31	Solar real
Fieltro poroso	1650	1000	0.044	2.19	Solar simulado
RPC espuma simple	1530	1200–300		5.39	Solar simulado
RPC doble escala	1420	825	0.042	5.69	Solar simulado
Biomórfica (madera)	1400–1500	800		$\approx$ 4.5	Eléctrico

La Tabla 3 revela tres tendencias importantes. Primero, a mayor temperatura de reducción (T_{TR}), mayor es el δ alcanzado y, por tanto, mayor la producción de CO: compárese el polvo a 1400°C ($\delta = 0{,}037$, CO = 2.28 mL/g) con el polvo a 1500°C ($\delta = 0{,}088$, CO = 5.47 mL/g). Segundo, la morfología RPC de doble escala supera a todas las demás en producción absoluta de CO (5.69 mL/g), confirmando que la optimización de la estructura porosa es el camino más efectivo para mejorar el rendimiento a temperatura de reducción fija. Tercero, las morfologías porosas sin diseño de doble escala (monolítica porosa, fieltro) producen consistentemente menos CO que las RPC optimizadas a la misma temperatura, lo que es coherente con su menor SSA efectivo; los trozos porosos irregulares utilizados en el presente trabajo pertenecen a esta categoría intermedia, siendo la morfología monolítica porosa de Chueh et al. la referencia más cercana. Dado que el Reactor WS opera a $\approx$837°C, su producción de CO se sitúa por debajo de todos los valores de la tabla, lo que establece el contexto cuantitativo para interpretar los resultados experimentales del Capítulo 5.

3.4. Tecnologías de concentración solar y diseño de reactores

La etapa TR requiere temperaturas de 1.400–1.600°C, alcanzables únicamente mediante concentración solar. Los tres sistemas de concentración disponibles son [33, 10]:

- **Plato parabólico:** $C > 2000$ soles, hasta 2.000°C, escala 1–10 kW; utilizado en ETH Zürich.
- **Torre solar:** $C = 500$–2.000 soles, 800–1.200°C, escala 1–100 MW; el candidato más prometedor para escalado industrial.
- **Horno solar:** hasta 1 MW, como el de PROMES-CNRS ("Processes, Materials and Solar Energy") en Odeillo, Francia, con $\approx$60 % de eficiencia térmica.

A su vez, los reactores para ciclos termoquímicos se clasifican en tres tipos según su configuración [11, 10]:

- **Lecho fijo:** diseño simple, con el mismo reactor para las etapas TR y CDS.
- **Lecho fluidizado rotativo:** operación cuasi-continua con recuperación de calor sensible, a costa de mayor complejidad mecánica.
- **Reactor de membrana:** emplea ceria que conduce iones O^{2-}, permitiendo operación isotérmica.

El Reactor WS de la UTFSM es de lecho fijo, con la variante de calentamiento eléctrico en lugar de solar.

La pérdida de calor sensible al transitar de T_{red} a T_{ox} entre ciclos representa más del 60 % de la energía solar absorbida [10]. Análisis teóricos muestran que con recuperación completa del calor sensible y eficiencia de bombeo del 50 %, la eficiencia solar-to-fuel podría superar el 20 %, el umbral mínimo de viabilidad comercial [16].

Establecido el panorama de rutas y materiales, esta segunda parte desarrolla los fundamentos físico-químicos que gobiernan el ciclo termoquímico y que sustentan el diseño experimental y la interpretación de los resultados. Se aborda la termodinámica del CO_2 splitting, la cinética de las reacciones de reducción y oxidación, el grado de no estequiometría (δ) y el rol de la presión parcial de oxígeno y del gas de barrido.

3.5. Termodinámica del CO_2 splitting: límites fundamentales

La disociación del CO_2 es la reacción global que ambos enfoques (termólisis directa y ciclo de dos pasos) buscan ejecutar:

$$\mathrm{CO_{2(g)}} \longrightarrow \mathrm{CO_{(g)}} + \frac{1}{2}\,\mathrm{O_{2(g)}} \qquad \Delta H^{\circ}_{298} = +283\ \mathrm{kJ/mol} \tag{3.16}$$

La espontaneidad de la reacción está gobernada por la energía libre de Gibbs, $\Delta G^{\circ}(T) = \Delta H^{\circ} - T\,\Delta S^{\circ}$. Dado que la reacción (3.16) aumenta el número de moles gaseosos, su cambio de entropía es positivo ($\Delta S^{\circ} \approx 87$ J/mol·K), por lo que ΔG° decrece con la temperatura y cruza el cero solo alrededor de los 3.000 °C. Bajo esa temperatura, la conversión de equilibrio en un solo paso es despreciable, lo que descarta la termólisis directa como ruta práctica [12].

El ciclo de dos pasos evade este límite descomponiendo la reacción global en dos reacciones parciales, cada una espontánea en su propia ventana de condiciones. En la etapa TR, la reducción del CeO_2 es endotérmica y se favorece con alta temperatura y baja presión parcial de oxígeno; en la etapa CDS, la reoxidación con CO_2 es exotérmica y se favorece a temperatura menor. El óxido metálico actúa así como un "almacén químico" de la energía térmica aportada en la reducción, que luego se transfiere al CO producido en la oxidación. La suma de ambas etapas reproduce la reacción (3.16), pero sin requerir jamás la temperatura de inversión de la termólisis [10, 12].

El estado termodinámico del CeO_2 reducido queda descrito por el grado de no estequiometría (δ), que en el equilibrio es función de la temperatura y de la presión parcial de oxígeno, $\delta_{\mathrm{eq}}(T, p_{O_2})$. Bulfin et al. [29] derivaron un modelo analítico ampliamente utilizado que ajusta los datos experimentales de equilibrio de la ceria mediante la relación:

$$\frac{\delta}{\delta_{\mathrm{máx}} - \delta} = A \left(\frac{p_{O_2}}{p^{\circ}}\right)^{-n} \exp\!\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \tag{3.17}$$

donde $\delta_{\mathrm{máx}} \approx 0{,}35$ es la no estequiometría (δ) máxima alcanzable sin cambio de fase, $n \approx 0{,}218$ el orden respecto de la presión parcial de oxígeno, y A y E_a parámetros de ajuste reportados por los autores [29]. La Ecuación (3.17) condensa las dos palancas termodinámicas del proceso: aumentar T o disminuir p_{O_2} incrementan el δ de equilibrio y, con él, la cantidad de CO producible por ciclo.

La Figura 9 ilustra las consecuencias prácticas de la Ecuación (3.17) para el presente trabajo. Los reactores solares de referencia operan la reducción a 1.400–1.600°C con $p_{O_2} \leq 10^{-4}$ bar, alcanzando $\delta \approx 0{,}02$–0.09 [18, 24, 26]. El Reactor WS, en cambio, alcanza temperaturas en torno a los 800°C en su punto más caliente (anillo superior, TC7), por lo que el δ de equilibrio esperado es de uno a dos órdenes de magnitud menor. Esto no invalida el experimento: la producción de CO sigue siendo termodinámicamente posible y medible, pero establece de antemano que las cantidades absolutas se situarán por debajo de la literatura solar, y que la métrica relevante es la caracterización paramétrica del sistema y no la maximización de δ.

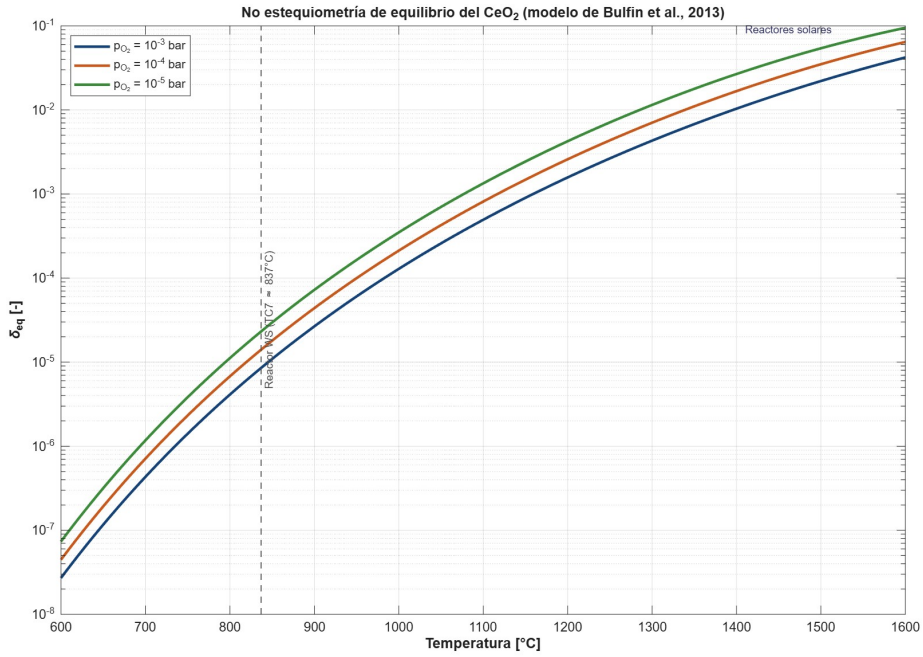


Figura 9: No estequiometría de equilibrio δ_{eq} del CeO_2 según el modelo de Bulfin et al. Elaboración propia con el modelo de [29], 2026.

Respecto de la etapa de oxidación, la termodinámica es favorable en todo el rango de operación del reactor: la reoxidación de $CeO_{2-\delta}$ con CO_2 es exotérmica y espontánea a temperaturas menores de ≈1.000°C, con equilibrio fuertemente desplazado hacia los productos mientras exista CO_2 en exceso y el material conserve vacantes disponibles [19, 23]. La ventana 800–1.000°C es, de hecho, la utilizada por los trabajos de referencia para la etapa CDS [18, 20, 25], y coincide con el rango de operación estacionaria del Reactor WS.

3.6. Cinética de las reacciones de reducción y oxidación del CeO_2

La termodinámica define cuánto CO puede producirse; la cinética define a qué velocidad. Ambas etapas del ciclo presentan mecanismos limitantes distintos, con implicancias directas sobre el diseño del reactor y la interpretación de las señales medidas.

3.6.1. Cinética de reducción térmica (TR)

La reducción del CeO_2 ocurre mediante la formación de vacantes de oxígeno en la superficie y su posterior difusión en el volumen (*bulk*) del material. Pullar et al. [15] demostraron que, para partículas de radio menor a 0.4 mm a 1.500°C, el tiempo característico de difusión del oxígeno es inferior a 10 s: la química intrínseca es rápida, y la etapa TR queda en la práctica limitada por la "transferencia de calor" hacia el interior del lecho de material. Esta conclusión es directamente aplicable al Reactor WS, donde el calor generado por las resistencias Kanthal debe atravesar las capas del reactor y propagarse por conducción a través del lecho de trozos porosos de CeO_2, un medio de contactos irregulares entre piezas y baja conductividad térmica efectiva.

La velocidad neta de reducción puede describirse mediante un modelo de reacción directa e inversa de tipo Arrhenius [29]:

$$\frac{d\delta}{dt} = \underbrace{(\delta_{\text{máx}} - \delta)\, A_{\text{red}}\, \exp\!\left(-\frac{E_{a,\text{red}}}{RT}\right)}_{\text{reducción}} - \underbrace{\delta \left(\frac{p_{O_2}}{p^\circ}\right)^{n} A_{\text{ox}}\, \exp\!\left(-\frac{E_{a,\text{ox}}}{RT}\right)}_{\text{reoxidación con } O_2} \tag{3.18}$$

El primer término representa la liberación de oxígeno (proporcional a las vacantes aún disponibles) y el segundo la recombinación con el O_2 presente en la atmósfera del reactor. La Ecuación (3.18) explica el rol cinético del gas de barrido: si el O_2 liberado no es evacuado, el término inverso crece y la reducción neta se detiene antes de alcanzar el δ de equilibrio. Este modelo, con los parámetros ajustados por Bulfin et al. [29], describe el rol del gas de barrido sobre la reducción neta del material.

3.6.2. Cinética de oxidación con CO_2 (CDS)

A diferencia de la reducción, la etapa CDS está limitada por la "cinética superficial": la adsorción y disociación del CO_2 sobre los sitios activos del material es el paso controlante, por lo que la velocidad de producción de CO es directamente proporcional al área superficial específica (SSA) disponible [15, 18]. Esta es la razón por la cual las morfologías con porosidad diseñada (RPC de doble escala) superan sistemáticamente a las demás en producción de CO por gramo (Tabla 3). La morfología en trozos porosos irregulares utilizada en este trabajo se sitúa en una posición intermedia: la porosidad natural de las piezas aporta un SSA mayor que el de un sólido denso, pero sin la doble escala de porosidad optimizada de las RPC, por lo que define un desempeño de referencia inferior al de dichas estructuras diseñadas.

Arifin y Weimer [23] caracterizaron la cinética de oxidación de ceria reducida con CO_2 y H_2O, proponiendo modelos del tipo:

$$\frac{dX}{dt} = A_{\text{CDS}}\, \exp\!\left(-\frac{E_{a,\text{CDS}}}{RT}\right) \left(\frac{p_{CO_2}}{p^\circ}\right)^{m} f(X) \tag{3.19}$$

donde X es el avance de la oxidación (fracción de vacantes reoxidadas, $X = 1 - \delta/\delta_0$ con δ_0 el valor al inicio de la inyección), m el orden respecto de la presión parcial de CO_2 y $f(X)$ una función de mecanismo. Para lechos de partículas resulta adecuado el modelo de núcleo decreciente (*shrinking core*), $f(X) = (1 - X)^{1/3}$, que refleja el retroceso del frente de reacción hacia el interior de cada partícula a medida que la capa externa se reoxida. La dependencia con p_{CO_2} de la Ecuación (3.19) fundamenta el uso del caudal de CO_2 como variable operacional del diseño experimental (§4.10). Cabe precisar que Arifin y Weimer caracterizaron esta cinética sobre ceria en polvo y no sobre medios porosos, por lo que la constante cinética y el orden de reacción dependen de la morfología y su transferencia directa al lecho de trozos porosos del Reactor WS debe tomarse solo como referencia cualitativa.

Dos implicancias de esta cinética son directamente relevantes para el presente trabajo. Primero, la oxidación con CO_2 ocurre con velocidad apreciable incluso a 800°C, como confirmó Le Gal et al. [20] con CeO_2 puro (en su caso, en polvo); el rango térmico del Reactor WS es por tanto suficiente para la etapa CDS. Segundo, la forma temporal de la señal de CO (pico inicial seguido de decaimiento) es consecuencia natural de la Ecuación (3.19): la velocidad es máxima al inicio, cuando $X \approx 0$ y todas las vacantes están disponibles, y decae a medida que el material se reoxida, lo que permite usar la forma del pico como diagnóstico del estado del material.

3.7. Grado de no estequiometría (δ): definición y medición

El grado de no estequiometría (δ) se define como los moles de oxígeno atómico removidos por mol de CeO_2, es decir, la composición instantánea del material es $CeO_{2-\delta}$. Es la variable de estado central del ciclo: determina

cuánto O_2 se libera en la TR y fija el máximo de CO producible en la CDS, ya que por estequiometría de la reacción (3.15) cada vacante reoxidada genera exactamente una molécula de CO.

En este trabajo, δ se estima a partir de la producción acumulada de CO durante la etapa CDS, siguiendo el procedimiento de integración empleado por la literatura de referencia [18, 26]. Integrando la señal de concentración de CO del analizador en el tiempo, ponderada por el caudal total de gas, se obtiene la producción molar:

$$n_{\mathrm{CO}} = \frac{Q}{V_m} \int_{t_0}^{t_f} y_{\mathrm{CO}}(t)\, dt \tag{3.20}$$

donde $y_{\mathrm{CO}}(t)$ es la fracción molar de CO medida (ppm $\times 10^{-6}$), Q el caudal volumétrico total en la línea de muestreo (6 L/min) y $V_m = 23{,}644$ L/mol el volumen molar en las condiciones de normalización (15 °C, 1 atm). El grado de no estequiometría (δ) alcanzado en la reducción se obtiene entonces como:

$$\delta = \frac{n_{\mathrm{CO}}}{n_{\mathrm{CeO_2}}} \qquad \text{con} \qquad n_{\mathrm{CeO_2}} = \frac{m_{\mathrm{CeO_2}}}{M_{\mathrm{CeO_2}}} = \frac{280\ \mathrm{g}}{172{,}115\ \mathrm{g/mol}} = 1{,}627\ \mathrm{mol} \tag{3.21}$$

Es fundamental precisar el carácter del valor así obtenido. La señal $y_{\mathrm{CO}}(t)$ del Testo 350 se mide *aguas abajo* del reactor, tras una línea de muestreo, y el tiempo de respuesta T90 ≈30–40 s del analizador suaviza y retrasa el pico real de concentración. En consecuencia, el δ calculado con la Ecuación (3.21) a partir de datos Testo constituye un **límite inferior conservador** del valor real. La cromatografía, tratada de forma independiente, entrega la composición del gas capturado y su razón CO:CO_2, comparable con la literatura; ambas caracterizaciones se desarrollan en el Capítulo 5.

Finalmente, para caracterizar la cinética global de cada experimento se define la tasa media de producción de CO, denotada $\bar{r}_{\mathrm{CO}}$, como la razón entre la producción total y la duración de la inyección:

$$\bar{r}_{\mathrm{CO}} = \frac{n_{\mathrm{CO}}}{t_{\mathrm{iny}}} \tag{3.22}$$

Esta magnitud, expresada en μmol/min, permite comparar la intensidad productiva entre experimentos con distinta duración de inyección, y resulta un mejor indicador de la actividad del material que la producción total cuando los tiempos de inyección difieren.

3.8. Presión parcial de oxígeno y el rol del gas de barrido (N_2)

La Ecuación (3.17) muestra que el δ de equilibrio crece al disminuir p_{O_2}: por el principio de Le Chatelier, remover el O_2 producido desplaza el equilibrio de la reducción hacia la formación de más vacantes. Los estudios termodinámicos del ciclo indican que se requieren presiones parciales del orden de $p_{O_2} \lesssim 10^{-5}$ bar para alcanzar valores de δ prácticos a temperaturas moderadas [29, 30]. En el presente trabajo, con barrido de N_2 a caudal de 6 L/min y a presión atmosférica, la presión parcial de oxígeno estimada mediante la Ecuación (3.23) se mantiene en el rango $p_{O_2} \approx 10^{-2}$–10^{-3} bar, varios órdenes de magnitud por encima del valor óptimo, lo que es coherente con el régimen de baja reducción esperado para el Reactor WS.

Existen dos estrategias para lograr baja p_{O_2}: operar bajo vacío o barrer con un gas inerte. El barrido con N_2, utilizado en este trabajo, diluye el O_2 liberado de modo que su presión parcial en la atmósfera del reactor queda determinada por la razón de flujos molares:

$$p_{O_2} \approx \frac{\dot{n}_{O_2}}{\dot{n}_{O_2} + \dot{n}_{N_2}}\, p_{\mathrm{tot}} \tag{3.23}$$

de donde se sigue que un mayor caudal de N_2 reduce la p_{O_2} efectiva y acelera la reducción, a costa de un mayor consumo de gas inerte que además debe calentarse hasta la temperatura del reactor, penalizando el balance energético. La operación bajo vacío evita ese consumo y es termodinámicamente más eficiente, pero requiere bombas de alta temperatura y sellado hermético, con penalizaciones de bombeo que crecen fuertemente al reducir la presión [32]. Para un reactor de laboratorio de lecho fijo como el Reactor WS, el barrido con N_2 es la solución de menor complejidad y riesgo, y su caudal constituye una de las variables operacionales del diseño experimental (§4.10).

Durante la etapa CDS el rol de los gases se invierte: la inyección de CO_2 debe proveer suficiente presión parcial de reactivo (Ecuación (3.19)) y a la vez arrastrar el CO producido hacia la línea de muestreo. El canal CO_2IR del analizador permite verificar directamente la presencia efectiva del reactivo en el gas muestreado, y por ello se utiliza como señal de referencia para delimitar el período real de inyección (§4.9).

Con los fundamentos teóricos establecidos, esta última parte revisa los trabajos experimentales que han materializado el ciclo termoquímico, desde las demostraciones históricas de referencia hasta los antecedentes directos del Reactor WS en la UTFSM, cerrando con el posicionamiento del presente trabajo.

3.9. Trabajos experimentales de referencia

La revisión de la literatura experimental permite identificar tres etapas de desarrollo claramente diferenciadas: una etapa fundacional que estableció la viabilidad del ciclo (2006–2011), una etapa de optimización sistemática del material y el reactor (2012–2017), y una etapa reciente de consolidación y nuevos horizontes (2017–2025). Esta narrativa permite entender qué está resuelto, qué sigue abierto, y dónde se inserta el presente trabajo.

- **Etapa 1: Primeras Demostraciones y Establecimiento del Material (2006–2011)**
  El campo del CO_2 splitting con ceria tiene su origen en el trabajo de Abanades y Flamant [17], quienes en 2006 reportaron la primera aplicación de CeO_2 para producción termoquímica de H_2 mediante *water splitting* (disociación del agua, WS) bajo concentración solar real en el horno solar de PROMES-CNRS (*Processes, Materials and Solar Energy*), Odeillo, Francia. Este trabajo estableció dos conclusiones fundamentales: la ceria puede reducirse y reoxidarse de forma cíclica y reproducible, y su estructura de fluorita cúbica se mantiene estable durante el proceso.

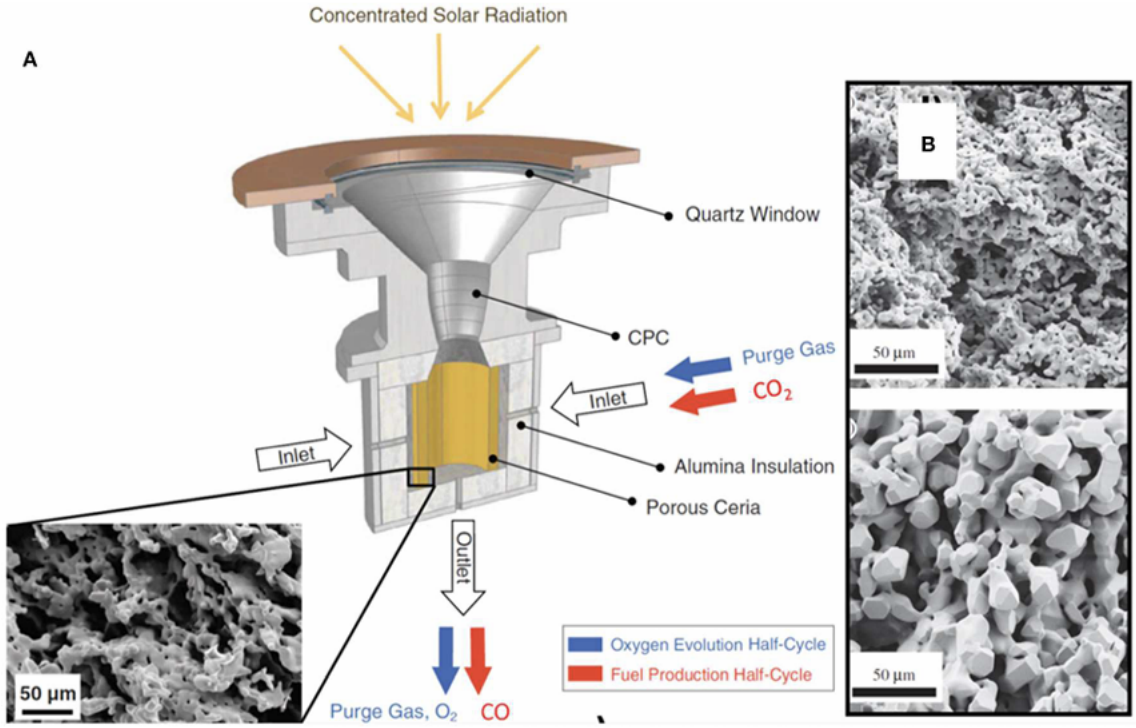


Figura 10: Reactor solar de Chueh et al. y microestructura de la ceria tras 500 ciclos. Fuente: Pullar et al., *Front. Chem.*, 2019 [15].

La Figura 10 muestra el esquema del ciclo de dos pasos con CeO_2 y el reactor solar utilizado por Chueh et al. (2010) [18], quienes realizaron la primera demostración de CO_2 splitting con ceria bajo radiación solar concentrada real ($C = 1500$ soles, 1.9 kW), en el mismo horno solar de PROMES-CNRS. Utilizaron ceria monolítica porosa (325 g, 80 % de porosidad), con reducción a 1.581–1.624°C y oxidación a 800°C. Los resultados de este experimento de referencia fueron:

- Tasa pico de producción de CO: 1.500 mL/min (= 4,6 mL/min/g).
- Eficiencia solar-to-fuel: $\eta_{\text{solar}} = 0{,}4\,\%$.
- Crecimiento de grano de 5 μm a 15 μm tras 500 ciclos por sinterización (visible en las imágenes SEM de la Figura 10).
- La oxidación con CO_2 es un proceso "limitado por reacción superficial", directamente proporcional al SSA disponible [15].
- Los autores proyectaron η_{solar} de 16–19 % con recuperación de calor, estableciendo la brecha entre el potencial teórico y el rendimiento experimental como el problema central del campo.

Complementando estos estudios, Le Gal et al. [20] investigaron en 2011 la reactividad de CeO_2 puro en polvo mediante análisis termogravimétrico (TGA, *Thermogravimetric Analysis*), con reducción a 1.400°C bajo Ar y oxidación a 1.000–1.200°C bajo CO_2, reportando $\delta = 0{,}037$ y producción de CO de 2.28 mL/g (≈113 μmol/g). Este trabajo es una referencia directamente relevante para la presente investigación por utilizar CeO_2 puro sin dopar en condiciones controladas de laboratorio con calentamiento no solar (horno de radiación infrarroja acoplado a un TGA), aunque su morfología (polvo) difiere de los trozos porosos aquí empleados. La conclusión clave fue que la reducción térmica es el paso limitante del ciclo con ceria pura, ya que los valores de δ alcanzables son inherentemente bajos sin temperaturas extremas [15].

- **Etapa 2: Optimización Sistemática del Reactor y el Material (2012–2017)**

Una vez establecida la viabilidad del ciclo, el grupo de Steinfeld en ETH Zürich desarrolló una línea de investigación sistemática para identificar los factores limitantes del desempeño y llevar η_{solar} a niveles industrialmente relevantes.

Furler et al. [24] introdujeron en 2012 la estructura RPC (*Reticulated Porous Ceramics*) como material de reactor, fabricada por replicación de esponjas de poliuretano y sinterizada a 1.600°C, en un reactor de plato parabólico de 10 kW. Lograron $\delta = 0{,}016$–0.042 y producciones de CO de 1.47–5.69 mL/g, con η_{solar} de 0.73–1.73 %. El hallazgo estructural fue que la cinética global del ciclo está controlada por la *transferencia de calor y masa* dentro del reactor, no por la cinética química intrínseca de la ceria, redirigiendo el esfuerzo investigador hacia el diseño del reactor.

En 2014, Furler et al. [25] introdujeron la RPC de "doble escala de porosidad" (poros de mm en la estructura macro para penetración de radiación, combinados con poros de μm en los *struts* para mayor SSA). Esta modificación redujo el tiempo de la etapa CDS de 40 min a solo 8 min, aumentó la producción de CO a 5.02 mL/g y mejoró η_{solar} a 1.72 %. Takacs et al. [27] complementaron con una caracterización cinética detallada en un analizador termogravimétrico solar, confirmando la limitación por transferencia de calor en TR y por cinética superficial en CDS.

La culminación de esta línea fue Marxer et al. [26] en 2017: usando un reactor de segunda generación de 4 kW con RPC de doble escala a ≈3.000 soles, lograron en 500 ciclos consecutivos selectividad = 100 %, conversión de masa = 83 % y $\eta_{\text{solar}} = 5{,}25$ % (el récord experimental vigente hasta la fecha). Este resultado demuestra que la barrera principal no es el material ni la cinética, sino el calor sensible rechazado al ciclar entre T_{red} y T_{ox} [10].

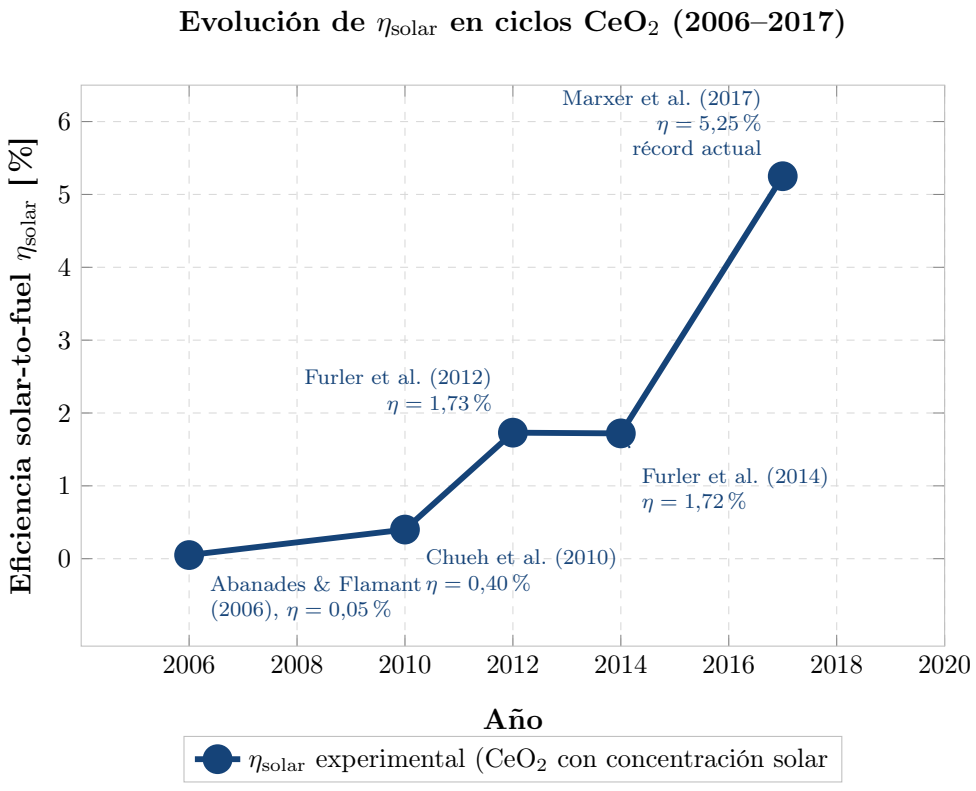


Figura 11: Evolución de η_{solar} en ciclos con CeO_2 (2006–2017). Elaboración propia con datos de [17, 18, 24, 25, 26].

La Figura 11 muestra la evolución de η_{solar} a lo largo del tiempo para los trabajos de referencia, evidenciando el progreso sostenido del campo desde la primera demostración en 2006 hasta el récord experimental de 5.25 % alcanzado por Marxer et al. en 2017, récord que se mantiene vigente hasta la fecha.

- **Etapa 3: Consolidación y Nuevos Horizontes (2017–2025)**

Superada la fase de demostración y establecido el récord de 5.25 %, la investigación posterior a 2017 se bifurcó en dos frentes complementarios: la búsqueda de materiales con mayor actividad a menor temperatura, y el desarrollo de conceptos de reactor que eludan la penalización del calor sensible. Bhosale [16] revisó exhaustivamente este período, contabilizando más de veinte dopantes distintos evaluados sobre la ceria mediante métodos sol–gel, Pechini y co-precipitación.

En el frente de materiales, los dopantes tetravalentes (Zr^{4+}, Hf^{4+}) se consolidaron como los más efectivos, con $Ce_{0,75}Zr_{0,25}O_2$ ofreciendo mayor δ a menor temperatura sin comprometer la estabilidad cíclica [10, 16]. La caracterización mediante espectroscopía Raman *in situ* permitió distinguir el mecanismo según la valencia del dopante: los tetravalentes aumentan la "cantidad" de combustible producido, mientras que los trivalentes incrementan la "velocidad" de producción [16]. En paralelo, la exploración morfológica se extendió más allá de las RPC hacia microesferas porosas y estructuras biomórficas templadas con corcho, que alcanzaron 3.1 mL/min/g de CO con menor sinterización que las espumas convencionales [16], reforzando la conclusión de la Etapa 2: a temperatura de reducción fija, la morfología es la palanca de diseño más efectiva.

En el frente de reactores, el concepto más disruptivo del período es el reactor de membrana isotérmica, que elimina el ciclado térmico entre T_{red} y T_{ox} (origen de la penalización por calor sensible) al operar ambas etapas a temperatura constante, separadas por una membrana de ceria conductora de iones O^{2-}; se ha demostrado con 100 % de selectividad en la conversión de CO_2 a CO a 1.600°C y 3.500 soles [16]. Pese a esta diversidad de enfoques, el récord de $\eta_{\text{solar}} = 5{,}25\,\%$ de Marxer et al. [26] permanece vigente y la ceria continúa siendo el material de referencia del campo [16]. La revisión crítica de Wei et al. [10] posiciona la recuperación de calor sensible como la prioridad absoluta para escalar el ciclo, e identifica el descubrimiento de materiales asistido por inteligencia artificial como la herramienta más prometedora para hallar composiciones que operen en condiciones más moderadas.

3.10. Trabajos previos sobre el Reactor WS

El presente trabajo se construye directamente sobre una línea de investigación establecida en el Laboratorio de Termofluidos del Departamento de Ingeniería Mecánica de la UTFSM, en el marco del proyecto (VIU).

3.10.1. Modelación numérica y validación experimental del ciclo

Rojas, Alegría y Toledo [38] publicaron en 2025 en *Energy Conversion and Management* una investigación numérica y experimental del Reactor WS utilizando CeO_2 en espuma porosa para producción de H_2 mediante *water splitting* (WS). Es el trabajo más directamente relacionado con la presente investigación.

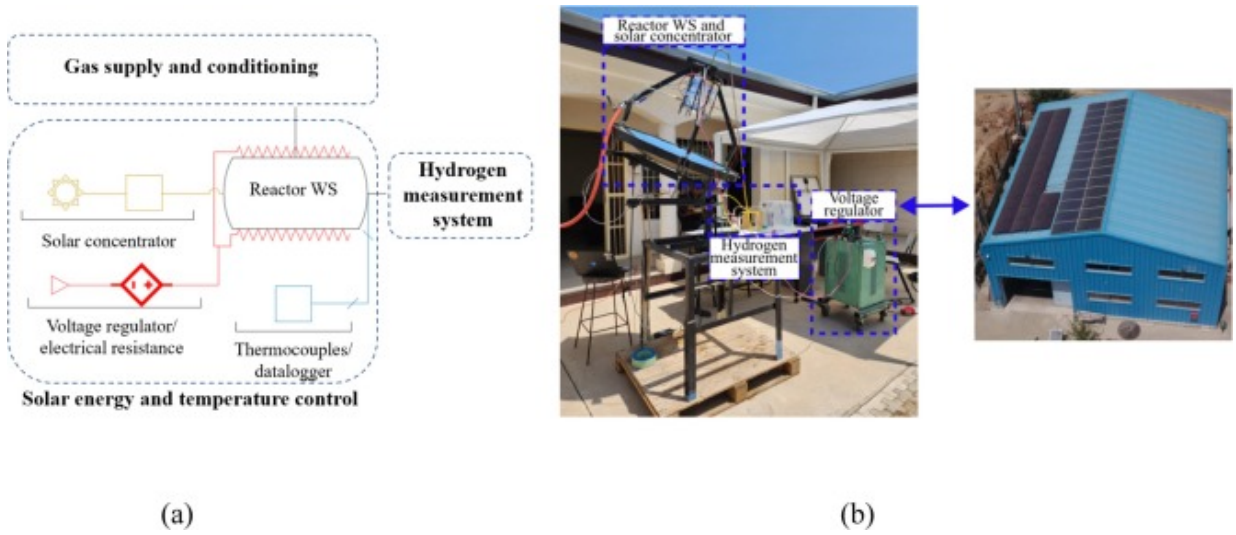


Figura 12: Sistema experimental del Reactor WS con concentrador PDR y planta fotovoltaica. Fuente: Rojas et al., *Energy Convers. Manag.*, 2025 [38].

La Figura 12 muestra la configuración experimental del Reactor WS documentada por Rojas et al. El panel (a) muestra el esquema del sistema, con el reactor WS conectado al suministro de gases, el concentrador solar PDR (*Parabolic Dish Receiver*, receptor de plato parabólico), el regulador de voltaje con resistencia eléctrica Kanthal A-1, los termopares y el sistema de medición de H_2. El panel (b) muestra la instalación real en el exterior del Laboratorio de Termofluidos, donde se aprecia el concentrador solar parabólico y la planta fotovoltaica que alimenta la resistencia eléctrica. Los resultados clave de este trabajo son:

- Buena concordancia entre perfiles de temperatura numérico y experimental (error $\approx$9 %), con temperatura máxima numérica $\approx$1100 K y experimental $\approx$1000 K.
- Producción máxima de H_2: 100 ppm experimental y 2000 $\mu\text{mol}_{H_2}/\text{g}_{CeO_2}$ numérica.
- La resistencia eléctrica es más determinante que la concentración solar para la producción de H_2 en las condiciones ensayadas.
- Mayores tiempos de inyección de vapor mejoran la producción total de H_2.

El presente trabajo utiliza el mismo reactor y el mismo sistema de calentamiento eléctrico, pero con CeO_2 en trozos porosos irregulares (280 g) en lugar de la pieza única de espuma porosa, y enfocándose en CO_2 splitting (CDS) en lugar de *water splitting* (WS).

3.10.2. Primera campaña experimental del sistema

Porras (2024) [37] realizó en el mismo Laboratorio de Termofluidos el diseño, construcción y puesta en marcha del Reactor WS utilizado en la presente Memoria, definiendo las características constructivas que este trabajo hereda: cuerpo en acero inoxidable 304, tres ladrillos de cemento refractario Lunkast-95 Plus con las resistencias Kanthal A-1 embebidas, nueve termocuplas instaladas mediante pernos y tapones guía, y un concepto modular de dos cilindros que facilita el desarme y el recambio de material. Su ensayo exploratorio de CO_2 splitting, único y condicionado por el corte de dos resistencias a los 30 min de iniciada la prueba, alcanzó solo 410–480°C en la reducción; aun así detectó un aumento de la concentración de CO durante la oxidación, con un máximo de 0,038 % volumétrico, demostrando la factibilidad del proceso en el reactor pero sin caracterización paramétrica ni condiciones térmicas suficientes para una reducción efectiva del CeO_2 [37]. Sus recomendaciones identifican dos problemas críticos que la presente campaña vuelve a enfrentar y

documenta: la durabilidad de las resistencias eléctricas (se cortaron resistencias en ambas puestas en marcha) y la estanqueidad del reactor, aspectos que se retoman en §4.2, §4.4 y en el Capítulo 6.

3.11. Síntesis: posicionamiento del presente trabajo

La revisión precedente permite situar el presente trabajo dentro del panorama del CO_2 splitting termoquímico con CeO_2. Los reactores solares de referencia (Chueh et al., Furler et al., Marxer et al.) operan la reducción térmica en el rango de 1.325–1.600°C con concentración solar real o simulada, alcanzando las mayores producciones específicas de CO y eficiencias del campo. En el otro extremo, los trabajos previos del Laboratorio de Termofluidos de la UTFSM (Rojas et al. [38] y Porras (2024) [37]) establecieron la viabilidad del calentamiento eléctrico como plataforma de laboratorio, operando a temperaturas sustancialmente menores.

El presente trabajo se inscribe en esta segunda línea y aporta cuatro elementos que lo distinguen de sus antecedentes directos:

(1) Escala de masa y protocolo paramétrico: con 280 g de CeO_2 puro en trozos porosos y una campaña experimental sistemática que varía el protocolo de fases (tiempos de reducción y oxidación), este trabajo aporta la caracterización paramétrica más completa del Reactor WS bajo calentamiento eléctrico puro.

(2) Enfoque de repetibilidad por grupos: a diferencia de las campañas previas centradas en ensayos individuales, esta investigación organiza los experimentos en grupos según su protocolo operacional, obteniendo resultados promediados que permiten evaluar la reproducibilidad del sistema y reducir el efecto del ruido experimental.

(3) Medición cromatografía independiente: la incorporación del análisis cromatográfico de gases como referencia externa para contrastar las mediciones del analizador Testo 350 constituye una contribución metodológica no abordada en los trabajos previos del laboratorio.

(4) Continuación de la línea UTFSM: este trabajo establece la base experimental para escalar el sistema hacia concentración solar real, cerrando la brecha entre el modelo de Rojas et al. (H_2 con espuma porosa) y la operación paramétrica sistemática con CO_2 splitting en trozos porosos de CeO_2.

4. Sistema experimental y metodología

Este capítulo describe la plataforma experimental utilizada y la metodología de trabajo. Se presenta primero el Reactor WS y el proceso de implementación y puesta en marcha realizado como parte de esta Memoria (Objetivo Específico N°2), luego cada uno de los subsistemas (calentamiento, material reactivo, medición de gases, temperatura y flujos), y finalmente el protocolo experimental, el diseño de experimentos y la metodología de procesamiento de datos.

4.1. Descripción general del Reactor WS

El Reactor WS es un reactor de lecho fijo desarrollado en el Laboratorio de Termofluidos del Departamento de Ingeniería Mecánica de la UTFSM, concebido originalmente para *water splitting* con calentamiento híbrido solar-eléctrico [38], rediseñado por Porras [37] y adaptado en este trabajo para la operación con CO_2 splitting bajo calentamiento eléctrico puro. El cuerpo del reactor está fabricado en acero inoxidable 304 y aloja el lecho de CeO_2 en trozos porosos irregulares en una cámara central, rodeada por tres segmentos de ladrillo de cemento refractario Lunkast-95 Plus dispuestos a 120° entre sí, en los cuales van embebidas las tres resistencias eléctricas Kanthal A-1; las nueve termocuplas se instalan en las ranuras entre segmentos, penetrando hasta la zona del material reactivo. Los gases de proceso (N_2 como barrido en la etapa TR, CO_2 como reactivo en la etapa CDS) ingresan por la línea de alimentación, atraviesan el lecho y abandonan el reactor por la línea de salida hacia el sistema de muestreo.

Según los planos de fabricación del reactor [37], la cámara del cilindro interior tiene un diámetro de 81 mm y una longitud de 105 mm, mientras que el cilindro exterior tiene un diámetro de 185 mm y una longitud de 145 mm; la inspección realizada durante el desarme no reveló desviaciones significativas respecto de estas dimensiones (variaciones puntuales de 1–2 mm atribuibles a dilataciones por la operación a alta temperatura, sin incidencia en el análisis).

La Figura 13 presenta el esquema en corte del reactor con la disposición de sus componentes principales, la carga de material reactivo utilizada en este trabajo es de 280 g de CeO_2 poroso en trozos ($n_{CeO_2} = 1{,}627$ mol), masa pesada por el autor durante la preparación de la campaña (§4.5).

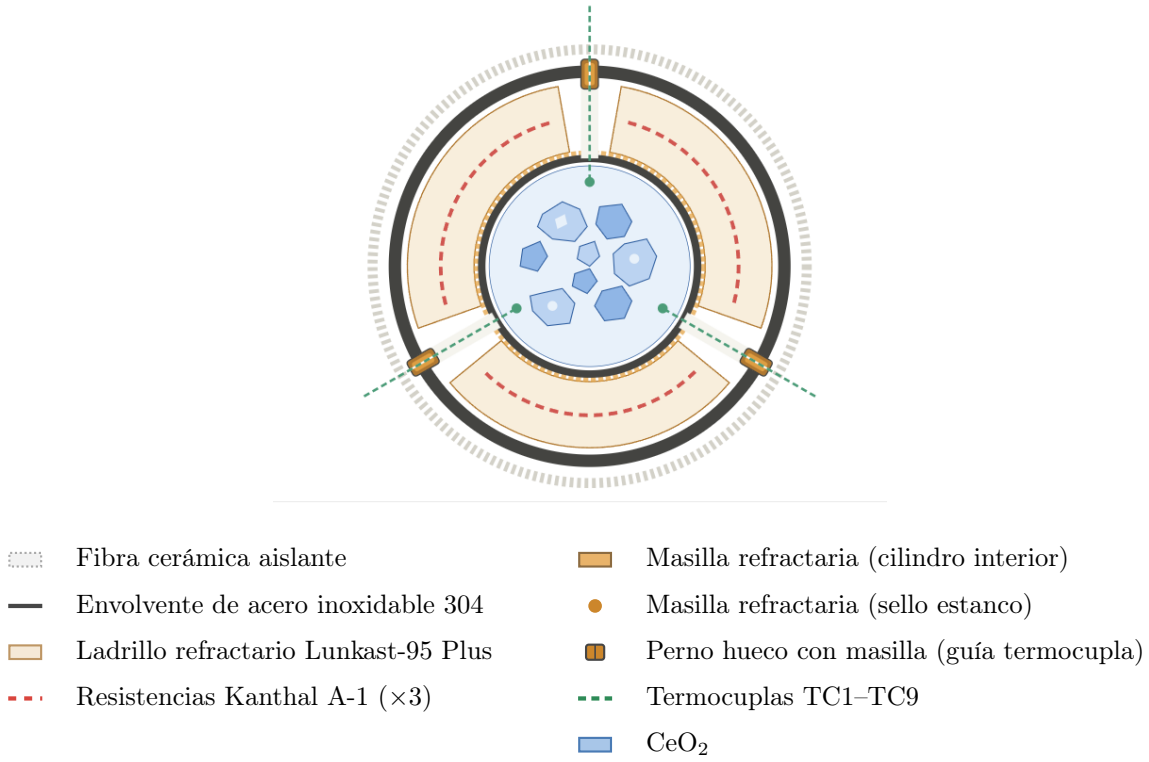


Figura 13: Esquema en corte transversal del Reactor WS. Elaboración propia, 2026.

