



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA


ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial
y Diseño Industrial

ANÁLISIS DE UN BANCO DE GASES SINTÉTICOS PARA
EL ENSAYO DE CELDAS DE PILAS DE COMBUSTIBLE
DE HIDRÓGENO.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: Currás Vallejos, Olga

Tutor/a: Morena Borja, Joaquín de la

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial



Clean Mobility & Thermofluids

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AEROSPAECIAL Y
DISEÑO INDUSTRIAL

ANÁLISIS DE UN BANCO DE GASES SINTÉTICOS PARA EL ENSAYO DE CELDAS DE PILAS DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO

GRADO EN INGENIERÍA AEROSPAECIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

AUTORA:

Olga Currás Vallejos

TUTOR:

Joaquín de la Morena Borja

CURSO ACADÉMICO:

2023/2024

Valencia, Julio de 2024

Agradecimientos

Primero quiero darle las gracias a mi tutor, Joaquín, porque sin él este Trabajo no hubiera salido a delante y ha estado ahí para ayudarme en todo momento.

Quiero agradecerse a mi familia, porque sin ellos no habría llegado a donde estoy ahora. Son mi apoyo fundamental, para lo bueno y para lo malo, y siempre están a mi lado cuando lo necesito, aunque muchas veces pase de ellos.

También a mis amigos de Valencia, porque han hecho que me sienta como en casa. En especial quiero darles las gracias a mis compañeros de clase, porque sin ellos no me hubiera sacado la carrera, me han ayudado siempre que lo he necesitado, que han sido muchas veces.

De igual modo quiero darles las gracias a mis amigos de Almería, porque no importa cuantos meses nos pasemos sin vernos, cuando estamos juntos siento que no ha pasado el tiempo.

Me gustaría agradecerse también a Diego. Estos años en Valencia han sido especiales gracias a que has estado a mi lado y guardare todos estos recuerdos con mucho cariño.

Finalmente, y en especial, quiero darle las gracias a la persona más maravillosa que ha existido. Me ha convertido en la persona que soy ahora, me ha hecho ver la vida de otra forma, y no puedo agradecerle lo suficiente todo lo que me ha dado. Te quiero mucho Irene, nunca me olvidaré de ti.

Resumen

La cada vez mayor restricción en las emisiones gaseosas en el transporte ha llevado a potenciar el desarrollo de sistemas de propulsión eléctrica. Sin embargo, el uso de sistemas puramente eléctricos basados en baterías presenta desventajas en cuanto a densidad energética, peso y tiempos de recarga, que son críticos para algunas aplicaciones. Por este motivo, en los últimos años se ha potenciado el desarrollo de las pilas de combustible de hidrógeno como una alternativa limpia y eficiente para el futuro. Durante el desarrollo de estos sistemas, es habitual la realización de ensayos en pilas de pequeña escala, de modo que se pueda evaluar el impacto de aspectos como los materiales o configuración de los distintos componentes elementales a un coste reducido. Para ello, en el Instituto Universitario CMT-Clean Mobility & Thermofluids se ha desarrollado un banco de gases sintéticos que permite evaluar experimentalmente este tipo de sistemas, con capacidad para controlar de forma precisa la composición de las corrientes gaseosas de alimentación. En el presente trabajo se efectuará un análisis detallado de la operación de dicho banco mediante el uso de una herramienta de simulación denominada VEMOD, también desarrollada en el Instituto. Dicho modelo será calibrado y validado a partir de datos experimentales en diferentes condiciones de humedad, temperatura, presión y composición de las corrientes gaseosas, centradas fundamentalmente sobre la estabilización de los diferentes sistemas relacionados. Finalmente, se juzgará la capacidad del banco para reproducir variaciones dinámicas de dichos parámetros similares a las de operación real en vehículo.

Abstract

Increasing restrictions on gaseous emissions in transport have led to the development of electric propulsion systems. However, the use of purely electric systems based on batteries has disadvantages in terms of energy density, weight and recharge times, which are critical for some applications. For this reason, the development of hydrogen fuel cells has been boosted in recent years as a clean and efficient alternative for the future. During the development of these systems, it is common to carry out tests on small-scale cells, so that the impact of aspects such as materials or configuration of the different elementary components can be evaluated at a reduced cost. To this end, a synthetic gas bench has been developed at the CMT-Clean Mobility & Thermofluids University Institute to experimentally evaluate this type of system, with the capacity to precisely control the composition of the gaseous feed streams. In this work, a detailed analysis of the operation of this bench will be carried out using a simulation tool called VEMOD, also developed at the Institute. This model will be calibrated and validated based on experimental data under different conditions of humidity, temperature, pressure and composition of the gaseous currents, focusing mainly on the stabilisation of the different related systems. Finally, the ability of the bench to reproduce dynamic variations of these parameters similar to a real vehicle operation will be judged.

Resum

La cada vegada major restricció en les emissions gasoses en el transport ha portat a potenciar el desenvolupament de sistemes de propulsió elèctrica. No obstant això, l'ús de sistemes purament elèctrics basats en bateries presenta desavantatges quant a densitat energètica, pes i temps de recàrrega, que són crítics per a algunes aplicacions. Per este motiu, en els últims anys s'ha potenciat el desenvolupament de les piles de combustible d'hidrogen com una alternativa neta i eficient per al futur. Durant el desenvolupament d'estos sistemes, és habitual la realització d'assajos en piles de xicoteta escala, de manera que es puga avaluar l'impacte d'aspectes com els materials o configuració dels diferents components elementals a un cost reduït. Per a això, en l'Institut Universitari CMT-Clean Mobility & Thermofluids s'ha desenvolupat un banc de gasos sintètics que permet avaluar experimentalment este tipus de sistemes, amb capacitat per a controlar de manera precisa la composició dels corrents gasosos d'alimentació. En el present treball s'efectuarà una anàlisi detallada de l'operació d'este banc mitjançant l'ús d'una ferramenta de simulació denominada VEMOD, també desenvolupada en l'Institut. Este model serà calibrat i validat a partir de dades experimentals en diferents condicions d'humitat, temperatura, pressió i composició dels corrents gasosos, centrades fonamentalment sobre l'estabilització dels diferents sistemes relacionats. Finalment, es jutjarà la capacitat del banc per a reproduir variacions dinàmiques d'estos paràmetres similars a les d'operació real en vehicle.

Índice

I. Memoria	
1	Introducción 21
1.1	Marco global..... 21
1.2	Motivación..... 23
1.3	Objetivos..... 23
1.4	Estructura..... 24
2	Marco teórico..... 26
2.1	Pilas de hidrógeno 27
2.1.1	¿Qué es una pila de hidrógeno?..... 27
2.1.2	Partes y componentes..... 27
2.1.3	¿Cómo funciona?..... 28
2.1.4	Tipos de pilas de combustible 29
2.1.5	Ventajas e inconvenientes..... 30
2.1.6	Aplicaciones presentes 31
2.1.7	Aplicaciones en la industria aeronáutica 32
2.1.8	PEMFC JRC ZERO ∇ CELL..... 33
2.1.8.1	Criterios de diseño..... 33
2.1.8.2	Condiciones operacionales..... 34
2.1.8.3	Membrane Electrode Assembly (MEA) 34
2.1.8.4	Montaje PEMFC JRC ZERO ∇ CELL 35
2.2	Banco de gases sintéticos..... 38
2.2.1	¿Qué es un banco de gases sintéticos?..... 38
2.2.2	Partes y componentes..... 38
2.2.3	¿Cómo funciona?..... 40
3	Herramientas y metodología..... 41

3.1	Definición de las necesidades del banco de ensayo.....	42
3.2	Simulación: VEMOD.....	46
3.2.1	Diseño del banco de gases sintéticos por simulación.....	47
3.2.1.1	Definición de los gases y sus condiciones iniciales.....	47
3.2.1.2	Componentes de la simulación.....	48
3.2.2	Entorno de gas	49
3.2.2.1	Línea cátodo.....	50
3.2.2.2	Línea ánodo.....	50
3.2.3	Circuito de control	51
3.3	Experimental: banco de gases sintéticos.....	53
3.3.1	Especificaciones del banco de trabajo.....	53
3.3.2	Línea cátodo.....	54
3.3.3	Línea ánodo.....	54
3.4	Otras herramientas.....	55
3.4.1	Matlab.....	55
3.4.2	Excel	56
3.4.3	Statgraphics	57
4	Resultados.....	58
4.1	Factores considerados durante el estudio.....	59
4.2	Limitaciones y condicionantes del estudio	59
4.3	Análisis de los resultados obtenidos mediante la simulación.....	64
4.3.1	Metodología del análisis paramétrico	64
4.3.2	Estudio paramétrico de las condiciones de operación.....	66
4.3.2.1	Análisis de la Varianza de las condiciones de operación	69
4.3.3	Estudio paramétrico del diseño del banco.....	73
4.3.3.1	Análisis de la Varianza de los parámetros de diseño.....	76
4.3.3.2	Análisis de Regresión de los parámetros de diseño	78
4.4	Análisis de los resultados obtenidos experimentalmente.....	82

5	Conclusiones.....	84
5.1	Solución adoptada.....	84
5.2	Soluciones alternativas	86
5.3	Trabajos futuros.....	86
II. Pliego de condiciones		
1	Introducción y objeto	91
2	Condiciones de los componentes.....	93
2.1	Descripción pliego de condiciones de los componentes	93
2.2	Control de calidad.....	93
2.3	Componentes banco de gases sintéticos.....	94
2.4	Equipos informáticos	94
3	Condiciones del entorno de trabajo	95
3.1	Descripción pliego condiciones del entorno de trabajo.....	95
3.2	Condiciones de la sala del banco de ensayos.....	95
3.2.1	Condiciones del área experimental	95
3.2.2	Normativas de operación de la sala.....	96
3.3	Condiciones de la sala de análisis de los resultados.....	97
3.3.1	Ergonomía.....	98
3.3.2	Condiciones del ambiente de la sala	99
3.4	Instalaciones eléctricas	100
3.5	Medidas de emergencia.....	100
4	Puesta en servicio y ajustes finales.....	101
4.1	Condiciones del uso del banco de gases sintéticos.....	101
4.1.1	Instalación.....	101
4.1.2	Puesta en marcha y apagado.....	101
4.1.3	Mantenimiento	102
4.2	Marco legal para el uso del banco de pruebas	103