La Figura 14 muestra el sistema completo instalado: a la izquierda los cilindros de N_2 y CO_2 con sus reguladores; al centro, sobre la mesa de trabajo, el Reactor WS recubierto con la aislación de fibra cerámica, con el variac trifásico ubicado bajo la mesa; a la derecha el analizador Testo 350; y en primer plano el computador de adquisición de los datos de temperatura.

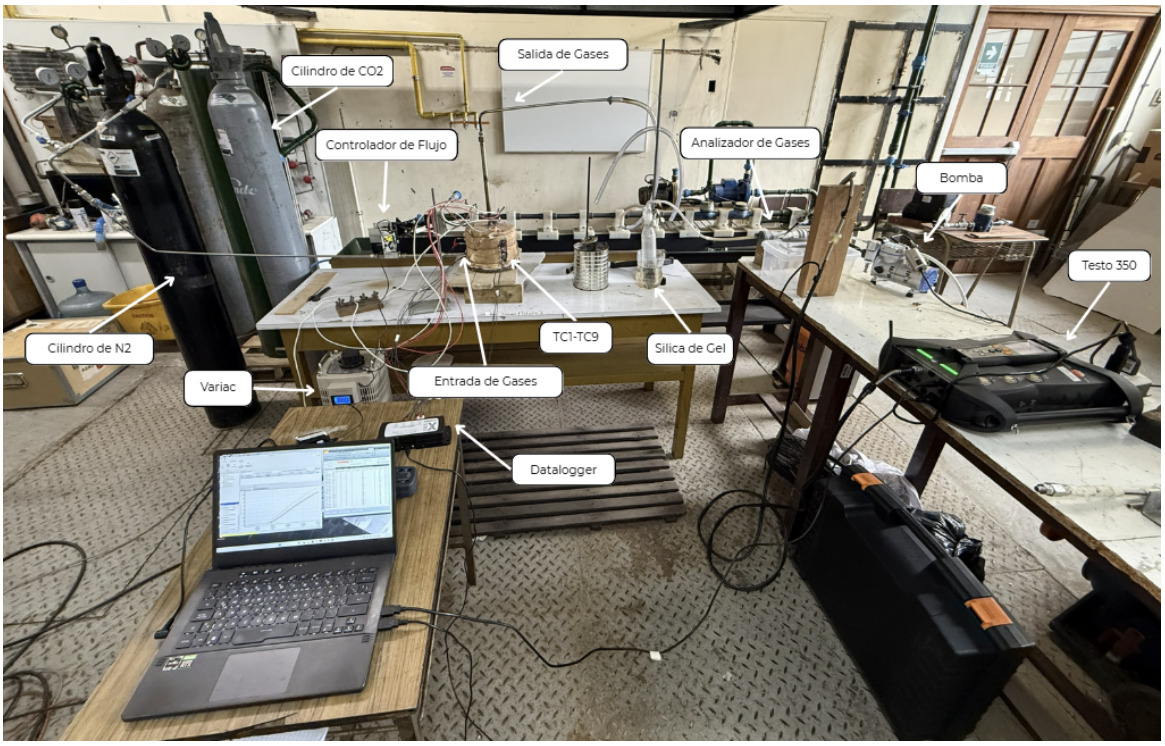


Figura 14: Vista general del sistema experimental instalado. Fotografía propia, Laboratorio de Termofluidos UTFSM, 2026.

4.2. Implementación y puesta en marcha del Reactor WS

Al inicio de este trabajo, el Reactor WS se encontraba fuera de servicio tras la campaña experimental anterior, con componentes deteriorados por la operación a alta temperatura y parte de la instrumentación de temperatura no funcional. La implementación del sistema (desarme, reacondicionamiento, reposición de instrumentación, armado y validación térmica) constituyó la primera fase experimental de la Memoria y da cumplimiento directo al Objetivo Específico N°2.

4.2.1. Planificación del trabajo

El proceso de implementación se planificó como una secuencia de fases con dependencias explícitas: (i) desarme e inspección, (ii) limpieza y reacondicionamiento de componentes e instrumentación, (iii) armado del reactor, (iv) prueba térmica de validación y (v) inicio de la campaña experimental. La planificación se gestionó mediante una carta Gantt (Anexo .1), lo que permitió coordinar la disponibilidad del laboratorio, la adquisición de repuestos y los hitos de avance con los profesores patrocinantes. El incidente de las resistencias (§4.4) constituyó el hito que explica el desplazamiento de las fases posteriores respecto de la planificación original.

4.2.2. Desarme e inspección inicial

El desarme completo del reactor permitió inspeccionar el estado de cada componente tras la campaña previa. Se retiraron secuencialmente la aislación exterior, la envolvente de acero, el cilindro refractario con las resistencias embebidas y la cámara del lecho, registrando fotográficamente la condición y posición original de cada elemento para el posterior rearmado.

La Figura 15 documenta el camino completo del desarme en cinco pasos encadenados: (a) el conjunto del núcleo recién extraído, con los terminales de las resistencias y las prensas de sujeción aún montadas sobre

la brida base; (b) la separación del cilindro refractario (con el cableado de resistencias y agujeros donde se colocan) respecto de la envolvente de acero, cuyo interior exhibe los depósitos propios de la operación a alta temperatura; (c) el cilindro refractario visto desde el eje, con los alambres de conexión emergiendo entre los segmentos; (d) el núcleo del lecho ya separado junto al cilindro refractario; y (e) la apertura final de la cámara del lecho, con la carga de trozos porosos de CeO_2 a la vista.

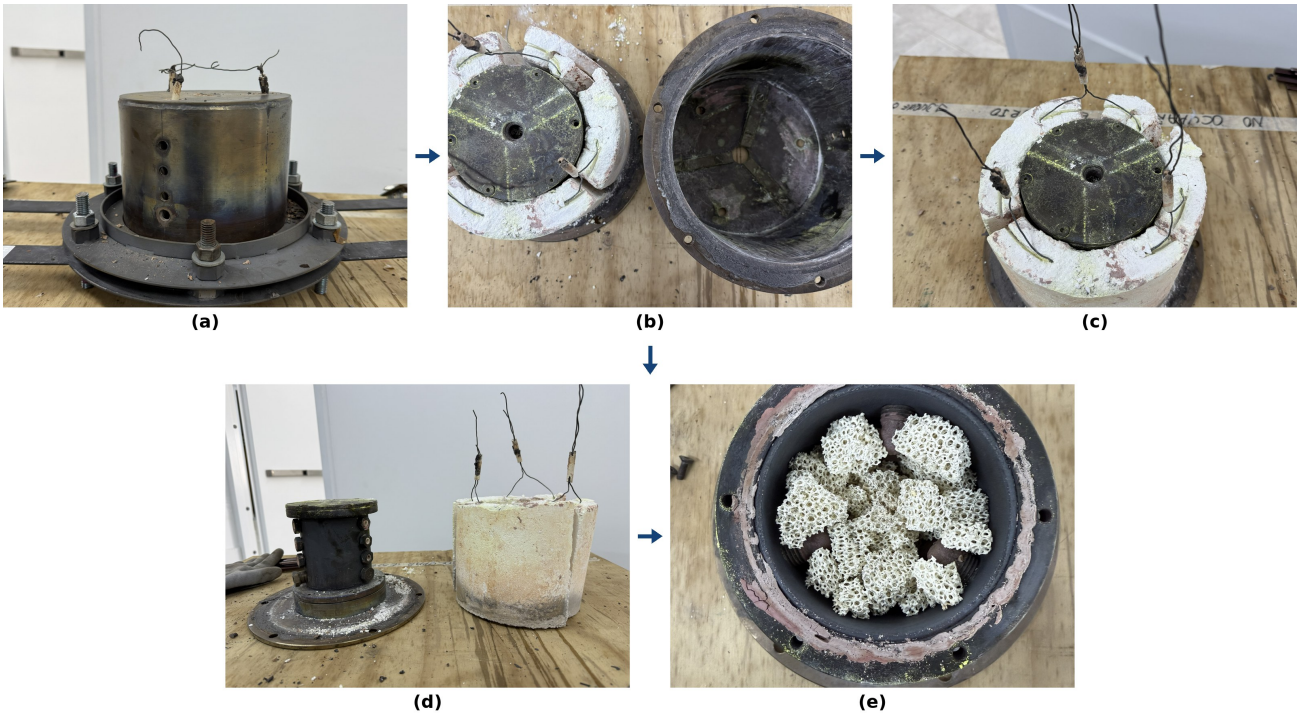


Figura 15: Secuencia de desarme del Reactor WS, etapas (a)–(e). Fotografías propias, Laboratorio de Termofluidos UTFSM, 2026.

La inspección reveló depósitos de polvillo amarillo pálido (característico del CeO_2) adheridos sobre las superficies refractarias y la masilla, cableado de termocuplas suelto o interrumpido en varias posiciones, y masilla refractaria degradada en las interfaces de sellado, hallazgos que definieron el alcance de las fases de limpieza y reposición siguientes.

4.2.3. Limpieza y reacondicionamiento de componentes

Todas las piezas del reactor fueron sometidas a una limpieza en profundidad: remoción mecánica de los residuos de material reactivo, masilla degradada y polvo refractario acumulados durante la campaña previa, verificación de la integridad de la cámara y de las conexiones de gases, y comprobación de la continuidad eléctrica de cada resistencia. En la misma fase se reacondicionó la instrumentación de temperatura: cada una de las nueve termocuplas fue desmontada, liberada de las cintas de fijación provisorias, reajustada y rearmada para mejorar su funcionamiento, quedando instaladas en sus pernos y tapones guía antes del cierre del reactor; la disposición final de los nueve sensores se presenta en la Figura 26 (§4.7).

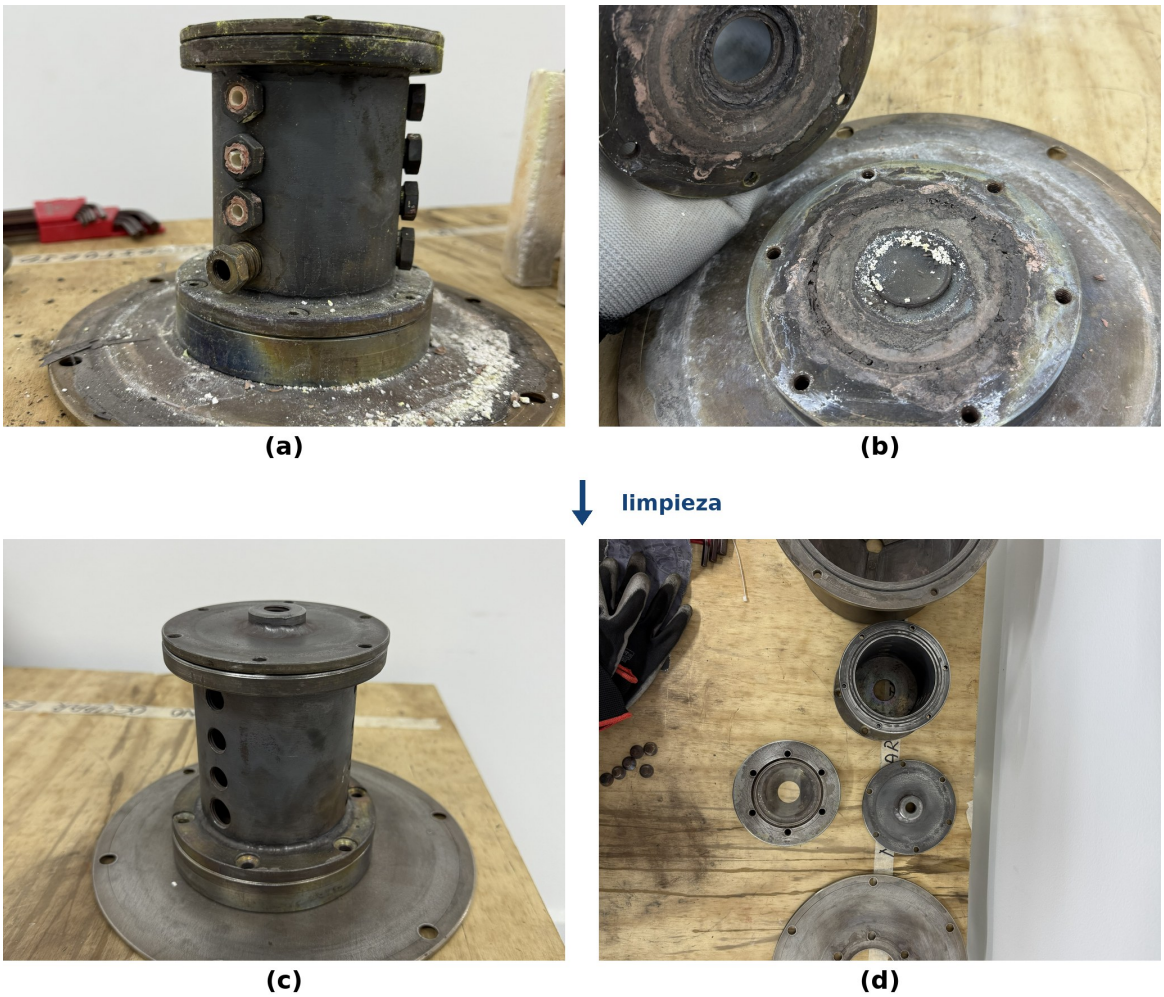


Figura 16: Componentes del reactor antes (a)–(b) y después (c)–(d) de la limpieza. Fotografías propias, Laboratorio de Termofluidos UTFSM, 2026..

La Figura 16 contrasta el estado de los componentes antes y después del proceso: los paneles (a) y (b) muestran el cilindro interior y las tapas/bridas con los depósitos y anillos de residuo adheridos tras la operación, mientras que los paneles (c) y (d) muestran el conjunto del núcleo reacondicionado y la totalidad de los componentes metálicos limpios dispuestos para el rearmado.

4.2.4. Armado del reactor

El rearmado se ejecutó en orden inverso al desarme: instalación del conjunto de resistencias y sus conexiones a las tres fases del variac, reposición de las capas refractarias, carga de los 280 g de CeO_2 en la cámara del lecho, cierre de la envolvente y conexión de las líneas de N_2, CO_2 y muestreo de gases. Cada interfaz se verificó durante el montaje (apriete de conexiones de gases, aislamiento eléctrico de las resistencias respecto de la envolvente, posición final de las termocuplas).

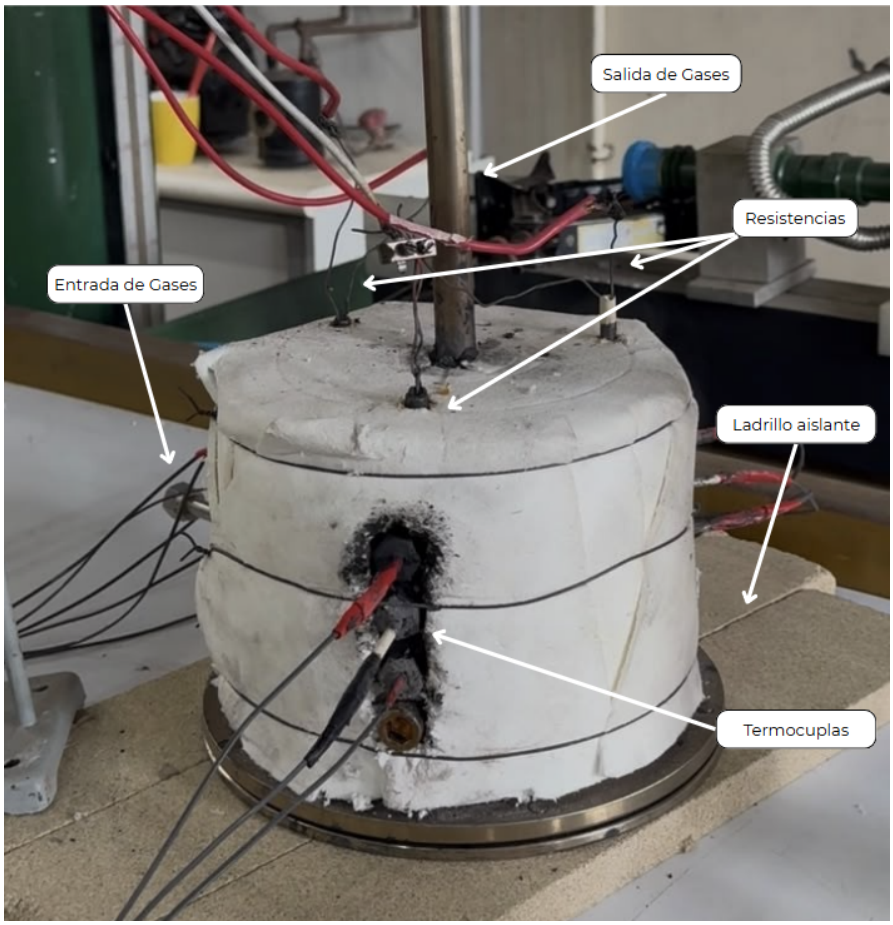


Figura 17: Reactor WS completamente armado. Fotografía propia, Laboratorio de Termofluidos UTFSM, 2026.

La Figura 17 muestra el reactor ya cerrado sobre su base de ladrillo aislante, con la manta de fibra cerámica exterior instalada, la línea de salida de gases en la parte superior y el acceso lateral para el cableado de resistencias y termocuplas.

4.2.5. Prueba térmica de validación

Antes de iniciar la campaña con gases reactivos, el sistema fue sometido a una prueba térmica de validación: calentamiento controlado mediante el variac con registro simultáneo de las termocuplas y de las corrientes por línea. La prueba permitió verificar (i) el funcionamiento de las tres resistencias y el balance de corrientes entre líneas, (ii) la respuesta de los canales de temperatura, (iii) la ausencia de puntos calientes anómalos en la envolvente y (iv) el nivel térmico alcanzable en el lecho.

La prueba se ejecutó el 14/05/2026, en la antesala del inicio de la campaña experimental. La Figura 18 muestra el registro de las nueve termocuplas durante el calentamiento de validación: partiendo desde temperatura ambiente, el reactor alcanzó 815°C en el Termopar 7 en aproximadamente 2 horas de rampa continua, confirmándose TC7 como el punto más caliente del sistema. Las termocuplas TC1, TC4, TC5, TC6, TC7 y TC8 siguieron la rampa de forma coherente, agrupándose entre 755 y 815°C al término de la prueba y validando el comportamiento térmico del reactor rearmado para la campaña. La prueba se realizó en la condición eléctrica nominal (70 V por línea, con corrientes equivalentes a las de la Tabla 4). El registro también permitió identificar el estado de los canales de temperatura: los termopares TC3 y TC9 permanecieron planos durante toda la prueba, sin responder al calentamiento, evidenciando fallas de medición; el termopar TC2

siguió la rampa hasta ≈95 min y luego derivó a una lectura anómala. Por esta razón, la campaña experimental se monitoreó con el subconjunto de termocuplas operativas y espacialmente representativas TC5–TC8 (anillos medio y superior), criterio que se mantiene en la presentación de los perfiles de temperatura del Capítulo 5.

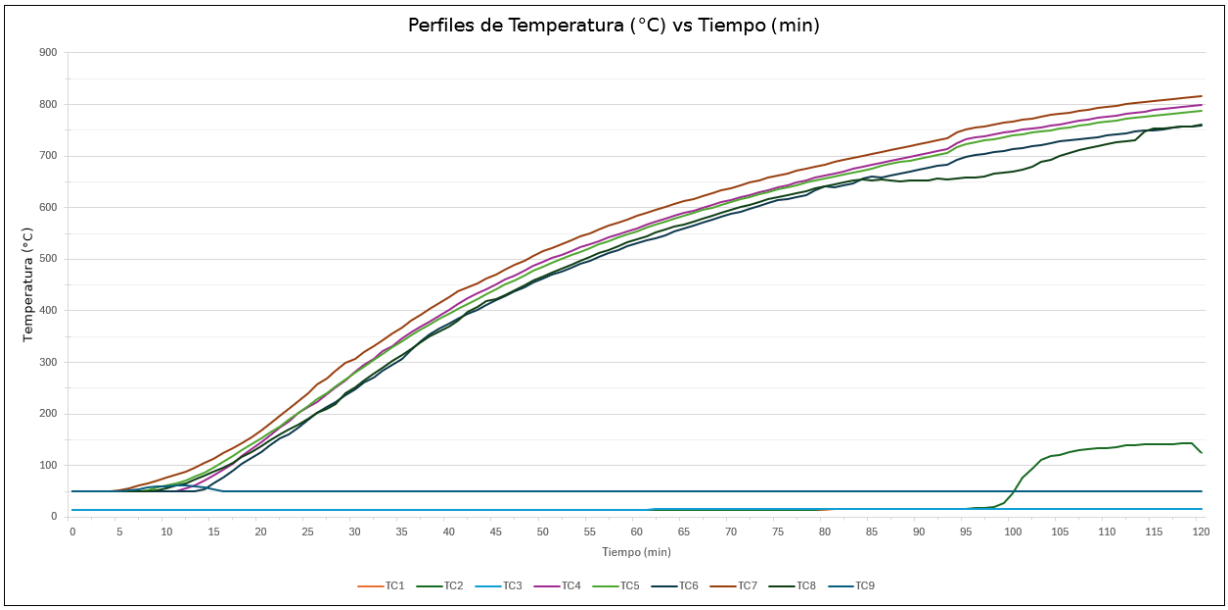


Figura 18: Prueba térmica de validación de las termocuplas TC1–TC9. Fuente: elaboración propia, 2026.

4.3. Sistema de calentamiento eléctrico

El aporte térmico del reactor proviene de tres resistencias eléctricas de alambre Kanthal A-1 (aleación Fe-Cr-Al, temperatura máxima de servicio de 1.400°C), cada una construida con ≈3 m de alambre de 1.21 mm de diámetro en configuración helicoidal (resistividad en frío de 1.11 Ω/m), embebidas en los segmentos de cemento refractario Lunkast-95 Plus que rodean la cámara del lecho. Las tres resistencias se conectan en paralelo, alimentada cada una de forma independiente por una línea de salida (a, b, c) del variac trifásico TSGC2-9000VA, cuyo dial único regula simultáneamente la tensión de las tres líneas. La corriente de cada línea se mide con pinza amperimétrica en cada experimento.

La campaña opera en dos niveles de tensión: 70 V durante el calentamiento y la etapa TR, y 50 V durante la etapa CDS. La reducción de tensión al inicio de la inyección de CO_2 se estableció como parámetro fijo del diseño experimental: al mantener idéntica la condición eléctrica de la etapa CDS en todos los experimentos, las eficiencias resultan directamente comparables variando únicamente la duración de la inyección, y se aprovecha además que la oxidación del $CeO_{2-\delta}$ ocurre a menor temperatura que la reducción (§3.5). Este esquema difiere del protocolo de puesta en marcha de Porras [37], que operó con tensión constante de 170 V en ambas etapas con las resistencias originales de alambre de 0.6 mm. La Tabla 4 resume los parámetros eléctricos medidos en ambas condiciones. A 70 V, las corrientes medidas por línea fueron de 14.6, 14.7 y 14.1 A, lo que corresponde a una resistencia en caliente estabilizada de 4.73–4.76 Ω por resistencia y una potencia total de ≈3.0 kW; a 50 V la corriente por línea desciende a ≈10.7 A, con una potencia total de 1.605 W, valor utilizado como $P_{\text{eléct}}$ en el cálculo de $E_{\text{eléct}}$ de la Ecuación (4.6).

Tabla 4: Parámetros eléctricos del sistema de calentamiento en las dos condiciones de operación de la campaña.

Parámetro	**Calentamiento / TR**	**Etapa CDS**
Tensión por línea [V]	70	50
Corriente por línea [A]	14.6 / 14.7 / 14.1	≈10.7
Resistencia en caliente [Ω]	4.73–4.76	≈4.7
Potencia por resistencia [W]	≈1000–1030	≈535
Potencia total [W]	≈3038	1605

La Figura 19 muestra el variac con su display de tensión de salida, las entradas de red (A, B, C) y las tres salidas independientes (a, b, c) conectadas a las resistencias del reactor.

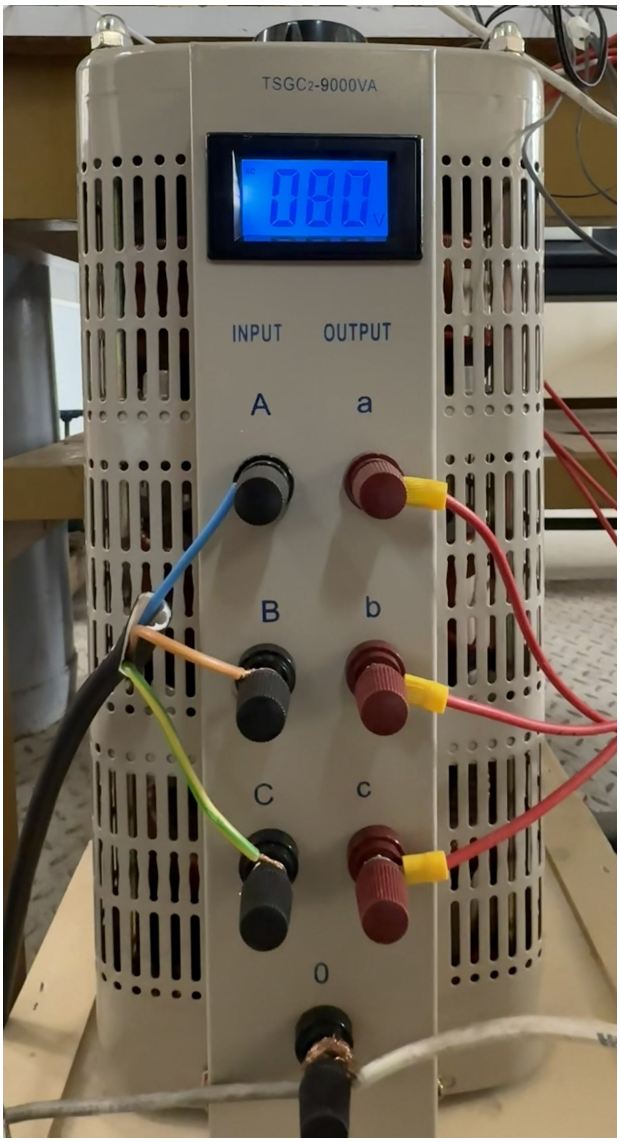


Figura 19: Variac trifásico TSGC2-9000VA. Fotografía propia, Laboratorio de Termofluidos UTFSM, 2026.

4.3.1. Límites de operación de las resistencias

Como parte de la caracterización del sistema se evaluaron los límites seguros de operación del alambre Kanthal A-1. Mediante un análisis de resistencias térmicas cilíndricas de las capas que rodean al alambre (cemento Lunkast-95 Plus, $k \approx 1{,}0$ W/m·K), se estimó una temperatura de alambre de ≈870°C en la condición de 70 V, lo que dejaría un margen de ≈530°C respecto del límite del material (1.400°C). Cabe advertir que esta estimación se apoya en la temperatura medida por las termocuplas, que registran el nivel térmico del lecho y no directamente el del alambre: la temperatura real del alambre pudo ser superior a la estimada, y si el cemento refractario actuó más como aislante que como disipador térmico, el alambre pudo alcanzar localmente valores próximos o superiores a su temperatura de falla. Esta consideración se retoma en el análisis de causa raíz del incidente (Capítulo 6). El mismo análisis entrega una corriente máxima admisible de ≈53.9 A por resistencia; el límite conservador del fabricante basado en carga superficial ($J_{\text{máx}} = 10$ A/mm^2, ≈11.5 A) aplica a alambre expuesto al aire, mientras que el cemento refractario actúa como disipador térmico y habilita corrientes mayores. Estos resultados confirman que las condiciones de la campaña (14–15 A) operan con amplio margen de seguridad, y que el sistema admite el aumento de tensión proyectado para los experimentos futuros a mayor temperatura (§4.10): a 100 V se proyectan ≈21.1 A y a 120 V ≈25.4 A por resistencia, ambos muy por debajo del límite admisible. El desarrollo completo del cálculo se incluye en el Anexo .4.

4.4. Incidente operacional: falla de las resistencias por sobretemperatura

Durante el transcurso de la campaña experimental se produjo un evento de sobretemperatura que resultó en el corte de las tres resistencias Kanthal A-1, con la particularidad de que las tres fallaron en la misma ubicación del arrollamiento. El evento estuvo acompañado de una falla eléctrica en el variac trifásico TSGC2-9000VA.

Este modo de falla cuenta con antecedentes directos en el mismo sistema: durante las dos pruebas de puesta en marcha de Porras [37] también se cortaron resistencias (una al alcanzar los 830°C en el ensayo de H_2, y dos a los 30 min del ensayo de CO), y su memoria recomienda explícitamente refabricarlas y buscar en el mercado alternativas de mayor durabilidad. El incidente registrado en esta campaña constituye, por tanto, la recurrencia de un modo de falla documentado del sistema, antecedente que se incorpora al análisis de causa raíz del Capítulo 6.

La Figura 20 documenta la inspección de las resistencias tras el incidente. Para acceder al alambre fue necesario fracturar los ladrillos de cemento refractario en los que las espiras van embebidas: los paneles (a) y (b) muestran un ladrillo con los terminales del arrollamiento y su fractura para inspección, y los paneles (c) y (d) el detalle de las espiras con el punto de corte del alambre dentro de la masilla.

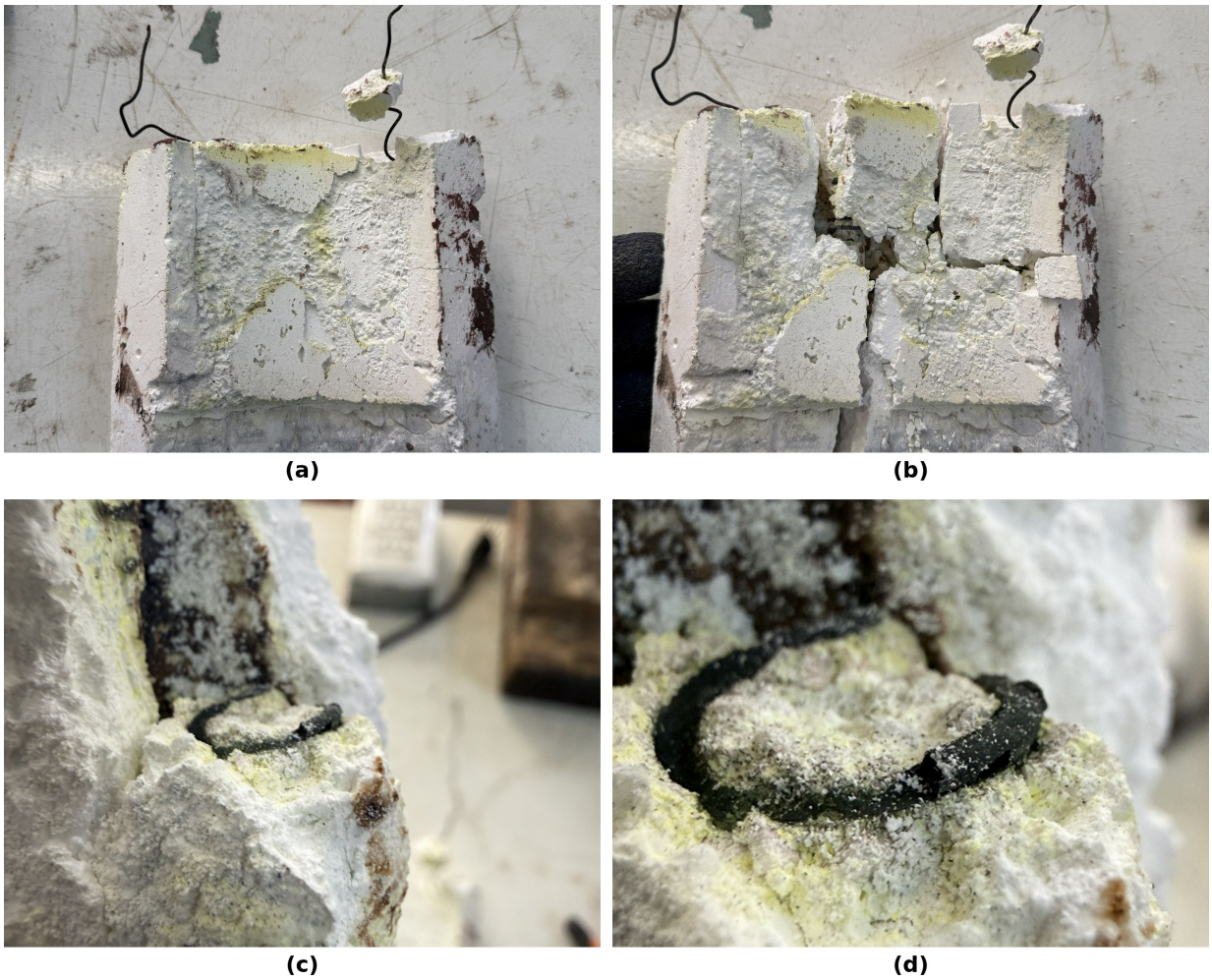


Figura 20: Inspección de las resistencias Kanthal A-1 tras el incidente, etapas (a)–(d). Fotografías propias, Laboratorio de Termofluidos UTFSM, 2026.



Figura 21: Segundo ladrillo refractario fracturado para inspección. Fotografía propia, Laboratorio de Termofluidos UTFSM, 2026.

La Figura 21 muestra el mismo hallazgo en un segundo ladrillo, confirmando que la falla se repitió en la misma zona del arrollamiento en las tres resistencias, coincidencia espacial que se analiza en el Capítulo 6.



Figura 22: Detalle microscópico de la sección de fractura del alambre Kanthal A-1 tras la falla. Fuente: elaboración propia, 2026.

La Figura 22 presenta un detalle microscópico de la sección de fractura de una de las resistencias tras el incidente. La superficie de rotura no es limpia ni plana, sino irregular y cavernosa, con una oquedad central y bordes disgregados, morfología que descarta un corte mecánico y es consistente con una falla progresiva del material. Sobre la superficie se aprecia una capa clara de productos de oxidación, característica del Kanthal A-1 sometido a alta temperatura de forma prolongada: la aleación forma una capa protectora de óxido de aluminio (Al_2O_3) que, ante ciclos térmicos sucesivos, se agrieta y desprende, adelgazando localmente el alambre hasta su rotura. La morfología observada (sección degradada, con oxidación abundante y pérdida de material en el punto de corte) respalda el diagnóstico de falla por fatiga y degradación térmica en la zona de mayor solicitación, más que una fusión por sobrecorriente puntual, y es coherente con la coincidencia espacial del corte en las tres resistencias descrita en §4.4.

En paralelo, el variac trifásico presentó daño en el devanado de una de sus bobinas toroidales, visible como una franja de espiras ennegrecidas en la zona de contacto de la escobilla (Figura 23).



(a) **(b)**

Figura 23: Falla eléctrica del variac trifásico TSGC2-9000VA: (a) torre de bobinas; (b) detalle del devanado dañado. Fotografías propias, Laboratorio de Termofluidos UTFSM, 2026.

La recuperación del sistema consistió en la fabricación de dos ladrillos refractarios nuevos con sus resistencias refabricadas (≈3.0–3.05 m de alambre por resistencia) y el reempaquetado de las termocuplas operativas, dado que no todas se encontraban en plenitud de funcionamiento tras el evento. El proceso completo de recuperación tomó aproximadamente una semana, impacto reflejado en la carta Gantt del Anexo .1 (planificado versus real). La coincidencia espacial del punto de corte en las tres resistencias, su relación con los márgenes térmicos del alambre (§4.3) y las medidas preventivas adoptadas para la operación a mayor temperatura de los Experimentos N°10–N°12 se analizan en el Capítulo 6.

4.5. Material reactivo: CeO_2 poroso en trozos

El material redox utilizado es óxido de cerio (CeO_2) puro en forma de trozos porosos irregulares de tamaños heterogéneos, con una carga de 280 g (1,627 mol, $M_{CeO_2} = 172{,}115$ g/mol), masa pesada por el autor como parte de la preparación de esta campaña. La morfología en trozos porosos es del mismo tipo que la empleada por Porras [37] en la campaña previa del laboratorio, lo que otorga comparabilidad cualitativa entre ambas; las masas de material utilizadas en las campañas anteriores no se encuentran documentadas (la memoria de Porras [37] no reporta la masa de CeO_2 empleada), por lo que la comparación cuantitativa por gramo se restringe a los experimentos de este trabajo. La morfología difiere, en cambio, de la empleada por Rojas et al. [38] en el mismo reactor, quienes utilizaron una pieza única de CeO_2 poroso (espuma). En el marco de las morfologías revisadas en §3.3, los trozos porosos se sitúan en una posición intermedia: su porosidad natural aporta un área superficial específica mayor que la de un sólido denso (favorable para la etapa CDS, limitada por cinética superficial), aunque inferior a la de las estructuras RPC con porosidad de doble escala diseñada; a la vez, el lecho de trozos permite el paso del gas de proceso entre las piezas y simplifica la carga, descarga e inspección del material. La misma carga se utilizó a lo largo de toda la campaña (N°1–N°12).

La Figura 24 muestra la carga real al interior de la cámara del lecho, fotografiada durante el desarme del reactor, donde se aprecia la estructura porosa abierta de las piezas (con poros visibles a simple vista que aportan la porosidad natural del medio, favorable para la etapa CDS) y el sello de masilla refractaria en el perímetro de la brida.



Figura 24: Carga de CeO_2 en trozos porosos irregulares (280 g) en la cámara. Fotografía propia, Laboratorio de Termofluidos UTFSM, 2026.

4.6. Sistema de medición de gases: Testo 350 y cromatografía

4.6.1. Analizador Testo 350

La composición del gas de salida se mide en continuo con un analizador Testo 350, que registra a 1 Hz los canales de O_2 y CO mediante celdas electroquímicas, NO, y CO_2 por sensor infrarrojo (canal CO_2IR). El O_2 es la señal de avance de la etapa TR (descenso desde la línea base al liberarse el oxígeno del CeO_2 y ser barrido por el N_2), el CO es la señal de producto de la etapa CDS, y el CO_2IR permite verificar la presencia efectiva del reactivo en el gas muestreado.

El principio de medición determina el tipo de dato entregado. Los canales de O_2 y CO operan por **celdas electroquímicas**: el gas difunde a través de una membrana hacia un electrodo de trabajo, donde la especie se oxida o reduce generando una corriente proporcional a su concentración, reportada en ppm (CO, NO) o en porcentaje volumétrico (O_2). El canal CO_2IR opera por **absorción infrarroja no dispersiva** (NDIR), midiendo la atenuación de radiación en la banda característica del CO_2. La conversión de la concentración instantánea $y_{CO}(t)$ [ppm] a cantidad molar de CO producido se realiza integrando la señal en el tiempo y ponderándola por el flujo molar de gas (Q/V_m), según la Ecuación (3.21); el sensor de CO de rango bajo empleado posee resolución de 0.1 ppm y exactitud de ± 5 ppm o $\pm 5\,\%$ de la lectura, el mayor de ambos [39], dato determinante para la cuantificación de la producción de CO (§4.11.3).

Dos características del sistema de muestreo condicionan la interpretación de las mediciones. Primero, el tiempo de respuesta T90 del analizador es de ≈30–40 s, por lo que picos de concentración más rápidos que esa escala son suavizados y subestimados. Segundo, la sonda muestrea *aguas abajo* del reactor, a través de una línea de muestreo y una trampa de acondicionamiento, por lo que registra la concentración del gas tal como llega al punto de muestreo y no directamente a la salida del lecho. Por ambas razones, las concentraciones reportadas por el Testo constituyen valores conservadores respecto de las concentraciones reales a la salida del reactor.

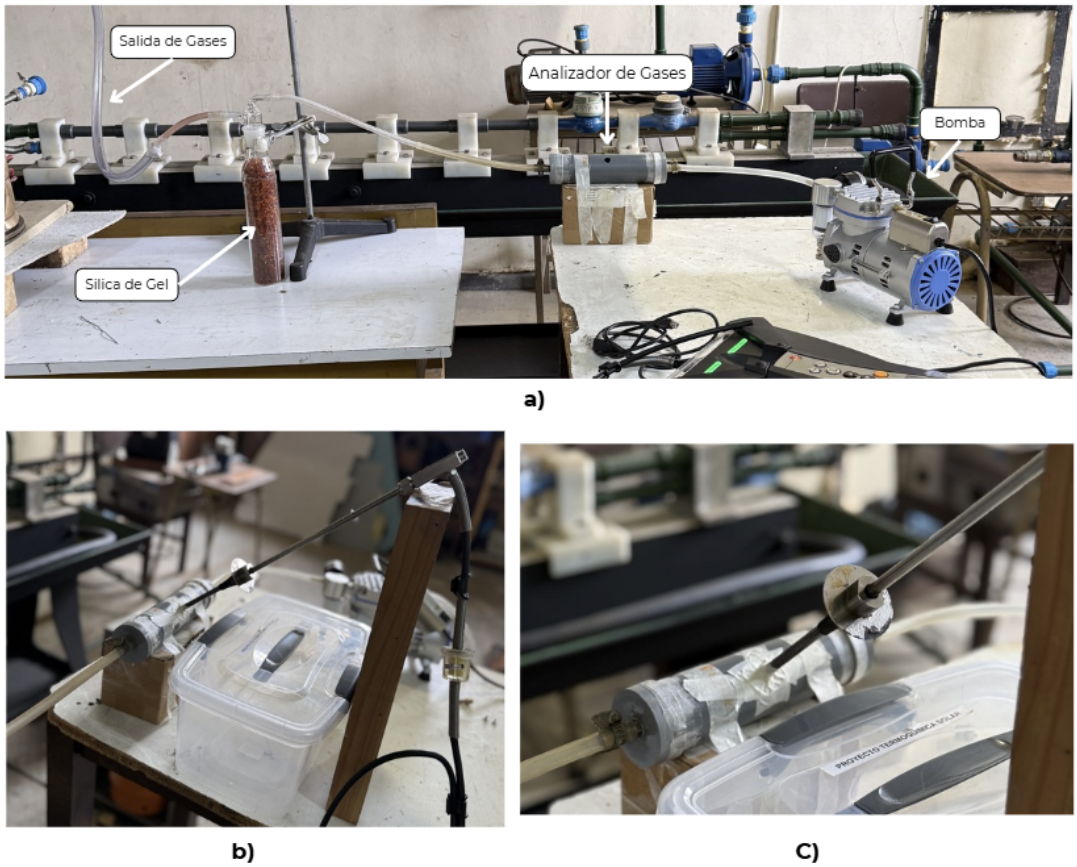


Figura 25: Línea de muestreo de gases aguas abajo del reactor y analizador Testo 350. Fotografía propia, Laboratorio de Termofluidos UTFSM, 2026.

4.6.2. Análisis cromatográfico independiente

La cromatografía de gases separa los componentes de una muestra al arrastrarlos con un gas portador a través de una columna, en la que cada especie se retiene un tiempo característico según su afinidad con la fase estacionaria; un detector a la salida registra cada componente como un pico cuya área es proporcional a su cantidad. A diferencia del Testo 350, que registra en continuo la concentración del gas que circula por la línea de muestreo, la cromatografía analiza un volumen de muestra definido, capturado en un instante puntual, y entrega la composición molar completa de ese volumen (CO, CO_2, O_2 y N_2). Se trata, por tanto, de dos técnicas de naturaleza distinta: el analizador entrega una serie temporal continua sobre la ventana de oxidación, mientras que la cromatografía entrega una fotografía composicional de una muestra aislada. Por esta diferencia de principio de medición, ambas técnicas se tratan de forma independiente en esta Memoria y no se contrastan entre sí.