III. Presupuesto

1	Introducción y objeto	107
2	Costes del proyecto.....	108
2.1	Costes equipos y sistemas informáticos	108
2.2	Costes del personal.....	110
3	Presupuesto del proyecto.....	111
3.1	Parte experimental.....	111
3.2	Parte computacional.....	111
3.3	Presupuesto total	113
	Bibliografía	115

IV. Anexo

A.	Códigos de Matlab	121
▪	Código para analizar variables simulación	121
▪	Código para los estudios paramétricos.....	123
▪	Código para el cálculo del tiempo de establecimiento.....	124
▪	Código para graficar los ensayos del banco.....	125
B.	Resultados y análisis de los estudios paramétricos	127
▪	Estudio paramétrico de las condiciones de operación.....	127
▪	ANOVA multifactorial de las condiciones de operación	139
▪	Estudio paramétrico del diseño del banco.....	141
▪	ANOVA multifactorial de los parámetros de diseño.....	153
▪	Modelo Regresión Múltiple de los parámetros de diseño.....	157
C.	Relación del Trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030	162

Índice de figuras

Figura 2.1. Componentes básicos de una pila de hidrógeno. [6]	27
Figura 2.2. Esquema funcionamiento de una pila de combustible. [8].....	28
Figura 2.3. Presentación del proyecto ZEROe de Airbus. [13]	33
Figura 2.4. Esquema del área activa del MEA. [14]	35
Figura 2.5. Montaje PEMFC JRC ZEROCELL: a) vista completa, b) equipo ánodo, c) equipo cátodo. [14]	36
Figura 2.6. Generador de gas del banco de gases sintéticos.	38
Figura 2.7. Horno del banco de gases sintéticos.....	39
Figura 2.8. Tubería calefactada grande.....	39
Figura 2.9. Humidificador P-serie.....	39
Figura 2.10. Horiba Mexa 730λ	39
Figura 2.11. Micro GC Agilent 990.....	40
Figura 2.12. FTIR MSK 2030.....	40
Figura 3.1. Esquema inicial del concepto del banco de ensayos.	43
Figura 3.2. Correcciones sobre el esquema inicial del banco de ensayos.....	44
Figura 3.3. Esquema final del banco de ensayos para pilas de combustible.	45
Figura 3.5. Logo de la plataforma de simulación VEMOD.	46
Figura 3.6. Esquema del entorno de gas del banco de gases sintéticos.....	49
Figura 3.7. Circuito de control para la simulación del banco de trabajo.	52
Figura 4.1. Resultados obtenidos con el problema de presurizado del ánodo.....	60
Figura 4.2. Comparación resultados calor y humedad al aislar la tubería.	61
Figura 4.3. Respuesta del actuador en el Caso 1 para el estudio de las condiciones de operación.	68
Figura 4.4. Respuesta de los PIDs en el Caso 1 para las condiciones de operación.....	68
Figura 4.5. Gráfico de Residuos para la Humedad en el cátodo.	70
Figura 4.6. Respuesta del actuador en el Caso 1 para los parámetros de diseño. ...	75
Figura 4.7. Respuesta de los PIDs en el Caso 1 para los parámetros de diseño.....	75
Figura 4.8. Comparación respuestas de los sensores de temperatura.....	82
Figura 4.9. Comparación respuestas de los sensores de humedad.....	82

Índice tablas

I. Memoria

Tabla 2.1. Comparación entre los distintos tipos de pilas de combustible.	30
Tabla 2.2. Ventajas e inconvenientes de las pilas de hidrógeno.	31
Tabla 2.3. Condiciones operacionales para PEMFC JRC ZEROVCELL.	34
Tabla 2.4. Componentes PEMFC JRC ZEROVCELL.	37
Tabla 3.1. Composición de los gases en los distintos entornos de la simulación.	47
Tabla 3.2. Condiciones iniciales de los gases según su entorno.	47
Tabla 3.3. Componentes de la simulación del banco de gases sintéticos.	49
Tabla 3.4. Requisitos del banco para configurar la PEMFC JRC ZEROVCELL. ...	54
Tabla 4.1. Condiciones de contorno de la simulación.	61
Tabla 4.2. Parámetros de diseño del banco en la simulación.	62
Tabla 4.3. Valores objetivo establecidos en los PIDs de la simulación.	62
Tabla 4.4. Valores de los PIDs de los parámetros de estudio.	63
Tabla 4.5. Matriz ortogonal de Taguchi para 5 parámetros con 3 niveles.	65
Tabla 4.6. Valores estudio paramétrico de las condiciones de operación del banco.	66
Tabla 4.7. Matriz ortogonal de Taguchi para las condiciones de operación.	67
Tabla 4.8. Tiempos de establecimiento para las condiciones de operación.	69
Tabla 4.9. Resumen del ANOVA Multifactorial para la Humedad L1.	70
Tabla 4.10. Dependencia de las variables respecto a las condiciones de operación.	71
Tabla 4.11. Valores estudio paramétrico de los parámetros de diseño del banco.	73
Tabla 4.12. Matriz ortogonal de Taguchi para los parámetros de diseño.	74
Tabla 4.13. Tiempos de establecimiento para los parámetros de diseño.	76
Tabla 4.14. Dependencia de las variables respecto a los parámetros de diseño.	77
Tabla 4.15. Análisis de Varianza del modelo para el Caudal N2.	78
Tabla 4.16. Resultados del Análisis de Regresión para el Caudal N2.	79
Tabla 4.17. Valor-P de los parámetros del modelo del Caudal N2.	79
Tabla 4.18. Comparación tiempos de establecimiento de la temperatura y la humedad.	83

III. Presupuesto

Tabla 2.1. Precio de los componentes y total de la pila de combustible.	108
Tabla 2.2. Costes del equipo del banco de gases sintéticos.	109
Tabla 2.3. Costes de los sistemas informáticos y licencias.	110
Tabla 2.4. Costes del personal.	110
Tabla 3.1. Presupuesto parte experimental del proyecto.....	111
Tabla 3.2. Presupuesto parte computacional del proyecto.	112
Tabla 3.3. Presupuesto total del Trabajo.....	113

Lista de símbolos

Símbolo	SI	Descripción
H ₂	[-]	Hidrógeno
O ₂	[-]	Oxígeno
N ₂	[-]	Nitrógeno
H ₂ O	[-]	Agua
CO ₂	[-]	Dióxido de carbono
H ⁺	[-]	Protón de Hidrógeno
e ⁻	[-]	Electrón
I	[mA/cm ²]	Intensidad
λ	[-]	Estequiometría del gas
K	[-]	Constante del caudal
S _{cell}	[cm ²]	Superficie de la celda
PM	[g/mol]	Peso molar
F	[C/mol]	Constante de Faraday
ṁ	[kg/s]	Caudal másico

Lista de abreviaturas

Abreviatura	Descripción
UE	Unión Europea
AFC	Alcaline Fuel Cell
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
MCFC	Molten carbonate fuel cell
PAFC	Phosphoric acid fuel cell
JRC	Joint Research Centre
MEA	Membrane Electrode Assembly
CCM	Catalyst Coated Membrane
GDL	Gas Diffusion Layers
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
ppm	Partes por millón
SCR	Selective Catalytic Reduction
ATS	After-Treatment System
ECU	Electronic Control Unit
PID	Proportional–Integral–Derivative controller
CSV	Código Seguro de Verificación
L1	Línea cátodo
L2	Línea ánodo
ANOVA	Analysis Of Variance
MAE	Mean Absolute Error
FW	Durbin-Watson
EULA	End-User License Agreement
NBE	Norma Básica de Edificación
CTE	Código Técnico de Edificación

NTP	Notas Técnicas de Prevención
INSST	Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo
BOE	Boletín Oficial del Estado
REBT	Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión
PRTR	Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia
PEM	Presupuesto de Ejecución Material
GG	Gastos Generales
BI	Beneficio Industrial
PEC	Presupuesto de Ejecución por Contrata
IVA	Impuesto sobre el Valor Añadido
EPDM	Etileno Propileno Dieno tipo M ASTM
PTFE	Politetrafluoroetileno
ODS	Objetivos del Desarrollo Sostenible

Parte I.
Memoria

1 Introducción

En este apartado se trata de exponer una visión general del contexto del presente trabajo. Primero se presentará el marco global en el que se encuentra actualmente la industria de las pilas de combustible. Después, se explicará cuál es la motivación por la cual se está realizando este estudio y se establecerán los objetivos que se desean conseguir con este. Finalmente se describirá la estructura en la que se divide el trabajo para entender el proceso seguido durante el desarrollo del estudio.

Contenido

1.1	Marco global.....	21
1.2	Motivación.....	23
1.3	Objetivos.....	23
1.4	Estructura.....	24

1.1 Marco global

En la actualidad, uno de los problemas crecientes más alarmantes es el cambio climático. En tan solo unos años, las leyes medioambientales han aumentado sus restricciones, convirtiéndose en una de las principales preocupaciones de las industrias. Sin querer dejar de lado la eficiencia y el beneficio económico, las empresas buscan nuevas alternativas con las que conseguir reducir el impacto medioambiental. Por ello, numerosas compañías han empezado a invertir en el desarrollo de nuevas tecnologías capaces de disminuir las emisiones contaminantes y el consumo de combustible.

En la Unión Europea, la política medioambiental se remonta a 1972, cuando se celebró el Consejo Europeo en París. En este se manifestó la necesidad de un programa de acción que estableciese una política comunitaria en materia del medio ambiente. Este cambio llegó en 1987, cuándo se introdujo la primera base jurídica respecto al medio ambiente en el Acta Única Europea. Tras numerosos tratados, como el de Tratado de Ámsterdam en 1999 o el de Lisboa en 2009, se ha logrado un gran avance, convirtiendo a la UE en el líder mundial en el frente medioambiental. En 2019, la Comisión puso en marcha el Pacto Verde Europeo, un conjunto de

iniciativas que buscan situar a Europa en el camino hacia una transición ecológica, con el objetivo de lograr la neutralidad climática en 2050. Para ello, en 2021, se adoptó el Reglamento sobre el clima, el cual obliga a la UE a alcanzar la neutralidad en 2050, además de establecer un nuevo objetivo para 2030, conseguir reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero en un 55% respecto a los niveles en 1990. [1] [2]

Para lograr una neutralidad climática, la investigación ha puesto su mira hacia nuevas alternativas capaces de producir cero emisiones, siendo el foco principal la electricidad. Gracias a la energía eléctrica se han desarrollado los motores eléctricos, los cuales generan potencia sin necesidad de emitir gases nocivos, a diferencia de los motores de combustión.