Los análisis fueron realizados por el Laboratorio de Análisis Químico e Instrumental (LabQI) del Departamento de Química de la UTFSM, según las normas ASTM D1946-90 (2011) y UOP 603-88, que estandarizan la determinación de gases permanentes e hidrocarburos ligeros por cromatografía de gases. Durante la campaña se capturaron muestras del gas de proceso en bolsas Tedlar durante la etapa CDS: el Experimento N°4 (Informe QUI-059-26, muestra CI 132) y los Experimentos N°10 y N°11 (Informe QUI-094-26, muestras CI 214 y CI 215). Cada informe entrega la composición molar del gas capturado, a partir de la cual se caracteriza la riqueza en CO del gas de salida del reactor mediante la razón CO:CO_2, magnitud que permite el contraste con la literatura de reactores solares (§5.7).

4.7. Sistema de medición de temperatura

La distribución térmica del reactor se monitorea con nueve termocuplas tipo B (TC1–TC9), reacondicionadas e instaladas durante la fase de implementación (§4.2.3), con registro continuo a 1 Hz en un adquisidor de datos (*datalogger*) de termopares de 12 canales de la marca Omega (familia OM-CP), operado mediante el software OM-CP Data Logger. Como muestra la Figura 26, los sensores se organizan en tres niveles de altura (anillo inferior TC1–TC3, anillo medio TC4–TC6 y anillo superior TC7–TC9) repartidos en las tres posiciones angulares del reactor, con la entrada de gases lateral en la zona inferior y la salida por la parte superior. El canal TC7 (anillo superior) corresponde al punto más caliente del sistema, con temperaturas estacionarias de 820–837°C en la condición de operación a 70 V, y se utiliza como temperatura de referencia del proceso a lo largo de esta Memoria.

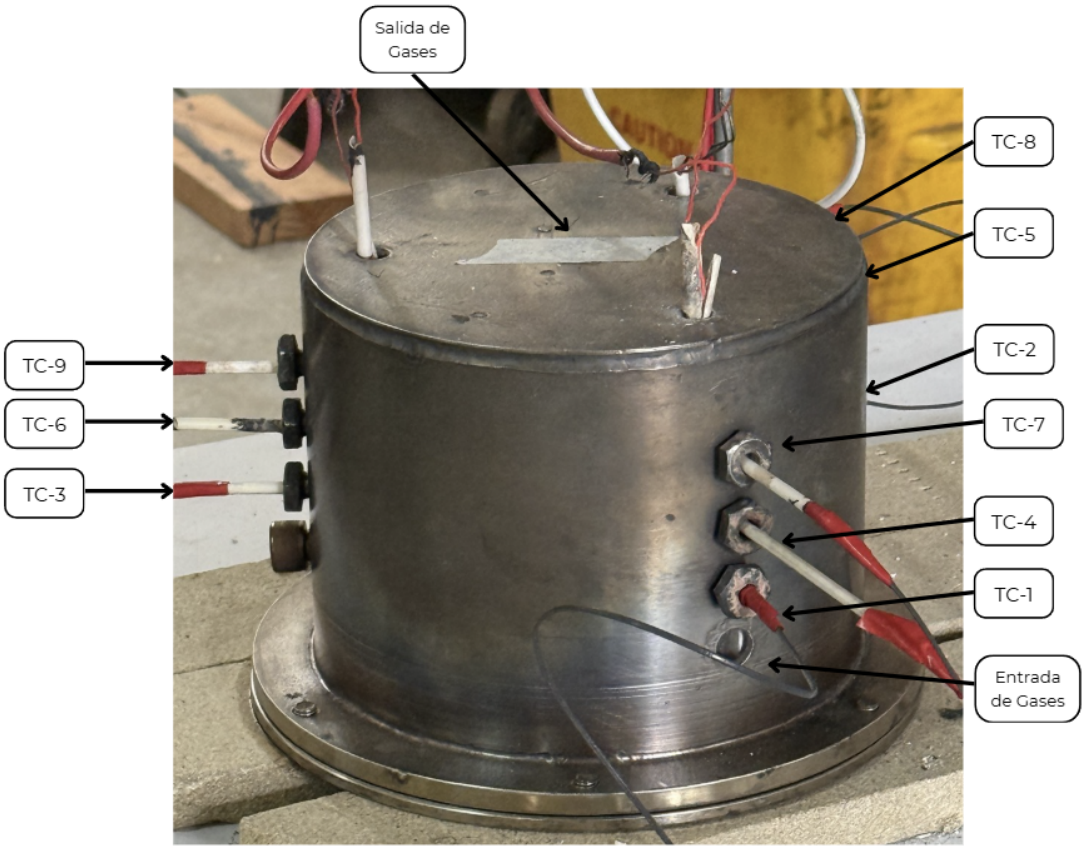


Figura 26: Distribución de las termocuplas TC1–TC9 en el Reactor WS. Fotografía propia anotada, Laboratorio de Termofluidos UTFSM, 2026.

La existencia de gradientes térmicos entre canales (TC7 versus los termopares más fríos) implica que la reducción del CeO_2 no es espacialmente uniforme: las zonas más frías del lecho alcanzan valores de δ menores, por lo que la temperatura de TC7 debe interpretarse como cota superior del nivel térmico del material. Esta consideración se retoma en la discusión de resultados.

4.8. Sistema de control de flujos

El suministro de gases se realiza desde cilindros de N_2 y CO_2 de grado industrial, ambos conectados a una misma línea de entrada: cada cilindro cuenta con una válvula de apertura/cierre ubicada a centímetros de su salida, y ambas ramas se unen mediante una conexión en T a una línea común, aguas abajo de la cual se ubica el controlador de flujo que regula el caudal del gas seleccionado. La conmutación entre las etapas

del ciclo (N_2 en la TR, CO_2 en la CDS) se realiza mediante las válvulas de los cilindros, manteniendo un único elemento de regulación para ambos gases. El conocimiento preciso del caudal de CO_2 es crítico para la conversión de las lecturas de concentración [ppm] a cantidades molares absolutas mediante la Ecuación (3.20).

Por la parte superior del reactor sale la línea de gases de proceso, que se acondiciona en una trampa de agua compuesta por vasos con sílica gel en granos, y continúa hacia una cámara de muestreo cilíndrica (5 cm de diámetro y 20 cm de longitud) donde se inserta la sonda del Testo 350; el tramo final de la línea es asistido por una bomba que ayuda a evacuar el gas remanente del sistema, punto en el cual se realiza además la toma de muestra en bolsa Tedlar para el análisis cromatográfico (§4.6.2). La Figura 27 presenta el diagrama de flujo de proceso completo del sistema.

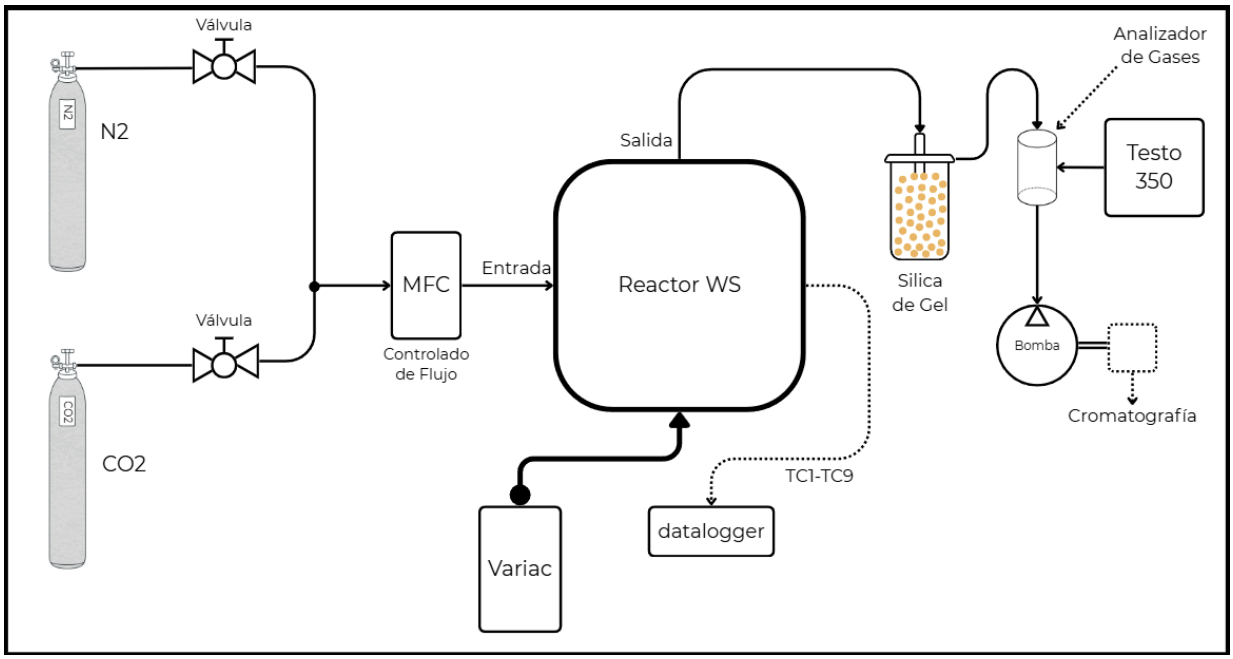


Figura 27: Diagrama de flujo de proceso (PFD) del sistema experimental. Elaboración propia, 2026.

4.9. Protocolo experimental: ciclo TR–CDS

Cada experimento ejecuta un ciclo completo TR–CDS de acuerdo al siguiente protocolo estándar:

1. **Preparación y arranque:** verificación de conexiones de gases e instrumentación; inicio del registro de temperaturas (TC1–TC9); encendido del analizador Testo 350 antes de que el reactor supere los 200°C, de modo de registrar la línea base de O_2 del sistema (típicamente 12.3–12.5 %, propia de la atmósfera del tren de muestreo); apertura del barrido de N_2 al caudal definido (6 L/min en el protocolo estándar).
2. **Calentamiento:** energización de las resistencias mediante rampa del variac de 10 V por minuto hasta los 70 V de operación (≈6–8 min), con monitoreo de las corrientes por línea; el sistema se lleva hasta alcanzar los 800°C en TC7 (duración típica de 2.5 a 3 horas).
3. **Etapa TR (reducción térmica):** una vez alcanzados los 800°C, mantención del barrido de N_2 durante 40 min a 70 V; la señal de O_2 del Testo registra el avance de la reducción del CeO_2, mientras TC7 continúa ascendiendo hasta su valor estacionario (820–844°C).
4. **Etapa CDS (inyección de CO_2):** conmutación al flujo de CO_2 (6 L/min en el protocolo estándar) y reducción simultánea de la tensión a 50 V; la inyección se mantiene por el tiempo definido para el experimento (40 min en los experimentos N°2–N°5; 20 min en N°6–N°8). La señal de CO del Testo

registra la producción y el canal CO_2IR confirma la presencia del reactivo en el gas muestreado.

5. **Purga y cierre:** restablecimiento del barrido de N_2 durante 5–8 min tras el corte del CO_2, corte de la alimentación eléctrica, cierre de gases y respaldo de los archivos de datos (gases y temperaturas).

La delimitación temporal de la etapa CDS para efectos de cálculo (t_{iny} en la Ecuación (4.6)) se realiza con el canal CO_2IR y no con la bitácora manual. Este criterio se adoptó a raíz del Experimento N°1, donde el registro CO_2IR reveló que la inyección efectiva de CO_2 comenzó a las 13:09:40, reduciendo el período válido de análisis de los ≈103 min anotados en bitácora a ≈22 min reales. Todas las métricas del Experimento N°1 reportadas en esta Memoria utilizan la ventana corregida, y el criterio CO_2IR se aplicó retroactiva y uniformemente a todos los experimentos de la campaña.

4.10. Variables operacionales y diseño de experimentos

La campaña experimental principal comprende ocho experimentos (N°1 al N°8) ejecutados entre el 18/05/2026 y el 04/06/2026, procesados en los archivos P1–P7 del Testo 350 con sus respectivos registros de temperatura, en los que se variaron las variables operacionales identificadas en el Objetivo Específico N°3: el caudal de CO_2 (que fija la p_{CO_2} de la etapa CDS, Ecuación (3.19)), el tiempo de inyección de CO_2 y el protocolo de fases N_2/CO_2; la tensión (70 V en TR, 50 V en CDS) y el caudal de N_2 (6 L/min) se mantuvieron fijos en el protocolo estándar. La campaña fue posteriormente extendida con cuatro experimentos adicionales: el Experimento N°9 (18/06/2026, a 80 V) y los Experimentos N°10 a N°12 (23 y 27 de julio de 2026), orientados a elevar la temperatura de reducción mediante mayor tensión de operación, dentro de los márgenes de seguridad establecidos en §4.3. La Tabla 5 resume las condiciones de cada experimento.

Tabla 5: Diseño de experimentos de la campaña. Tensión: calentamiento/TR → CDS.

Exp.	**Fecha**	**N_2/CO_2 [min]**	**Tensión [V]**	**Q_{N_2} [L/min]**	**Q_{CO_2} [L/min]**	**T inicio CO_2 °C**
N°1	18/05	40 / 20	70 → 50	6	2	>810
N°2	19/05	40 / 40	70 → 50	6	6	≈800
N°3	20/05	40 / 40	70 → 50	6	6	817
N°4	26/05 AM	40 / 40†	70 → 50	6	6	827
N°5	26/05 PM	40 / 40	70 → 50	6	6	>800
N°6	01/06	40 / 20	70 → 50	6	6	≈804
N°7	03/06	40 / 20	70 → 50	6	6	823.5
N°8	04/06	40 / 20	70 → 50	6	6	825.5
N°9	18/06	40/20	80→50	6	6	913
N°10	23/07 AM	40/20†	70→50	6	6	773
N°11	23/07 PM	40/20†	70→50	6	6	815
N°12	27/07	40/20	70→50	6	6	844.5

† Experimento con toma de muestra cromatográfica durante CDS (§4.6.2).

Los rangos de las variables se definieron a partir de tres criterios: (i) la tensión máxima de operación quedó acotada por el límite térmico del alambre Kanthal A-1 (§4.3); (ii) los caudales de N_2 y CO_2 se acotaron a los rangos de los elementos de control disponibles; y (iii) los tiempos de inyección se ajustaron durante la campaña: los experimentos N°2–N°5 usaron inyecciones de 40 min, replicando la duración de los primeros ensayos para verificar la repetibilidad, y a partir de la evidencia de que el pico de CO ocurre en los primeros minutos y luego decae (§5.5), los experimentos N°6–N°8 acortaron la inyección a 20 min, mejorando la eficiencia eléctrica al no consumir energía en la cola de baja producción.

4.11. Metodología de procesamiento de datos

Esta sección describe el conjunto de parámetros, criterios y ecuaciones empleados para transformar los registros en bruto de la campaña en las métricas de desempeño reportadas en el Capítulo 5. El procesamiento persigue dos objetivos: consolidar los doce experimentos en un conjunto reducido de casos representativos mediante el promediado por protocolo, y cuantificar la producción de CO y el rendimiento del sistema a partir de las señales medidas.

4.11.1. Parámetros de cálculo

El procesamiento de los datos y el cálculo de las métricas de desempeño emplean el conjunto de parámetros constantes de la Tabla 6. Estos valores son comunes a todos los experimentos y se aplican de forma idéntica en las ecuaciones de producción molar y de rendimiento.

Tabla 6: Parámetros constantes empleados en el procesamiento de datos y el cálculo de rendimientos. Fuente: elaboración propia, 2026.

Parámetro	**Símbolo**	**Valor**
Volumen molar del gas (15°C, 1 atm)	V_m	23.644 L/mol
Masa de CeO_2 cargada	m_{CeO_2}	280 g
Masa molar del CeO_2	M_{CeO_2}	172.115 g/mol
Moles de CeO_2	n_{CeO_2}	1.627 mol
Entalpía de disociación del CO	ΔH°_{CO}	283 kJ/mol
Caudal de gas (protocolo estándar)	Q	6 L/min
Potencia eléctrica a 70 V (precalentamiento y TR)	P_{70}	3038 W
Potencia eléctrica a 50 V (CDS)	P_{50}	1605 W
Resistencia equivalente del arreglo	R	1.613 Ω
Duración de la etapa TR	t_{TR}	40 min

La potencia a 70 V se determinó a partir de las corrientes y tensiones registradas en la campaña (del orden de 14 A por fase a 70 V), valor coherente con el límite de diseño del arreglo de tres resistencias (1030 W por resistencia) y con la potencia total estimada del sistema de calentamiento.

4.11.2. Agrupación por protocolo y promediado

La campaña comprendió doce experimentos. Para obtener resultados representativos y evaluar la repetibilidad del sistema, los experimentos que compartieron protocolo operacional se organizaron en tres grupos, cuyo comportamiento promedio constituye la base del análisis:

- **Grupo 2 (protocolo 40/40):** reducción de 40 min seguida de oxidación de 40 min. Reúne los experimentos con este protocolo y se analiza como el promedio de sus repeticiones.
- **Grupo 3 (protocolo 40/20):** reducción de 40 min seguida de oxidación de 20 min.
- **Grupo 4 (protocolo 40/20, extensión de campaña):** repeticiones del protocolo 40/20 realizadas en la segunda tanda de la campaña, operadas a mayor temperatura. Este grupo se ejecutó tras el incidente de las resistencias (§4.4), por lo que operó con los ladrillos refractarios y las resistencias refabricados y con el variac reparado; esta diferencia en el sistema de calentamiento debe tenerse presente al comparar el Grupo 4 con los Grupos 2 y 3, ejecutados con el arreglo original.

Dos experimentos quedan fuera de los grupos y se tratan de forma independiente: el Experimento N°1, de carácter exploratorio y con condiciones operacionales distintas al resto (caudal reducido y falla eléctrica inicial), y el Experimento N°9, un ensayo incidental interrumpido por la falla simultánea de las resistencias

que, al no tener repeticiones bajo el mismo protocolo, no admite promediado. Ambos se documentan como casos singulares y no participan en la comparación de rendimientos.

El promediado de cada grupo requiere alinear temporalmente las repeticiones, dado que cada experimento inició el registro en un instante distinto y con distinta duración de precalentamiento. La alineación se realiza por fase física, no por el reloj absoluto de cada instrumento:

- **Gases (O_2, CO, CO_2IR):** el inicio de la etapa CDS se ancla al instante real de inyección de CO_2 registrado a mano en la bitácora de cada experimento, con una tolerancia de ± 30 s para encajar con la marca de tiempo exacta del registro. Se evita usar el canal CO_2IR como disparador automático, pues presenta una deriva de línea base (del orden de 3 %) que no corresponde a inyección real de reactivo. A partir de ese anclaje, la etapa TR se define como los 40 min inmediatamente anteriores, y el precalentamiento como el intervalo previo.
- **Temperatura (TC5–TC8):** el eje temporal se guía por la curva de un experimento de referencia de cada grupo (el de registro más completo desde el arranque en frío), y las demás repeticiones se promedian por cruce de temperatura: en cada punto se promedian las repeticiones que alcanzan la misma temperatura, de modo que la curva conserva la forma de la rampa real mientras integra la información de las demás pruebas donde está disponible.

Una vez alineadas, las señales se remuestrean a una grilla de 1 minuto, en la que cada punto corresponde al promedio de las mediciones de ese minuto (el Testo registra a 1 Hz; las termocuplas a mayor frecuencia se decimaron a la misma base). Para cada instante se calcula el promedio entre repeticiones y su desviación estándar muestral, lo que permite representar cada variable como una curva media acompañada de una banda de ± 1 desviación estándar ($\pm\sigma$) que expresa la dispersión entre repeticiones. La cota inferior de dicha banda se limita a cero en las variables de concentración, por corresponder a magnitudes físicamente no negativas.

4.11.3. Cuantificación de la producción de CO

La producción de CO se obtiene integrando la señal de concentración del analizador sobre la etapa CDS. Partiendo de que la concentración medida en partes por millón equivale a la fracción molar del gas, los moles de CO producidos en cada intervalo de un minuto se calculan como el producto de dicha fracción por el volumen de gas que circula, normalizado por el volumen molar:

$$\Delta n_{\mathrm{CO}} = \frac{\left(\mathrm{ppm}_{\mathrm{CO}} \times 10^{-6}\right)\, \dot{V}\, \Delta t}{V_m} \tag{4.1}$$

donde $\mathrm{ppm}_{\mathrm{CO}} \times 10^{-6}$ es la fracción molar de CO, $\dot{V}\,\Delta t$ el volumen de gas que atraviesa el sistema en el intervalo (con $\dot{V} = Q = 6$ L/min) y V_m el volumen molar. Esta relación es la aplicación directa de la definición de caudal molar de una especie como producto de su concentración por el caudal volumétrico [41]; su validez con caudal constante se sustenta en que las concentraciones de CO involucradas (nivel de ppm) representan una fracción ínfima del gas total, por lo que no alteran el flujo volumétrico. La producción total de la etapa se obtiene sumando los aportes de todos los minutos del período de oxidación:

$$n_{\mathrm{CO}} = \sum_{i} \Delta n_{\mathrm{CO},\,i} \tag{4.2}$$

expresada en micromoles tras multiplicar por 10^6. Fuera de la etapa CDS el canal CO_2IR se fuerza a cero, por cuanto en ausencia de inyección de CO_2 toda lectura de dicho canal corresponde a deriva o restos del sensor y no a reactivo real.

4.11.4. Corrección de línea base de la señal de CO

El sensor de CO registra una concentración de fondo no nula durante la etapa TR bajo N_2, previa a toda inyección de CO_2, cuando físicamente no puede existir CO de reacción. Esta línea base proviene de CO residual en la celda electroquímica, de la deriva de cero del sensor y, de forma notoria en el Experimento N°10, de la contaminación previa del equipo documentada en bitácora. Al no ser atribuible a la oxidación del CeO_2, su descuento permite aislar la producción real, en línea con la práctica estándar de integración de señales analíticas sobre la línea base [40]. La producción neta de CO se obtiene restando dicho fondo antes de integrar:

$$n_{\mathrm{CO}}^{neto} = \frac{Q}{V_m}\int_{t_0}^{t_f}\left[\,y_{\mathrm{CO}}(t) - \bar{y}_{\mathrm{CO}}^{base}\right]dt, \qquad \bar{y}_{\mathrm{CO}}^{base} = \frac{1}{N_b}\sum_{k} y_{\mathrm{CO}}(t_k) \tag{4.3}$$

donde $\bar{y}_{\mathrm{CO}}^{base}$ es el promedio de la señal de CO sobre la ventana estable de N_2 inmediatamente anterior a la conmutación a CO_2, y los valores negativos se truncan a cero.

4.11.5. Métricas de rendimiento

El desempeño de cada grupo se evalúa con tres métricas complementarias, todas de uso establecido en la literatura de ciclos termoquímicos con CeO_2.

- **Rendimiento específico de CO (Y_{CO})**

  Es la producción total de CO por la masa de material, la métrica más difundida para comparar el desempeño intrínseco de un material redox [25, 15, 18]:

  $$Y_{\mathrm{CO}} = \frac{n_{\mathrm{CO}}}{m_{\mathrm{CeO_2}}} \qquad [\mu\mathrm{mol/g}] \tag{4.4}$$

- **Tasa media de producción de CO (r_{CO})**

  Ordenada la producción por la masa y por la duración de la oxidación, lo que permite comparar de forma justa protocolos con distinta duración de la etapa CDS [25]:

  $$r_{\mathrm{CO}} = \frac{n_{\mathrm{CO}}}{m_{\mathrm{CeO_2}}\, t_{\mathrm{CDS}}} \qquad [\mu\mathrm{mol/(g{\cdot}min)}] \tag{4.5}$$

- **Eficiencia eléctrica (η)**

  Cuantifica la fracción de la energía eléctrica aportada al sistema que se recupera como energía química en el CO producido. Es la adaptación, a una fuente de calentamiento eléctrica, de la eficiencia solar-to-fuel con que la literatura evalúa el ciclo [18, 26]:

  $$\eta = \frac{n_{\mathrm{CO}}\,\Delta H^{\circ}_{\mathrm{CO}}}{E_{\mathrm{eléct}}} \times 100 \qquad [\,\%] \tag{4.6}$$

  En coherencia con la práctica de la literatura, que contabiliza la energía de todo el ciclo redox [18, 26], el denominador considera la energía eléctrica del protocolo completo: precalentamiento, reducción y oxidación.

  $$E_{\mathrm{eléct}} = E_{\mathrm{precal}} + E_{\mathrm{TR}} + E_{\mathrm{CDS}} \tag{4.7}$$

  La energía del precalentamiento se descompone en la rampa inicial de subida de tensión (0 a 70 V) y la meseta posterior a 70 V. Durante la rampa, dado que en un arreglo resistivo la potencia crece

con el cuadrado de la tensión ($P = V^2/R$) y la tensión sube de forma aproximadamente lineal, la potencia media efectiva del tramo es un tercio de la potencia nominal ($P_{70}/3$). Las etapas de reducción y oxidación se calculan con su potencia constante (P_{70} y P_{50} respectivamente) por su duración.

4.11.6. Conversión del reactor y caracterización cromatográfica

Además de las tres métricas de rendimiento anteriores, el desempeño del sistema se cuantifica mediante la conversión del reactivo, es decir, la fracción del CO_2 inyectado que resulta efectivamente convertida en CO. Esta magnitud es la que responde de forma directa a la pregunta central del trabajo (cuánto CO se produce respecto del CO_2 alimentado) y se obtiene íntegramente a partir de la señal continua del Testo 350, sin recurrir a la cromatografía.

Siguiendo la definición de conversión de reactivo de un solo paso de Fogler [41], la " conversión base reactor " se define como la razón entre los moles de CO producidos y los moles de CO_2 inyectados al reactor durante la etapa CDS:

$$X_{\text{reactor}} = \frac{n_{\text{CO}}}{n_{\text{CO}_2,\,iny}} \times 100 \qquad [\,\%] \tag{4.8}$$

donde n_{CO} es la producción total integrada de la señal del Testo (Ecuación (4.1)) y $n_{\text{CO}_2,\,iny}$ el CO_2 total inyectado, calculado a partir del caudal de alimentación y la duración de la oxidación:

$$n_{\text{CO}_2,\,iny} = \frac{Q\; t_{\text{CDS}}}{V_m} \tag{4.9}$$

Con el caudal de 6 L/min del protocolo estándar, la inyección aporta 10.151 mol de CO_2 en los protocolos de oxidación de 40 min y 5.075 mol en los de 20 min.

Complementariamente, la riqueza en CO del gas de salida se caracteriza mediante la razón CO:CO_2, calculada a partir de las concentraciones promedio de CO y CO_2IR registradas por el Testo sobre la ventana de oxidación:

$$\text{Razón CO:CO}_2 = \frac{\bar{y}_{\text{CO}}}{\bar{y}_{\text{CO}_2}} \tag{4.10}$$

Ambas magnitudes se calculan por grupo (G2, G3, G4) y permiten comparar de forma interna la efectividad de conversión entre los distintos protocolos operacionales; sus valores se presentan en el Capítulo 5.

La caracterización cromatográfica se trata de forma separada, como una técnica independiente que entrega la composición molar del gas capturado en un volumen de muestra definido. A partir de dicha composición se obtiene la razón CO:CO_2 de la muestra, magnitud que sí admite contraste con los valores reportados por la literatura de reactores solares operativos (§5.9), por tratarse de una propiedad del gas de proceso independiente del caudal y del principio de medición del instrumento. La razón intrínseca de la muestra se expresa como [26]:

$$X_{\text{muestra}} = \frac{n_{\text{CO}}}{n_{\text{CO}} + n_{\text{CO}_2}} \tag{4.11}$$

donde n_{CO} y n_{CO_2} son los moles de cada especie en el volumen de muestra, obtenidos directamente de la composición molar del informe cromatográfico.

El procesamiento se estructuró en tres etapas, cada una materializada en planillas de cálculo específicas. En la primera, los registros en bruto del Testo 350 y de las termocuplas de cada experimento se depuraron y alinearon temporalmente por fase, obteniéndose para cada grupo una planilla consolidada con las curvas promedio de las cuatro señales (O_2, CO, CO_2IR y temperatura por termocupla) y su banda de dispersión $\pm\sigma$, calculada minuto a minuto entre las repeticiones del grupo. En la segunda, a partir de la curva promedio de CO de cada grupo se aplicó la Ecuación (4.1) para integrar la producción sobre la etapa CDS y obtener el n_{CO} total, del cual se derivaron las métricas de rendimiento (Y_{CO}, r_{CO} y η), la conversión base reactor (X_{reactor}) y la razón CO:CO_2, todas mediante ecuaciones vivas enlazadas a los parámetros de la Tabla 6. En la tercera, se

construyó una planilla independiente para la medición cromatográfica, en la que se procesó la composición molar de los informes de laboratorio para obtener la razón CO:CO_2 de cada muestra. La correspondencia entre la numeración de experimentos de bitácora y la de los archivos de planilla se documenta en el Anexo .3.

5. Resultados

Este capítulo presenta los resultados de la campaña experimental organizados por protocolo operacional. Como se detalló en la metodología (§4.11.2), los experimentos se consolidan en tres grupos G2 (protocolo 40/40), G3 (protocolo 40/20) y G4 (protocolo 40/20, ejecutado tras el cambio de equipos por el incidente de las resistencias), cuyo comportamiento promedio y su dispersión constituyen la base del análisis. El Experimento N°1 (que en el ordenamiento original de la campaña habría constituido un grupo G1) se descarta del análisis por grupos, dado que su carácter exploratorio y sus condiciones operacionales atípicas (caudal reducido y falla eléctrica inicial) produjeron resultados sin sentido físico para la comparación de rendimientos; se documenta como caso singular junto al Experimento N°9. Se presentan primero los perfiles térmicos y de gases de dos protocolos representativos, luego la cuantificación de la producción de CO y las métricas de rendimiento, y finalmente la medición cromatográfica independiente y la comparación con la literatura.

5.1. Perfiles del protocolo 40/40 (Grupo G2)

El Grupo G2 corresponde al protocolo de reducción de 40 min y oxidación de 40 min. La Figura 28 presenta el perfil térmico promedio del grupo a lo largo de todo el proceso, donde se distinguen con claridad las tres etapas: el precalentamiento, con la rampa de subida hasta el régimen de operación; la reducción térmica (TR) bajo N_2, en la que el lecho alcanza su temperatura máxima; y la oxidación (CDS) tras la conmutación a CO_2, con el descenso térmico característico al reducirse la potencia eléctrica.

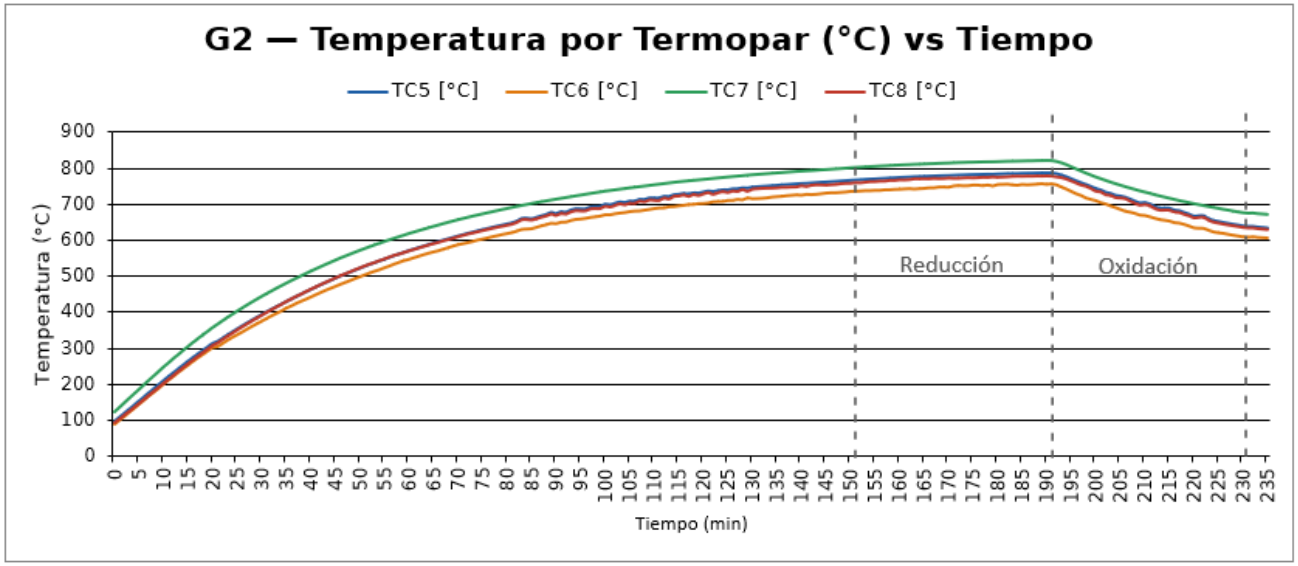


Figura 28: Perfil de temperatura promedio del Grupo G2 (protocolo 40/40). Fuente: elaboración propia, 2026.

El comportamiento de los gases durante todo el protocolo se muestra en la Figura 29. Durante el precalentamiento y la reducción bajo N_2, el CO y el CO_2IR permanecen en su línea base, mientras la atmósfera del reactor está dominada por el N_2 de barrido, que desplaza el O_2 y mantiene el ambiente inerte; al iniciarse la inyección de CO_2 (etapa CDS), el canal CO_2IR asciende abruptamente y el CO comienza a producirse por la reoxidación del CeO_2 reducido.

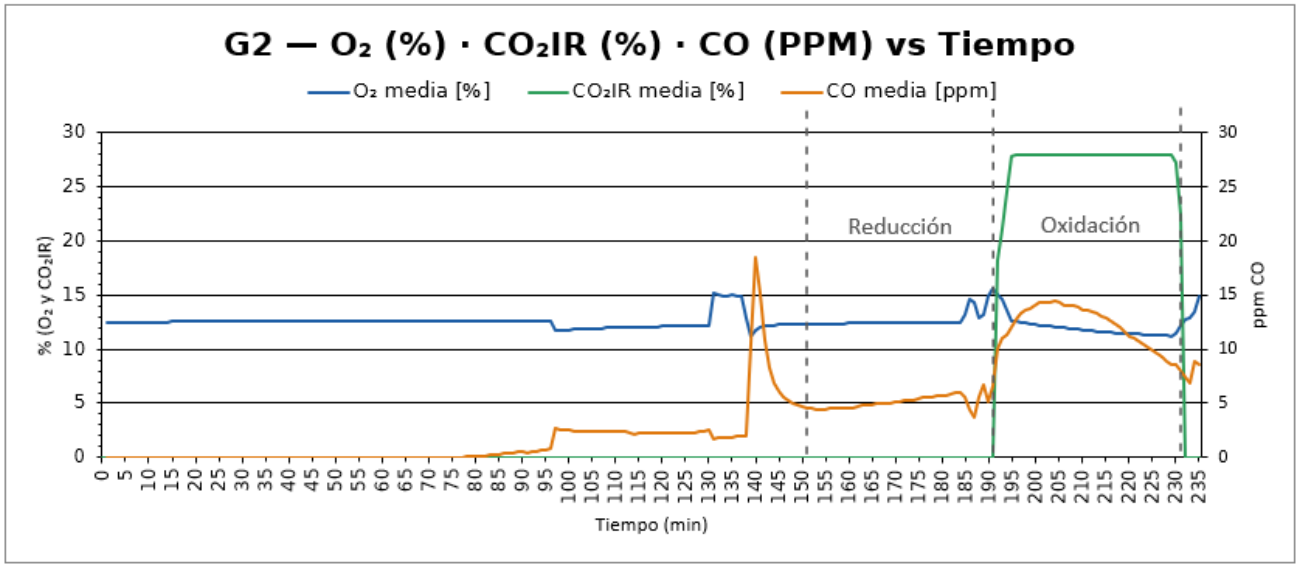


Figura 29: Señales de gases promedio del Grupo G2. Fuente: elaboración propia, 2026.

Para apreciar el comportamiento de cada especie sin el ruido de un ensayo individual, las Figuras 30, 31 y 32 presentan cada gas por separado como curva promedio del grupo, acompañada de la banda de ± 1 desviación estándar ($\pm\sigma$) que expresa la dispersión entre las repeticiones. Una banda estrecha indica alta reproducibilidad del sistema en ese tramo; su ensanchamiento señala los instantes de mayor variabilidad entre ensayos.

En el O_2 se observa que, durante la etapa de oxidación, la concentración se mantiene en torno a su valor de base sin un aumento apreciable, consistente con que en el CDS el oxígeno del CO_2 es capturado por el material y no liberado al gas. La banda de dispersión estrecha a lo largo del CDS confirma que este comportamiento es altamente reproducible entre los ensayos del grupo.

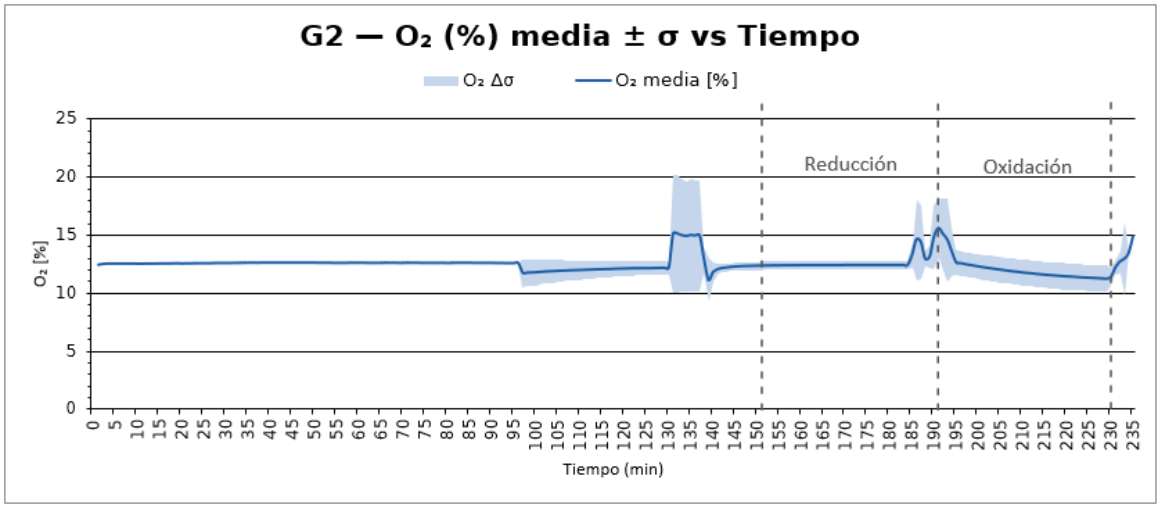


Figura 30: Concentración de O_2 promedio del Grupo G2, con banda $\pm\sigma$. Fuente: elaboración propia, 2026.

El CO es la variable de interés para la cuantificación de la producción. Su curva promedio asciende desde el inicio de la inyección de CO_2 hasta un máximo en los primeros minutos y luego decae, reflejando el agotamiento progresivo de las vacantes de oxígeno generadas en la reducción. El ensanchamiento de la banda

$\pm\sigma$ en la zona del pico indica que es precisamente en el máximo donde los ensayos difieren más entre sí, mientras que las fases de subida y decaimiento son más consistentes. La integración de esta curva sobre el CDS entrega una producción total promedio de $n_{CO} = 123{,}0$ μmol para este grupo, base del cálculo de rendimiento reportado en §5.6.

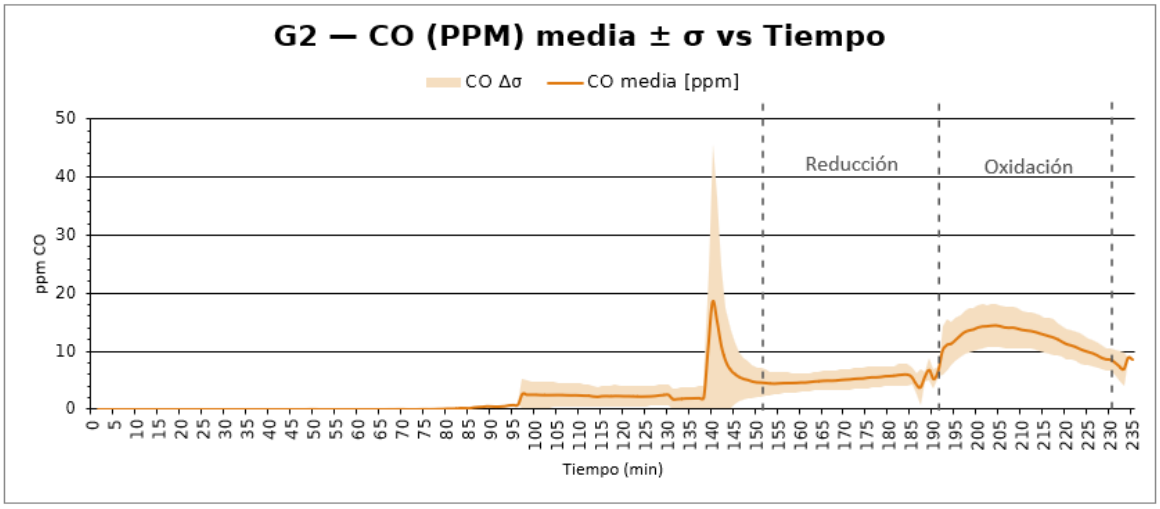


Figura 31: Concentración de CO promedio del Grupo G2, con banda $\pm\sigma$. Fuente: elaboración propia, 2026.

El canal CO_2IR permanece nulo durante el precalentamiento y la reducción, y asciende bruscamente al iniciarse la inyección, marcando el inicio efectivo de la etapa CDS. Su nivel durante la oxidación refleja el CO_2 no convertido que atraviesa el lecho; el hecho de que se mantenga elevado frente al modesto nivel de CO es coherente con la baja conversión característica del rango térmico de operación, analizada en el Capítulo 6.

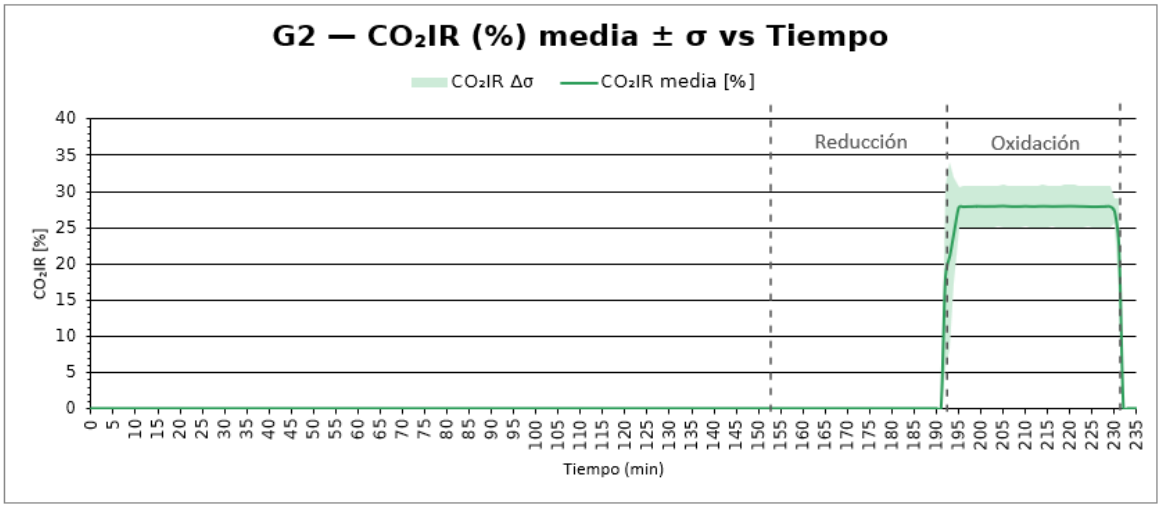


Figura 32: Concentración de CO_2IR promedio del Grupo G2, con banda $\pm\sigma$. Fuente: elaboración propia, 2026.

5.2. Protocolo 40/20 de referencia (Grupo G3)

El Grupo G3 corresponde a la primera tanda del protocolo 40/20, ejecutada con el arreglo original del reactor. Es importante precisar que, aunque G3 y G4 comparten el mismo protocolo operacional (reducción de 40 min y oxidación de 20 min), no son directamente equiparables en cuanto al sistema de calentamiento: el Grupo

G4 se ejecutó tras el incidente de las resistencias (§4.4) con un equipo de voltaje distinto y con dos ladrillos refractarios fabricados específicamente para esa segunda tanda, mientras que G3 operó con los ladrillos y el variac originales. Esta diferencia de equipos explica que G4 alcanzara una mayor temperatura de reducción y debe tenerse presente al comparar ambos grupos. La Figura 33 muestra el perfil térmico promedio del grupo.