Para poder generar esa potencia, los motores eléctricos necesitan de una fuente que les suministre energía, la cual puede provenir de baterías o de pilas de combustible. Las baterías transforman la energía química en eléctrica, almacenando esa energía y posteriormente suministrándola, dependiendo de su capacidad de carga. De forma análoga, las pilas de combustible se tratan de dispositivos electroquímicos de conversión energética, convirtiendo la energía química en electricidad. [3] [4]

Sin embargo, a diferencia de las baterías, una pila de combustible no necesita ser recargada ni se agota, gracias a que puede funcionar siempre que exista un flujo de reactivos. Las pilas de hidrógeno presentan una alta eficiencia sin comprometer la seguridad del medioambiente, por lo que se han convertido en una de las alternativas predilectas a la hora de sustituir a los combustibles convencionales. [4]

No obstante, las pilas de combustible presentan diversos inconvenientes. Actualmente tienen un coste muy elevado, debido a que se fabrican con materiales costosos y no es fácil encontrar hidrógeno como combustible. Además, presentan una vida útil corta y una robustez escasa, ya que son muy sensibles a la contaminación y a la temperatura. [5]

Aunque la industria del hidrógeno hoy en día es limitada, está en continuo desarrollo para lograr que las pilas de combustible sean más accesibles. Los centros de investigación buscan mejorar su fiabilidad y su seguridad, además de conseguir aumentar su eficiencia. El objetivo principal del desarrollo de estas nuevas alternativas es poder prescindir de los antiguos medios de combustión y pasar al uso exclusivo de estos dispositivos cero emisiones y renovables.

1.2 Motivación

Como se ha explicado anteriormente, para poder alcanzar el objetivo de la neutralidad climática en 2050 es necesario el desarrollo y la implementación de alternativas limpias como las pilas de combustible. Para poder avanzar en su investigación, es vital conseguir una uniformidad a la hora de experimentar con la pila, ya que según la configuración del *hardware* de prueba y de las condiciones de trabajo, los resultados obtenidos pueden presentar diferentes rendimientos.

Así pues, con este Trabajo Final de Grado se busca analizar el banco de trabajo con el que se realizarán las pruebas sobre la pila, con el objetivo de lograr optimizar el proceso del estudio. Para ello, se profundizará en cómo funciona una pila de hidrógeno y cuáles son las condiciones idóneas para poder conseguir un rendimiento óptimo de la pila dentro de un rango práctico y realista. También se analizará el funcionamiento y la estructura del banco de trabajo, para poder extrapolar su diseño a la simulación, con la que se estudien los resultados deseados con el fin de agilizar la realización posteriormente de los experimentos.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Final de Grado es construir un gemelo digital de una instalación para ensayo de monoceldas de pilas de combustible basado en un banco de gases sintéticos, que sirva como plataforma base para diseñar y testear mejoras en la configuración de dicho banco orientadas a mejorar su comportamiento dinámico. Para poder alcanzar este objetivo, se plantearán una serie de objetivos secundarios que establezcan un desarrollo continuo y pautado del estudio, los cuales se describen a continuación.

- Entender el funcionamiento y los requisitos que presentan la pila de combustible que se empleará durante la investigación.
- Comprender la estructura y el funcionamiento del banco de gases sintéticos, así como los protocolos necesarios para su ejecución.
- Aprender a utilizar VEMOD, programa de simulación de dinámica de fluidos y de termodinámica.
- Desarrollar un esquema del banco de trabajo e implementar su diseño de forma simulada mediante el programa VEMOD.

- Analizar los resultados obtenidos en las simulaciones y calibrar los controladores de caudal, temperatura y fracción molar para obtener valores que generen un establecimiento más rápido y robusto de los PIDs.
- Emplear los programas de Matlab y Excel para poder analizar los resultados obtenidos en las simulaciones y ajustar el modelo.
- Realizar un estudio paramétrico de las condiciones operacionales y otro de los parámetros de diseño del banco de gases sintéticos.
- Analizar los resultados de ambos estudios mediante Matlab y Statgraphics para observar la correlación entre los parámetros estudiados y como afecta la variación de estos sobre el control del banco.
- Validar el modelo desarrollado con VEMOD mediante los resultados obtenidos experimentalmente en el banco de trabajo para poder mejorar su fiabilidad.
- Usar el modelo desarrollado en VEMOD para guiar y optimizar el diseño físico del banco de gases sintéticos.