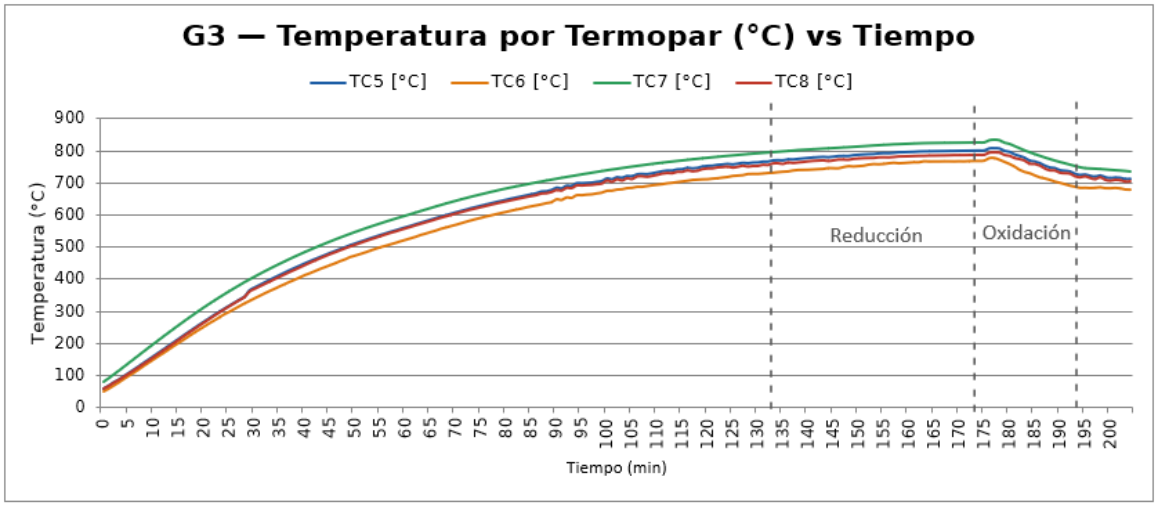


Figura 33: Perfil de temperatura promedio del Grupo G3. Fuente: elaboración propia, 2026.

El comportamiento de las tres especies gaseosas, analizado individualmente con su banda de dispersión $\pm\sigma$, se presenta a continuación con el mismo formato empleado para los Grupos G2 y G4.

En el O_2 se observa que, durante la etapa de oxidación, la concentración se mantiene en torno a su valor de base sin un aumento apreciable, consistente con que en el CDS el oxígeno del CO_2 es capturado por el material y no liberado al gas. La banda de dispersión estrecha confirma la reproducibilidad del comportamiento entre los ensayos del grupo.

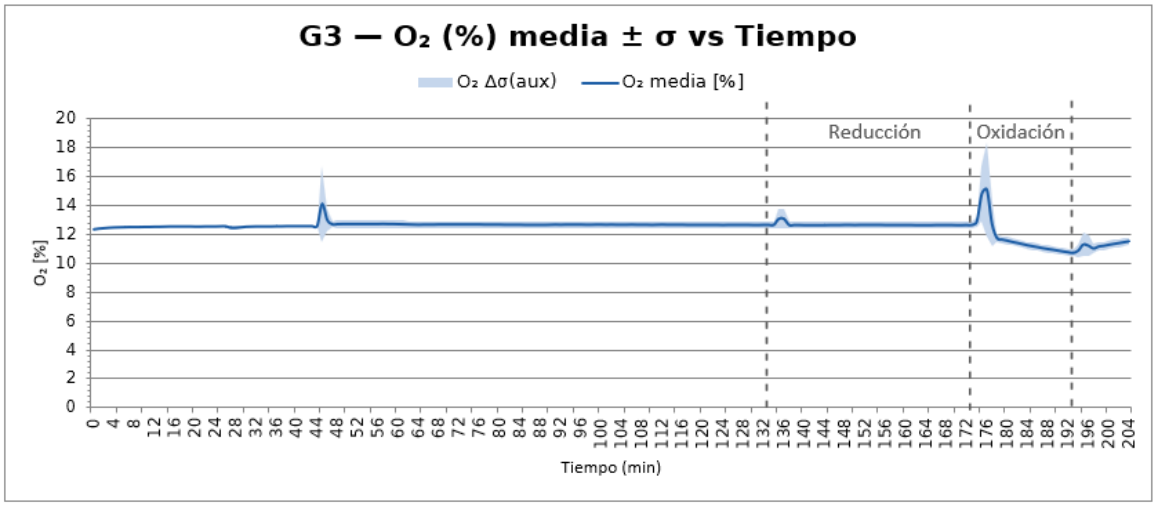


Figura 34: Concentración de O_2 promedio del Grupo G3, con banda $\pm\sigma$. Fuente: elaboración propia, 2026.

El CO asciende desde el inicio de la inyección de CO_2 hasta un máximo en los primeros minutos y luego decae, reflejando el agotamiento progresivo de las vacantes de oxígeno generadas en la reducción. La integración de esta curva sobre el CDS entrega una producción total promedio de $n_{CO} = 69{,}6$ μmol para este grupo (§5.6).

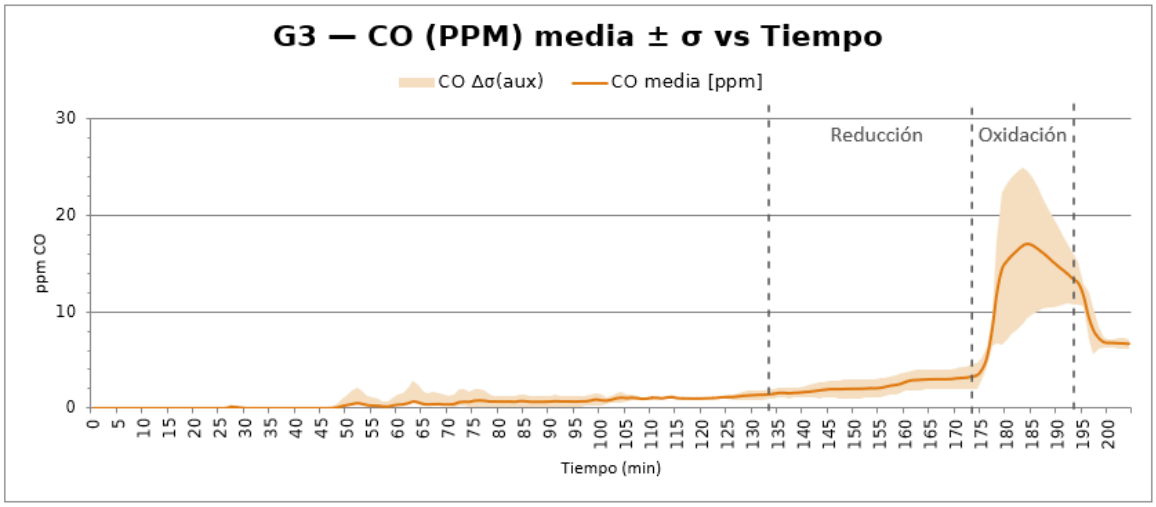


Figura 35: Concentración de CO promedio del Grupo G3, con banda $\pm\sigma$. Fuente: elaboración propia, 2026.

El canal CO_2IR permanece nulo durante el precalentamiento y la reducción, y asciende bruscamente al iniciarse la inyección, marcando el inicio efectivo de la etapa CDS; su nivel durante la oxidación refleja el CO_2 no convertido que atraviesa el lecho.

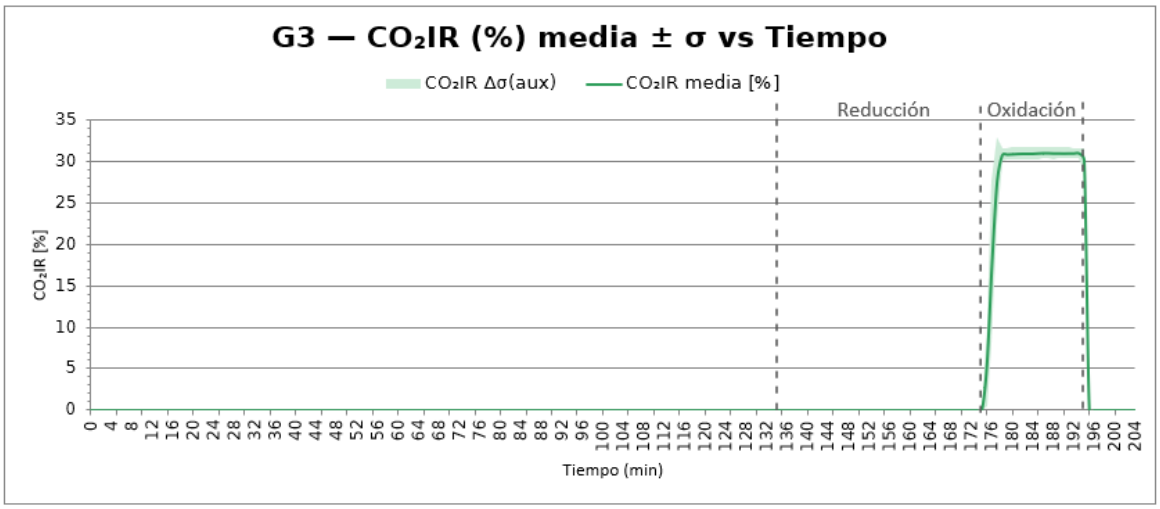


Figura 36: Concentración de CO_2IR promedio del Grupo G3, con banda $\pm\sigma$. Fuente: elaboración propia, 2026.

Finalmente, la Figura 37 presenta las tres especies superpuestas en un mismo gráfico, para apreciar de forma conjunta la secuencia de las etapas del protocolo.

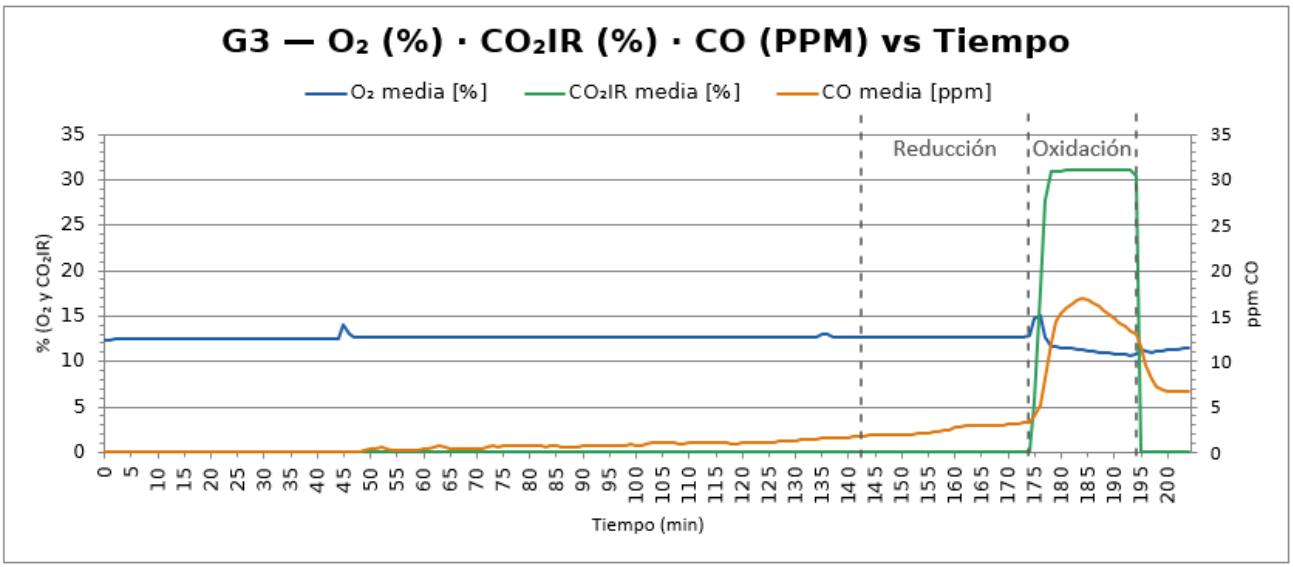


Figura 37: Señales de gases promedio del Grupo G3. Fuente: elaboración propia, 2026.

5.3. Perfiles del protocolo 40/20, mejor caso (Grupo G4)

El Grupo G4 corresponde a las repeticiones del protocolo 40/20 realizadas tras el incidente de las resistencias, con el reactor operando con los ladrillos, las resistencias y el variac refabricados (§4.4); esta configuración alcanzó una mayor temperatura de reducción y constituye el mejor caso en producción de CO. Al provenir de un sistema de calentamiento distinto al de G2 y G3, su comparación con los otros grupos debe tener presente ese cambio de equipos. La Figura 38 muestra su perfil térmico, que alcanza la temperatura de reducción más alta de la campaña en el anillo superior del lecho, y la Figura 39 el comportamiento de los gases a lo largo del protocolo.

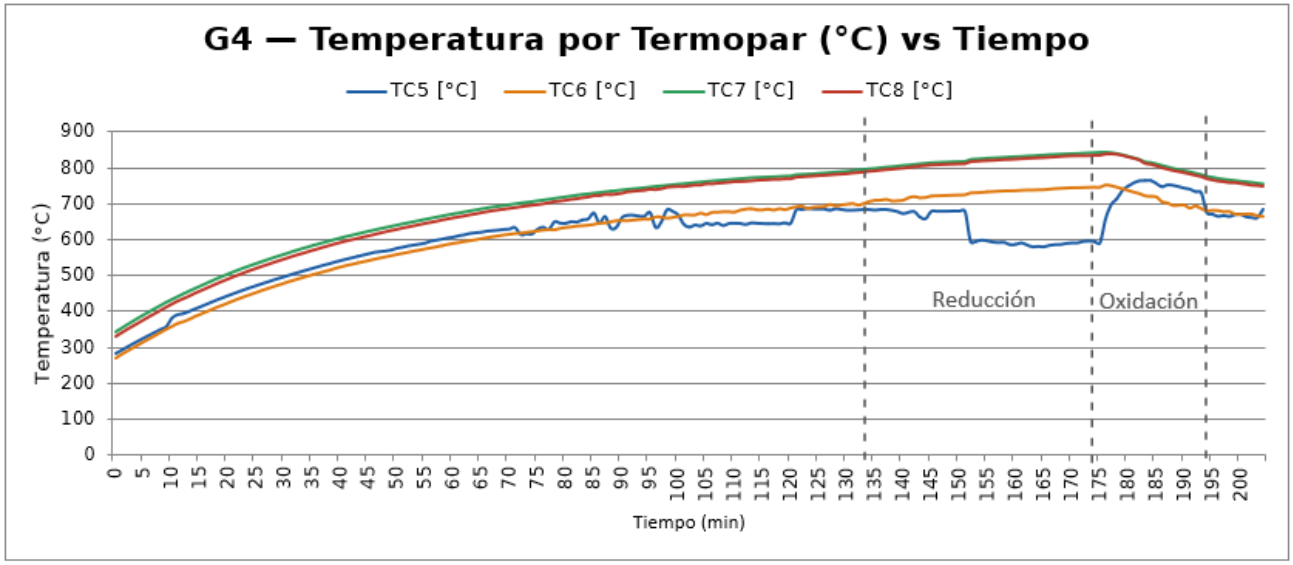


Figura 38: Perfil de temperatura promedio del Grupo G4 (protocolo 40/20, extensión). Fuente: elaboración propia, 2026.

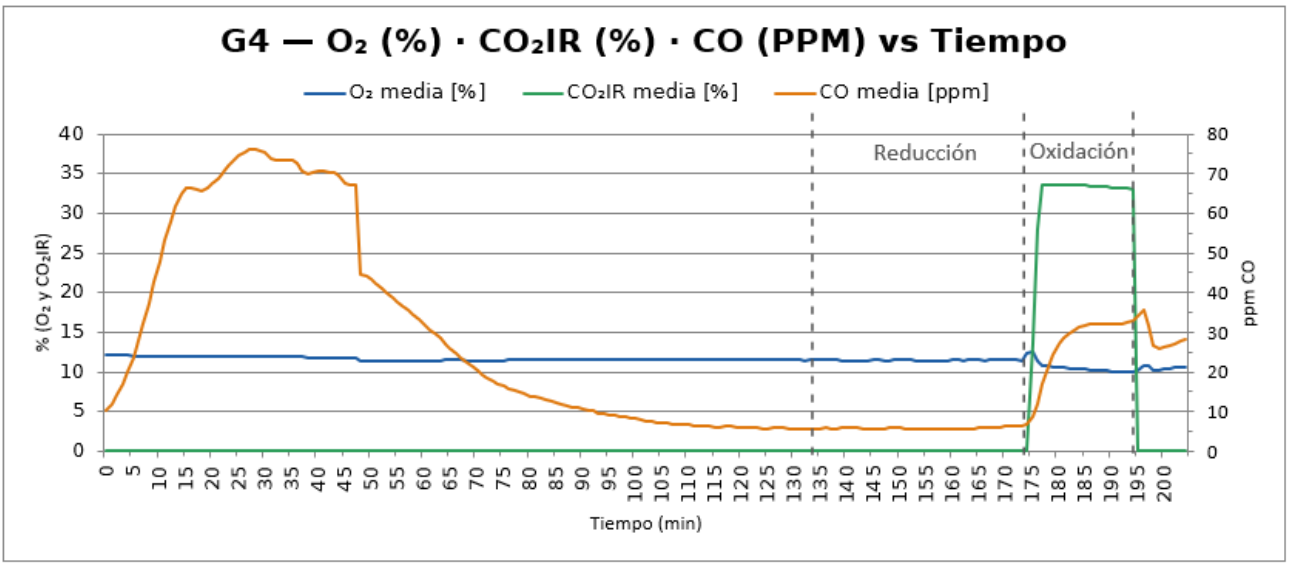


Figura 39: Señales de gases promedio del Grupo G4. Fuente: elaboración propia, 2026.

Las Figuras 40, 41 y 42 presentan cada gas por separado con su banda de dispersión. Destaca el CO, que alcanza el mayor valor promedio de toda la campaña, coherente con la mayor temperatura de reducción alcanzada por este grupo.

Al igual que en el protocolo 40/40, el O_2 se mantiene en su nivel de base durante la oxidación, sin liberación apreciable al gas. La banda de dispersión estrecha confirma la reproducibilidad del comportamiento entre los ensayos de este grupo.

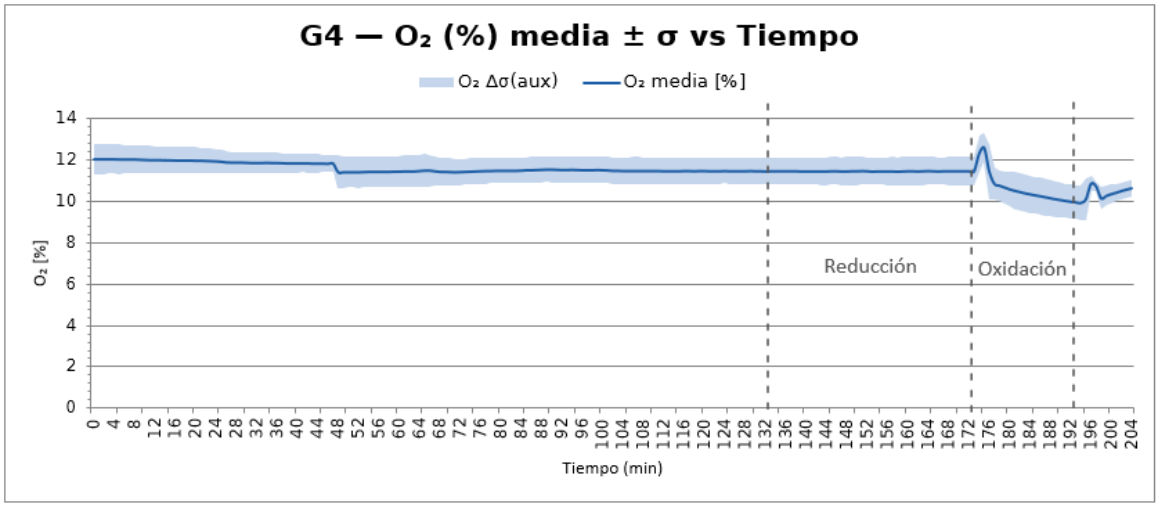


Figura 40: Concentración de O_2 promedio del Grupo G4, con banda $\pm\sigma$. Fuente: elaboración propia, 2026.

El CO de este grupo alcanza el mayor valor promedio de toda la campaña, con un pico más pronunciado y sostenido que el del protocolo 40/40. Este comportamiento es consistente con la mayor temperatura de reducción alcanzada por el grupo, que genera un mayor grado de reducción del material y, por tanto, más vacantes de oxígeno disponibles para reaccionar con el CO_2 durante la oxidación. La integración de esta curva entrega la mayor producción total promedio de la campaña, $n_{CO} = 140{,}4$ μmol, lo que sustenta que el Grupo G4 constituya el mejor caso de producción (§5.6).

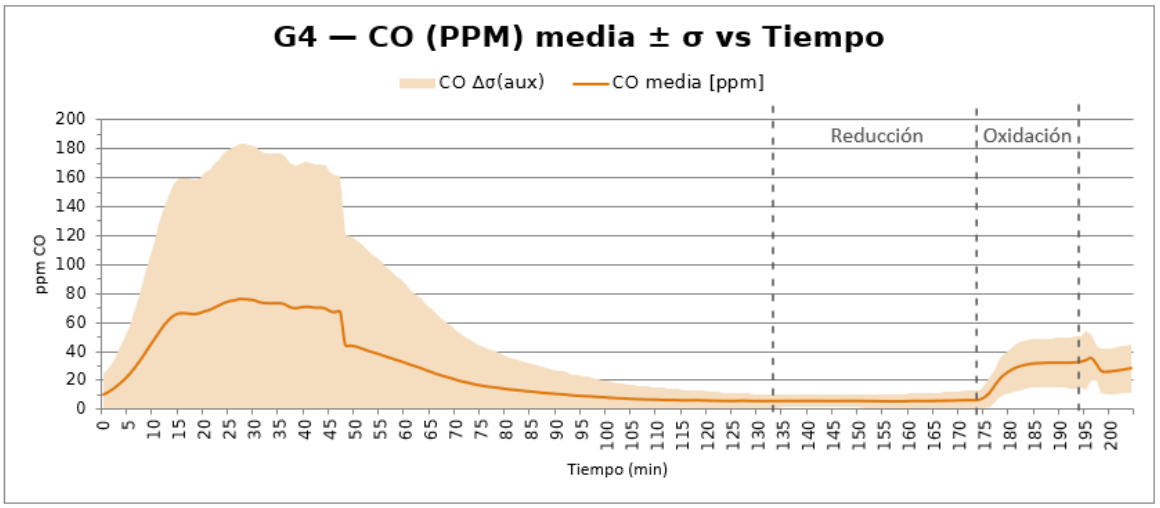


Figura 41: Concentración de CO promedio del Grupo G4, con banda $\pm\sigma$. Fuente: elaboración propia, 2026.

El canal CO_2IR asciende al iniciarse la inyección y se mantiene elevado durante la oxidación, con un comportamiento análogo al de los demás grupos. La relación entre el CO producido y el CO_2 remanente determina la conversión del proceso, cuantificada por grupo en §5.7.

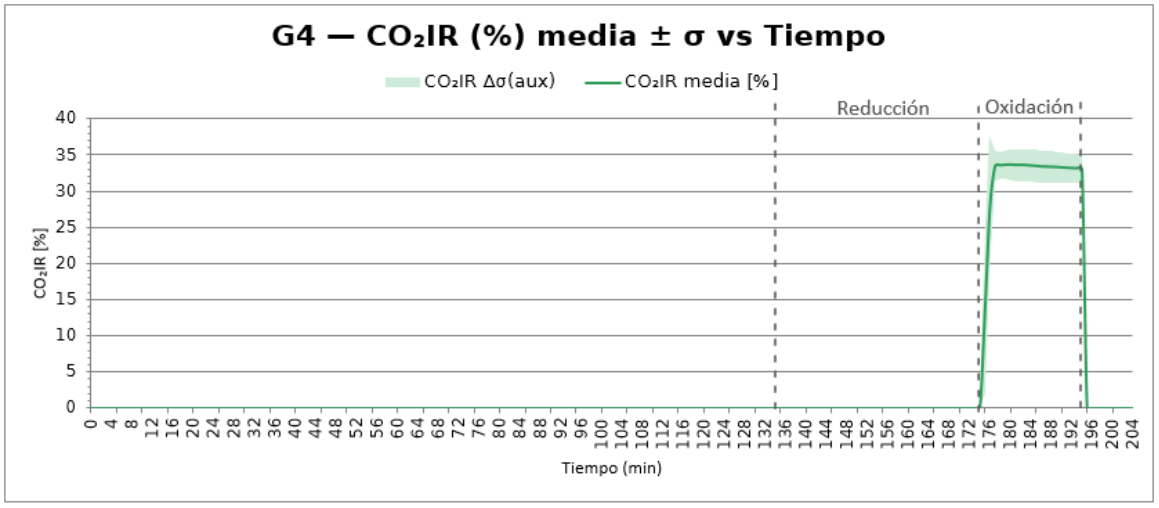


Figura 42: Concentración de CO_2IR promedio del Grupo G4, con banda $\pm\sigma$. Fuente: elaboración propia, 2026.

5.4. Temperaturas alcanzadas por grupo

La temperatura, medida directamente por las termocuplas, es independiente de la medición de gases y constituye por tanto un dato de alta confiabilidad. La Tabla 7 resume la temperatura máxima de reducción alcanzada en el anillo superior del lecho (TC7) para cada grupo. Se observa una progresión ascendente de G2 a G4, coherente con la extensión de campaña operada a mayor potencia efectiva.

Tabla 7: Temperatura máxima de reducción (TC7) por grupo. Fuente: elaboración propia, 2026.

Grupo	Protocolo (TR/CDS)	TC7 máx. °C
G2	40/40	820
G3	40/20	837
G4	40/20 (ext.)	844

5.5. Comparación de la producción de CO entre protocolos

La Figura 43 superpone las curvas promedio de CO de los tres grupos, alineadas al inicio de la etapa CDS, permitiendo comparar directamente el desempeño de cada protocolo. El Grupo G4 exhibe el pico de CO más alto y sostenido, seguido por G3 y G2.

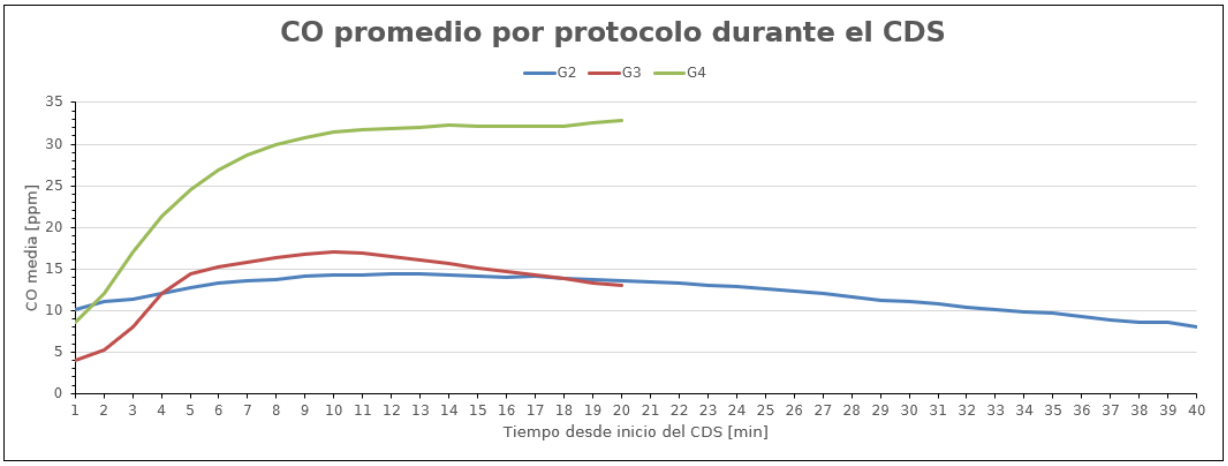


Figura 43: Comparación de la concentración de CO promedio durante el CDS. Fuente: elaboración propia, 2026.

5.6. Métricas de rendimiento

A partir de la integración de las curvas de CO (Ecuaciones (4.1) y (4.2)) se obtienen las tres métricas de rendimiento definidas en la metodología. La Tabla 8 las consolida para los tres grupos.

Tabla 8: Métricas de rendimiento por grupo: producción total de CO, rendimiento específico, tasa media de producción y eficiencia eléctrica. Fuente: elaboración propia, 2026.

Grupo	t_{CDS} [min]	n_{CO} [μmol]	Y_{CO} [μmol/g]	r_{CO} [μmol/(g·min)]	η [%]
G2 (40/40)	40	123.0	0.4393	0.0110	0.00010
G3 (40/20)	20	69.6	0.2486	0.0124	0.00006
G4 (40/20 ext.)	20	140.4	0.5014	0.0251	0.00012

El Grupo G4 presenta el mejor desempeño en las tres métricas: la mayor producción total (140.4 μmol), el mayor rendimiento específico (0.5014 μmol/g) y la mayor tasa de producción (0.0251 μmol/(g·min)), esta última al doble de los otros grupos. Es relevante notar que, si bien G2 produce más CO total que G3 (123.0 frente a 69.6 μmol), su tasa de producción es menor: G2 acumula CO durante una oxidación de 40 min, mientras que G3 lo hace en 20 min. Por ello, la comparación entre protocolos de distinta duración es más justa mediante la tasa r_{CO} que mediante la producción absoluta. Las eficiencias eléctricas son muy bajas en

términos absolutos, consecuencia directa de que el denominador contabiliza la energía de todo el protocolo (dominada por las más de dos horas de precalentamiento) frente a la modesta cantidad de CO producida; su interpretación se aborda en el Capítulo 6.

5.7. Conversión del reactor y razón CO:CO_2 por grupo

A partir de la señal continua del Testo 350 se cuantifica la conversión del reactor, es decir, la fracción del CO_2 inyectado que se convierte efectivamente en CO durante la etapa CDS. Siguiendo la definición de conversión de reactivo de Fogler [41] (Ecuación (4.8)), y con el CO_2 inyectado obtenido del caudal de alimentación y la duración de la oxidación (Ecuación (4.9)), la Tabla 9 consolida por grupo la conversión base reactor y la razón CO:CO_2, esta última como indicador de la riqueza en CO del gas de salida.

Tabla 9: Conversión base reactor y razón CO:CO_2 por grupo, a partir de la señal del Testo 350. Fuente: elaboración propia, 2026.

Grupo	n_{CO} [μmol]	$n_{CO_2,\,iny}$ [mol]	$X_{reactor}$ [%]	Razón CO:CO_2
G2 (40/40)	123.0	10.151	0.00121	1:22.535
G3 (40/20)	69.6	5.075	0.00137	1:21.073
G4 (40/20 ext.)	140.4	5.075	0.00277	1:11.624

La conversión base reactor es muy baja en términos absolutos (del orden de 10^{-3} %) porque el sistema inyecta un caudal elevado de CO_2 (entre 5 y 10 mol por experimento) y convierte de él una fracción pequeña, consecuencia directa del régimen de operación a temperatura moderada, donde el grado de reducción alcanzado por el material es bajo. Entre protocolos, el Grupo G4 alcanza la mayor conversión (0.00277 %) y el gas más rico en CO (razón 1:11.624, frente a 1:22.535 de G2 y 1:21.073 de G3), lo que refuerza su condición de mejor caso de la campaña. La razón CO:CO_2 del Testo se emplea aquí para comparar los protocolos entre sí; sus valores absolutos no son directamente comparables con la literatura, por corresponder a un gas muestreado aguas abajo del reactor.

5.8. Composición del gas por cromatografía

Como técnica independiente, la cromatografía de gases entrega la composición molar del gas capturado en cada muestra puntual durante la etapa CDS. La Tabla 10 presenta los valores reportados por el Laboratorio de Análisis Químico e Instrumental (LabQI) para las tres muestras de la campaña, junto con la razón CO:CO_2 derivada de dicha composición.

Tabla 10: Composición molar del gas de proceso por cromatografía de gases. Los resultados se expresan como valor promedio ± desviación estándar. Fuente: elaboración propia a partir de los Informes QUI-059-26 y QUI-094-26, 2026.

Exp.	Muestra	CO [%]	CO_2 [%]	O_2 [%]	N_2 [%]	Razón CO:CO_2
N°4	CI 132	$0{,}43 \pm 0{,}04$	48 ± 1	$9{,}4 \pm 0{,}1$	$34{,}9 \pm 0{,}4$	1:112
N°10	CI 214	$0{,}40 \pm 0{,}02$	56 ± 1	$8{,}5 \pm 0{,}3$	$45{,}7 \pm 0{,}9$	1:140
N°11	CI 215	$0{,}73 \pm 0{,}03$	49 ± 2	$8{,}5 \pm 0{,}4$	$46{,}7 \pm 0{,}2$	1:67

Estos valores describen la composición real del gas de proceso analizado sobre un volumen de muestra definido. La razón CO:CO_2 de la muestra caracteriza la riqueza en CO del gas capturado: la muestra del Experimento N°11 es la más rica (1:67), seguida del N°4 (1:112) y del N°10 (1:140). Se observa además un contenido

apreciable de N_2 en todas las muestras (entre 35 y 47 %), coherente con el uso de N_2 como gas de barrido durante la campaña. Al tratarse de una propiedad composicional del gas, independiente del caudal de proceso y del principio de medición, la razón $CO:CO_2$ es la magnitud que admite contraste con los valores reportados por la literatura de reactores solares.

5.9. Comparación con la literatura

La Tabla 11 sitúa los resultados del presente trabajo frente a los reactores de referencia del estado del arte. La comparación debe leerse con cautela: los reactores solares operan la reducción a temperaturas de 1.300–1.600°C con concentración solar real, mientras que el Reactor WS opera con calentamiento eléctrico en torno a los 800°C, una diferencia térmica que explica la mayor parte de la brecha en producción específica.

Tabla 11: Posicionamiento del presente trabajo frente a reactores de referencia del estado del arte. Fuente: elaboración propia, 2026.

Trabajo	T_{red} °C	Fuente de calor	Material
Chueh et al. (2010)	∼1.500	Solar (simulado)	Ceria porosa
Furler et al. (2014)	∼1.500	Solar (simulado)	Espuma de ceria
Marxer et al. (2017)	∼1.500	Solar (4 kW)	Espuma de ceria
Rojas et al. (2025)	∼800	Eléctrico	Espuma de ceria
Este trabajo	∼800–844	Eléctrico	Trozos porosos (280 g)

En cuanto a la riqueza del gas de salida, la razón $CO:CO_2$ obtenida por cromatografía (1:67 a 1:140, §5.8) sitúa al reactor en un rango contrastable con la literatura, pese a operar a temperaturas varios cientos de grados por debajo. El aporte del presente trabajo no reside en superar las cifras de producción de los reactores solares, inalcanzables a la temperatura de operación eléctrica, sino en la caracterización paramétrica sistemática del sistema, el enfoque de repetibilidad por grupos y la caracterización cromatográfica independiente del gas de proceso, elementos que fortalecen la base experimental del Laboratorio de Termofluidos de cara a una futura integración con concentración solar.

6. Análisis y discusión

Este capítulo interpreta los resultados presentados en el Capítulo 5. Se analiza primero el efecto de los parámetros operacionales sobre la producción de CO comparando los tres grupos, luego las limitaciones del sistema de medición y su corrección, la comparabilidad entre el calentamiento eléctrico y el solar, la posición del trabajo frente a la literatura y a los antecedentes del propio laboratorio, y finalmente las mejoras propuestas y las proyecciones hacia el escalamiento solar.

6.1. Efecto de los parámetros operacionales en la producción de CO

6.1.1. Duración de la etapa de oxidación

La comparación entre grupos permite aislar el efecto de la duración de la etapa CDS. El Grupo G2 (protocolo 40/40) y los Grupos G3 y G4 (protocolo 40/20) comparten el caudal de CO_2 (6 L/min), la duración de la reducción (40 min) y las condiciones eléctricas de ambas etapas, difiriendo esencialmente en la duración de la inyección de CO_2.

Los resultados muestran un comportamiento asimétrico entre producción total y tasa de producción. En términos de producción acumulada, el protocolo de 40 min del Grupo G2 (123.0 μmol) supera al protocolo de 20 min del Grupo G3 (69.6 μmol). Sin embargo, en términos de tasa de producción por gramo y por minuto, la relación se invierte o se estrecha: el Grupo G3 alcanza 0.0124 μmol/(g·min) frente a los 0.0110 del G2, y el Grupo G4 llega a 0.0251, más del doble.

La explicación reside en la forma temporal de la señal de CO, coherente con el modelo cinético de la Ecuación (3.19): la velocidad de oxidación es máxima al inicio de la inyección, cuando la totalidad de las vacantes de oxígeno generadas en la etapa TR se encuentra disponible, y decae conforme el material se reoxida. Extender la inyección de 20 a 40 min añade principalmente la cola de baja producción del proceso: incrementa la producción acumulada, pero a un costo energético proporcionalmente mayor, dado que el consumo eléctrico crece linealmente con el tiempo mientras la producción marginal decrece. El acortamiento de la etapa CDS a 20 min constituye, en consecuencia, una decisión de diseño favorable a la tasa de producción y a la eficiencia.

6.1.2. Temperatura de reducción y grado de reducción efectivo

La relación entre la temperatura de reducción alcanzada y la producción de CO constituye uno de los hallazgos centrales de este trabajo. La Figura 44 contrasta, para cada experimento de los tres grupos, su producción específica de CO frente a su temperatura pico en TC7, distinguiendo por color el grupo al que pertenece.

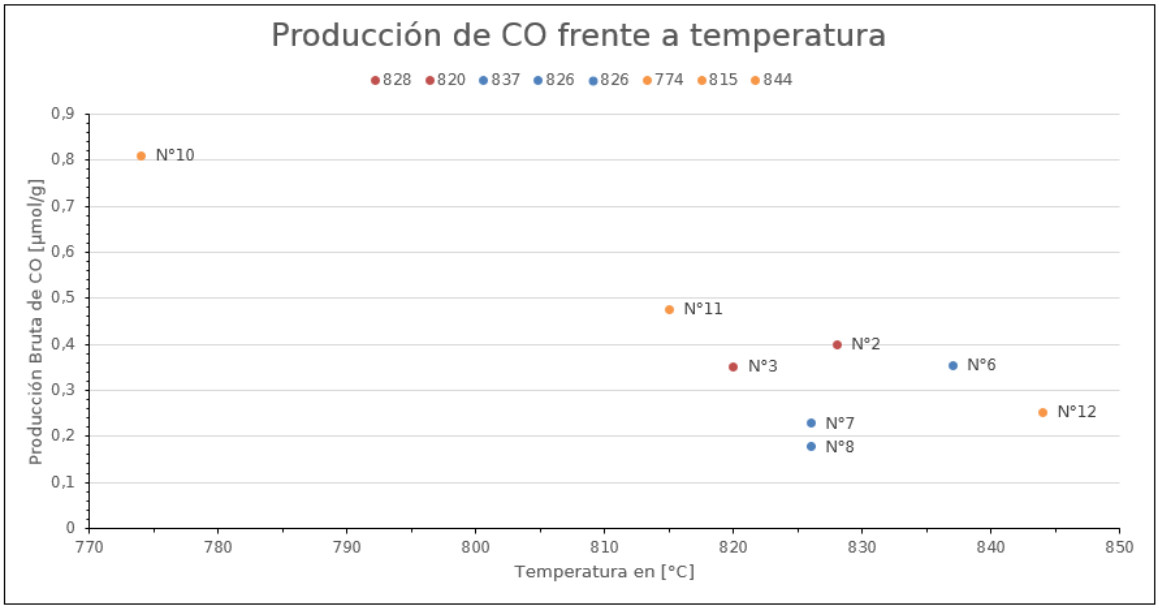


Figura 44: Producción específica de CO frente a la temperatura para los tres grupos. Fuente: elaboración propia, 2026.

A nivel de grupos, la comparación es coherente con la termodinámica: el Grupo G4, que alcanza la mayor temperatura de reducción de la campaña (844°C en TC7), es también el de mayor producción específica y mayor tasa, seguido por los grupos operados a menor temperatura. En este sentido, la conclusión que gobierna el análisis es que el protocolo del Grupo G4 constituye la configuración operacional más favorable de las ensayadas.

No obstante, el análisis experimento por experimento revela un matiz que debe interpretarse con cautela. Al examinar los experimentos individuales (Figura 44) se observa que los mayores niveles térmicos no siempre se corresponden con las mayores producciones: en particular, un experimento operado a la menor temperatura del conjunto (774°C) registró una de las mayores producciones específicas de la campaña. Tomada literalmente, esta observación contradiría la termodinámica del ciclo, según la cual un mayor grado de reducción y por tanto una mayor producción de CO requiere una mayor temperatura (Ecuación (3.17)). Antes de extraer una conclusión física de este comportamiento, conviene advertir que la dispersión punto a punto puede tener también un origen experimental: la producción se obtiene de la señal del analizador, sujeta a variabilidad entre ensayos, y la temperatura pico registrada en TC7 es una medida puntual que no captura necesariamente el estado térmico completo del lecho. Parte de la dispersión observada podría, por tanto, atribuirse a la incertidumbre de las mediciones antes que a un efecto físico genuino, por lo que este resultado se presenta como una observación que amerita verificación con instrumentación de mayor resolución, y no como una relación establecida.

Con esa reserva, una interpretación físicamente plausible de la dispersión es la distinción entre la temperatura pico instantánea, el máximo registrado en TC7 al inicio de la inyección y el grado de reducción efectivamente alcanzado durante la etapa TR. El modelo de Bulfin (Ecuación (3.17)) predice el δ de equilibrio, es decir, el máximo termodinámicamente alcanzable si el material permaneciera el tiempo suficiente a esa temperatura y baja p_{O_2}. En la práctica, el δ real depende también del tiempo de residencia a alta temperatura, de la eficacia del barrido con N_2 para remover el O_2 liberado y de la homogeneidad térmica del lecho. Un pico térmico elevado pero breve podría, en principio, producir un δ efectivo menor que un ciclo a temperatura moderada pero sostenida; esta hipótesis, sin embargo, requiere confirmación experimental.

De confirmarse, este comportamiento tendría una implicación práctica: para maximizar la producción del

Reactor WS no bastaría con elevar la temperatura pico, sino que sería igualmente relevante asegurar la duración de la etapa de reducción y la eficacia del barrido inerte. En todo caso, a nivel de grupos la tendencia sí es coherente con la termodinámica, y la superioridad del Grupo G4 se sostiene sobre su comportamiento promedio, que combina una mayor temperatura con condiciones de reducción adecuadas.

6.2. Limitaciones del sistema de medición y su corrección

6.2.1. Naturaleza de la medición del analizador

El analizador Testo 350 muestrea el gas de proceso *aguas abajo* del reactor, a través de una línea de muestreo y una trampa de acondicionamiento. Esta ubicación determina el carácter de la señal: el analizador registra la concentración del gas tal como llega al punto de muestreo, tras recorrer la línea, y no la concentración instantánea a la salida misma del lecho. A ello se suma el tiempo de respuesta del instrumento (T90 ≈30–40 s), comparable a la escala temporal del pico de producción, que suaviza los transitorios más rápidos que dicha escala.

Por estas razones, las métricas derivadas de la señal del Testo deben interpretarse como valores conservadores del desempeño del reactor, adecuados para caracterizar tendencias y comparar protocolos entre sí. Dado que la configuración física del tren de muestreo se mantuvo constante durante toda la campaña, su efecto sobre la señal es sistemático y no altera el ordenamiento relativo entre grupos, que es la comparación de interés para identificar el protocolo óptimo.

La cromatografía de gases, por su parte, constituye una técnica de naturaleza distinta: analiza la composición molar de un volumen de muestra definido, capturado en un instante puntual (§5.8). No se trata, por tanto, de una medición contra la cual contrastar la del analizador ambas responden a principios y volúmenes de muestreo distintos y no son directamente comparables, sino de una caracterización composicional independiente del gas de proceso, cuya razón CO:CO_2 admite contraste con la literatura por ser una propiedad del gas y no del instrumento.

6.2.2. Delimitación de la ventana de inyección

El anclaje de la etapa CDS al instante real de inyección de CO_2 registrado en bitácora, con la tolerancia definida en la metodología (§4.11.2), evita dos fuentes de error: por una parte, la deriva de línea base del canal CO_2IR, que presenta lecturas no nulas en ausencia de inyección real y que, de usarse como disparador automático, delimitaría erróneamente la ventana; por otra, la contabilización de picos de CO registrados durante el calentamiento, sin CO_2 presente, que inflarían artificialmente la producción atribuida. Anclar la ventana de cálculo a la presencia efectiva del reactivo antes que a una señal derivante constituye una decisión metodológica que fortalece la trazabilidad de los resultados.

6.3. Calentamiento eléctrico frente a solar: diferencias y comparabilidad

Las eficiencias de este trabajo y las de la literatura de reactores solares responden al mismo concepto físico cuánta energía primaria cuesta producir cada mol de CO y son, en ese sentido, conceptualmente equivalentes; su diferencia está en la fuente de energía contabilizada en el denominador, no en el significado de la métrica. La eficiencia solar-to-fuel contabiliza la energía solar incidente sobre la apertura del reactor (con sus pérdidas ópticas y de re-radiación), mientras que la eficiencia eléctrica de este trabajo (Ecuación (4.6)) contabiliza la energía eléctrica entregada a las resistencias. Al tratarse del mismo concepto aplicado a fuentes de energía distintas, ambas pueden compararse en términos de interpretación, teniendo presente que provienen de sistemas de aporte térmico diferentes. Una segunda diferencia está en el régimen térmico: los reactores solares de referencia operan la etapa TR entre 1.400 y 1.600°C [18, 24, 26], frente a los ≈800–844°C del Reactor WS, lo que sitúa a ambos sistemas en regímenes de no estequiometría (δ) distintos. Una tercera diferencia está en

el punto de medición: las concentraciones de este trabajo provienen de un analizador situado aguas abajo del reactor, mientras que la literatura mide en configuraciones selladas.