1.4 Estructura

La división de este Trabajo Final de Grado se acoge a las directrices establecidas por la Escuela Técnica Superior De Ingeniería Aeroespacial Y Diseño Industrial, el organismo supervisor de este proyecto. La normativa vigente contempla cuatro partes, sin embargo, en este trabajo no se incluirá la parte de Planos, ya que en nuestro caso no se ha necesitado ninguna especificación gráfica para el desarrollo del Trabajo. Por ende, las tres partes en las que se divide este proyecto son,

- I. Memoria: es el documento justificativo y descriptivo del proyecto, en el cual se expondrá el proceso seguido para alcanzar la solución adoptada, a su vez incluyendo los problemas encontrados y las resoluciones aplicadas.
 1. Introducción: se establece el marco global, la motivación y los objetivos planteados para la resolución del proyecto, además de la estructura en la que se divide el Trabajo.
 2. Marco teórico: se presenta la información necesaria para la correcta comprensión del procedimiento y de los resultados adoptados.
 3. Herramientas y metodología: en este apartado se explicarán cuáles han sido los métodos e instrumentos utilizados durante el desarrollo del Trabajo.

4. Resultados: se mostrarán los resultados obtenidos durante la resolución del proyecto, estableciendo un estudio de las necesidades, los condicionantes y limitaciones consideradas para alcanzarlos.
 5. Conclusiones: se describirá de forma detallada la solución adoptada, justificando los motivos de haber escogido dicha solución y se plantearán soluciones alternativas a esta. Además, se explicarán cuáles son los trabajos futuros que realizar a partir de este Trabajo.
- II. Pliego de condiciones: en este apartado se recogen las especificaciones técnicas del proyecto, según las directrices de la normativa. Para el correcto desarrollo del proyecto se aplicarán las condiciones requeridas en el ámbito experimental, considerando las normativas necesarias del puesto de trabajo del personal. Se dividirá en,
1. Introducción y objeto
 2. Condiciones de los componentes
 3. Condiciones del entorno de trabajo
 4. Puesta en servicio y ajustes finales
- III. Presupuesto: en esta sección se mostrarán de forma aproximada el importe general que ha sido necesario para la realización del proyecto. Para ello se subdividirá por un lado en el cálculo total de los costes y por otro lado en el presupuesto que se ha necesitado para la realización del Trabajo,
1. Introducción y objeto
 2. Costes del proyecto
 3. Presupuesto del proyecto
- IV. Anexo: por último, se añadirá la información adicional requerida para alcanzar una comprensión completa y clara del Trabajo de Fin de Grado. Este se compondrá por una serie de anexos, los cuales se describen a continuación,
- A. Códigos de Matlab
 - B. Resultados y análisis de los estudios paramétricos
 - C. Relación del Trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la agenda 2030.

2 Marco teórico

En este apartado se presentarán los conceptos y antecedentes del tema tratado en este Trabajo. Primero se hablará sobre las pilas de hidrógeno, explicando qué son, cómo funcionan y cuáles son sus tipos. También, se expondrán algunas de sus aplicaciones en la actualidad. Además, se profundizará en las PEMFC, específicamente en el modelo en el que se ha basado la pila utilizada para el análisis tratado en este Trabajo.

Por otro lado, se introducirá el concepto del banco de gases sintético, explicando su función y describiendo sus componentes fundamentales.

Contenido

2.1	Pilas de hidrógeno	27
2.1.1	¿Qué es una pila de hidrógeno?.....	27
2.1.2	Partes y componentes.....	27
2.1.3	¿Cómo funciona?.....	28
2.1.4	Tipos de pilas de combustible	29
2.1.5	Ventajas e inconvenientes.....	30
2.1.6	Aplicaciones presentes.....	31
2.1.7	Aplicaciones en la industria aeronáutica	32
2.1.8	PEMFC JRC ZEROVCELL.....	33
2.2	Banco de gases sintéticos.....	38
2.2.1	¿Qué es un banco de gases sintéticos?.....	38
2.2.2	Partes y componentes.....	38
2.2.3	¿Cómo funciona?.....	40

2.1 Pilas de hidrógeno

2.1.1 ¿Qué es una pila de hidrógeno?

Una pila de hidrógeno, también conocida como pila de combustible, se trata de un dispositivo electroquímico, por el cual se produce una reacción química entre un combustible, generalmente hidrógeno, y un comburente, el cual suele ser oxígeno. De esta reacción se produce energía eléctrica, en forma de corriente continua, además de calor y agua. Esta electricidad generada se emplea fundamentalmente como alimentación de motores de tracción y para sistemas de red eléctrica. El único residuo que producen es agua, el cual se emite en forma de vapor a la atmósfera. [6] [7]

2.1.2 Partes y componentes

La estructura elemental de la pila la forman los siguientes componentes:

1. Electrodo: existe dos tipos
 - Ánodo: es el encargado de separar el H_2 en dos protones H^+ .
 - Cátodo: es la franja en la que reaccionan los iones H^+ y O_2 .
2. Electrolito: separa los gases, permitiendo con ello el paso de los protones H^+ y separa los electrones (e^-).
3. Placas bipolares: se utilizan para separar las celdas y transportar los gases a los electrodos. Además, son las encargadas de evacuar el H_2O generado durante la reacción. [6]

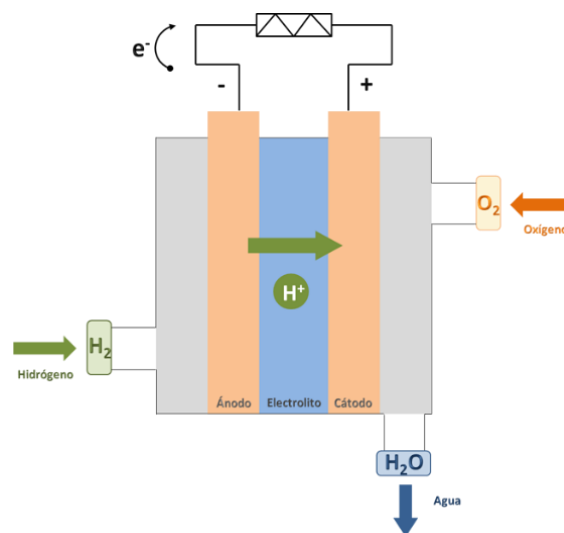


Figura 2.1. Componentes básicos de una pila de hidrógeno. [6]

2.1.3 ¿Cómo funciona?

Como se ha comentado anteriormente, una pila de combustible funciona mediante una reacción electroquímica entre hidrógeno y oxígeno.

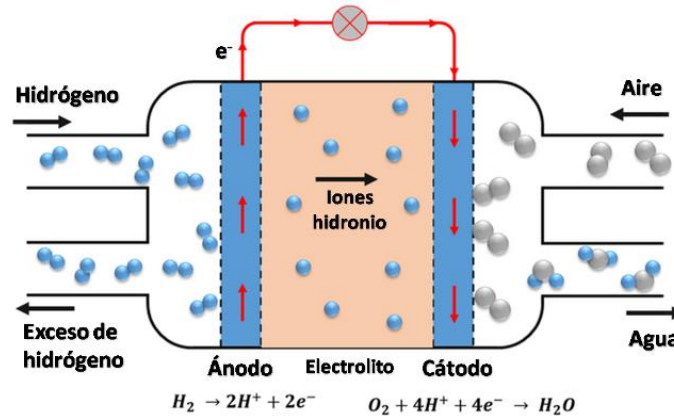
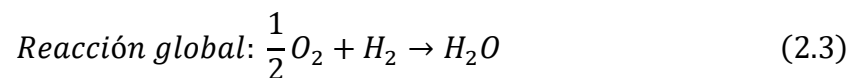
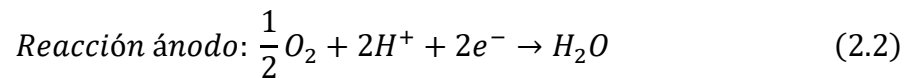
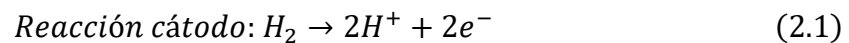


Figura 2.2. Esquema funcionamiento de una pila de combustible. [8]

Aunque existen distintos tipos de pilas, todas comparten el mismo esquema que podemos observar en la Figura 2.2. Primero entra el combustible, que se trata de hidrógeno. Este pasa al ánodo, el cual, mediante un catalizador, genera iones cargados positivamente y separa los electrones (e^-). Estos iones (H^+) fluyen a través del electrolito hasta llegar al cátodo, que provocan que se induzca una corriente eléctrica. Por el otro lado se introduce el aire, el cual entra en el cátodo. Ahí, a través de un catalizador, se combina el O_2 con los iones H^+ y con los electrones, generando calor y agua. Al encontrarnos a temperaturas elevadas, el agua se encuentra en estado de vapor y es expulsado a la atmósfera. [9]

Las reacciones que tienen lugar en el electrodo se definen en las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3. [6]



2.1.4 Tipos de pilas de combustible

A partir del principio fundamental de la pila de combustible desarrollado en 1838, se han desarrollado numerosas variaciones. Las más utilizadas son:

1. Pilas de combustible alcalinas (AFC)

Estas contienen electrodos porosos saturados, los cuales contienen una solución alcalina, y están separados por un electrolito de hidróxido. Se deben utilizar con oxígeno puro, ya que son muy sensibles al CO_2 .

2. Pilas de combustible de óxido sólido (SOFC)

En el caso de las SOFC, el electrolito está compuesto por cerámica sólida, la cual se puede calentar a temperaturas muy altas ($1000\text{ }^\circ\text{C}$) y se encargan de transportar los iones de oxígeno. Debido a sus altas temperaturas, este tipo de pilas presentan grandes dificultades respecto a su gestión térmica.

3. Pilas de combustible de carbonato fundido (MCFC)

Son similares a las SOFC ya que funcionan a altas temperaturas. Sin embargo, en este caso, el electrolito está compuesto por una mezcla de sales de carbonato fundido.

4. Pilas de combustible de ácido fosfórico (PAFC)

En el caso de las PAFC, el electrolito es de ácido fosfórico. Su aplicación principal es la generación de energía estacionaria.

5. Pilas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC)

La característica principal de las PEMFC es que utilizan una membrana electrolítica la cual es capaz de conducir los protones entre el ánodo y el cátodo. Debido a que son más potentes y ligeras, estas pilas son las más usadas en la industria automovilística.