6.3.1. Interpretación de la conversión cromatográfica

Existe una métrica de este trabajo que sí admite comparación con la literatura: la conversión intrínseca de la muestra (X_{muestra}), determinada por cromatografía (Ecuación (4.11)), que alcanzó 0.709 % en el Experimento N°10 y 1.468 % en el N°11 (§5.8). Esta magnitud es una propiedad composicional del gas capturado la fracción del carbono presente que se encuentra en forma de CO e independiente tanto de la fuente de calor empleada como del punto y principio de medición, puesto que se calcula sobre la composición de una muestra extraída directamente del gas de proceso.

Situada frente a la literatura, esta conversión resulta apreciable considerando el rango térmico moderado del Reactor WS. El resultado sugiere que la etapa de oxidación con CO_2 procede incluso a las temperaturas alcanzadas por el sistema, consistente con la observación de Le Gal et al. [20] de que la reoxidación de la ceria es cinéticamente favorable a temperaturas del orden de 800–1.000°C, y con la caracterización de Arifin y Weimer [23]. La limitación del sistema, por tanto, no reside en la etapa CDS sino en la etapa TR: es la temperatura de reducción alcanzable la que acota el δ generado y, con ello, la cantidad total de CO producible por ciclo.

6.3.2. Proyección a temperaturas de reducción superiores

El techo térmico operable con seguridad del sistema actual quedó determinado por el incidente de falla simultánea de las tres resistencias (§4.4), ocurrido al intentar superar el rango de operación seguro. Tras dicha falla, los experimentos de la extensión se ejecutaron deliberadamente dentro de un margen de seguridad. En consecuencia, el contraste con la predicción termodinámica a las temperaturas de los reactores solares de referencia (1.200–1.600°C) queda como proyección a validar con un sistema de calentamiento rediseñado, capaz de alcanzar mayores temperaturas de reducción sin comprometer la integridad de las resistencias.

6.3.3. Contraste con los reactores solares de referencia

La Tabla 11 sitúa el presente trabajo respecto de los experimentos de referencia del campo. La diferencia determinante es la temperatura de reducción: mientras Chueh et al. [18] y Marxer et al. [26] operan por encima de los 1.400°C, la presente campaña alcanza 844°C como máximo. Dado que el δ de equilibrio depende exponencialmente de la temperatura (Ecuación (3.17)), esta diferencia explica por sí sola que la producción de CO por gramo se sitúe varios órdenes de magnitud por debajo de los valores de la literatura, sin que ello implique un defecto del protocolo experimental ni del material empleado.

Un segundo factor es la morfología. Los trabajos de referencia emplean estructuras porosas de doble escala, diseñadas para maximizar el área superficial disponible para la etapa CDS [25], mientras que este trabajo utiliza CeO_2 en trozos porosos irregulares, cuya porosidad natural ofrece un área superficial intermedia entre un sólido denso y una estructura diseñada. La conclusión de Pullar et al. [15] de que la etapa CDS está limitada por cinética superficial implica que esta diferencia morfológica penaliza la tasa de producción, aunque en magnitud menor que la diferencia térmica.

6.4. Resultados previos

La comparación con Porras [37] requiere precisión respecto de qué magnitudes son efectivamente comparables. Su ensayo de CO_2 splitting fue único, quedó interrumpido por el corte de dos resistencias a los 30 min y alcanzó temperaturas de reducción de 410–480°C, insuficientes para una reducción efectiva del CeO_2; reporta una concentración máxima de CO sin normalización por masa de material, y la eficiencia que consigna corresponde a su ensayo de H_2, no al de CO. En consecuencia, no existe en dicho trabajo una eficiencia de

producción de CO frente a la cual contrastar los valores de la presente campaña, y cualquier comparación directa entre ambas sería metodológicamente incorrecta.

Lo que sí admite comparación es el alcance experimental. La presente campaña aporta doce experimentos, de los cuales diez se organizan en tres grupos por protocolo, con temperaturas de reducción de hasta 844°C, registro continuo a 1 Hz de temperatura y composición de gases, delimitación instrumental de la ventana de inyección, y caracterización composicional independiente del gas de proceso mediante cromatografía. Constituye, en ese sentido, la primera caracterización paramétrica sistemática de la producción de CO en el Reactor WS.

Respecto de Rojas et al. [38], la comparación es igualmente indirecta: su trabajo aborda *water splitting* con producción de H_2 empleando una pieza única de espuma porosa, de modo que ni el producto ni la morfología del material coinciden con los de esta campaña. Su aporte al presente trabajo es metodológico y de diseño (la caracterización térmica del reactor y la validación del calentamiento eléctrico como fuente de calor controlada) antes que un punto de comparación cuantitativo.

6.5. Mejoras y proyecciones para el sistema experimental

El muestreo aguas abajo del reactor, discutido en §6.2, constituye la principal limitación del sistema de medición actual, pues obliga a reportar las métricas de gases como valores conservadores. El rediseño del sellado del reactor y de la línea de muestreo, verificable mediante el retorno de la línea base de O_2 a valores próximos a cero bajo atmósfera de N_2, permitiría reportar concentraciones más representativas del gas a la salida del lecho. Esta recomendación coincide con la formulada por Porras [37] respecto de la estanqueidad del reactor, lo que la sitúa como una deficiencia estructural recurrente del sistema antes que como una incidencia de la presente campaña.

El cálculo de la producción de CO emplea el caudal de entrada como referencia. La instalación de un medidor de caudal en la línea de salida permitiría cerrar el balance de masa y determinar la producción de forma directa, sin depender de dicho supuesto.

El tiempo de respuesta del Testo 350 (T90 ≈30–40 s) resulta comparable a la escala temporal del propio fenómeno medido, dado que el pico de producción de CO se desarrolla en los primeros minutos de la inyección. La incorporación de cromatografía en línea, o de un analizador con tiempo de respuesta inferior a 5 s, permitiría resolver la forma real del transitorio de producción y, con ello, calibrar la cinética de oxidación con datos propios en lugar de parámetros de literatura.

Las bitácoras de la campaña registran varios eventos de falla eléctrica localizados en la unión de neutro de las resistencias, incluida la falla simultánea de las tres resistencias descrita en §4.4. La recurrencia del mismo modo de falla en el mismo elemento, sumada a los cortes reportados por Porras [37], indica que se trata de una debilidad de diseño de la conexión eléctrica y no de eventos aislados. Se recomienda el rediseño de dicha unión, con terminales de sección adecuada y verificación periódica de la resistencia de contacto antes de cada ensayo.

Dado que el precalentamiento concentra la mayor parte del consumo energético del ciclo, toda mejora en la aislación térmica del reactor incide directamente sobre la eficiencia global. A ello se añade que el ciclo de dos pasos implica, entre la etapa TR y la CDS, un descenso de temperatura teórico considerable (del orden de 1.500 a 1.100°C en los reactores de referencia), transición en la que se rechaza una fracción importante de la energía como calor sensible; reducir esa caída y recuperar dicho calor es precisamente la palanca que la literatura señala como prioritaria para elevar la eficiencia de los ciclos termoquímicos [10, 32]. Esta línea de mejora se complementa con la operación en continuidad térmica, esto es, el encadenamiento de ciclos sin retornar a temperatura ambiente, que evita rechazar y volver a aportar el calor sensible en cada ciclo.

Más allá de las mejoras al sistema actual, la proyección de mayor alcance es la integración solar de la

plataforma, que impone sus propios requisitos. Alcanzar valores de δ comparables a los de la literatura requiere elevar la temperatura de reducción por encima de los 1.200°C, rango inalcanzable con el sistema de calentamiento eléctrico actual, cuyo límite operacional está determinado por la capacidad del alambre Kanthal A-1 y por la integridad de los ladrillos refractarios (§4.3). La concentración solar constituye la vía natural para superar dicho umbral: un concentrador de plato parabólico con razón de concentración superior a 2.000 soles permite alcanzar los 1.400–1.600°C empleados por los reactores de referencia [33, 10].

La integración solar de la plataforma exige, además del rediseño del sellado ya discutido como mejora del sistema de medición (§6.5) que en operación solar resulta indispensable para mantener la baja presión parcial de oxígeno necesaria en la etapa TR, dos modificaciones adicionales. La primera es la incorporación de una ventana de cuarzo en la apertura del reactor, que permita el ingreso de la radiación concentrada preservando la atmósfera controlada del lecho. La segunda es la adecuación del sistema de barrido, dado que el mayor δ alcanzable a temperaturas superiores incrementa el flujo de O_2 liberado que debe evacuarse para evitar la reoxidación del material (Ecuación (3.18)).

Este esfuerzo de integración solar encuentra en Chile un contexto favorable, dado el recurso solar excepcional del desierto de Atacama [5]; la presente campaña, al caracterizar el Reactor WS bajo condiciones térmicas controladas y documentar sus limitaciones, establece la base experimental sobre la cual proyectar dicha integración.

7. Conclusiones

El presente trabajo caracterizó experimentalmente el proceso de CO_2 splitting mediante el ciclo termoquímico de dos pasos con CeO_2 en el Reactor WS de la UTFSM, a lo largo de una campaña de doce experimentos ejecutados entre mayo y julio de 2026.

La campaña demostró la producción reproducible de CO en el Reactor WS bajo calentamiento eléctrico, con la misma carga de 280 g de CeO_2 operada durante los ciclos. Para obtener resultados representativos y evaluar la repetibilidad del sistema, diez de los doce experimentos se organizaron en tres grupos según su protocolo operacional G2 (40/40), G3 (40/20) y G4 (40/20, extensión), cuyo comportamiento promedio constituye la base del análisis. Los dos experimentos restantes se trataron de forma independiente: el Experimento N°1, de carácter exploratorio, y el Experimento N°9, incidental. El enfoque de promediado por grupo permitió reducir el efecto de la incertidumbre experimental y establecer curvas representativas con su dispersión asociada.

De los tres grupos, el Grupo G4 exhibió el mejor desempeño en las tres métricas de rendimiento. Este grupo corresponde al protocolo 40/20 operado a la mayor temperatura de reducción de la campaña, a la misma potencia eléctrica que los demás pero con un sistema de calentamiento distinto (ladrillos refractarios y resistencias refabricados tras el incidente descrito en §4.4), diferencia que debe tenerse presente al comparar los grupos. El G4 alcanzó la mayor producción total de CO (140.4 μmol), frente a los 69.6 μmol del Grupo G3, que fue el de menor producción; el mayor rendimiento específico (0.501 μmol/g) y la mayor tasa de producción (0.025 μmol/(g·min)), esta última al doble de la de los otros grupos. Las eficiencias eléctricas alcanzadas fueron bajas en términos absolutos (0.00012 % para el G4, 0.00010 % para el G2 y 0.00006 % para el G3), consecuencia directa de que el denominador contabiliza la energía de todo el protocolo, dominada por las más de dos horas de precalentamiento, frente a la modesta cantidad de CO producida. La comparación entre protocolos evidenció además un comportamiento asimétrico: el protocolo de oxidación de 40 min acumula más CO total, pero el de 20 min ofrece mayor tasa de producción, dado que la velocidad de reacción es máxima al inicio de la inyección y decae conforme el material se reoxida. El acortamiento de la etapa de oxidación resulta, por tanto, favorable a la eficiencia del proceso.

A nivel de grupos, los resultados son coherentes con la termodinámica del ciclo: el grupo de mayor temperatura (G4) fue también el de mayor producción, en línea con la literatura, según la cual un mayor grado de reducción requiere una mayor temperatura. El análisis experimento por experimento sugirió, no obstante, una dispersión en la que algunos ensayos con temperaturas pico elevadas produjeron menos CO que otros operados a temperaturas moderadas. Tomada literalmente, esta observación contradiría la tendencia esperada, por lo que se interpreta con cautela: parte de dicha dispersión podría atribuirse a la incertidumbre de las mediciones (variabilidad de la señal de producción y carácter puntual de la temperatura pico registrada) antes que a un efecto físico establecido. De confirmarse con instrumentación de mayor resolución, apuntaría a que, para maximizar la producción, no bastaría con elevar la temperatura pico, sino que sería igualmente relevante asegurar la duración de la reducción y la eficacia del barrido inerte que remueve el O_2 liberado.

El trabajo aporta la primera caracterización paramétrica sistemática de la producción de CO en el Reactor WS bajo calentamiento eléctrico, con registro continuo de temperatura y composición de gases y delimitación instrumental de la ventana de inyección. Las dos técnicas de medición empleadas se tratan de forma independiente: el analizador Testo 350 entrega la serie continua de concentración a lo largo de toda la campaña, sobre la cual se cuantifican las métricas de producción y la conversión del reactor por grupo, mientras que la cromatografía de gases entrega la composición molar de muestras puntuales del gas de proceso. Esta última permitió aprovechar lo distintivo del análisis cromatográfico, la determinación de la composición sobre un volumen de gas captado en un instante definido para caracterizar la riqueza en CO del gas de salida mediante la razón $CO:CO_2$ (entre 1:67 y 1:140), magnitud que admite contraste con la literatura por ser una propiedad composicional del gas. La caracterización conjunta del proceso mediante ambas técnicas, cada una en su ámbito propio, es una de las contribuciones metodológicas de esta Memoria.

Finalmente, el Experimento N°9, ejecutado a mayor tensión, estableció empíricamente el límite práctico de operación del sistema de calentamiento actual: las tres resistencias Kanthal A-1 fallaron simultáneamente por fatiga térmica, fijando en 70 V la tensión segura recomendada para futuras campañas.

Los objetivos planteados para esta Memoria se cumplieron en su totalidad. La revisión del estado del arte de la producción de CO mediante energía solar quedó sistematizada en el Capítulo 3, que abarca las rutas tecnológicas de conversión de CO_2, los materiales redox, las propiedades y morfologías del CeO_2 y la trayectoria experimental del campo. La implementación del reactor con sus sistemas de medición y control se documentó en el Capítulo 4, desde el desarme y reacondicionamiento hasta la puesta en operación de la instrumentación de gases, temperatura y flujos. El desarrollo experimental se materializó en la campaña de doce experimentos, variando el caudal de CO_2, la duración de la inyección, el protocolo de fases y la temperatura de reducción. Y el análisis de los resultados, en el Capítulo 6, identificó el protocolo del Grupo G4 como la configuración de mejor desempeño y sistematizó las mejoras al sistema experimental.

Respecto del objetivo general, que plantea la investigación experimental del proceso termoquímico de dos pasos en un reactor solar, corresponde precisar el alcance con que fue abordado. El Reactor WS forma parte de una plataforma experimental concebida para operación solar, dotada de concentrador PDR [38]. En la presente campaña el aporte térmico se realizó mediante resistencias eléctricas Kanthal A-1, decisión metodológica que permite controlar la temperatura de reducción de forma precisa y reproducible condición necesaria para un estudio paramétrico y que elimina la variabilidad asociada al recurso solar instantáneo. El proceso termoquímico investigado, sus reacciones, su material redox y su instrumentación son los mismos que operarían bajo concentración solar; lo que difiere es la fuente de calor. En ese sentido, la campaña constituye la caracterización experimental previa e indispensable para la posterior integración solar de la plataforma, cuyos requisitos técnicos se detallan en §6.5.

Finalmente, la campaña permitió identificar un conjunto de recomendaciones para trabajos futuros sobre el Reactor WS, ordenadas según su prioridad e impacto sobre la calidad de la medición y el desempeño del proceso.

1. Rediseñar el sellado del reactor y la línea de muestreo para que el gas medido sea representativo del que sale del lecho. Es la recomendación de mayor prioridad: con la configuración actual, las concentraciones registradas por el Testo son tan bajas que su orden de magnitud dificulta distinguir la variación real entre experimentos, lo que limita la resolución de la comparación entre protocolos.
2. Instalar un medidor de caudal de gas a la salida para efectuar un balance de masa preciso y calcular la producción de CO sin depender del caudal de entrada. Es, junto con la anterior, una intervención prioritaria sobre el sistema de medición.
3. Incorporar cromatografía en línea o un segundo analizador con T90 < 5 s para una medición continua y confiable, que capture el pico real de concentración sin el suavizado del instrumento actual.
4. Aumentar la temperatura de reducción al rango 900–1000°C mediante mayor potencia eléctrica o mejor aislamiento térmico del reactor, respetando el límite de tensión establecido tras la falla de las resistencias (§4.4).
5. Implementar el modelo térmico de diferencias finitas 2D del sistema resistencia-ladrillo en MATLAB (cuyo alcance y requerimientos de datos ya fueron definidos) para predecir el campo de temperatura del lecho y estimar las pérdidas térmicas.
6. Comparar el desempeño del CeO_2 puro frente al dopado con Zr ($Ce_{0,75}Zr_{0,25}O_2$) en idénticas condiciones experimentales, para evaluar la mejora de reducibilidad reportada en la literatura.
7. Estudiar la estabilidad cíclica del CeO_2 a largo plazo (más de 20 ciclos): evolución del área superficial específica, sinterización y grado de no estequiometría con el número de ciclos.

8. Integrar el Reactor WS con un concentrador solar real (horno solar o plato parabólico) para operar a $T_{\mathrm{TR}} > 1200$°C, culminando la transición desde el proxy eléctrico hacia la operación solar de la plataforma.

En conjunto, estas recomendaciones trazan la ruta desde la configuración experimental actual (calentamiento eléctrico, medición con valores conservadores) hacia la operación solar de la plataforma con instrumentación de mayor precisión. Las dos primeras, orientadas a que el gas medido sea representativo del que sale del lecho y a cerrar el balance de masa, son condición necesaria para que las campañas futuras superen la principal limitación identificada en este trabajo: el carácter conservador de la producción registrada por efecto del punto de muestreo.

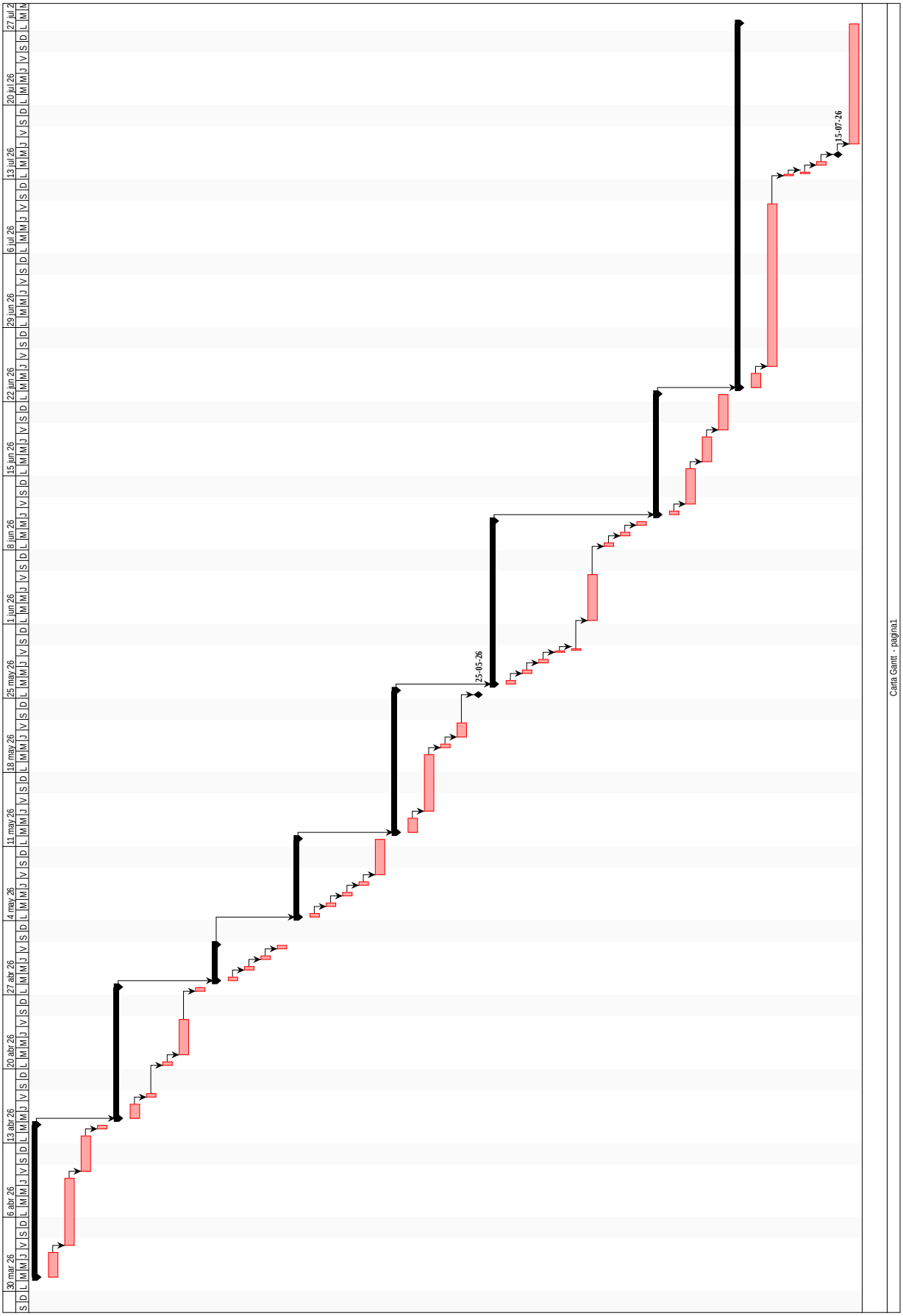
8. Anexos

.1. Carta Gantt de planificación

La planificación temporal del trabajo de titulación se elaboró en ProjectLibre, organizada en ocho fases que abarcan desde la preparación y logística inicial (marzo 2026) hasta el cierre de la campaña experimental y el envío de las muestras cromatográficas finales (julio 2026). La carta se presenta a continuación con su lista de tareas, duraciones, fechas y precedencias, junto con la línea de tiempo del proyecto.

		Nombre	Duracion	Inicio	Terminado	Predecesores
1		**FASE 1: PREPARACIÓN Y LOGÍSTICA**	**11 days**	**31-03-26, 08:00**	**14-04-26, 17:00**	
2		Desarme e inspección del reactor	3 days	31-03-26, 08:00	02-04-26, 17:00	
3		Limpieza en profundidad de piezas	5 days	03-04-26, 08:00	09-04-26, 17:00	2
4		Inventario de pernos, golillas y estado de termocuplas	2 days	10-04-26, 08:00	13-04-26, 17:00	3
5		Verificación de Datalogger y Variac	1 day	14-04-26, 08:00	14-04-26, 17:00	4
6		**FASE 2: ARMADO DEL NÚCLEO**	**9 days**	**15-04-26, 08:00**	**27-04-26, 17:00**	**1**
7		Reacondicionamiento de termocuplas (retiro de cintas, reajuste	2 days	15-04-26, 08:00	16-04-26, 17:00	
8		Pesaje y carga de CeO2 (280 g) en cámara interna	1 day	17-04-26, 08:00	17-04-26, 17:00	7
9		Instalación de pernos de sujeción cámara de reacción	1 day	20-04-26, 08:00	20-04-26, 17:00	8
10		Montaje de termocuplas internas y sellado	4 days	21-04-26, 08:00	24-04-26, 17:00	9
11		Aplicación de cemento refractario en base (ladrillos)	1 day	27-04-26, 08:00	27-04-26, 17:00	10
12		**FASE 3: SISTEMA ELÉCTRICO Y AISLAMIENTO**	**4 days**	**28-04-26, 08:00**	**01-05-26, 17:00**	**6**
13		Verificación y conexión de resistencias (3 ladrillos)	1 day	28-04-26, 08:00	28-04-26, 17:00	
14		Conexión de cableado de potencia al variac	1 day	29-04-26, 08:00	29-04-26, 17:00	13
15		Inserción de varillas de alúmina en extremos de resistencias	1 day	30-04-26, 08:00	30-04-26, 17:00	14
16		Prueba de continuidad eléctrica (seguridad)	1 day	01-05-26, 08:00	01-05-26, 17:00	15
17		**FASE 4: ENSAMBLAJE ESTRUCTURAL**	**6 days**	**04-05-26, 08:00**	**11-05-26, 17:00**	**12**
18		Introducción módulo A (núcleo) en módulo B (resistencias)	1 day	04-05-26, 08:00	04-05-26, 17:00	
19		Torqueado de los 6 espárragos principales	1 day	05-05-26, 08:00	05-05-26, 17:00	18
20		Montaje de soporte de 3 brazos y tuercas 13 mm	1 day	06-05-26, 08:00	06-05-26, 17:00	19
21		Conexión salida de gases superior	1 day	07-05-26, 08:00	07-05-26, 17:00	20
22		Colocación de manta de fibra cerámica exterior	2 days	08-05-26, 08:00	11-05-26, 17:00	21
23		**FASE 5: LÍNEA DE GASES Y VALIDACIÓN**	**10 days**	**12-05-26, 08:00**	**25-05-26, 17:00**	**17**
24		Montaje línea de gases: válvulas, conexión T y controlador	2 days	12-05-26, 08:00	13-05-26, 17:00	
25		Montaje línea de muestreo: trampa sílica gel, cámara y bomba	4 days	14-05-26, 08:00	19-05-26, 17:00	24
26		Prueba de estanqueidad en frío con N2	1 day	20-05-26, 08:00	20-05-26, 17:00	25
27		Detección y corrección de fugas	2 days	21-05-26, 08:00	22-05-26, 17:00	26
28		HITO: Prueba térmica de validación	1 day	25-05-26, 08:00	25-05-26, 17:00	27
29		**FASE 6: CAMPAÑA EXPERIMENTAL PRINCIPAL**	**12 days**	**26-05-26, 08:00**	**10-06-26, 17:00**	**23**
30		Experimento N°1 — exploratorio (Q_CO2 = 2 L/min)	1 day	26-05-26, 08:00	26-05-26, 17:00	
31		Experimento N°2 — protocolo 40/40	1 day	27-05-26, 08:00	27-05-26, 17:00	30
32		Experimento N°3 — protocolo 40/40	1 day	28-05-26, 08:00	28-05-26, 17:00	31
33		Experimento N°4 — 40/40 + toma cromatográfica	0,5 days	29-05-26, 08:00	29-05-26, 13:00	32
34		Experimento N°5 — 40/40	0,5 days	29-05-26, 13:00	29-05-26, 17:00	33
35		Envío de muestra a cromatografía (Informe QUI-059-26)	5 days	01-06-26, 08:00	05-06-26, 17:00	34
36		Experimento N°6 — protocolo 40/20	1 day	08-06-26, 08:00	08-06-26, 17:00	35
37		Experimento N°7 — protocolo 40/20	1 day	09-06-26, 08:00	09-06-26, 17:00	36
38		Experimento N°8 — protocolo 40/20	1 day	10-06-26, 08:00	10-06-26, 17:00	37
39		**FASE 7: INCIDENTE Y RECUPERACIÓN**	**8 days**	**11-06-26, 08:00**	**22-06-26, 17:00**	**29**
40		Experimento N°9 (80 V) — falla de resistencias	1 day	11-06-26, 08:00	11-06-26, 17:00	
41		Inspección: fractura de ladrillos y diagnóstico	2 days	12-06-26, 08:00	15-06-26, 17:00	40
42		Fabricación de 2 ladrillos refractarios nuevos	3 days	16-06-26, 08:00	18-06-26, 17:00	41
43		Reempaquetado de termocuplas operativas	2 days	19-06-26, 08:00	22-06-26, 17:00	42
44		**FASE 8: EXTENSIÓN DE LA CAMPAÑA**	**25 days**	**23-06-26, 08:00**	**27-07-26, 17:00**	**39**
45		Revalidación térmica post-recuperación	2 days	23-06-26, 08:00	24-06-26, 17:00	
46		PAUSA: Universidad cerrada (sin pruebas)	12 days	25-06-26, 08:00	10-07-26, 17:00	45
47		Experimento N°10	0,5 days	13-07-26, 08:00	13-07-26, 13:00	46
48		Experimento N°11	0,5 days	13-07-26, 13:00	13-07-26, 17:00	47
49		Experimento N°12	1 day	14-07-26, 08:00	14-07-26, 17:00	48
50		HITO: Cierre de la campaña experimental	1 day	15-07-26, 08:00	15-07-26, 17:00	49
51		Envío muestras cromatográficas N°10-N°11	8 days	16-07-26, 08:00	27-07-26, 17:00	50

Carta Gantt - pagina1


30 mar 26
6 abr 26
13 abr 26
20 abr 26
27 abr 26
4 may 26
11 may 26
18 may 26
25 may 26
1 jun 26
8 jun 26
15 jun 26
22 jun 26
29 jun 26
6 jul 26
13 jul 26
20 jul 26
27 jul 2
25-05-26
15-07-26
Carta Gantt - pagina1

.2. Informes cromatográficos

Informe del análisis cromatográfico de las muestras extraídas durante los Experimentos N°4, N°10 y N°11, empleado para caracterizar la composición del gas de proceso mediante la razón CO:CO_2 (§5.8).

.2.1. Informe experimento N°4

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE QUIMICA

LabQI
Laboratorio de Análisis Químico e Instrumental

INFORME DE ENSAYO
N° QUI-059-26

Fecha emisión: 01.06.2026

Información del cliente		
Nombre	Universidad Técnica Federico Santa María	
Solicitante	Mario Toledo David Carrillo.	
Dirección	Departamento de Ingeniería Mecánica	

Información del análisis y muestra			
Análisis solicitado	Monóxido de Carbono, Dióxido de Carbono, Oxígeno y Nitrógeno		
Tipo de muestra	Muestra gaseosa en bolsa Tedlar.		
Identificación muestra	Prueba 1 CO_2, Splitting.		CI 132
Fecha de recepción	26 de mayo de 2026	Fecho Inicio Análisis	26 de mayo de 2026
Método utilizado	Cromatografía de Gases; regún Normas: - ASTM: D1946-90 (2011), - UOP 603-88		
Responsable del muestreo	David Carrillo.		

RESULTADOS:

Código interno	Análisis	Unidad	Resultados (*)
CI 132	Monóxido de Carbono	[mol CO/100 moles de muestra]	0,43 ± 0,04
	Dióxido de Carbono	[mol CO_2/100 moles de muestra]	48 ± 1
	Oxigeno	[mol O_2/100 moles de muestra]	9,4 ± 0,1
	Nitrégeno	[mol N_2/100 moles de muestra]	34,9 ± 0,4

(*). Los resultados se exprasan con el siguiente formato. X ± s, donde X corresponde al valor promedio entre las porciones de muestra analizadas y s es la desviación estándar de los valores obtenidos.

Observaciones: No hay observaciones.

Fin del documento

LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO E INSTRUMENTAL
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA UTFSM
VALPARAISO

Gisela Bruhn L.
Químico analista

María Elena Ortiz
Jefe de laboratorio

Responsable: Jefe de Laboratorio — Fecha de edición: junio de 2020 — v03

Av. España 1680, Valparaíso — servicios.analiticos@usm.cl
www.labqi.cl — 32 2 654219

QUI-059-26

Los resultados entregados en este informe solo se refieren a los ítemes ensevados.
Este informe no debe ser reproducido parcial o totalmente cin la aprobación escrita de este Laboratorio.

Página 1 de 1

.2.2. Informe experimento N°10 y N°11

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE QUIMICA

LabQI
Laboratorio de Análisis
Químico e Instrumental

INFORME DE ENSAYO
N° QUI-094-26

Fecha emisión:
29.07.2026

Información del cliente	
Nombre	Universidad Técnica Federico Santa María
Solicitante	Mario Toledo Maximiliano Quezada.
Dirección	Departamento de Ingeniería Mecánica

Información del análisis y muestra			
Análisis solicitado	Hidrógeno, Monóxido de Carbono, Dióxido de Carbono, Metano, Hidrocarburos ≥ C_2		
Tipo de muestra	Muestra gaseosa en bolsa Tedlar.		
Identificación muestra	Prueba 2 CO2. Splitting. 23/07		**CI 214**
	Prueba 3 CO2. Splitting. 23/07		**CI 215**
Fecha de recepción	23 de julio de 2026	Fecha Inicio Análisis	24 de julio de 2026
Método utilizado	Cromatografía de Gases; según Normas: - ASTM: D1946-90 (2011), - UOP 603-88		
Responsable del muestreo	Maximiliano Quezada.		

LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO E INSTRUMENTAL
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA UTFSM
VALPARAÍSO

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE QUIMICA

LabQI
Laboratorio de Análisis
Químico e Instrumental

RESULTADOS:

Código interno	Análisis	Unidad	Resultados (*)
CI 214	Monóxido de Carbono	[mol CO/100 moles de muestra]	0,40 ± 0,02
	Dióxido de Carbono	[mol CO_2/100 moles de muestra]	56 ± 1
	Oxígeno	[mol O_2/100 moles de muestra]	8,5 ± 0,3
	Nitrógeno	[mol N_2/100 moles de muestra]	45,7 ± 0,9
CI 215	Monóxido de Carbono	[mol CO/100 moles de muestra]	0,73 ± 0,03
	Dióxido de Carbono	[mol CO_2/100 moles de muestra]	49 ± 2
	Oxígeno	[mol O_2/100 moles de muestra]	8,5 ± 0,4
	Nitrógeno	[mol N_2/100 moles de muestra]	46,7 ± 0,2

(*): Los resultados se expresan con el siguiente formato: **X ± s**; donde **X** corresponde al valor promedio entre las porciones de muestra analizadas y **s** es la desviación estándar de los valores obtenidos.

Observaciones: No hay observaciones.

Fin del documento

LABORATORIO DE ANÁLISIS QUÍMICO E INSTRUMENTAL
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA UTFSM VALPARAÍSO

Gisela Bruhn L.
Químico analista

María Elena Ortiz
Jefe de laboratorio

.3. Datos experimentales (gases y temperatura)

Los registros en bruto del Testo 350 (canales O_2, CO, NO, CO_2IR a 1 Hz) y de las termocuplas se procesaron en planillas Excel estructuradas por experimento. La Tabla 12 documenta la correspondencia entre la numeración de experimentos de bitácora (N°) y la de archivos de planilla (Prueba), cuyo desfase se origina en que los Experimentos N°4 y N°5 se ejecutaron el mismo día (26/05/2026) y comparten archivo.

Tabla 12: Correspondencia entre experimentos (bitácora) y archivos de planilla. Fuente: elaboración propia, 2026.

Experimento	Archivo planilla	Fecha
N°1	Prueba1	18/05/2026
N°2	Prueba2	19/05/2026
N°3	Prueba3	20/05/2026
N°4	Prueba4	26/05/2026
N°5	Prueba4	26/05/2026
N°6	Prueba5	01/06/2026
N°7	Prueba6	03/06/2026
N°8	Prueba7	04/06/2026
N°9	Prueba9	18/06/2026
N°10	Prueba10	23/07/2026
N°11	Prueba11	23/07/2026
N°12	Prueba12	27/07/2026

.3.1. Gráficos del experimento N°1

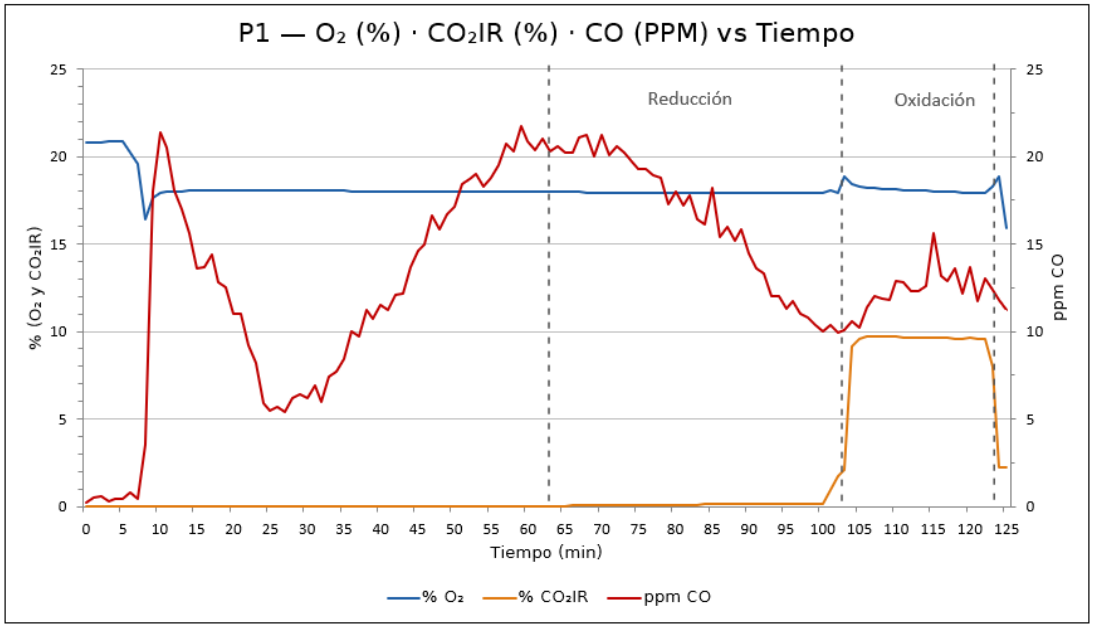


Figura 45: Señales de gases del Experimento N°1. Fuente: elaboración propia, 2026.

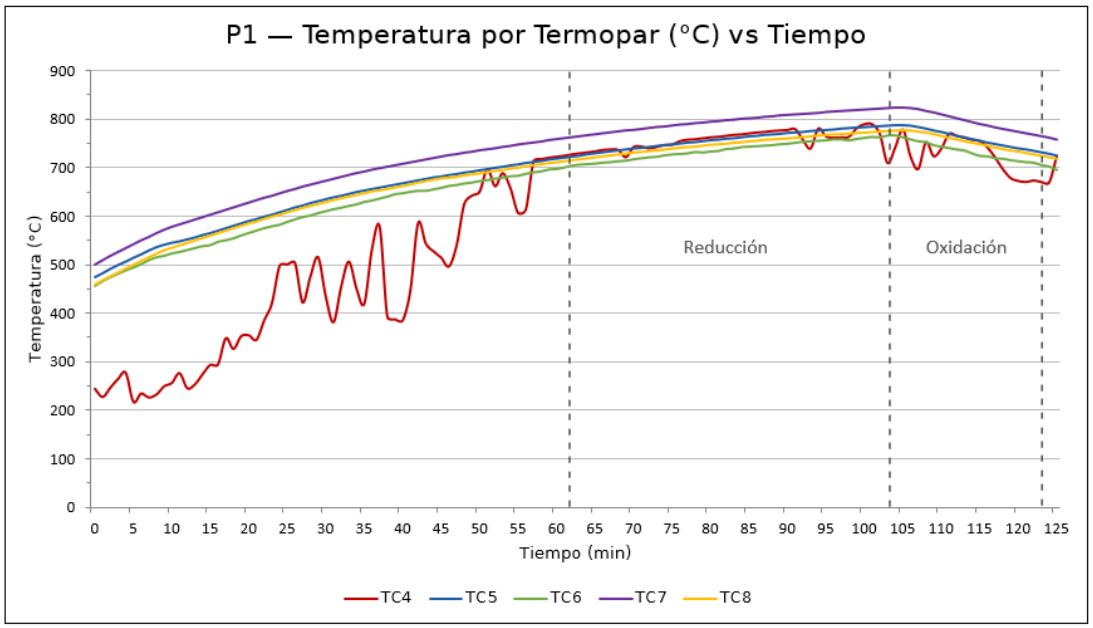


Figura 46: Perfiles de temperatura del Experimento N°1. Fuente: elaboración propia, 2026.

.3.2. Gráficos del experimento N°2

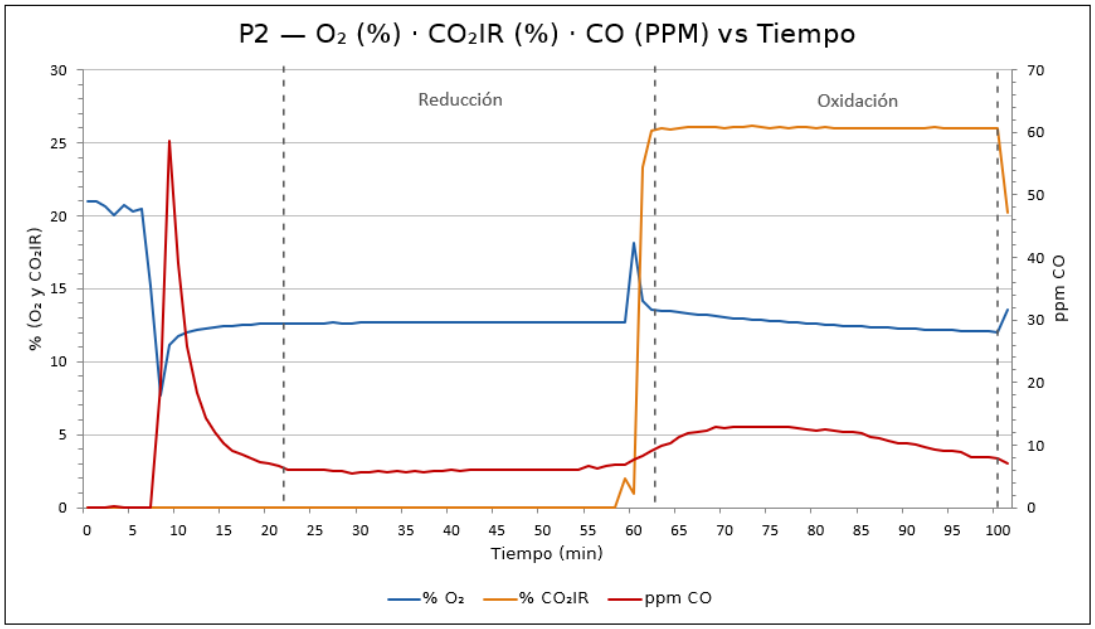


Figura 47: Señales de gases del Experimento N°2. Fuente: elaboración propia, 2026.

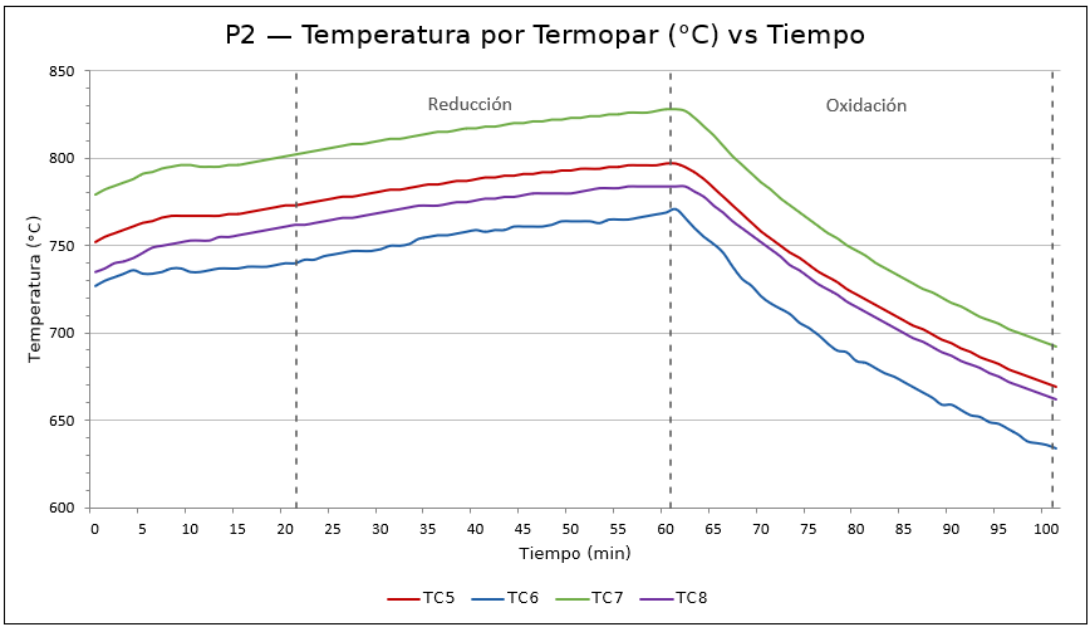


Figura 48: Perfiles de temperatura del Experimento N°2. Fuente: elaboración propia, 2026.

.3.3. Gráficos del experimento N°3

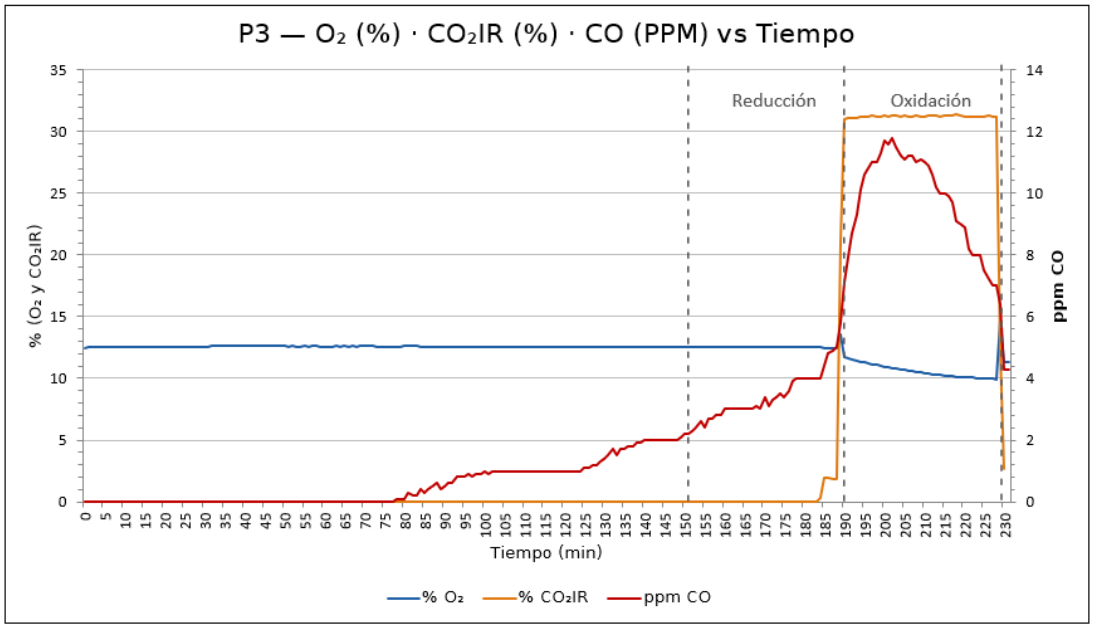


Figura 49: Señales de gases del Experimento N°3. Fuente: elaboración propia, 2026.

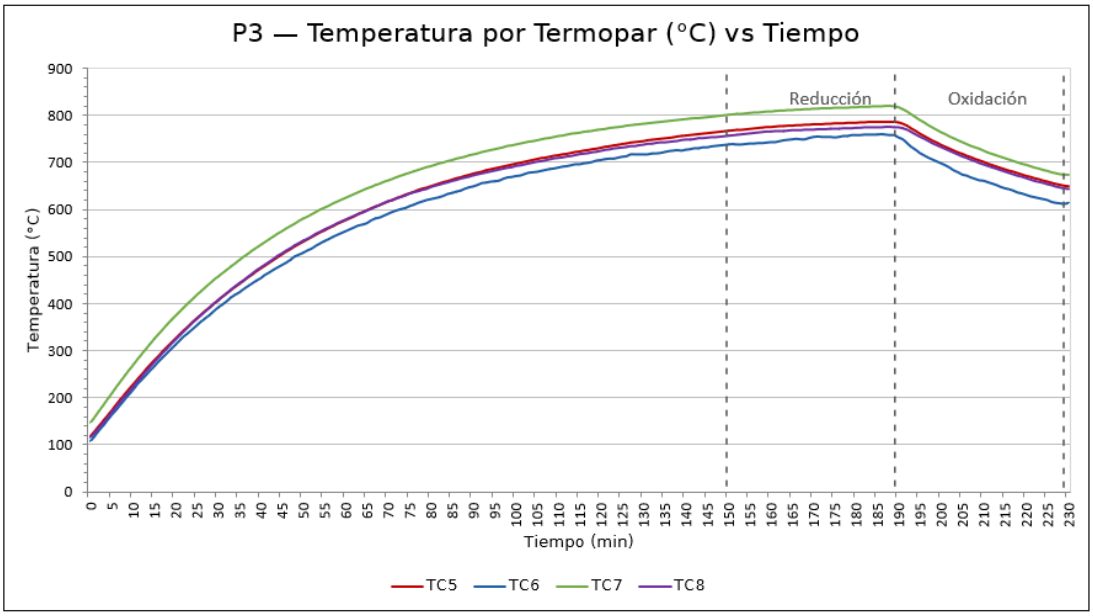


Figura 50: Perfiles de temperatura del Experimento N°3. Fuente: elaboración propia, 2026.

.3.4. Gráficos del experimento N°4

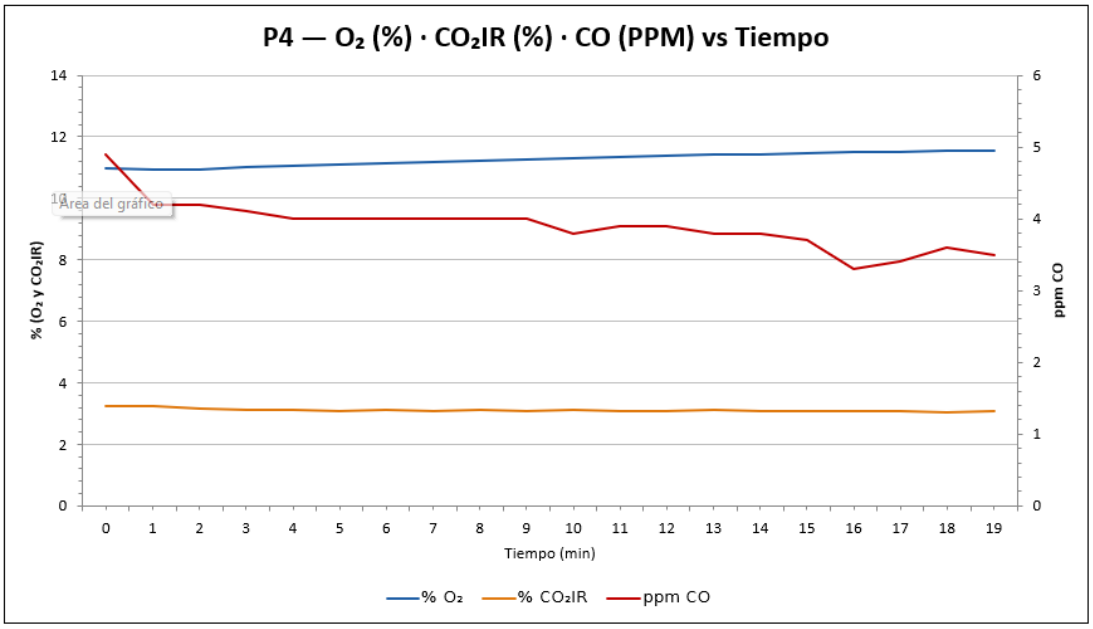


Figura 51: Señales de gases del Experimento N°4. Fuente: elaboración propia, 2026.

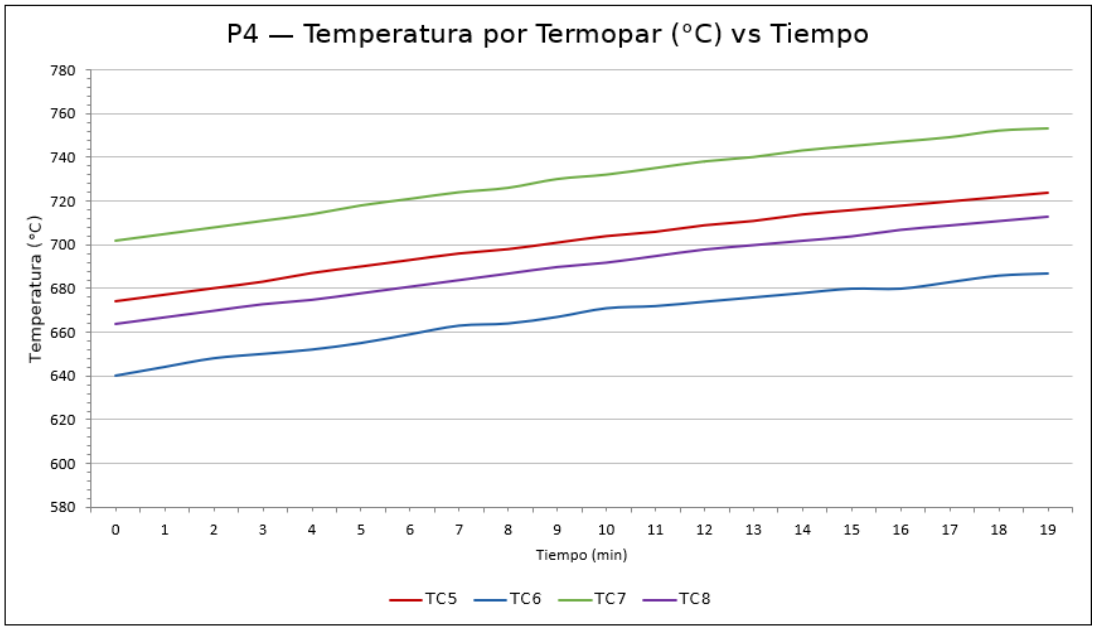


Figura 52: Perfiles de temperatura del Experimento N°4. Fuente: elaboración propia, 2026.

.3.5. Gráficos del experimento N°5

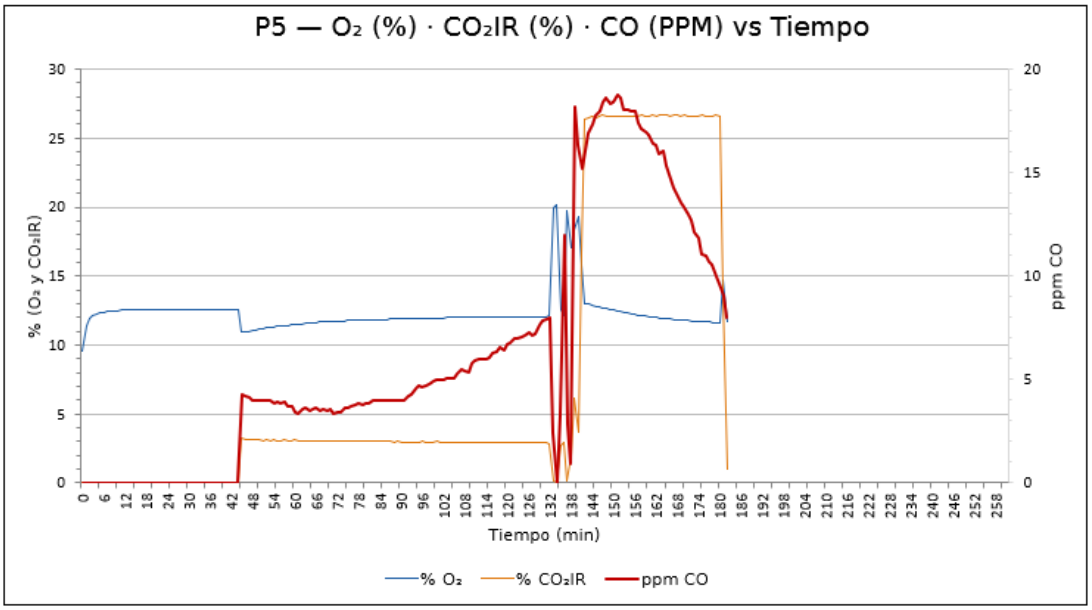


Figura 53: Señales de gases del Experimento N°5. Fuente: elaboración propia, 2026.

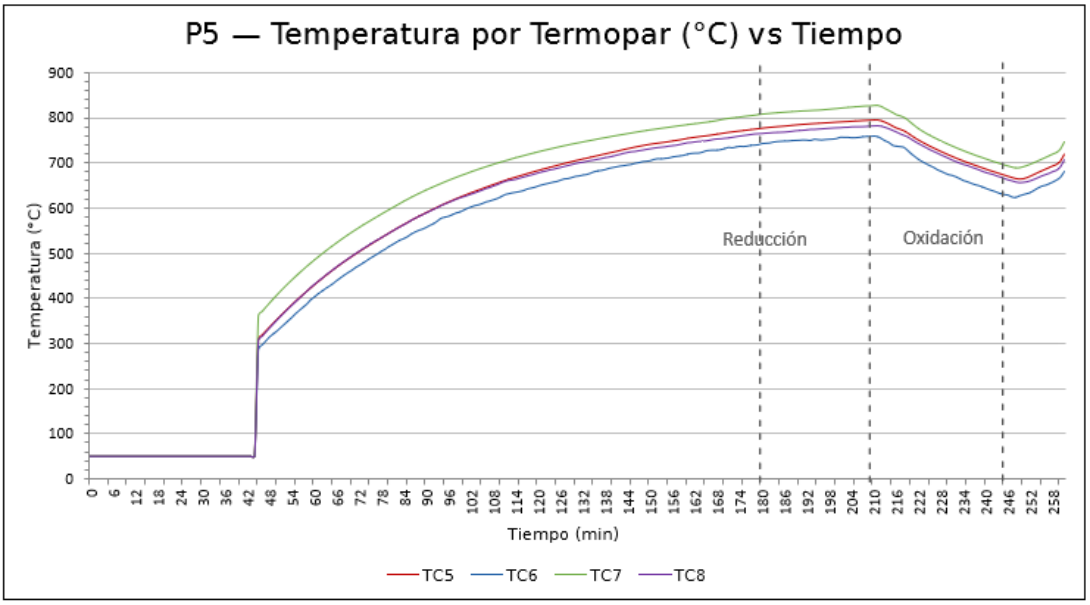


Figura 54: Perfiles de temperatura del Experimento N°5. Fuente: elaboración propia, 2026.

.3.6. Gráficos del experimento N°6

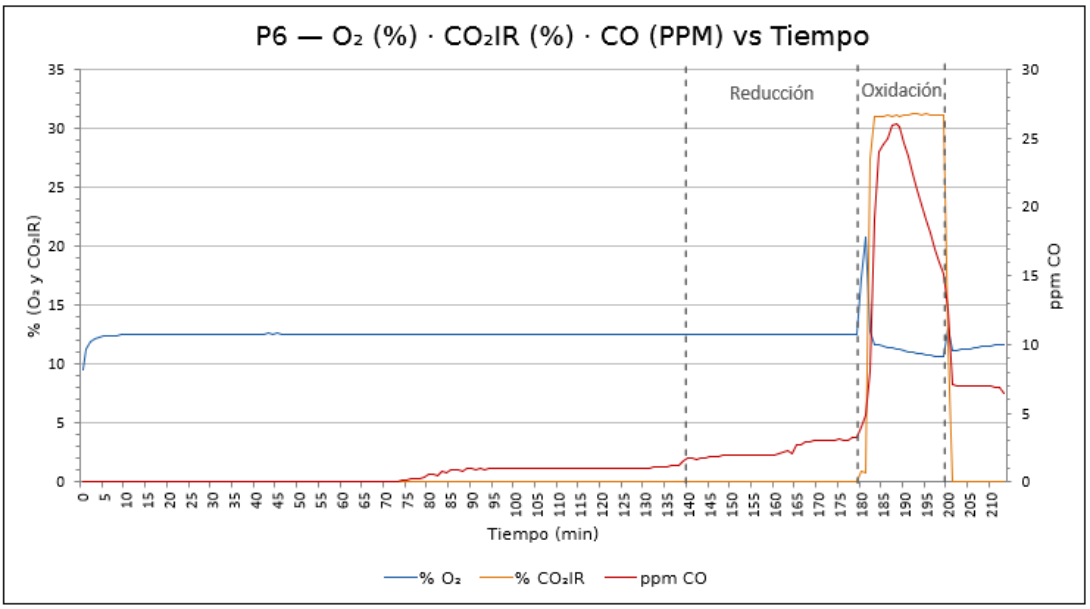


Figura 55: Señales de gases del Experimento N°6. Fuente: elaboración propia, 2026.

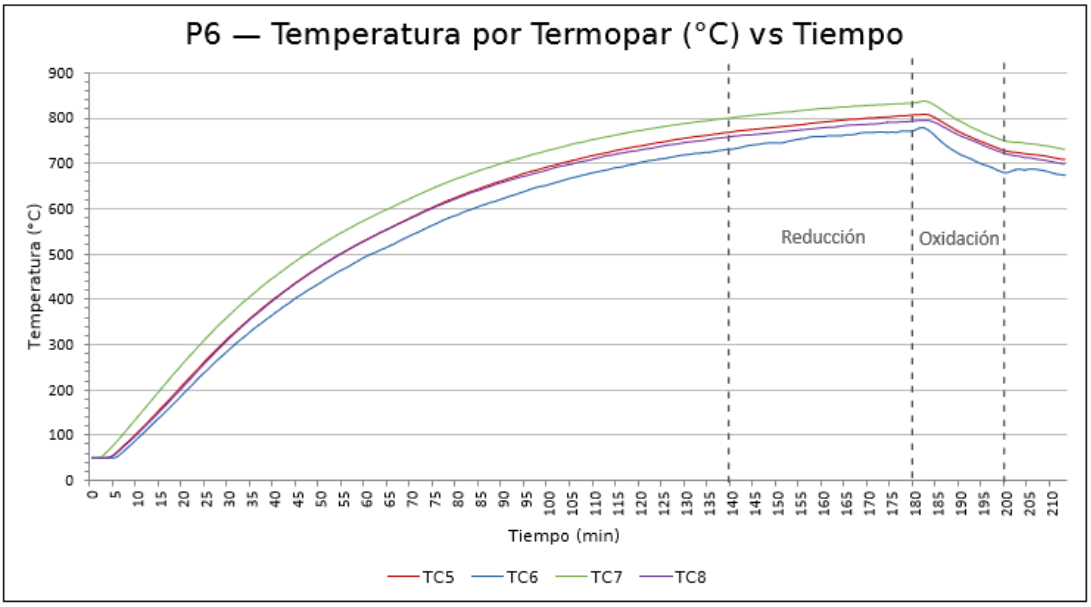


Figura 56: Perfiles de temperatura del Experimento N°6. Fuente: elaboración propia, 2026.

.3.7. Gráficos del experimento N°7

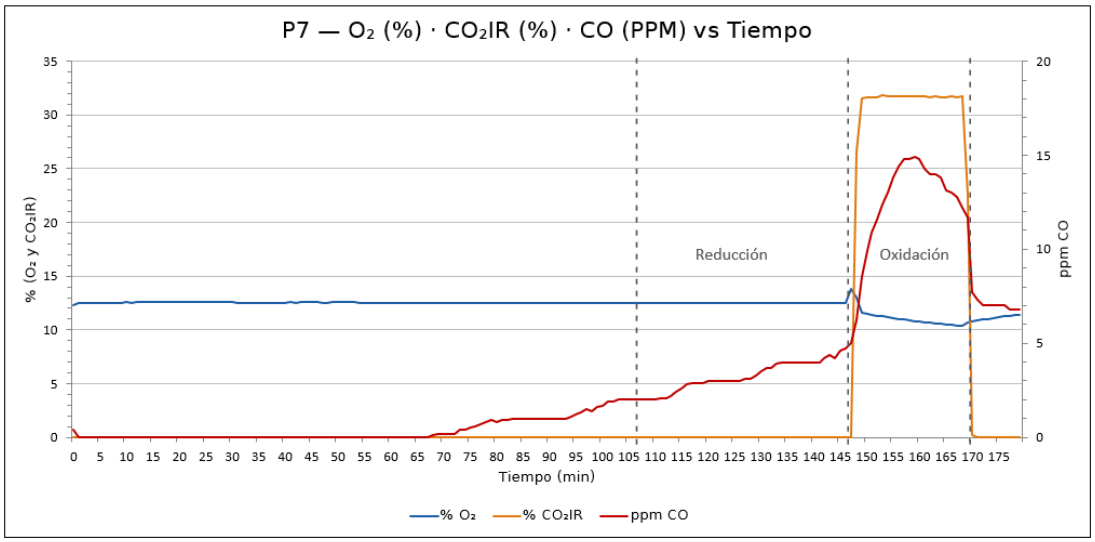


Figura 57: Señales de gases del Experimento N°7. Fuente: elaboración propia, 2026.

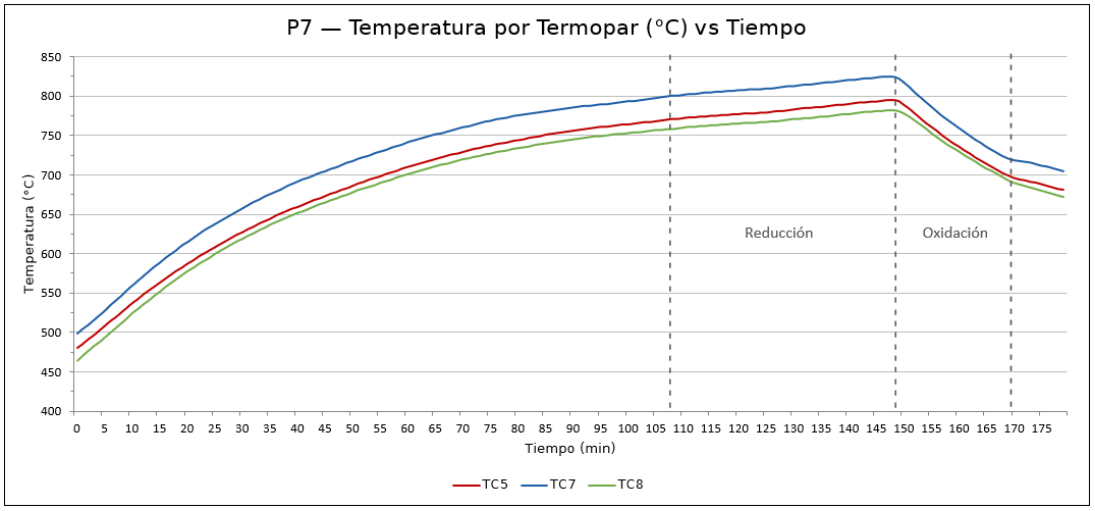


Figura 58: Perfiles de temperatura del Experimento N°7. Fuente: elaboración propia, 2026.

.3.8. Gráficos del experimento N°8

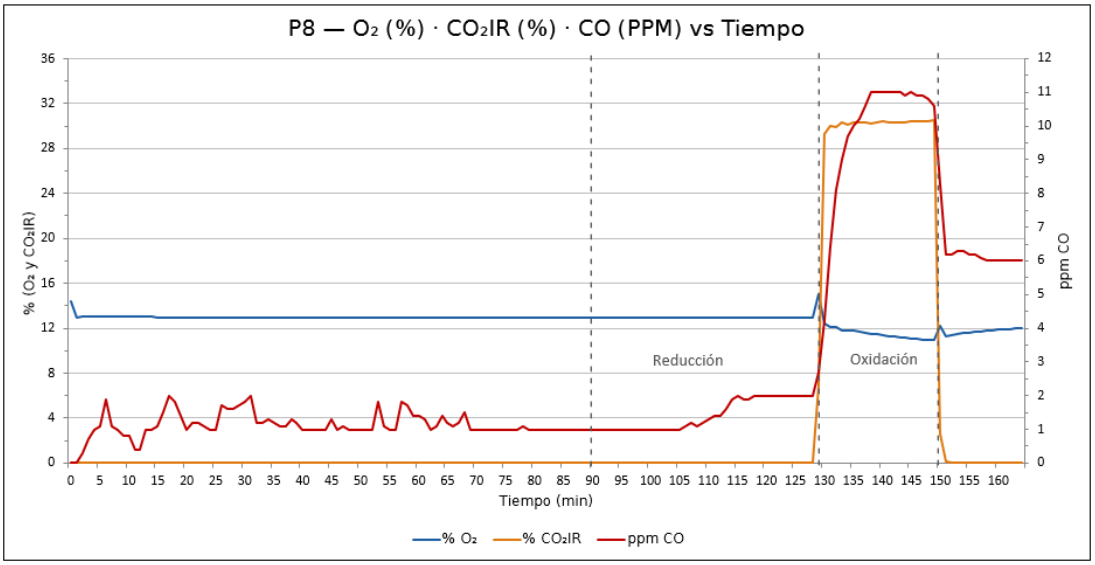


Figura 59: Señales de gases del Experimento N°8. Fuente: elaboración propia, 2026.

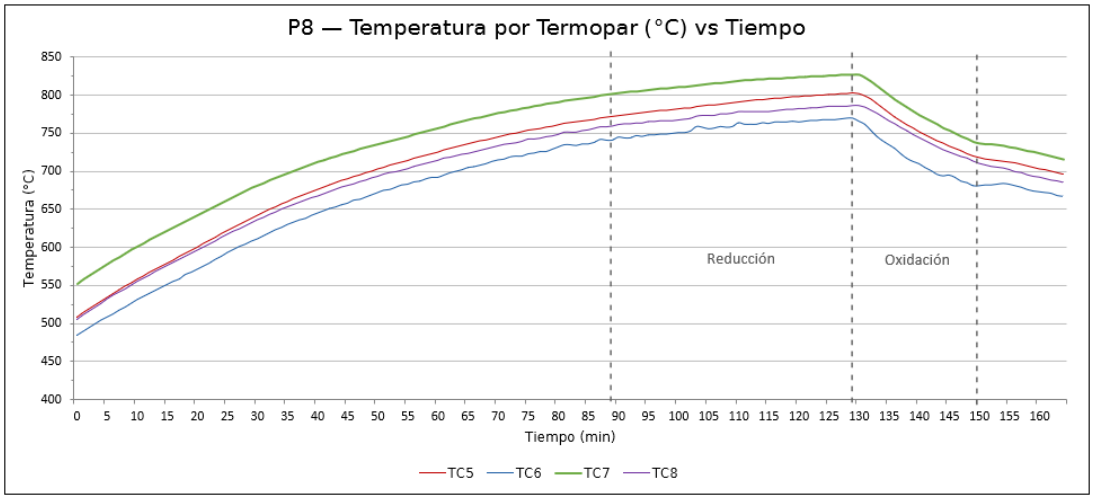


Figura 60: Perfiles de temperatura del Experimento N°8. Fuente: elaboración propia, 2026.

.3.9. Gráficos del experimento N°9

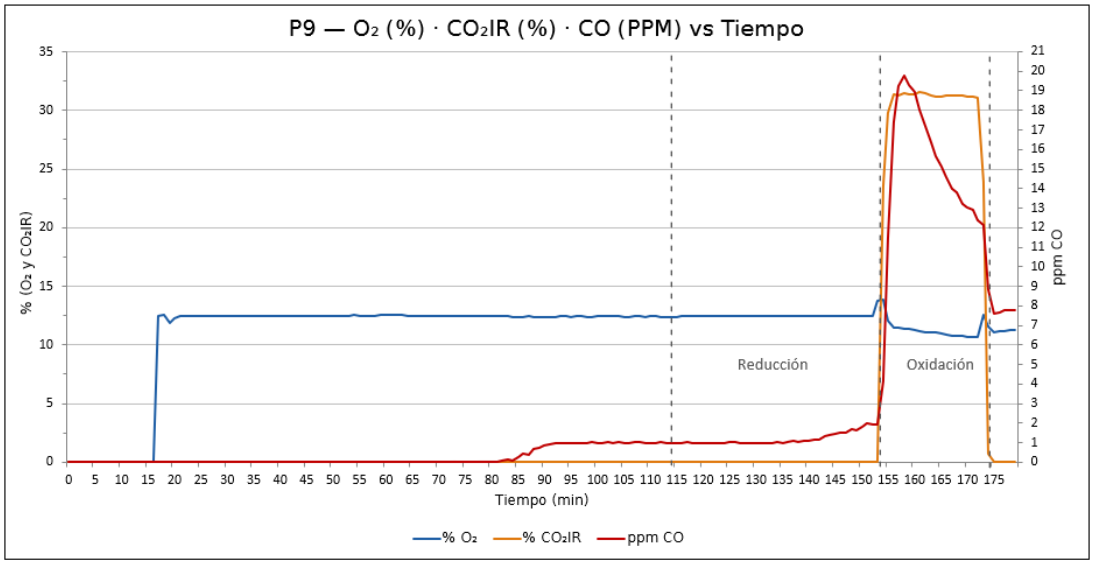


Figura 61: Señales de gases del Experimento N°9. Fuente: elaboración propia, 2026.

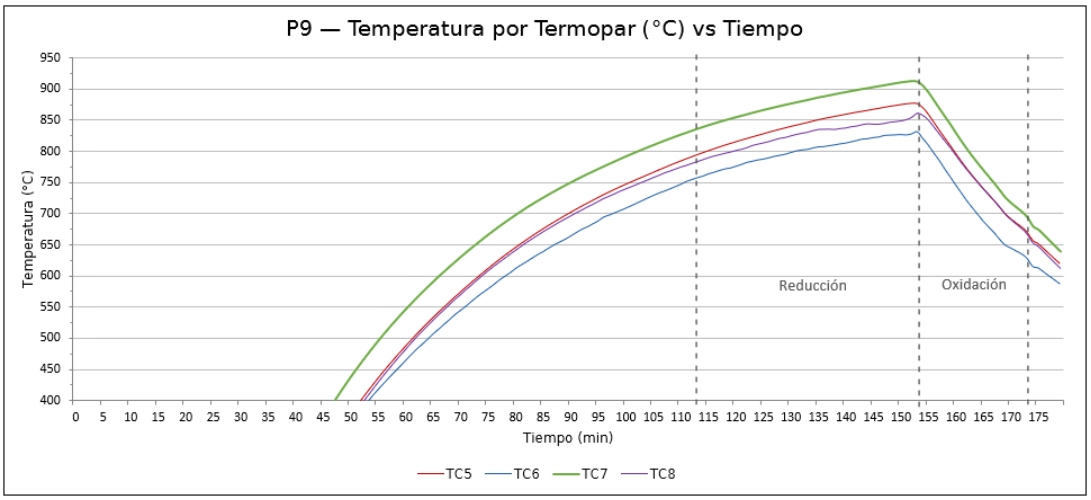


Figura 62: Perfiles de temperatura del Experimento N°9. Fuente: elaboración propia, 2026.

.3.10. Gráficos del experimento N°10

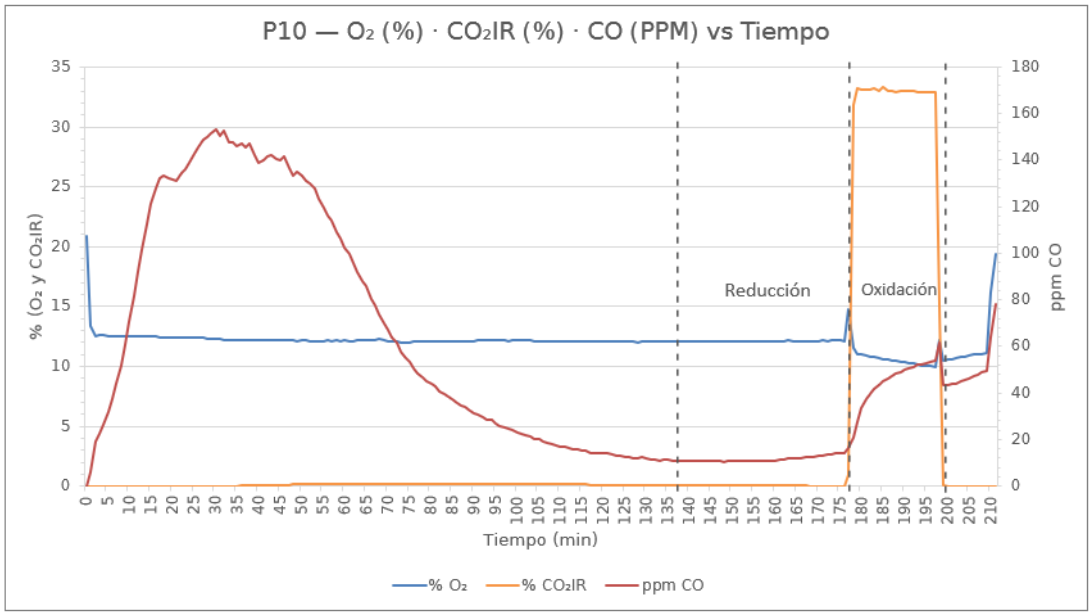


Figura 63: Señales de gases del Experimento N°10. Fuente: elaboración propia, 2026.

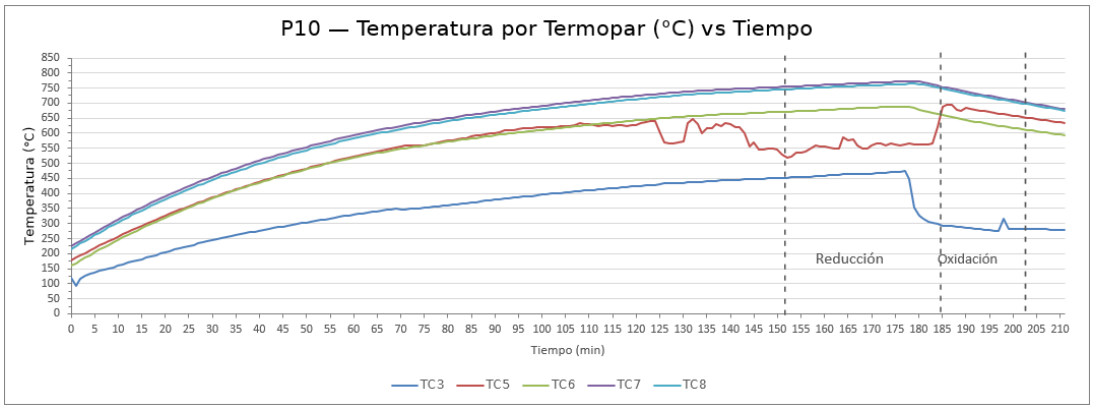


Figura 64: Perfiles de temperatura del Experimento N°10. Fuente: elaboración propia, 2026.

.3.11. Gráficos del experimento N°11

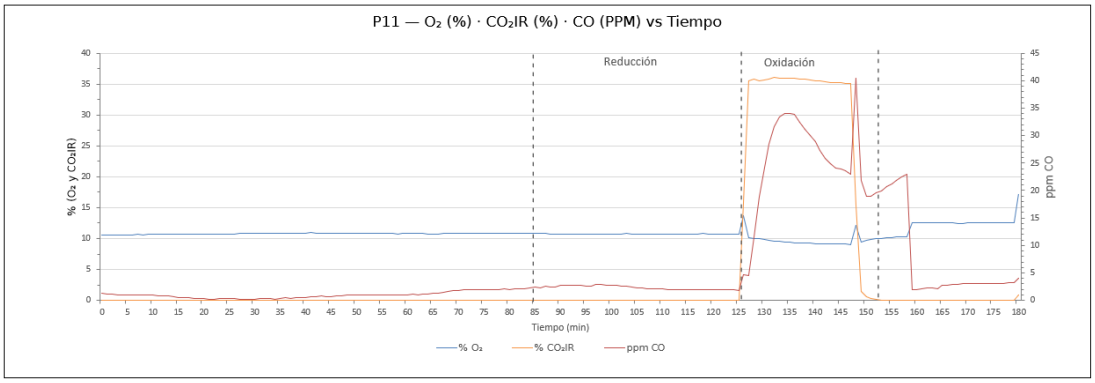


Figura 65: Señales de gases del Experimento N°11. Fuente: elaboración propia, 2026.

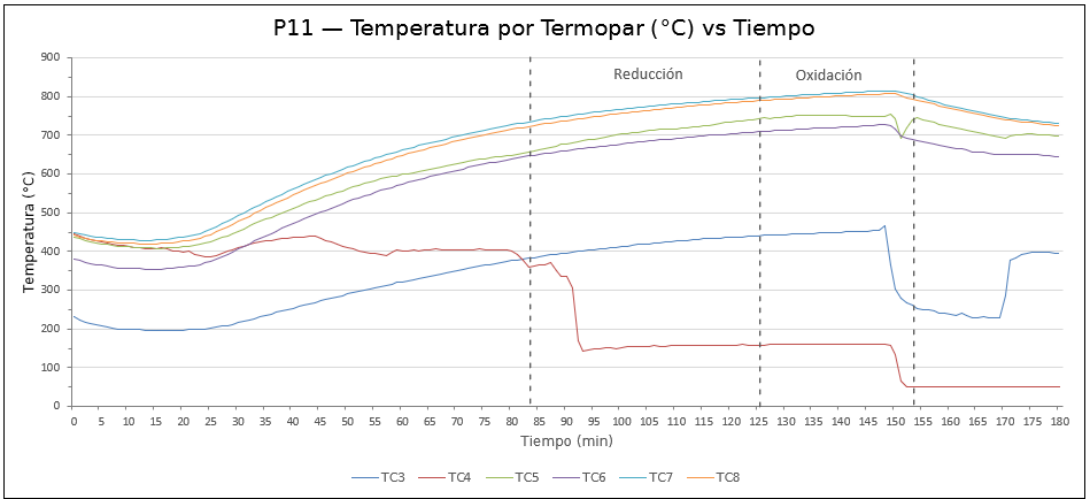


Figura 66: Perfiles de temperatura del Experimento N°11. Fuente: elaboración propia, 2026.

.3.12. Gráficos del experimento N°12

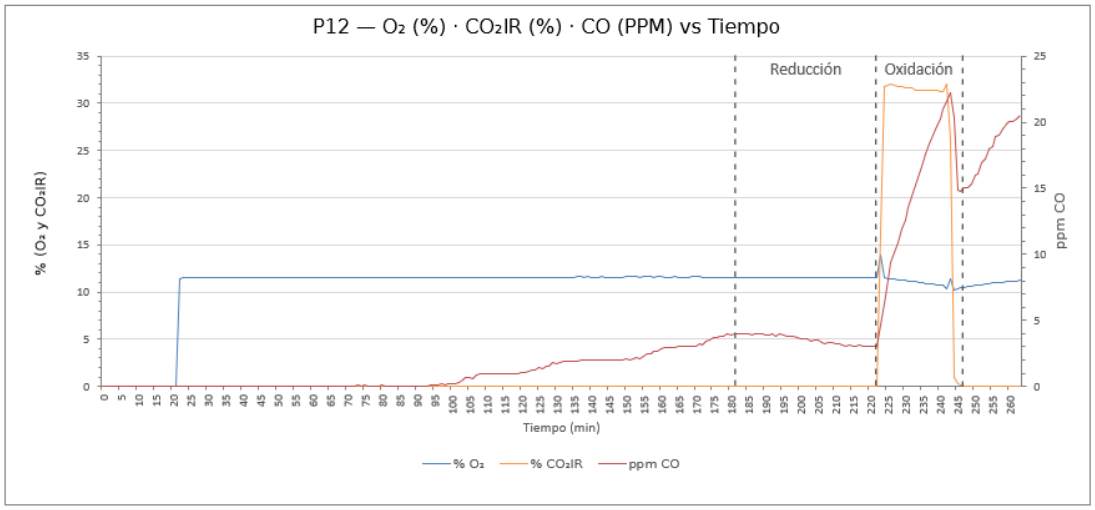


Figura 67: Señales de gases del Experimento N°12. Fuente: elaboración propia, 2026.

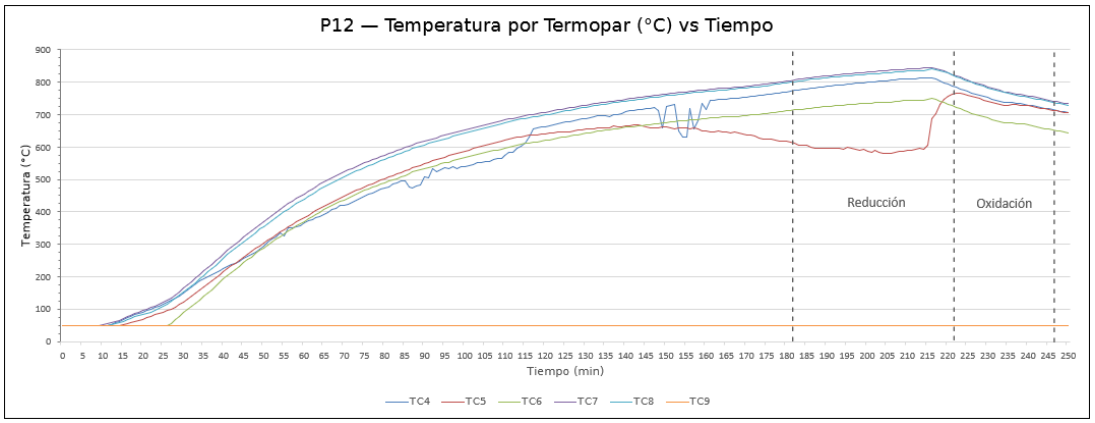


Figura 68: Perfiles de temperatura del Experimento N°12. Fuente: elaboración propia, 2026.

.4. Cálculo de límites de operación de las resistencias Kanthal A-1

Desarrollo analítico completo del análisis empleado en §4.3: resistencia en frío y en caliente, temperatura del alambre y corriente máxima admisible.

.4.1. Cálculo de resistencias

1. Cálculo de resistencias eléctricas – Reactor WS

1.1. Características del alambre según ficha técnica

Las resistencias eléctricas del Reactor WS están fabricadas con alambre Kanthal A-1 (aleación FeCrAl), instaladas en tres ladrillos de cemento refractario Lunkast-95 Plus que rodean la zona interior del reactor. Cada resistencia tiene una longitud de 3 metros dispuesta en forma helicoidal dentro del ladrillo curvo. Las resistencias están conectadas en paralelo, cada una alimentada individualmente por una unidad TDGC2-10 independiente.

Las propiedades físicas y eléctricas del alambre se extraen directamente de la ficha técnica oficial Kanthal A-1 (actualizada 2024-09-06) y se presentan en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1: Propiedades del alambre Kanthal A-1 instalado en el Reactor WS

Parámetro	**Valor**	**Unidad**
Material	Kanthal A-1 (FeCrAl)	–
Diámetro	1,21	mm
Largo por resistencia	3,0	m
Forma de instalación	Helicoidal en ladrillo curvo	–
Conexión	Paralelo (fase independiente)	–
Número de resistencias	3	–
Instalación	Embebido en cemento refractario	–

Tabla 2: Propiedades físicas y eléctricas del Kanthal A-1 según ficha técnica oficial

Propiedad	**Valor**	**Unidad**
Densidad	7,10	g/cm^3
Resistividad eléctrica a 20°C	1,45	$\Omega\ mm^2/m$
Temperatura máxima de operación en aire	1400	°C
Punto de fusión	1500	°C
Conductividad térmica a 800°C	22	W/m·K
Conductividad térmica a 1000°C	26	W/m·K
Coeficiente de resistividad C_t a 800°C	1,03	–
Coeficiente de resistividad C_t a 900°C	1,03	–

1.2. Cálculo de parámetros geométricos y eléctricos

1.2.1. Área transversal del alambre

$$A_{transv} = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \times (0{,}605)^2 = 1{,}149\ \text{mm}^2 \tag{1.1}$$

1.2.2. Resistencia teórica por alambre (en frío, según ficha técnica)

Usando la resistividad oficial $\rho = 1{,}45\ \Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$:

$$R_{fro,terico} = \frac{\rho}{A_{transv}} \times L = \frac{1{,}45}{1{,}149} \times 3{,}0 = \mathbf{3{,}79\ \Omega} \tag{1.2}$$

1.2.3. Resistencia teórica corregida por temperatura de operación

A la temperatura de operación (870°C), el coeficiente $C_t = 1{,}03$ según la ficha técnica. La resistencia corregida es:

$$R_{caliente,terico} = R_{fro,terico} \times C_t = 3{,}79 \times 1{,}03 \approx 3{,}91\ \Omega \tag{1.3}$$

1.2.4. Área superficial del alambre

$$A_{sup} = \pi \cdot d \cdot L = \pi \times 0{,}121\ \text{cm} \times 300\ \text{cm} \approx 11{,}40\ \text{cm}^2 \tag{1.4}$$

La resistividad oficial del Kanthal A-1 es $1{,}45\ \Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$, lo que da unabresistencia teórica en frío de 3,79 Ω para 3 metros. Sin embargo, las mediciones empíricas a baja tensión (10 V) indican una resistencia de $R = V/I = 10/1{,}5 \approx 6{,}67\ \Omega$, significativamente mayor al valor teórico. Esta diferencia puede deberse a variaciones de fabricación tolerancias dimensionales del diámetro real del alambre, o que el alambre utilizado corresponde a otra aleación con resistividad similar. Para todos los cálculos de operación se utilizan los valores empíricos medidos, que reflejan el comportamiento real delsistema.

1.3. Datos empíricos de operación – Prueba del variador

Se realizó una prueba gradual del sistema eléctrico registrando voltaje, corriente y potencia por resistencia individual a distintos niveles de tensión. Los resultados se presentan en la Tabla 3, donde se observa que la resistencia real en caliente disminuye progresivamente desde ∼6,67 Ω en frío hasta estabilizarse en ∼4,73 Ω a partir de los 60–70 V.

Tabla 3: Datos de prueba del variador – valores por resistencia individual

Voltaje (V)	**Corriente (A)**	**Potencia (W)**	R_{real} (Ω)
10	1,5	15	6,67
20	3,1	62	6,45
30	4,5	135	6,67
40	7,1	284	5,63
50	10,7	535	4,67
60	12,6	756	4,76
70	14,7	1029	4,76
71	15,1	1072	4,70

La temperatura interior del reactor a 70 V fue de **828–833 °C**.

1.4. Resistencia real en caliente

Tomando el valor estabilizado a partir de 60–70 V:

$$R_{real,prom} \approx 4{,}73\ \Omega \tag{1.5}$$

La potencia disipada a 70 V por resistencia y total:

$$P_{resistencia,70V} = V \times I = 70 \times 14{,}7 \approx 1029\ \text{W por resistencia} \tag{1.6}$$

$$P_{total,70V} = 3 \times P_{resistencia} = 3 \times 1029 = 3087\ \text{W} \tag{1.7}$$

1.5. Datos reales a 80 V – Experimento N°9 (18/06/2026)

En el Experimento N°9 se operó por primera vez a 80 V, registrando los valores de corriente por fase y temperatura interior del reactor. Los datos obtenidos se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Mediciones reales a 80 V – Experimento N°9

Parámetro	**Valor**	**Unidad**
Voltaje aplicado	80	V
Corriente fase 1	16,1	A
Corriente fase 2	15,5	A
Corriente fase 3	16,2	A
Corriente promedio por resistencia	15,9	A
Desbalance máximo entre fases	0,7	A
Potencia por resistencia	$\approx$ 1272	W
Potencia total	$\approx$ 3816	W
R_{real} en caliente	$\approx$ 5,03	Ω
T° máxima interior (TC7)	913	°C
T° interior (TC8)	861,5	°C

La resistencia real calculada a 80 V:

$$R_{real,80V} = \frac{V}{I_{prom}} = \frac{80}{15{,}9} \approx 5{,}03\ \Omega \tag{1.8}$$

$$P_{resistencia,80V} = V \times I_{prom} = 80 \times 15{,}9 \approx 1272\ \text{W por resistencia} \tag{1.9}$$

1.6. Falla por fatiga del material – Experimento N°9

Al finalizar el período de CO_2 (voltaje reducido a 50 V durante la oxidación), se intentó subir nuevamente a 80 V para iniciar un segundo ciclo de calentamiento. Al alcanzar los 80 V, las 3 resistencias se cortaron de forma simultánea en la misma sección de cada ladrillo. La inspección post-falla con microscopio confirmó el mecanismo de falla como **fatiga máxima del material (Kanthal)**.

1.7. Corriente máxima admisible del alambre

El límite térmico del Kanthal A-1 es 1400°C según la ficha técnica oficial. A partir del punto de operación conocido y la resistencia térmica del cemento refractario Lunkast-95 Plus ($k = 1{,}0$ W/m·K), se estima la temperatura del alambre en operación normal.

1.7.1. Resistencia térmica del cemento

$$R_{cil,cemento} = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi \cdot k \cdot L} = \frac{\ln(90/43{,}5)}{2\pi \times 1{,}0 \times 3{,}0} = \frac{0{,}727}{18{,}85} \approx 0{,}0386 \text{ K/W} \tag{1.10}$$

1.7.2. Temperatura estimada del alambre a 80 V

$$T_{alambre,80V} = T_{interior} + Q \cdot R_{cil,cemento} = 913 + 1272 \times 0{,}0386 \approx 962C \tag{1.11}$$

1.7.3. Margen disponible hasta el límite del Kanthal A-1

$$\Delta T_{disponible} = 1400 - 962 = 438C \tag{1.12}$$

1.7.4. Potencia máxima admisible

$$Q_{max} = \frac{\Delta T_{disponible}}{R_{cil,cemento}} = \frac{438}{0{,}0386} \approx 11.347 \text{ W por resistencia} \tag{1.13}$$

1.7.5. Corriente máxima real

$$I_{max,real} = \sqrt{\frac{Q_{max}}{R_{real,prom}}} = \sqrt{\frac{11.347}{4{,}73}} \approx \mathbf{48{,}9} \text{ A por resistencia} \tag{1.14}$$

$$V_{max,real} = I_{max,real} \times R_{real,prom} = 48{,}9 \times 4{,}73 \approx \mathbf{231} \text{ V} \tag{1.15}$$

.5. Especificaciones técnicas del equipo

Fichas técnicas de los equipos empleados en la campaña:

- **Testo 350:** canales O_2/CO/NO/CO_2IR, rangos, T90, exactitud del sensor CO (0–500 ppm, ±5 ppm o ±5 %) [39].
- **Variac TSGC2-9000VA:** variador trifásico, una perilla de control, tres líneas de salida con neutro compartido.
- **Kanthal A-1:** límites de temperatura (1.400°C) y carga superficial ($J_{\text{máx}} = 10$ A/mm^2), diámetro 1.21 mm.
- **CeO_2:** ficha de seguridad (SDS) y especificaciones del proveedor.
- **Termocuplas TC1–TC9:** tipo B, rango y exactitud.

.5.1. Ficha Testo 350

testo 350

We measure it. testo

Datos técnicos

Datos técnicos Unidad de Control testo 350

	Datos técnicos Unidad de Control testo 350	Caja salidas analógicas (salida mA)
Temp. Func.	-5 ... +45 °C	-5 ... +45 °C
Temp. Almac.	-20 ... +50 °C	-20 ... +50 °C
Tipo de batería	pila de litio	–
Autonomía	5 h (sin conexión inalámbrica)	–
Memoria	2 MB (250.000 valores)	–
Peso	440 g	305 g
Medidas	88 x 38 x 220 mm	200 x 89 x 37 mm
Tipo de protección	IP40	–
Garantía	2 años	3 años

Países con permiso para la transmisión por BLUETOOTH® del analizador testo 350
El módulo para transmisión por BLUETOOTH® utilizado por Testo está permitido para el uso exclusivo en los países indicados, no está permitido el uso en ningún otro país.
Europa y todos los miembros de la UE
Alemania, Austria, Bélgica, Bulgaria, Chipre, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Finlandia, Francia, Gran Bretaña, Grecia, Holanda, Hungría, Irlanda, Italia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Malta, Polonia, Portugal, República Checa, Rumanía, Suecia, y Turquía
Otros países europeos (EFTA)
Islandia, Liechtenstein, Noruega, Suiza
Países no europeos
Canada, USA, Japón, Ucrania, Australia, Colombia, El Salvador, Venezuela.

Datos técnicos Caja Analizadora testo 350

	Rango	Exactitud ±1 dígito	Resolución	Tiempo de respuesta t_{90}
Medición O_2	0 ... +25 Vol. % O_2	±0.8% del f.e. (0 ... +25 Vol. % O_2)	0.01 Vol. % O_2 (0 ... +25 Vol. % O_2)	20 s (t_{95})
Med. CO (H_2 compensado)*	0 ... +10.000 ppm CO	±5% del v.m. (+200 ... +2.000 ppm CO) ±10% del v.m. (+2.001 ... +10.000 ppm CO) ±10 ppm CO (0 ... +199 ppm CO)	1 ppm CO (0 ... +10.000 ppm CO)	40 s
Med. CObajo (H_2 compensado)*	0 ... 500 ppm CO	±5% del v.m. (+40 ... +500 ppm CO) ±2% del v.m. (0 ... +39,9 ppm CO)	1 ppm CO (0 ... +500 ppm CO)	40 s
Medición NO	0 ... +4.000 ppm NO	±5% del v.m. (+100 ... +1.999 ppm NO) ±10% del v.m. (+2.000 ... +4.000 ppm NO) ±5 ppm CO (0 ... +99 ppm CO)	±1 ppm NO (0 ... +4.000 ppm NO)	30 s
Medición NO_{bajo}	0 a +300 ppm NO_{bajo}	±5% of mv (+40 a +300 ppm NO) ±2 ppm NO (0 a +39.9 ppm NO)	0.1 ppm NO_{bajo} (0 ... +300 ppm NO_{bajo})	30 s
Medición NO_2	0 ... +500 ppm NO_2	±5% del v.m. (+100 ... +500 ppm NO_2) ±5 ppm NO_2 (0 ... +9,99 ppm NO_2)	±0.1 ppm NO_2 (0 ... +500 ppm NO_2)	40 s
Medición SO_2	0 ... +5.000 ppm SO_2	±5% del v.m. (+100 ... +2.000 ppm SO_2) ±10% del v.m. (+2.001 ... +5.000 ppm SO_2) ±5 ppm SO_2 (0 ... +99 ppm SO_2)	±1 ppm SO_2 (0 ... +5.000 ppm SO_2)	30 s
MediciónCO_2 (IR)	0 ... +50 Vol. % CO_2	±0.3 Vol. % CO_2 + 1% del v.m. (0 ... 25 Vol. % CO_2) ±0.5 Vol. % CO_2 + 1.5% del v.m. (>25 ... 50 Vol. % CO_2)	0.01 Vol. % CO_2 (0 ... 25 Vol. % CO_2) 0.1 Vol. % CO_2 (>25 Vol. % CO_2)	10 s
Medición H_2S	0 ... +300 ppm H_2S	±5% del v.m. (+40 ... +300 ppm) ±2 ppm (0 ... +39.9 ppm)	0.1 ppm (0 ... +300 ppm)	35 s

* Visualización del H_2 solo como indicador

	Dilución individual con factor de dilución seleccionable (x2, x5, x10, x20, x40)			Dilución de todos los sensores (Factor 5) Cuando se activa la dilución de todos los sensores, los valores de O_2, CO_2-(IR) y C_xH_y no se muestran en la pantalla.		
	Rango	Exactitud ±1 dígito	Resolución	Rango	Exactitud ±1 dígito	Resolución
Medición de CO (H_2 compensado)	según el factor de dilución	±2 % del v.m. (error adicional)	1 ppm	2.500 ... 50.000 ppm	±5 % del v.m. (error adicional) Rango presión -100 a 0 mbar en la punta de la sonda	1 ppm
Medición de CO_{bajo} (H_2 compensado)	según el factor de dilución		0.1 ppm	500 ... 2.500 ppm		0.1 ppm
Medición NO			1 ppm	1.500 ... 20.000 ppm		1 ppm
Medición NO_{bajo}			0.1 ppm	300 ... 1.500 ppm		0.1 ppm
Medición SO_2			1 ppm	500 ... 25.000 ppm		1 ppm
Medición CxHy	Methano: 100 a 40,000 ppm Propano: 100 a 21,000 ppm Butano: 100 a 18,000 ppm		10 ppm			
Medición NO_2				500 ... 2.500 ppm		0.1 ppm
Medición H_2S				200 ... 1.500 ppm		0.1 ppm

testo 350

We measure it. testo

Datos técnicos

Datos técnicos Caja analizadora testo 350

	Rango	Exactitud ±1 dígito	Resolución	Tiempo respuesta t_{90}
Grado de efectividad	0 ... +120 %		0.1 % (0 ... +120 %)	
Pérdida por chimenea	0 ... +99.9 % qA		0.1 % qA (-20 ... +99.9 % qA)	
Cálculo del CO_2	0 a CO_2 máx. Vol. %CO_2	Calculado a partir del O2 ±0.2 Vol. %	0.01 Vol. % CO2	40 s
Presión diferencial 1	-40 ... +40 hPa	±1.5% del v.m. (-40 ... -3 hPa) ±1.5% del v.m. (+3 ... +40 hPa) ±0.03 hPa (-2.99 ... +2.99 hPa)	0.01 hPa (-40 ... +40 hPa)	
Presión diferencial 2	-200 ... +200 hPa	±1.5% del v.m. (-200 ... -50 hPa) ±1.5% del v.m. (+50 ... +200 hPa) ±0.5 hPa (-49.9 ... +49.9 hPa)	0.1 hPa (-200 ... +200 hPa)	
Velocidad	0 ... +40 m/s		0.1 m/s (0 ... +40 m/s)	
Presión absoluta (opcional si equipa el sensor IR)	-600 ... +1.150 hPa	±10 hPa	1 hPa	
Cálculo punto rocío de la combustión	0 ... 99.9 °C td		0.1 °C td (0 ... 99.9 °C td)	
Sonda Tipo K (NiCr-Ni)	-200 ... +1.370 °C	±0.4 °C (-100 ... +200 °C) ±1 °C (-200 ... -100.1 °C) ±1 °C (+200.1 ... +1370 °C)	0.1 °C (-200 ... +1.370 °C)	
Tipo S (Pt10Rh-Pt)	0 ... +1.760 °C	±1 °C (0 ... +1.760 °C)	0.1 °C (0 ... +1.760 °C)	
Sonda de temperatura ambiente (NTC)	-20 ... +50 °C	±0.2 °C (-10 ... +50 °C)	0.1 °C (-20 ... +50 °C)	

Datos técnicos sensor CxHy

Parámetro medición	Rango [1]	Exactitud ±1 dígito	Resolución	Contenido mín. de O2 en la combustión	Tiempo de respuesta t_{90}	Factor respuesta [2]
Metano	100 ... 40.000 ppm	‹400 ppm (100 ... 4.000 ppm) ‹10% del v.m. (>4.000 ppm)	10 ppm	2% + (2 x v.m. metano)	‹40 s	1
Propano	100 ... 21.000 ppm			2% + (5 x v.m. propano)		1.5
Butano	100 ... 18.000 ppm			2% + (6.5 x v.m. butano)		2

[1] Se debe respetar el límite inferior de explosividad.
[2] El sensor CxHy se ajusta a metano de serie. El usuario puede ajustarlo a otro gas (propano o butano).

Datos técnicos generales

- Medidas: 330 x 128 x 438 mm
- Peso: 4800 g
- Temperatura almacenamiento: -20 a +50 °C
- Temperatura funcionamiento: -5 a +45 °C
- Material caja: ABS
- Memoria: 250.000 valores de medición
- Alimentación: alimentador CA 90V a 260V (47 a 65 Hz)
- Alimentación CC: 11V a 40V
- Carga máx. partículas: 20 g/m³ partículas en la combustión
- Cálculo de punto de rocío: 0 a 99 °C t
- Max. presión pos. combustión: max. +50 mbar
- Max. presión neg.: min. -300 mbar
- Rendimiento bomba: 1 l/min. con monitorización del rendimiento
- Longitud manguera: máx 16.2 m (correspondiente a 5 extensiones)

Carga máx. humedad:	+70 °C temperatura punto de rocío en la entrada para medición del gas de la caja analizadora
Entrada disparador:	Voltaje 5 a 12 Volt (flanco ascendente o descendente)
Amplitud impulso > 1 seg	
Carga: 5 V/máx, 5 mA, 12 V/máx. 40 mA	
Garantía:* Instrumento:	2 años (excepto consumibles, p.ej., los sensores de gas...);
Sensores de gas:	CO/NO/NO2/SO2/H2S/CXHY: 1 año;
Sensor O2:	1 año y medio;
Sensor CO2-IR:	2 años.
Batería:	1 año
Clase de protección: IP40	
Autonomía: a pleno rendimiento, aprox. 2.5 h	

* Garantía aplicable si los sensores sufren una carga de trabajo normal.

Instrumentos Testo, S.A. · P.I. La Baileta-Can Xinxa, c/B nº 2, 08358 Cabrils · T: 93 753 95 20 · F: 93 753 95 26 · www.testo.es · info@testo.es

.5.2. Ficha técnica Kanthal A-1

KANTHAL®

KANTHAL® A-1
ALAMBRE DE CALENTAMIENTO POR RESISTENCIA Y ALAMBRE DE RESISTENCIA

Alambre Kanthal® A-1 es una aleación ferrítica de hierro-cromo-aluminio (aleación de FeCrAl) que se puede usar a temperaturas de hasta 1400 °C (2550 °F). Esta aleación se caracteriza por su alta resistividad y una muy buena resistencia a la oxidación.

Alambre Kanthal® A-1 se utiliza generalmente en elementos de calentamiento eléctricos de hornos de alta temperatura en las industrias de tratamiento térmico, cerámica, vidrio, acero y electrónica.

COMPOSICIÓN QUÍMICA

	C %	Si %	Mn %	Cr %	Al %	Fe %
†Composición nominal					5,8	Bal.
Mín.	-	-	-	20,5	-	
Máx.	0,08	0,7	0,4	23,5	-	

†Nota: La composición indicada es nominal. La composición real puede variar para cumplir con la resistencia eléctrica estándar y las tolerancias dimensionales.

PROPIEDADES FÍSICAS

Densidad g/cm^3 (lb/in^3)	7,10 (0,257)
Resistividad eléctrica a 20 °C Ω mm^2/m (Ω mil circ./ft)	1,45 (872)
Coeficiente de Poisson	0,30

MÓDULO DE YOUNG

Temperatura °C	20	100	200	400	600	800	1000
Temperatura °F	68	212	392	752	1112	1472	1832
GPa	220	210	205	190	170	150	130
Msi	32	30	30	28	25	22	19

1 KANTHAL® A-1

Hoja de datos actualizada 2024-09-06 07:26 (sustituye todas las ediciones anteriores)

COEFICIENTE DE RESISTIVIDAD A LA TEMPERATURA

Temp. °C	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
Temp. °F	212	392	572	752	932	1112	1292	1472	1652	1832	2012	2192	2372	2552
Ct	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,02	1,02	1,03	1,03	1,04	1,04	1,04	1,04	1,05

COEFICIENTE DE DILATACIÓN TÉRMICA

Temperatura °C (°F)	Dilatación térmica x 10^{-6}/K (10^{-6}/°F)
20-250 (68-482)	11 (6,1)
20-500 (68-932)	12 (6,7)
20-750 (68-1382)	14 (7,8)
20-1000 (68-1832)	15 (8,3)

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Temperatura °C	50	600	800	1000	1200	1400
Temperatura °F	122	1112	1472	1832	2192	2552
W m^{-1} K^{-1}	11	20	22	26	27	35
Btu $h^{-1}ft^{-1}°F^{-1}$	6,4	11,6	12,7	15,0	15,6	20,2

CAPACIDAD CALORÍFICA ESPECÍFICA

Temperatura °C	20	200	400	600	800	1000	1200	1400
Temperatura °F	68	392	752	1112	1472	1832	2192	2552
kJ kg^{-1} K^{-1}	0,46	0,56	0,63	0,75	0,71	0,72	0,74	0,80
Btu lb^{-1} $°F^{-1}$	0,11	0,13	0,15	0,18	0,17	0,17	0,18	0,19

Punto de fusión °C (°F)	1500 (2732)
Temperatura máxima de funcionamiento continuo en aire °C (°F)	1400 (2552)
Propiedades magnéticas	El material es magnético hasta aproximadamente los 600 °C (1112 °F) (punto de Curie).
Emisividad: material completamente oxidado	0,70

PROPIEDADES MECÁNICAS

Diámetro del alambre	Límite elástico	Resistencia a la tracción	Alargamiento	Dureza
Ø	$R_{p0,2}$	R_m	A	

Hoja de datos actualizada 2024-09-06 07:26 (sustituye todas las ediciones anteriores)

2 KANTHAL® A-1

mm (in)	MPa (ksi)	MPa (ksi)	%	Hv
1,0 (0,04)	545 (79)	760 (110)	20	240
4,0 (0,16)	475 (69)	680 (99)	18	230

PROPIEDADES MECÁNICAS A TEMPERATURAS ELEVADAS

Temperatura °C	900	1000	1100	1200	1300
Temperatura °F	1652	1832	2012	2192	2372
MPa	34	18	10	6	4
ksi	4,9	2,6	1,5	0,9	0,6

Resistencia a la rotura por tracción: tasa de deformación 6,2 x 10^{-2}/min

RESISTENCIA A LA FLUENCIA: ALARGAMIENTO DEL 1 % EN 1000 H

Temperatura °C	800	1000
Temperatura °F	1472	1832
MPa	1,2	0,5
psi	170	73

Descargo de responsabilidad: Las recomendaciones son solo orientativas, y la idoneidad de un material para una aplicación específica se puede confirmar solo cuando conocemos las condiciones reales de utilización. Debido al desarrollo continuo de los materiales, es posible que sea necesario realizar cambios en los datos técnicos sin previo aviso. Esta ficha técnica solo es válida para materiales que lleven la marca comercial Kanthal®.

Hoja de datos actualizada 2024-09-06 07:26 (sustituye todas las ediciones anteriores)

KANTHAL.COM

KANTHAL®

.6. Bitácoras de laboratorio (experimentos)

Se adjunta una bitácora por experimento, con las condiciones operacionales, incidencias y observaciones registradas durante cada ensayo. La numeración de bitácoras (N°1–N°12) corresponde a la de los experimentos; los archivos Excel del Testo 350 conservan la numeración original de planilla (Prueba 1–Prueba 12), con el desfase documentado en el Anexo .3.

.6.1. Bitácora N°1

Bitácora de Experimento — Tesis MEC			
Experimento N°: 1	**Fecha:** 18/05/2026		
Nombre del ensayo:	Monitoreo Térmico y Medición de Gases (O_2, CO) en Reactor WS		
Objetivo:	Determinar la temperatura de reducción de $CO_2 \rightarrow$ CO mediante rampa de calentamiento controlada y análisis con Testo.		
Lugar / Sala:	Laboratorio de Termofluidos	**Hora inicio:** 09:35	

Instrumentos y Condiciones Iniciales			
Instrumento 1:	Analizador Testo (O_2 / CO) ±	**Instrumento 2:**	Variador de voltaje ±
Instrumento 3:	Medidor de corriente (3 fases) ±	**Instrumento 4:**	±

1. Verificación Previa al Experimento	
[ ]	Calibración y verificación de cero en todos los instrumentos realizada.
[ ]	Condiciones de seguridad verificadas (EPIs, ventilación, conexiones eléctricas).
[ ]	Muestras y reactivos rotulados y preparados correctamente.
[ ]	Condiciones ambientales estables y registradas.
[ ]	Protocolo experimental revisado y disponible.
[ ]	Reactor WS inspeccionado y en condiciones operativas.

2. Registro Cronológico del Experimento

Registre cada acción y medición de forma inmediata, con hora exacta. Una fila por evento.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
–:–	Inicio de purga con N_2. Presión de línea: 1 bar.	2	L/min	Purga inicial del sistema previo al calentamiento.
–:–	Inicio de calentamiento con variador de voltaje. Incremento de +10 V cada 2 min.	10	V (inicio)	Rampa de calentamiento progresiva para estabilizar temperatura.
–:–	**INTERRUPCIÓN:** unión resistencia–neutro suelta detectada. Se detiene el sistema.	—	—	Falla eléctrica: conexión floja en resistencia. Se procede a desconectar e instalar resistencias de forma individual.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
10:46	Reinicio del sistema tras corrección eléctrica. Resistencias reconectadas individualmente.	—	—	Sistema operativo nuevamente. Se retoma rampa de calentamiento.
–:–	Medición de corriente en los 3 cables de alimentación de las resistencias.	14,6 / 14,7 / 13,8	A	Corrientes balanceadas. Diferencia máxima: 0,9 A entre fases.
–:–	Sistema alcanza 500 °C. Inicio oficial de las pruebas de medición.	500	°C	Temperatura umbral para inicio de ensayos de reducción de CO_2 → CO.
–:–	Inicio de medición con analizador Testo (O_2 y PPM de CO).	573,5	°C	Primera lectura Testo al alcanzar 573,5 °C. Objetivo: determinar T° de reducción de CO_2.
11:35	Lectura de O_2 con Testo.	17,56	% O_2	Temperatura: 573,5 °C.
–:–	Medición de línea base promedio de O_2 (referencia experimental).	18,02	% O_2	Base de referencia. Desviación respecto al 20,9 % atmosférico sugiere posible fuga / sello incompleto del sistema.
–:–	Sistema alcanza 800 °C. Fin purga N_2. Inicio inyección CO_2.	800	°C	Todo el proceso previo transcurrió bajo atmósfera de N_2. Se cambia al gas reactivo CO_2.
–:–	Flujo de CO_2 estabilizado. Inicio del periodo de reacción de 20 min.	2	L/min	Objetivo: reducción CO_2 → CO. Inicio cronómetro de 20 min.
12:49	Confirmación 800 °C. Inicio oficial del periodo de reacción con CO_2.	800	°C	Hora de referencia para los 20 min de exposición al CO_2.
13:09	Fin del periodo de 20 min con CO_2. Temperatura máxima del tramo.	824	°C	Aumento de +24 °C respecto a T° de inicio del periodo.
13:09	Reducción de potencia. Voltaje bajado a 50 V.	535	W	Control térmico post-pico. Operación dentro de límites seguros.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
–:–	Aumento progresivo de voltaje hasta 70 V (límite máximo de operación).	70	V	Límite de diseño: máx. 1030 W/resistencia × 3 resistencias. No superar este voltaje.
13:29	Fin del experimento. Voltaje reducido a 0 V. Corte de alimentación eléctrica.	0	V	Cierre controlado del sistema.
13:29	Cambio de gas: $CO_2 \rightarrow N_2$. Inicio de purga final de seguridad.	4	L/min	Purga post-experimento: 5–10 min con N_2 para desplazar CO residual.
:				
:				

Resumen del Experimento

Resumen — Experimento N°1 — 18/05/2026	
T° inicio N_2 (800 °C):	12:49
T° inicio CO_2:	> 810 °C *(no registrada con precisión)*
T° final CO_2:	824 °C (13:09)
O_2 base:	18,02 % *(estimado — Testo no estaba desde el inicio)*
O_2 final:	17,56 % *(medido a 573,5 °C — 11:35 am)*
CO detectado:	10–17 PPM
Flujo CO_2:	2 L/min
Duración periodo CO_2:	20 min (12:49 – 13:09)
Voltaje durante CO_2:	50 V (bajado desde 70 V al inicio del periodo)
Purga final:	5–10 min con N_2 a 4 L/min (desde 13:29)
Incidentes:	Falla eléctrica inicial — unión resistencia-neutro suelta. Reinicio a las 10:46.

.6.2. Bitácora N°2

Bitácora de Experimento — Tesis MEC	
Experimento N°: 2	**Fecha:** 19/05/2026
Nombre del ensayo:	Monitoreo Térmico y Medición de Gases (O_2, CO) en Reactor WS
Objetivo:	Determinar la temperatura de reducción de $CO_2 \rightarrow$ CO. Periodo de oxidación extendido a 40 min. Medición con Testo 350 desde 500 °C.
Lugar / Sala:	Laboratorio de Termofluidos **Hora inicio:** 09:10

Instrumentos y Condiciones Iniciales			
Instrumento 1:	Analizador Testo (O_2 / CO) ±	**Instrumento 2:**	Variador de voltaje ±
Instrumento 3:	Medidor de corriente (3 fases) ±	**Instrumento 4:**	±

1. Verificación Previa al Experimento	
[ ]	Calibración y verificación de cero en todos los instrumentos realizada.
[ ]	Condiciones de seguridad verificadas (EPIs, ventilación, conexiones eléctricas).
[ ]	Muestras y reactivos rotulados y preparados correctamente.
[ ]	Condiciones ambientales estables y registradas.
[ ]	Protocolo experimental revisado y disponible.
[ ]	Reactor WS inspeccionado y en condiciones operativas.

2. Registro Cronológico del Experimento

Registre cada acción y medición de forma inmediata, con hora exacta. Una fila por evento.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
09:10	Inicio de purga con N_2.	6	L/min	Purga inicial del sistema previo al calentamiento.
09:10	Inicio de calentamiento con variador de voltaje. Incremento de +10 V cada 1 min.	10	V (inicio)	Rampa de calentamiento: 10 V → 70 V en 6 min.
09:16	Voltaje máximo de operación alcanzado. Se mantiene en 70 V.	70	V	Límite de diseño: máx. 1030 W/resistencia × 3. No superar este voltaje.
–:–	Sistema alcanza 500 °C. Inicio de mediciones con Testo 350 (O_2 y CO en PPM).	500	°C	Primera lectura Testo desde 500 °C. Mejora respecto al experimento anterior (inicio más temprano).

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
11:09	Lectura de O_2 con Testo 350.	10,34	% O_2	Temperatura: 796 °C. Sistema aún bajo atmósfera de N_2.
–:–	Estimación de línea base de O_2 (referencia experimental).	12,26	% O_2	Valor estimado a partir de los datos. Testo no estaba desde el inicio — se recomienda encenderlo antes para capturar la base real.
∼11:10	Sistema alcanza 800 °C. Inicio del periodo de reducción bajo N_2 (40 min).	800	°C	Flujo N_2: 6 L/min. Periodo extendido a 40 min vs. 20 min del experimento anterior.
12:02	Fin periodo N_2. Cambio de gas: $N_2 \rightarrow CO_2$. Reducción de potencia a 50 V. Inicio de oxidación.	6	L/min	Flujo CO_2: 6 L/min. Voltaje bajado a 50 V para control térmico. Inicio cronómetro 40 min.
12:42	Fin del periodo de oxidación con CO_2 (40 min). Temperatura final registrada.	694,5	°C	Descenso de temperatura durante el periodo de CO_2 al operar a menor potencia.
12:42	Voltaje reducido a 0 V. Corte de alimentación eléctrica. Fin del experimento.	0	V	Cierre controlado del sistema.
12:42	Cambio de gas: $CO_2 \rightarrow N_2$. Inicio de purga final de seguridad.	6	L/min	Purga post-experimento: 5–8 min aprox. para desplazar CO residual.
∼12:50	Fin de purga final. Cierre de cilindro de N_2.	—	—	Experimento finalizado sin incidentes.
:				
:				
:				

Resumen del Experimento

Resumen — Experimento N°2 — 19/05/2026	
T° inicio N_2 (800 °C):	∼11:10
T° inicio CO_2:	824 °C
T° final CO_2:	694,5 °C
O_2 base:	12,26 %
O_2 final:	18 %
CO detectado:	7 - 8 ppm
Flujo CO_2:	6 L/min
Duración periodo CO_2:	40 min (12:02 – 12:42)
Voltaje durante CO_2:	50 V (bajado desde 70 V al inicio del periodo)
Incidentes:	Ninguno.

.6.3. Bitácora N°3

Bitácora de Experimento — Tesis MEC			
Experimento N°: 3	**Fecha:** 20/05/2026		
Nombre del ensayo:	Monitoreo Térmico y Medición de Gases (O_2, CO) en Reactor WS		
Objetivo:	Repetición del ensayo del 19/05 con mejoras: Testo 350 encendido desde antes de los 200 °C para capturar línea base real de O_2.		
Lugar / Sala:	Laboratorio de Termofluidos	**Hora inicio:** 12:00	

Instrumentos y Condiciones Iniciales			
Instrumento 1:	Analizador Testo (O_2 / CO) ±	**Instrumento 2:**	Variador de voltaje ±
Instrumento 3:	Medidor de corriente (3 fases) ±	**Instrumento 4:**	±

1. Verificación Previa al Experimento	
[ ]	Calibración y verificación de cero en todos los instrumentos realizada.
[ ]	Condiciones de seguridad verificadas (EPIs, ventilación, conexiones eléctricas).
[ ]	Muestras y reactivos rotulados y preparados correctamente.
[ ]	Condiciones ambientales estables y registradas.
[ ]	Protocolo experimental revisado y disponible.
[ ]	Reactor WS inspeccionado y en condiciones operativas.

2. Registro Cronológico del Experimento

Registre cada acción y medición de forma inmediata, con hora exacta. Una fila por evento.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
12:00	Inicio de purga con N_2. Testo 350 encendido previo al calentamiento.	6	L/min	Mejora respecto días anteriores: Testo activo desde antes de los 200 °C para capturar línea base real de O_2.
12:00	Inicio de calentamiento con variador de voltaje. Incremento de 0 a 70 V.	0	V (inicio)	Rampa de calentamiento: 0 V → 70 V en 6 min.
12:06	Voltaje máximo de operación alcanzado. Se mantiene en 70 V.	70	V	Límite de diseño: máx. 1030 W/resistencia × 3. No superar este voltaje.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
–:–	Lectura de línea base de O_2 con Testo 350 (antes de los 200 °C).	12,5	% O_2	Base real registrada. Desviación respecto al 20,9 % atmosférico confirma fuga / sello incompleto del sistema.
14:48	Sistema alcanza 800 °C. Inicio del periodo de reducción bajo N_2 (40 min).	800	°C	Flujo N_2: 6 L/min. Cronómetro de 40 min iniciado.
15:28	Fin periodo N_2 (40 min). Temperatura al cambio de gas.	817	°C	Temperatura pico al inicio del periodo de CO_2.
15:28	Cambio de gas: $N_2 \rightarrow CO_2$. Reducción de potencia a 50 V. Inicio de oxidación.	6	L/min	Flujo CO_2: 6 L/min. Voltaje bajado a 50 V. Cronómetro de 40 min iniciado.
16:07	Fin del periodo de oxidación con CO_2 (40 min). Lecturas finales registradas.	673,5	°C	Temperatura final: 673,5 °C. O_2: 16,57 %. CO detectado: 8–7 PPM.
16:07	Voltaje reducido a 0 V. Corte de alimentación eléctrica.	0	V	Cierre controlado del sistema.
16:07	Cambio de gas: $CO_2 \rightarrow N_2$. Inicio de purga final de seguridad.	6	L/min	Purga post-experimento: 5–8 min aprox. para desplazar CO residual.
∼16:15	Fin de purga final. Cierre de cilindro de N_2.	—	—	Experimento finalizado sin incidentes.
:				
:				
:				

Resumen del Experimento

Resumen — Experimento N°3 — 20/05/2026	
T° inicio CO_2:	817 °C
T° final CO_2:	673,5 °C
O_2 base:	12,5 % *(medido correctamente — Testo encendido antes de los 200 °C)*
O_2 final:	16,57 %
CO detectado:	7–8 PPM
Flujo CO_2:	6 L/min
Duración periodo CO_2:	40 min (15:28 – 16:07)
Voltaje durante CO_2:	50 V (bajado desde 70 V al inicio del periodo)
Incidentes:	Ninguno.

.6.4. Bitácora N°4

Bitácora de Experimento — Tesis MEC			
Experimento N°: 4	**Fecha:** 26/05/2026		
Nombre del ensayo:	Monitoreo Térmico, Medición de Gases (O_2, CO) y Cromatografía en Reactor WS		
Objetivo:	Repetición del ensayo con toma de muestra para análisis cromatográfico durante el periodo de CO_2. Verificar presencia de CO mediante cromatografía.		
Lugar / Sala:	Laboratorio de Termofluidos	**Hora inicio:** 09:47	

Instrumentos y Condiciones Iniciales			
Instrumento 1:	Analizador Testo 350 (O_2 / CO) ±	**Instrumento 2:**	Variador de voltaje ±
Instrumento 3:	Medidor de corriente (3 fases) ±	**Instrumento 4:**	Bomba extracción de muestra ±
T° ambiente:	14,2 °C	**Presión:**	Pa

1. Verificación Previa al Experimento	
[ ]	Calibración y verificación de cero en todos los instrumentos realizada.
[ ]	Condiciones de seguridad verificadas (EPIs, ventilación, conexiones eléctricas).
[ ]	Muestras y reactivos rotulados y preparados correctamente.
[ ]	Condiciones ambientales estables y registradas.
[ ]	Protocolo experimental revisado y disponible.
[ ]	Reactor WS inspeccionado y en condiciones operativas.

2. Registro Cronológico del Experimento

Registre cada acción y medición de forma inmediata, con hora exacta. Una fila por evento.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
09:47	Inicio de purga con N_2.	6	L/min	Purga inicial del sistema. T° ambiente: 14,2 °C.
09:47	Inicio de calentamiento con variador de voltaje. Incremento de 0 a 70 V en 8 min.	0	V (inicio)	Rampa de calentamiento: 0 V → 70 V en 8 min.
09:55	Voltaje máximo de operación alcanzado. Se mantiene en 70 V.	70	V	Límite de diseño: máx. 1030 W/resistencia × 3. No superar este voltaje.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
09:53	Testo 350 encendido. Lectura de línea base de O_2.	12,34	% O_2	Base real registrada desde el inicio. Sistema bajo atmósfera de N_2.
12:34	Sistema alcanza 800 °C. Inicio del periodo de reducción bajo N_2 (40 min).	800	°C	Flujo N_2: 6 L/min. Cronómetro de 40 min iniciado.
13:14	Fin periodo N_2 (40 min). Temperatura al cambio de gas.	827	°C	Temperatura pico registrada al inicio del periodo de CO_2.
13:14	Cambio de gas: $N_2 \rightarrow CO_2$. Reducción de potencia a 50 V. Inicio de oxidación.	6	L/min	Flujo CO_2: 6 L/min. Voltaje bajado a 50 V. Cronómetro de 40 min iniciado.
13:22	**Extracción de muestra para cromatografía** con bomba. Min 8 del periodo de CO_2.	792	°C	CO: ≈8 PPM. NO: ≈3 PPM. Muestra etiquetada para análisis cromatográfico.
13:55	Fin del periodo de oxidación con CO_2 (40 min). Lecturas finales registradas.	700	°C	T° final: 700 °C. O_2 final: — PPM (completar).
13:55	Voltaje reducido a 0 V. Corte de alimentación eléctrica.	0	V	Cierre controlado del sistema.
13:55	Cambio de gas: $CO_2 \rightarrow N_2$. Inicio de purga final de seguridad.	6	L/min	Purga post-experimento: 5–8 min para desplazar CO residual.
∼14:00	Fin de purga final. Cierre de cilindro de N_2.	—	—	Experimento finalizado sin incidentes. Muestra pendiente de análisis cromatográfico.
:				
:				

Resumen del Experimento

Resumen — Experimento N°4	
T° ambiente:	14,2 °C
T° inicio N_2 (800 °C):	12:34
T° inicio CO_2:	827 °C (13:14)
T° final CO_2:	700 °C (13:55)
O_2 base:	12,34 % *(medido desde las 09:53 — Testo encendido al inicio)*
O_2 final:	10,92 %
CO detectado (Testo):	≈8 PPM *(min 8 del periodo CO_2, T°: 792 °C)*
NO detectado (Testo):	≈3 PPM *(min 8 del periodo CO_2)*
Muestra cromatografía:	Extraída a las 13:22 (min 8 del CO_2) con bomba. Pendiente de análisis.
Flujo CO_2:	6 L/min
Duración periodo CO_2:	40 min (13:14 – 13:55)
Voltaje durante CO_2:	50 V (bajado desde 70 V al inicio del periodo)
Incidentes:	Ninguno.

.6.5. Bitácora N°5

Bitácora de Experimento — Tesis MEC	
Experimento N°: 5	**Fecha:** 26/05/2026
Nombre del ensayo:	Monitoreo Térmico y Medición de Gases (O_2, CO, NO) en Reactor WS — Prueba continua
Objetivo:	Repetición inmediata del ensayo anterior (Exp. N°4) sin cromatografía. Reactor iniciado en caliente desde 690 °C tras purga final del experimento previo.
Lugar / Sala:	Laboratorio de Termofluidos **Hora inicio:** 14:55

Instrumentos y Condiciones Iniciales			
Instrumento 1:	Analizador Testo 350 (O_2 / CO / NO) ±	**Instrumento 2:**	Variador de voltaje ±
Instrumento 3:	Medidor de corriente (3 fases) ±	**Instrumento 4:**	±
T° reactor al inicio:	690 °C *(reactor en caliente tras purga del Exp. N°4)*	**Voltaje inicial:**	70 V (mantenido)

1. Verificación Previa al Experimento	
[ ]	Calibración y verificación de cero en todos los instrumentos realizada.
[ ]	Condiciones de seguridad verificadas (EPIs, ventilación, conexiones eléctricas).
[ ]	Muestras y reactivos rotulados y preparados correctamente.
[ ]	Condiciones ambientales estables y registradas.
[ ]	Protocolo experimental revisado y disponible.
[ ]	Reactor WS inspeccionado y en condiciones operativas.

2. Registro Cronológico del Experimento

Registre cada acción y medición de forma inmediata, con hora exacta. Una fila por evento.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
14:55	Inicio de la prueba continua. Reactor en caliente a 690 °C tras purga del Exp. N°4. Inicio periodo de N_2 (40 min).	6	L/min	Sin rampa de calentamiento — reactor ya operativo. Voltaje mantenido en 70 V.
–:–	Sistema alcanza 800 °C. Mediciones Testo 350 durante periodo de N_2.	800	°C	O_2: 11,95 %. CO: 4 PPM. NO: 2 PPM. Valores de base bajo atmósfera de N_2.
15:37	Fin periodo N_2 (40 min). Cambio de gas: $N_2 \rightarrow CO_2$. Reducción de potencia a 50 V. Inicio de oxidación.	6	L/min	Lectura Testo al inicio CO_2: O_2: 18,48 %. CO: 20 PPM. NO: 3 PPM.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
–:–	Temperatura pico durante el periodo de CO_2.	830,5	°C	Máximo registrado durante la oxidación.
16:19	Fin del periodo de oxidación con CO_2 (40 min). Lecturas finales registradas.	—	°C	O_2 final: 16,84 %. CO final: 9 PPM. T° final: °C *(completar)*.
16:19	Voltaje reducido a 0 V. Corte de alimentación eléctrica.	0	V	Cierre controlado del sistema.
16:19	Cambio de gas: $CO_2 \rightarrow N_2$. Inicio de purga final de seguridad.	6	L/min	Purga post-experimento: 5–8 min para desplazar CO residual.
∼16:27	Fin de purga final. Cierre de cilindro de N_2.	—	—	Experimento finalizado sin incidentes.
:				
:				

Resumen del Experimento

Resumen — Experimento N°5 — Prueba continua (mismo día que Exp. N°4)	
T° reactor al inicio:	690 °C *(reactor en caliente tras purga del Exp. N°4)*
T° inicio N_2 (800 °C):	14:55
O_2 / CO / NO durante N_2:	11,95 % O_2 4 PPM CO 2 PPM NO
T° inicio CO_2:	>800 °C (15:37)
O_2 / CO / NO inicio CO_2:	18,48 % O_2 20 PPM CO 3 PPM NO
T° pico durante CO_2:	830,5 °C
T° final CO_2:	740,5 °C
O_2 / CO final:	16,84 % O_2 9 PPM CO (16:19)
Flujo CO_2:	6 L/min
Duración periodo CO_2:	40 min (15:37 – 16:19)
Voltaje durante CO_2:	50 V
Cromatografía:	No realizada en este ensayo.
Incidentes:	Ninguno.

.6.6. Bitácora N°6

Bitácora de Experimento — Tesis MEC		
Experimento N°: 6	**Fecha:** 01/06/2026	
Nombre del ensayo:	Monitoreo Térmico y Medición de Gases (O_2, CO, NO) en Reactor WS	
Objetivo:	Ciclo N_2 (40 min) + CO_2 (20 min) con seguimiento detallado de CO y NO mediante Testo 350. Evaluar evolución temporal de CO durante la oxidación.	
Lugar / Sala:	Laboratorio de Termofluidos	**Hora inicio:** 09:34

Instrumentos y Condiciones Iniciales			
Instrumento 1:	Analizador Testo 350 (O_2 / CO / NO) ±	**Instrumento 2:**	Variador de voltaje ±
Instrumento 3:	Medidor de corriente (3 fases) ±	**Instrumento 4:**	±

1. Verificación Previa al Experimento	
[ ]	Calibración y verificación de cero en todos los instrumentos realizada.
[ ]	Condiciones de seguridad verificadas (EPIs, ventilación, conexiones eléctricas).
[ ]	Muestras y reactivos rotulados y preparados correctamente.
[ ]	Condiciones ambientales estables y registradas.
[ ]	Protocolo experimental revisado y disponible.
[ ]	Reactor WS inspeccionado y en condiciones operativas.

2. Registro Cronológico del Experimento

Registre cada acción y medición de forma inmediata, con hora exacta. Una fila por evento.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
09:34	Inicio de purga con N_2. Inicio de calentamiento: 0 V → 70 V en 2 min.	6	L/min	Rampa más rápida que experimentos anteriores: 2 min hasta 70 V.
09:36	Voltaje máximo alcanzado. Se mantiene en 70 V.	70	V	Límite de diseño: máx. 1030 W/resistencia × 3. No superar este voltaje.
09:40	Testo 350 encendido. Lectura de línea base.	—	—	O_2: 12,51 %. CO: 0 PPM. NO: 1 PPM. Sistema bajo atmósfera de N_2.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
12:00	Sistema alcanza 800 °C. Lecturas Testo 350 durante calentamiento.	800	°C	O_2: —%. CO: 2 PPM. NO: 2 PPM. Inicio cronómetro 40 min de N_2.
12:40	Fin periodo N_2 (40 min). Temperatura pico al cambio de gas.	835,5	°C	Temperatura máxima registrada.
12:40	Cambio de gas: $N_2 \rightarrow CO_2$. Reducción de potencia a 50 V. Inicio de oxidación (20 min).	6	L/min	Voltaje bajado a 50 V. CO_2: 6 L/min. Lectura base CO_2: CO: 3 PPM. NO: 2 PPM.
12:42	Subida rápida de CO detectada por Testo 350.	—	°C	CO sube rápidamente hasta 17 PPM a los 2 min del inicio de CO_2.
12:49	Pico máximo de CO registrado durante el experimento.	799–800	°C	**CO: 26 PPM**. NO: — PPM. Valor más alto registrado en la serie de experimentos.
13:00	Fin del periodo de CO_2 (20 min). T° final registrada. Inicio purga final con N_2.	746	°C	Voltaje a 0 V. Cambio $CO_2 \rightarrow N_2$. Flujo purga: 6 L/min. Duración: 10 min.
13:10	Fin de purga final. Cierre de cilindro de N_2.	—	—	Experimento finalizado sin incidentes.
:				
:				

Resumen del Experimento

Resumen — Experimento N°6 — 01/06/2026	
T° inicio N_2 (800 °C):	12:00
O_2 / CO / NO base (09:40):	12,51 % O_2 0 PPM CO 1 PPM NO
O_2 / CO / NO a 800 °C:	— % O_2 2 PPM CO 2 PPM NO
T° inicio CO_2:	835,5 °C (12:40)
CO / NO base inicio CO_2:	3 PPM CO 2 PPM NO
CO a los 2 min (12:42):	17 PPM *(subida rápida)*
CO pico máximo (12:49):	**26 PPM** T°: 799–800 °C
T° final CO_2:	746 °C (13:00)
Flujo CO_2:	6 L/min
Duración periodo CO_2:	20 min (12:40 – 13:00)
Voltaje durante CO_2:	50 V
Purga final:	10 min con N_2 a 6 L/min (13:00 – 13:10)
Incidentes:	Ninguno.

.6.7. Bitácora N°7

Bitácora de Experimento — Tesis MEC			
Experimento N°: 7	**Fecha:** 03/06/2026		
Nombre del ensayo:	Monitoreo Térmico y Medición de Gases (O_2, CO, NO) en Reactor WS		
Objetivo:	Repetición del ensayo del 01/06 (N_2 40 min + CO_2 20 min). Interrupción por corte de resistencias de nuetro — reinicio desde 400 °C.		
Lugar / Sala:	Laboratorio de Termofluidos	**Hora inicio:** 08:15	

Instrumentos y Condiciones Iniciales			
Instrumento 1:	Analizador Testo 350 (O_2 / CO / NO) ±	**Instrumento 2:**	Variador de voltaje ±
Instrumento 3:	Medidor de corriente (3 fases) ±	**Instrumento 4:**	±
T° ambiente:	14,2 °C	**Flujo:**	6 L/min (N_2 y CO_2)

1. Verificación Previa al Experimento	
[ ]	Calibración y verificación de cero en todos los instrumentos realizada.
[ ]	Condiciones de seguridad verificadas (EPIs, ventilación, conexiones eléctricas).
[ ]	Muestras y reactivos rotulados y preparados correctamente.
[ ]	Condiciones ambientales estables y registradas.
[ ]	Protocolo experimental revisado y disponible.
[ ]	Reactor WS inspeccionado y en condiciones operativas.

2. Registro Cronológico del Experimento

Registre cada acción y medición de forma inmediata, con hora exacta. Una fila por evento.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
08:15	Inicio de purga con N_2. Calentamiento: 0 V → 70 V en 1 min. T° ambiente: 14,2 °C.	6	L/min	Rampa más rápida hasta la fecha: 1 min hasta 70 V.
08:16	Voltaje máximo alcanzado. Se mantiene en 70 V.	70	V	Límite de diseño: máx. 1030 W/resistencia × 3. No superar este voltaje.
08:39	Sistema alcanza 271 °C. Testo 350 encendido. Lectura de base.	271	°C	O_2: 12,38 %. CO: 0 PPM. NO: 0 PPM.
09:55	Sistema alcanza 700 °C. **INTERRUPCIÓN:** corte de resistencias de neutro por mala junta. Sistema detenido.	700	°C	Falla eléctrica: corte de resistencias de neutro. Se procede a revisión y reparación de la junta.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
11:10	Reinicio del sistema tras reparación. Reactor en caliente a 400 °C. Testo 350 reactivado.	400	°C	O_2: 12,40 %. CO: 0 PPM. NO: 0 PPM. Se retoma calentamiento hacia 800 °C.
13:08	Sistema alcanza 800 °C. Inicio periodo de reducción bajo N_2 (40 min). Lecturas Testo.	800	°C	O_2: 12,53 %. CO: 2 PPM. NO: 1 PPM. Cronómetro 40 min iniciado.
13:49	Fin periodo N_2 (40 min). Cambio de gas: $N_2 \rightarrow CO_2$. Reducción de potencia a 50 V. Inicio oxidación (20 min).	6	L/min	T° inicio CO_2: 823,5 °C. Lectura inicial: O_2: 12,49 %.
13:49	O_2 sube rápidamente en segundos tras inicio de CO_2.	823,5	°C	O_2 sube a 20,25 % en segundos. CO: 4–5 PPM. NO: 2 PPM. Reacción inmediata del CeO_2.
14:12	Fin del periodo de CO_2 (20 min aprox). Lecturas finales Testo 350.	720	°C	O_2: 10,78 %. CO: 8 PPM. NO: 2 PPM.
14:12	Voltaje reducido a 0 V. Corte alimentación eléctrica. Cambio $CO_2 \rightarrow N_2$. Inicio purga final.	6	L/min	Purga final con N_2: 10 min aprox.
∼14:22	Fin de purga final. Cierre de cilindro de N_2.	—	—	Experimento finalizado.
:				
:				

Resumen del Experimento

Resumen — Experimento N°7 — 03/06/2026	
T° ambiente:	14,2 °C
Base O_2 / CO / NO (08:39 — 271 °C):	12,38 % O_2 0 PPM CO 0 PPM NO
Interrupción:	Corte de resistencias de neutro (mala junta) a las 09:55 a 700 °C. Reinicio a las 11:10 desde 400 °C.
Base tras reinicio (11:10 — 400 °C):	12,40 % O_2 0 PPM CO 0 PPM NO
T° / lecturas a 800 °C (13:08):	12,53 % O_2 2 PPM CO 1 PPM NO
T° inicio CO_2 (13:49):	823,5 °C
O_2 / CO / NO inicio CO_2:	12,49 % O_2 → **20,25 %** en segundos 4–5 PPM CO 2 PPM NO
T° / lecturas finales (14:12):	720 °C 10,78 % O_2 8 PPM CO 2 PPM NO
Flujo CO_2:	6 L/min
Duración periodo CO_2:	20 min aprox. (13:49 – 14:12)
Voltaje durante CO_2:	50 V
Purga final:	10 min con N_2 a 6 L/min (∼14:12 – 14:22)
Incidentes:	Corte de resistencias de neutro por mala junta. Reparado y reiniciado.

.6.8. Bitácora N°8

Bitácora de Experimento — Tesis MEC			
Experimento N°: 8	**Fecha:** 04/06/2026		
Nombre del ensayo:	Monitoreo Térmico y Medición de Gases (O_2, CO, NO) en Reactor WS		
Objetivo:	Ciclo N_2 (40 min) + CO_2 (20 min). Seguimiento de evolución de CO y NO con Testo 350 desde 550 °C.		
Lugar / Sala:	Laboratorio de Termofluidos	**Hora inicio:** 08:39	

Instrumentos y Condiciones Iniciales			
Instrumento 1:	Analizador Testo 350 (O_2 / CO / NO) ±	**Instrumento 2:**	Variador de voltaje ±
Instrumento 3:	Medidor de corriente (3 fases) ±	**Instrumento 4:**	±
T° ambiente:	13,7 °C	**Flujo:**	6 L/min (N_2 y CO_2)

1. Verificación Previa al Experimento	
[ ]	Calibración y verificación de cero en todos los instrumentos realizada.
[ ]	Condiciones de seguridad verificadas (EPIs, ventilación, conexiones eléctricas).
[ ]	Muestras y reactivos rotulados y preparados correctamente.
[ ]	Condiciones ambientales estables y registradas.
[ ]	Protocolo experimental revisado y disponible.
[ ]	Reactor WS inspeccionado y en condiciones operativas.

2. Registro Cronológico del Experimento

Registre cada acción y medición de forma inmediata, con hora exacta. Una fila por evento.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
08:39	Inicio de purga con N_2. Calentamiento: 0 V → 70 V en 1 min. T° ambiente: 13,7 °C.	6	L/min	Rampa de calentamiento: 1 min hasta 70 V.
08:40	Voltaje máximo alcanzado. Se mantiene en 70 V.	70	V	Límite de diseño: máx. 1030 W/resistencia × 3. No superar este voltaje.
09:40	Sistema alcanza 550 °C. Testo 350 encendido. Lectura de base.	550	°C	O_2: 12,98 %. CO: — PPM. NO: — PPM. Sistema bajo atmósfera de N_2.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
11:07	Sistema alcanza 800 °C. Inicio periodo de reducción bajo N_2 (40 min). Lecturas Testo.	800	°C	O_2: 12,94 %. CO: 1 PPM. NO: 2 PPM. Cronómetro 40 min iniciado.
11:48	Fin periodo N_2 (40 min). Temperatura pico al cambio de gas. Lecturas Testo.	825,5	°C	O_2: 12,92 %. CO: 2 PPM. NO: 2 PPM.
11:48	Cambio de gas: $N_2 \rightarrow CO_2$. Reducción de potencia a 50 V. Inicio oxidación (20 min).	6	L/min	Voltaje bajado a 50 V. CO_2: 6 L/min. Cronómetro 20 min iniciado.
–:–	Pico máximo de CO durante el periodo de CO_2.	—	°C	**CO máx.: 11 PPM**. Registrado durante los 20 min de oxidación.
12:09	Fin del periodo de CO_2 (20 min). Lecturas finales Testo 350.	736	°C	O_2: 10,95 %. CO: 11 PPM. NO: 2 PPM.
12:09	Voltaje reducido a 0 V. Corte alimentación eléctrica. Cambio $CO_2 \rightarrow N_2$. Inicio purga final.	6	L/min	Purga final con N_2: 15 min.
12:24	Fin de purga final. Cierre de cilindro de N_2.	—	—	Experimento finalizado sin incidentes.
:				
:				

Resumen del Experimento

Resumen — Experimento N°8 — 04/06/2026	
T° ambiente:	13,7 °C
Base O_2 (09:40 — 550 °C):	12,98 % O_2
T° / lecturas a 800 °C (11:07):	12,94 % O_2 1 PPM CO 2 PPM NO
T° inicio CO_2 (11:48):	825,5 °C
O_2 / CO / NO inicio CO_2:	12,92 % O_2 2 PPM CO 2 PPM NO
CO máximo durante CO_2:	**11 PPM**
T° / lecturas finales (12:09):	736 °C 10,95 % O_2 11 PPM CO 2 PPM NO
Flujo CO_2:	6 L/min
Duración periodo CO_2:	20 min (11:48 – 12:09)
Voltaje durante CO_2:	50 V
Purga final:	15 min con N_2 a 6 L/min (12:09 – 12:24)
Incidentes:	Ninguno.

.6.9. Bitácora N°9

Bitácora de Experimento — Tesis MEC			
Experimento N°: 9	**Fecha:** 18/06/2026		
Nombre del ensayo:	Monitoreo Térmico y Medición de Gases (O_2, CO, NO) en Reactor WS — 80 V / Falla final de resistencias		
Objetivo:	Protocolo 40/20 min a 80 V (vs 70 V anteriores). Evaluar efecto de mayor potencia. Error de protocolo: cambio anticipado a CO_2 al alcanzar T° máxima. Falla final: rotura simultánea de las 3 resistencias por fatiga del material.		
Lugar / Sala:	Laboratorio de Termofluidos	**Hora inicio:** 09:54	

Instrumentos y Condiciones Iniciales			
Instrumento 1:	Analizador Testo 350 (O_2 / CO / NO) ±	**Instrumento 2:**	Variador de voltaje ±
Instrumento 3:	Registrador termocuplas (TC5–TC8) ±	**Instrumento 4:**	Microscopio (inspección post-falla) ±
T° ambiente:	16,8 °C	**Flujo:**	6 L/min (N_2 y CO_2)

1. Verificación Previa al Experimento	
[ ]	Calibración y verificación de cero en todos los instrumentos realizada.
[ ]	Condiciones de seguridad verificadas (EPIs, ventilación, conexiones eléctricas).
[ ]	Muestras y reactivos rotulados y preparados correctamente.
[ ]	Condiciones ambientales estables y registradas.
[ ]	Protocolo experimental revisado y disponible.
[ ]	Reactor WS inspeccionado y en condiciones operativas.

2. Registro Cronológico del Experimento

Registre cada acción y medición de forma inmediata, con hora exacta. Una fila por evento.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
09:54	Inicio de purga con N_2. Calentamiento: 0 V → 80 V en 8 min (+10 V/min). T° amb: 16,8 °C.	6	L/min	**Nuevo voltaje máximo: 80 V** (vs 70 V de experimentos anteriores).
09:57	Testo 350 encendido. Base O_2 atmosférica registrada.	—	—	O_2: ∼20,9 %. Base de aire puro previo a purga.
09:58	Purga N_2 establece atmósfera inerte. Baseline O_2 estabilizado.	—	—	O_2: ∼12,33 % (media). Confirmado por datos Excel.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
10:03	Voltaje máximo 80 V alcanzado. Corrientes medidas en 3 fases.	80	V	Corrientes: 16,1 A / 15,5 A / 16,2 A. Desbalance máx: 0,7 A.
11:22	TC7 alcanza 800 °C. Sistema continúa calentando bajo N_2.	800	°C	Confirmado por datos termocuplas. Se continúa sin cambio de gas.
12:14	**ERROR DE PROTOCOLO:** al alcanzar T° máxima se cambia a CO_2 anticipadamente en vez de continuar 40 min con N_2. Voltaje bajado a 50 V.	911,5	°C	T° máxima alcanzada: TC7=913 °C / TC8=861,5 °C. Debía continuar con N_2. Se continuó el ensayo con CO_2 de todas formas.
12:14	Inicio CO_2. Lecturas Testo al inicio. CO_2IR activo.	6	L/min	O_2: 12,44 % (sube a 14,84 % al inicio CO_2). CO: 2 PPM. NO: 2 PPM.
12:17	Pico máximo de CO durante el periodo de CO_2.	∼890	°C	**CO máx: 20 PPM** a las 12:17:19. CO_2IR máx: 31,74 %.
12:32	Fin del periodo de CO_2 (∼20 min). Lecturas finales Testo.	730	°C	O_2: 10,62 %. CO: 12 PPM. NO: 2 PPM. TC7=738 °C / TC8=711,5 °C.
12:32	Cambio $CO_2 \rightarrow N_2$. Inicio subida progresiva de voltaje: +10 V/min hacia 80 V.	6	L/min	Intento de nuevo ciclo de calentamiento post-CO_2.
–:–	**FALLA CRÍTICA:** al alcanzar 80 V las 3 resistencias se cortan simultáneamente.	80	V	Rotura simultánea de las 3 resistencias en la misma sección de cada ladrillo. Diagnóstico: fatiga máxima del material (Kanthal). Fin del experimento.
–:–	Inspección post-falla con microscopio. Fotografía de las secciones de rotura.	—	—	Imágenes tomadas para análisis de la sección de rotura y confirmación de mecanismo de falla por fatiga térmica.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
:				

Resumen del Experimento

Resumen — Experimento N°9 — 18/06/2026	
T° ambiente:	16,8 °C
Voltaje máximo:	**80 V** (nuevo máximo; experimentos anteriores a 70 V)
Corrientes (10:03):	16,1 A / 15,5 A / 16,2 A
Base O_2 Testo (09:57):	∼20,9 % (aire) → 12,33 % tras purga N_2
TC7 alcanza 800 °C:	11:22
T° máxima registrada:	TC7: 913 °C / TC8: 861,5 °C (12:14)
Error de protocolo (12:14):	Cambio anticipado a CO_2 al alcanzar T° pico. Debía continuar 40 min con N_2.
O_2 / CO / NO inicio CO_2:	12,44 % O_2 2 PPM CO 2 PPM NO
CO máximo (12:17):	**20 PPM** CO_2IR máx: 31,74 %
T° / lecturas finales CO_2 (12:32):	TC7: 738 °C O_2: 10,62 % CO: 12 PPM NO: 2 PPM
Flujo CO_2:	6 L/min
Duración periodo CO_2:	∼20 min (12:14 – 12:32)
Voltaje durante CO_2:	50 V
Falla final:	Rotura simultánea de las 3 resistencias Kanthal al intentar subir a 80 V post-CO_2. Punto de fatiga máxima del material. Fin de la campaña experimental.
Inspección:	Fotografía microscópica de la sección de rotura realizada.

.6.10. Bitácora N°10

Bitácora de Experimento — Tesis MEC	
Experimento N°: 10	**Fecha:** 23/07/2026
Nombre del ensayo:	Monitoreo Térmico y Medición de Gases (O_2, CO, NO) en Reactor WS + Cromatografía (min 7 CDS)
Objetivo:	Protocolo TRS 40 min + CDS 20 min con nuevo variador de voltaje (Variac original dañado). Toma de muestra cromatográfica en el minuto 7 del CDS. Verificar reproducibilidad del sistema tras reparación post-falla.
Lugar / Sala:	Laboratorio de Termofluidos **Hora inicio:** 08:30

Instrumentos y Condiciones Iniciales			
Instrumento 1:	Analizador Testo 350 (O_2 / CO / NO) ±	**Instrumento 2:**	Nuevo variador de voltaje (Variac original dañado) ±
Instrumento 3:	Registrador termocuplas TC3, TC4, TC5, TC6, TC7, TC8 ±	**Instrumento 4:**	Bomba extracción muestra cromatografía ±
T° ambiente:	16,5 °C	**Flujo:**	6 L/min (N_2 y CO_2)

1. Verificación Previa al Experimento	
[ ]	Calibración y verificación de cero en todos los instrumentos realizada.
[ ]	Condiciones de seguridad verificadas (EPIs, ventilación, conexiones eléctricas).
[ ]	Muestras y reactivos rotulados y preparados correctamente.
[ ]	Condiciones ambientales estables y registradas.
[ ]	Protocolo experimental revisado y disponible.
[ ]	Reactor WS inspeccionado y en condiciones operativas.

2. Registro Cronológico del Experimento

Registre cada acción y medición de forma inmediata, con hora exacta. Una fila por evento.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
08:30	Inicio de purga con N_2. Inicio del datalogger de termocuplas. TC operativas: TC3, TC5, TC6, TC7, TC8 (6 termocuplas reacondicionadas).	6	L/min	Nuevo variador de voltaje. Variac original dañado en experimento anterior (Exp. N°9).
08:30	**Parada 1 de calentamiento.** Corrientes y voltajes en las 3 fases.	—	—	I: 6,5 / 5,9 / 7,7 A. V: 18,8 / 18,8 / 21,2 V. Voltajes desiguales por características del nuevo variador.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
∼08:40	**Parada 2 de calentamiento** (+10 min). Subida de corriente.	—	—	I máx: 10,4 A. V máx: 27,9 V. *(Límite de diseño: $I \approx 15$ A.)*
∼08:50	**Parada 3 de calentamiento** (+10 min). Corrientes y voltaje máx.	—	—	I: 12 / 14,3 / 13 A. V máx: 38,6 V. Sistema en régimen de calentamiento estable.
09:08	Testo 350 encendido. **Lecturas anómalas detectadas** — equipo contaminado por uso previo con combustión de metano sin mantenimiento.	—	—	CO: 131 PPM. NO: 5 PPM. O_2: 12,44 %. Lecturas no representativas del sistema. El equipo se estabilizará progresivamente con el tiempo.
11:25	Sistema alcanza 744 °C (TC7). Inicio del periodo TRS bajo N_2 (40 min). Testo estabilizado.	744	°C	O_2: 12,04 %. CO: 11 PPM. NO: 6 PPM. Testo ya estabilizado. TC7=743,5 / TC8=733,0 °C (datos Excel).
12:06	Fin TRS (40 min). Cambio N_2 → CO_2. Inicio CDS (20 min). Corrientes bajadas.	6	L/min	Lecturas inicio CDS: O_2: 12,08 %. CO: 14 PPM. NO: 4 PPM. TC7=773 / TC8=763,5 °C. I: 10,5 / 9,5 / 9,4 A. V máx: 30,07 V (≈50 V equivalente).
12:13	**Extracción muestra cromatográfica.** Minuto 7 del CDS.	—	—	O_2: 10,78 %. CO: 44 PPM. NO: 4 PPM. CO_2IR: 32,95 %. TC7=756,5 / TC8=751,0 °C.
12:23	Pico máximo de CO durante el CDS.	—	°C	**CO máx: 54 PPM** a las 12:23:49. O_2 mín: 9,90 %.
12:26	Fin CDS (20 min). Lecturas finales Testo 350. Inicio purga final N_2 (12 min).	716	°C	O_2: 9,94 %. CO: 54 PPM. NO: 3 PPM. TC7=717,5 / TC8=711,5 °C.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
12:38	Fin de purga final (∼12 min). Cierre cilindro N_2.	—	—	Experimento finalizado. Muestra cromatográfica pendiente de análisis.
:				

Resumen del Experimento

Resumen — Experimento N°10 — 23/07/2026	
T° ambiente:	16,5 °C
Variador:	Nuevo variador (Variac original dañado desde Exp. N°9)
Termocuplas activas:	TC3, TC5, TC6, TC7, TC8 (6 reacondicionadas)
Calentamiento (3 paradas):	P1: I=6,5/5,9/7,7 A, V=18,8/18,8/21,2 V P2: I máx=10,4 A, V máx=27,9 V P3: I=12/14,3/13 A, V máx=38,6 V
Testo al inicio (09:08):	131 PPM CO / 5 PPM NO / 12,44 % O_2 — equipo contaminado (uso previo metano, sin mantenimiento). Descartar estos datos.
T° inicio TRS (11:25):	TC7=744 °C O_2: 12,04 % CO: 11 PPM NO: 6 PPM
T° inicio CDS (12:06):	TC7=773 °C O_2: 12,08 % CO: 14 PPM NO: 4 PPM
Corrientes CDS:	I: 10,5 / 9,5 / 9,4 A V máx: 30,07 V (≈10,7 A equiv. a 50 V)
Muestra cromatográfica (12:13, min 7):	O_2: 10,78 % CO: 44 PPM NO: 4 PPM CO_2IR: 32,95 % TC7=756,5 °C
CO máximo CDS (12:23):	**54 PPM** O_2 mín: 9,90 %
T° / lecturas finales CDS (12:26):	TC7=716 °C O_2: 9,94 % CO: 54 PPM NO: 3 PPM
Purga final:	12 min con N_2 a 6 L/min (12:26 – 12:38)
Cromatografía:	Muestra extraída en min 7 del CDS (12:13). Pendiente de análisis.
Incidentes:	Lecturas anómalas iniciales del Testo 350 (contaminación previa). Se estabilizó durante la fase TRS.

.6.11. Bitácora N°11

Bitácora de Experimento — Tesis MEC	
Experimento N°: 11	**Fecha:** 23/07/2026
Nombre del ensayo:	Monitoreo Térmico y Medición de Gases (O_2, CO, NO) en Reactor WS + Cromatografía (min 5 CDS)
Objetivo:	Protocolo TRS 40 min + CDS 20 min. Prueba continua mismo día que Exp. N°10, reactor iniciado en caliente. Toma de muestra cromatográfica en el minuto 5 del CDS.
Lugar / Sala:	Laboratorio de Termofluidos **Hora inicio:** 13:40

Instrumentos y Condiciones Iniciales			
Instrumento 1:	Analizador Testo 350 (O_2 / CO / NO) ±	**Instrumento 2:**	Nuevo variador de voltaje (Variac original dañado) ±
Instrumento 3:	Registrador termocuplas TC3, TC4, TC5, TC6, TC7, TC8 ±	**Instrumento 4:**	Bomba extracción muestra cromatografía ±
T° reactor al inicio:	TC7 = 452 °C *(reactor en caliente, ∼1,5 h tras fin Exp. N°10)*	**Flujo:**	6 L/min (N_2 y CO_2)

1. Verificación Previa al Experimento	
[ ]	Calibración y verificación de cero en todos los instrumentos realizada.
[ ]	Condiciones de seguridad verificadas (EPIs, ventilación, conexiones eléctricas).
[ ]	Muestras y reactivos rotulados y preparados correctamente.
[ ]	Condiciones ambientales estables y registradas.
[ ]	Protocolo experimental revisado y disponible.
[ ]	Reactor WS inspeccionado y en condiciones operativas.

2. Registro Cronológico del Experimento

Registre cada acción y medición de forma inmediata, con hora exacta. Una fila por evento.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
13:40	Inicio del datalogger de termocuplas. Inicio de calentamiento. Reactor en caliente (TC7=452 °C) tras ∼1,5 h del fin del Exp. N°10.	6	L/min	Sin rampa desde cero. Se aprovecha calor residual.
13:40	**Parada 1 de calentamiento.** Corriente y voltaje.	—	—	I máx: 7,7 A. V máx: 21,2 V.
13:52	**Parada 2 de calentamiento** (+10 min). Subida de corriente.	—	—	I máx: 10,4 A. V máx: 27,9 V.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
14:00	**Parada 3 de calentamiento** (+10 min). Corrientes y voltaje máx. Testo 350 encendido.	—	—	I: 14,8 / 12,1 / 13,0 A. V máx: 38,6 V. O_2: 10,57 %. CO: 2 PPM. NO: 0 PPM. *Lecturas adecuadas desde el inicio.*
15:28	Sistema alcanza 778,5 °C (TC7=778 °C). Inicio del periodo TRS bajo N_2 (40 min).	778,5	°C	O_2: 10,81 %. CO: 2 PPM. NO: 1 PPM. TC7=778 / TC8=768,5 °C. Cronómetro 40 min iniciado.
16:09	Fin TRS (40 min). Temperatura pico registrada. Cambio $N_2 \rightarrow CO_2$. Reducción corriente. Inicio CDS (20 min).	6	L/min	T° pico: TC7=815 °C / TC8=807,5 °C. Lecturas inicio CDS: O_2: 10,70 %. CO: 2 PPM. NO: 1 PPM. I: 10,3 / 9,2 / 9,4 A. V máx: 30,07 V.
16:14	**Extracción muestra cromatográfica.** Minuto 5 del CDS.	—	—	O_2: 9,98 %. CO: 28 PPM. NO: 1 PPM. CO_2IR: 35,50 %. TC7=802,5 / TC8=792,0 °C.
16:29	Fin CDS (20 min). Lecturas finales Testo. Inicio purga final N_2 (12 min).	745,5	°C	O_2: 9,09 %. CO: 23 PPM. NO: 2 PPM. TC7=746,5 / TC8=742 °C.
16:31	Pico máximo de CO durante CDS.	—	—	**CO máx: 68 PPM** a las 16:31:14. O_2: 9,04 %. CO_2IR máx: 36,50 %.
∼16:41	Fin de purga final (∼12 min). Cierre cilindro N_2.	—	—	Experimento finalizado. Muestra cromatográfica pendiente de análisis.
:				
:				

Resumen del Experimento

Resumen — Experimento N°11 — 23/07/2026	
T° reactor al inicio (13:40):	TC7 = 452 °C *(∼1,5 h tras fin del Exp. N°10)*
T° ambiente:	16,5 °C
Calentamiento (3 paradas):	P1 (13:40): I máx=7,7 A, V máx=21,2 V P2 (13:52): I máx=10,4 A, V máx=27,9 V P3 (14:00): I=14,8/12,1/13,0 A, V máx=38,6 V
Testo al inicio (14:00):	O_2: 10,57 % CO: 2 PPM NO: 0 PPM
T° inicio TRS (15:28):	TC7=778 °C O_2: 10,81 % CO: 2 PPM NO: 1 PPM
T° pico / inicio CDS (16:09):	TC7=815 °C / TC8=807,5 °C O_2: 10,70 % CO: 2 PPM NO: 1 PPM
Corrientes CDS:	I: 10,3 / 9,2 / 9,4 A V máx: 30,07 V (≈10,7 A equiv.)
Muestra cromatográfica (16:14, min 5):	O_2: 9,98 % CO: 28 PPM NO: 1 PPM CO_2IR: 35,50 % TC7=802,5 °C
T° / lecturas fin CDS (16:29):	TC7=746,5 °C O_2: 9,09 % CO: 23 PPM NO: 2 PPM
CO máximo CDS (16:31):	**68 PPM** CO_2IR máx: 36,50 %
Flujo CO_2:	6 L/min
Duración periodo CDS:	20 min (16:09 – 16:29)
Purga final:	12 min con N_2 a 6 L/min (∼16:29 – 16:41)
Cromatografía:	Muestra extraída en min 5 del CDS (16:14). Pendiente de análisis.
Incidentes:	Ninguno.

.6.12. Bitácora N°12

Bitácora de Experimento — Tesis MEC		
Experimento N°: 12	**Fecha:** 27/07/2026	
Nombre del ensayo:	Monitoreo Térmico y Medición de Gases (O_2, CO, NO) en Reactor WS	
Objetivo:	Protocolo TRS 40 min + CDS 20 min. Calentamiento escalonado con nuevo variador. Termocuplas activas: TC4, TC5, TC6, TC7, TC8 (TC9 no operativa).	
Lugar / Sala:	Laboratorio de Termofluidos	**Hora inicio:** 08:18

Instrumentos y Condiciones Iniciales			
Instrumento 1:	Analizador Testo 350 (O_2 / CO / NO) ±	**Instrumento 2:**	Nuevo variador de voltaje (Variac original dañado) ±
Instrumento 3:	Registrador termocuplas TC4, TC5, TC6, TC7, TC8 ±	**Instrumento 4:**	±
T° ambiente:	16,3 °C *(registrada por Testo 350)*	**Flujo:**	6 L/min (N_2 y CO_2)

1. Verificación Previa al Experimento	
[ ]	Calibración y verificación de cero en todos los instrumentos realizada.
[ ]	Condiciones de seguridad verificadas (EPIs, ventilación, conexiones eléctricas).
[ ]	Muestras y reactivos rotulados y preparados correctamente.
[ ]	Condiciones ambientales estables y registradas.
[ ]	Protocolo experimental revisado y disponible.
[ ]	Reactor WS inspeccionado y en condiciones operativas.

2. Registro Cronológico del Experimento

Registre cada acción y medición de forma inmediata, con hora exacta. Una fila por evento.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
08:18	Inicio del datalogger de termocuplas. Purga con N_2. T° reactor al inicio: TC7=50 °C.	6	L/min	T° ambiente: 16,3 °C (registrada por Testo). TC9 no operativa (lectura fija en 50 °C).
08:18	**Parada 1 de calentamiento.** Corrientes y voltajes en 3 fases.	—	—	I: 8,3 / 7,1 / 7,3 A. V máx: 22,79 V.
08:25	**Parada 2 de calentamiento** (+7 min). Subida de corriente.	—	—	I: 10,1 / 8,7 / 9,0 A. V máx: 27,76 V.
08:43	**Parada 3 de calentamiento** (+18 min). Corrientes y voltajes por fase.	—	—	I: 14,6 / 12,5 / 13,7 A. V: 42,3 / 40,9 / 41,6 V. Potencia total estimada: ∼1715 W.

Hora	Acción / Paso del Procedimiento	Medición	Unidad	Observación
08:40	Testo 350 encendido. Lectura de base.	—	—	O_2: 11,37 %. CO: 0 PPM. NO: 0 PPM. T° amb: 16,3 °C. *Lecturas adecuadas desde el inicio.*
11:21	Sistema alcanza 800 °C (TC7). Inicio del periodo TRS bajo N_2 (40 min). Lecturas Testo.	800	°C	O_2: 11,62 %. CO: 4 PPM. NO: 2 PPM. TC7=799 / TC8=794 °C. Cronómetro 40 min iniciado.
12:01	Fin TRS (40 min). Temperatura pico registrada. Cambio N_2 → CO_2. Reducción de corriente. Inicio CDS (20 min).	6	L/min	T° pico: TC7=844,5 °C / TC8=840 °C. Lecturas inicio CDS: O_2: 11,53 %. CO: 3 PPM. NO: 3 PPM.
12:02	CO_2IR activo. Corrientes y voltajes CDS registrados.	—	—	I: 10,4 / 9,3 / 9,6 A. V: 31,11 / 30,80 / 29,37 V. P estimada: ∼889 W. O_2 sube a 13,02 %.
12:21	Lecturas Testo al cierre del CDS.	—	°C	O_2: 10,68 %. CO: 21 PPM. NO: 2 PPM. CO_2IR: 31,09 %. TC7=777,5 / TC8=773,5 °C.
12:22	Pico máximo de CO durante el CDS.	—	—	**CO máx: 41 PPM** a las 12:22:55. O_2: 10,67 %. CO_2IR: 3,85 %.
12:26	Fin CDS (∼24 min). Inicio purga final con N_2. Lecturas Testo.	6	L/min	O_2: 10,46 %. CO: 15 PPM. NO: 3 PPM. CO_2IR: 0 %.
12:41	Fin de purga final (∼15 min). Cierre cilindro N_2.	—	—	Experimento finalizado sin incidentes.
:				
:				

Resumen del Experimento

Resumen — Experimento N°12 — 27/07/2026	
T° ambiente:	16,3 °C *(Testo 350)*
Termocuplas activas:	TC4, TC5, TC6, TC7, TC8 *(TC9 no operativa — lectura fija 50 °C)*
Calentamiento (3 paradas):	P1 (08:18): I=8,3/7,1/7,3 A, V máx=22,79 V P2 (08:25): I=10,1/8,7/9,0 A, V máx=27,76 V P3 (08:43): I=14,6/12,5/13,7 A, V=42,3/40,9/41,6 V
Base O_2 / CO / NO (08:40):	11,37 % O_2 0 PPM CO 0 PPM NO
T° / lecturas inicio TRS (11:21):	TC7=799 °C / TC8=794 °C O_2: 11,62 % CO: 4 PPM NO: 2 PPM
T° pico / inicio CDS (12:01–12:02):	TC7=844,5 °C / TC8=840 °C O_2: 11,53 % CO: 3 PPM NO: 3 PPM
Corrientes y voltajes CDS:	I: 10,4 / 9,3 / 9,6 A V: 31,11 / 30,80 / 29,37 V P≈889 W
O_2 al inicio CO_2IR activo (12:02):	13,02 % O_2 3 PPM CO 3 PPM NO
CO máximo CDS (12:22):	**41 PPM** O_2: 10,67 % CO_2IR: 3,85 %
T° / lecturas fin CDS (12:21):	TC7=777,5 °C / TC8=773,5 °C O_2: 10,68 % CO: 21 PPM NO: 2 PPM
Purga final (12:26 – 12:41):	O_2: 10,46 % CO: 15 PPM NO: 3 PPM Duración: ∼15 min
Flujo CO_2:	6 L/min
Duración periodo CDS:	∼24 min (12:02 – 12:26)
CO_2IR máx:	34,32 %
Cromatografía:	No realizada en este ensayo.
Incidentes:	TC9 no operativa. Sin otros incidentes.

Referencias

[1] Hakami, M.W., Hussain, A., Alasiri, H., Khan, W.U. (2022). *Thermocatalytic and solar thermochemical carbon dioxide utilization to solar fuels and chemicals: A review. Int. J. Energy Res.*, 46, 19924–19970. DOI: 10.1002/er.8702

[2] IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781009157896

[3] International Energy Agency (IEA). (2025). *Global Energy Review 2025*. IEA, Paris. Disponible en: www.iea.org/reports/global-energy-review-2025

[4] Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M.W. et al. (2024). *Global Carbon Budget 2024. Earth Syst. Sci. Data*. DOI: 10.5194/essd-2024-519

[5] Ministerio de Energía de Chile. (2020). *Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde: Chile, fuente energética para un planeta cero emisiones*. Santiago, Chile. Disponible en: energia.gob.cl/hidrogeno

[6] Climate Watch. (2024). *Historical GHG Emissions (1990–2023)*. World Resources Institute (WRI). Washington, D.C. Disponible en: www.climatewatchdata.org/ghg-emissions

[7] Boretti, A. (2021). *Technology Readiness Level of Solar Thermochemical Splitting Cycles. ACS Energy Lett.*, 6, 1170–1174. DOI: 10.1021/acsenergylett.1c00181

[8] Cheng, W.-H., de la Calle, A., Atwater, H.A., Stechel, E.B., Xiang, C. (2021). *Hydrogen from Sunlight and Water: A Side-by-Side Comparison between Photoelectrochemical and Solar Thermochemical Water-Splitting. ACS Energy Lett.*, 6, 3096–3113. DOI: 10.1021/acsenergylett.1c00893

[9] Falter, C., Pitz-Paal, R. (2018). *Energy analysis of solar thermochemical fuel production pathway with a focus on waste heat recuperation and vacuum generation. Sol. Energy*, 176, 230–240. DOI: 10.1016/j.solener.2018.10.042

[10] Wei, L., Pan, Z., An, L. (2025). *Two-step thermochemical cycle for solar fuel production from H_2O and CO_2: technological challenges and potential solutions. Chem. Commun.*, 61, 4897–4903. DOI: 10.1039/d5cc00262a

[11] Guo, Y., Chen, J., Song, H., Zheng, K., Wang, J., Wang, H., Kong, H. (2024). *A review of solar thermochemical cycles for fuel production. Appl. Energy*, 357, 122499. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.122499

[12] Abanades, S. (2022). *Redox Cycles, Active Materials, and Reactors Applied to Water and Carbon Dioxide Splitting for Solar Thermochemical Fuel Production: A Review. Energies*, 15, 7061. DOI: 10.3390/en15197061

[13] Safari, F., Dincer, I. (2020). *A Review and Comparative Evaluation of Thermochemical Water Splitting Cycles for Hydrogen Production. Energy Convers. Manag.*, 205, 112182. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.112182

[14] Carrillo, R.J., Scheffe, J.R. (2017). *Advances and Trends in Redox Materials for Solar Thermochemical Fuel Production. Sol. Energy*, 156, 3–20. DOI: 10.1016/j.solener.2017.05.032

[15] Pullar, R.C., Novais, R.M., Caetano, A.P.F., Barreiros, M.A., Abanades, S., Oliveira, F.A.C. (2019). *A Review of Solar Thermochemical CO_2 Splitting Using Ceria-Based Ceramics With Designed Morphologies and Microstructures. Front. Chem.*, 7:601. DOI: 10.3389/fchem.2019.00601

[16] Bhosale, R.R. (2023). *Recent Developments in Ceria-Driven Solar Thermochemical Water and Carbon Dioxide Splitting Redox Cycle. Energies*, 16, 5949. DOI: 10.3390/en16165949

[17] Abanades, S., Flamant, G. (2006). *Thermochemical hydrogen production from a two-step solar-driven water-splitting cycle based on cerium oxides. Sol. Energy*, 80, 1611–1623. DOI: 10.1016/j.solener.2005.12.005

[18] Chueh, W.C., Falter, C., Abbott, M., Scipio, D., Furler, P., Haile, S.M., Steinfeld, A. (2010). *High-Flux Solar-Driven Thermochemical Dissociation of CO_2 and H_2O Using Nonstoichiometric Ceria. Science*, 330, 1797–1801. DOI: 10.1126/science.1197834

[19] Chueh, W.C., Haile, S.M. (2010). *A thermochemical study of ceria: exploiting an old material for new modes of energy conversion and CO_2 mitigation. Phil. Trans. R. Soc. A*, 368, 3269–3294. DOI: 10.1098/rsta.2010.0114

[20] Le Gal, A., Abanades, S., Flamant, G. (2011). *CO_2 and H_2O Splitting for Thermochemical Production of Solar Fuels Using Nonstoichiometric Ceria and Ceria/Zirconia Solid Solutions. Energy Fuels*, 25, 4836–4845. DOI: 10.1021/ef200972r

[21] Muhich, C., Steinfeld, A. (2017). *Principles of doping ceria for the solar thermochemical redox splitting of H_2O and CO_2. J. Mater. Chem. A*, 5, 15578–15590. DOI: 10.1039/C7TA04000H

[22] Naghavi, S.S., Emery, A.A., Hansen, H.A., Zhou, F., Ozolins, V., Wolverton, C. (2017). *Giant onsite electronic entropy enhances the performance of ceria for water splitting. Nat. Commun.*, 8, 285. DOI: 10.1038/s41467-017-00381-2

[23] Arifin, D., Weimer, A.W. (2018). *Kinetics and mechanism of solar-thermochemical H_2 and CO production by oxidation of reduced CeO_2. Sol. Energy*, 160, 178–185. DOI: 10.1016/j.solener.2017.11.075

[24] Furler, P., Scheffe, J., Gorbar, M., Moes, L., Vogt, U., Steinfeld, A. (2012). *Solar thermochemical CO_2 splitting utilizing a reticulated porous ceria redox system. Energy Fuels*, 26, 7051–7059. DOI: 10.1021/ef3013757

[25] Furler, P., Scheffe, J., Marxer, D., Gorbar, M., Bonk, A., Vogt, U., Steinfeld, A. (2014). *Thermochemical CO_2 splitting via redox cycling of ceria reticulated foam structures with dual-scale porosities. Phys. Chem. Chem. Phys.*, 16, 10503–10511. DOI: 10.1039/C4CP01172D

[26] Marxer, D., Furler, P., Takacs, M., Steinfeld, A. (2017). *Solar thermochemical splitting of CO_2 into separate streams of CO and O_2 with high selectivity, stability, conversion, and efficiency. Energy Environ. Sci.*, 10, 1142–1149. DOI: 10.1039/C6EE03776C

[27] Takacs, M., Ackermann, S., Bonk, A., Neises-von Puttkamer, M., Haueter, P., Scheffe, J.R., Vogt, U.F., Steinfeld, A. (2017). *Splitting CO_2 with a ceria-based redox cycle in a solar-driven thermogravimetric analyzer. AIChE J.*, 63, 1263–1271. DOI: 10.1002/aic.15501

[28] Ackermann, S., Takacs, M., Scheffe, J., Steinfeld, A. (2017). *Reticulated porous ceria undergoing thermochemical reduction with high-flux irradiation. Int. J. Heat Mass Transf.*, 107, 439–449. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.032

[29] Bulfin, B., Lowe, A.J., Keogh, K.A., Murphy, B.E., Lübben, O., Krasnikov, S.A., Shvets, I.V. (2013). *Analytical Model of CeO_2 Oxidation and Reduction. J. Phys. Chem. C*, 117, 24129–24137. DOI: 10.1021/jp406578z

[30] Scheffe, J.R., Steinfeld, A. (2014). *Oxygen exchange materials for solar thermochemical splitting of H_2O and CO_2: a review. Mater. Today*, 17, 341–348. DOI: 10.1016/j.mattod.2014.04.025

[31] Zhu, L., Lu, Y., Li, F. (2018). *Reactivity of Ni, Cr and Zr doped ceria in CO_2 splitting for CO production via two-step thermochemical cycle. Int. J. Hydrogen Energy*, 43, 13754–13763. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.05.094

[32] Falter, C., Pitz-Paal, R. (2018). *Energy analysis of solar thermochemical fuel production pathway with a focus on waste heat recuperation and vacuum generation. Sol. Energy*, 176, 230–240. DOI: 10.1016/j.solener.2018.10.042

[33] Romero, M., Steinfeld, A. (2012). *Concentrating solar thermal power and thermochemical fuels. Energy Environ. Sci.*, 5, 9234–9245. DOI: 10.1039/C2EE21275G

[34] Boretti, A. (2021). *Technology Readiness Level of Solar Thermochemical Splitting Cycles. ACS Energy Lett.*, 6, 1170–1174. DOI: 10.1021/acsenergylett.1c00181

[35] Davis, S.J., Lewis, N.S., Shaner, M. et al. (2018). *Net-Zero Emissions Energy Systems. Science*, 360, eaas9793. DOI: 10.1126/science.aas9793

[36] Cheng, W.-H., de la Calle, A., Atwater, H.A., Stechel, E.B., Xiang, C. (2021). *Hydrogen from Sunlight and Water: A Side-by-Side Comparison between Photoelectrochemical and Solar Thermochemical Water-Splitting. ACS Energy Lett.*, 6, 3096–3113. DOI: 10.1021/acsenergylett.1c00893

[37] Porras Vera, C. (2024). *Diseño, construcción e implementación de un reactor solar para la producción de hidrógeno verde y monóxido de carbono a partir de agua y dióxido de carbono.* Memoria de Título, Ing. Civil Mecánica, UTFSM, Valparaíso, 2024.

[38] Rojas, P., Alegría, N., Toledo, M. (2025). *Numerical and experimental investigation of a two-stage thermochemical water-splitting reactor based on a cerium oxide reduction–oxidation cycle. Energy Convers. Manag.*, 323, 119217. DOI: 10.1016/j.enconman.2024.119217

[39] Testo SE & Co. KGaA. (2024). *testo 350 — Analizador portátil de emisiones: Ficha técnica.* Sensor CO rango bajo: 0–500 ppm, resolución 0.1 ppm, exactitud ±5 ppm o ±5 % de la lectura. Disponible en: www.testo.com

[40] Skoog, D.A., Holler, F.J., Crouch, S.R. (2018). *Principles of Instrumental Analysis* (7ª ed.). Cengage Learning, Boston, MA.

[41] H. S. Fogler, *Elements of Chemical Reaction Engineering*, 5ª ed. Boston: Prentice Hall, 2016.