En la Tabla 2.1 se contempla una comparación entre los distintos tipos de pilas de combustible explicados anteriormente. [6]

	AFC	SOFC	MCFC	PAFC	PEMFC
Electrolito	Solución alcalina	Óxido sólido	Carbonato fundido	Ácido fosfórico	Membrana polímero sólido
Temperatura [°C]	100-120	800-1000	600-700	200-250	60-80
Rango Potencia [kW]	5-150	100-250	100-2000	50-11000	5-250
Ventajas	- Mayor eficiencia - Reacción rápida	- Reformado interno - Cogeneración		Acepta H ₂ impuro	- Baja temperatura - Arranque rápido - Baja corrosión
Aplicaciones	Espaciales	Generación eléctrica distribuida y calor			- Transporte - Portátiles - Residencial

Tabla 2.1. Comparación entre los distintos tipos de pilas de combustible.

2.1.5 Ventajas e inconvenientes

Comparado con una batería, las pilas de hidrógeno permiten el almacenamiento de energía eléctrica de forma mucho más eficiente, debido a que las baterías presentan grandes limitaciones, como su baja densidad energética, su elevado peso, son caras de fabricar, etc. Es por ello por lo que, actualmente, cuando hay una sobreproducción de energía, esta se almacena para producir hidrógeno, el cual se puede utilizar como combustible directo en motores de combustión interna en el caso de un automóvil, o también como combustible de una pila de hidrógeno. Aun así, las pilas de hidrógeno presentan tanto numerosas ventajas como considerables problemas y desafíos que hoy en día se tratan de estudiar para conseguir una mejor eficiencia y funcionamiento de estas.

En la Tabla 2.2 se ha tratado de resumir algunas de las principales ventajas y desventajas que presentan actualmente las pilas de combustible. [7] [5]

Ventajas	Inconvenientes
Cero emisiones	Elevados costes
Más ligeras	Problemas de fiabilidad
Funcionan de forma continua	Corta vida útil
Materiales más comunes	Presiones elevadas
Reciclables	Peligro explosión del hidrógeno
Rapidez de recarga	Sensibles a contaminación de CO ₂
No emiten ruido	Problemas de gestión térmica

Tabla 2.2. Ventajas e inconvenientes de las pilas de hidrógeno.

2.1.6 Aplicaciones presentes

Hoy en día, las pilas de combustible se utilizan para numerosas aplicaciones, gracias a que se tratan de fuentes de generación de energía eléctrica de forma limpia, por lo que se intenta fomentar su uso.

1. Transporte: gracias a las pilas de combustible se han creado vehículos eléctricos que las aprovechan, conocidos como automóviles de hidrógeno (FCEV). Este tipo de vehículos generan energía eléctrica mediante la pila de combustible para alimentar un motor eléctrico. De esta forma consiguen una mayor autonomía además de ser capaces de recargarse en un menor tiempo. Sin embargo, en la actualidad, no son muy usados debido a sus altos precios y a la falta de estaciones de repostaje de hidrógeno. También se está tratando de aplicar en otros tipos de vehículos como autobuses y barcos, apareciendo nuevos prototipos con cada vez más frecuencia.
2. Energía estacionaria: las pilas de combustible son fuentes fiables y continuas de electricidad, por lo que son muy utilizadas en sistemas de energía estacionaria, como estaciones de telecomunicaciones, refugios, sistemas de iluminación, etc.
3. Almacenamiento de energía: las compañías eléctricas utilizan las pilas de combustible para almacenar el excedente de energía eléctrica. En combinación con fuentes de energía renovable, como eólica o solar, en los momentos donde hay sobreproducción, esta energía sobrante se almacena en forma de hidrógeno en depósitos presurizados. Este hidrógeno almacenado es convertido en electricidad nuevamente para ser suministrada cuando hay máxima demanda.

4. Electrónica portátil: este tipo de pilas de combustible son más pequeñas, conocidas como celdas de combustible de bajo consumo. Son utilizadas en portátiles, teléfonos móvil, sistemas de navegación y pequeños electrodomésticos, ya que duran más y son más rápidos de recargar.
5. Aplicaciones industriales: debido a que presentan una gran fiabilidad, las pilas de hidrógeno son usadas en plantas de energía para los generadores auxiliares, en hospitales para los sistemas de respaldo de emergencia o en equipos de difícil acceso para producir energía. [6] [7] [10]

2.1.7 Aplicaciones en la industria aeronáutica

Uno de los principales problemas actuales de la aviación comercial es la reducción de la huella de carbono. La Unión Europea ha establecido el objetivo de alcanzar la neutralidad de CO₂ para 2050. Para poder lograr ese propósito, el sector aeronáutico debe comprometerse en invertir en nuevos prototipos y conceptos que consigan reinventar la industria.

El claro exponente de esta nueva era con cero emisiones son los aviones de hidrógeno. La primera compañía que ha apostado por este concepto revolucionario es Airbus, con los prototipos ZEROe. Estos aviones comerciales son propulsados utilizando el hidrógeno como combustible, una alternativa al queroseno que se sigue utilizando hoy en día.

Sin embargo, el modelo de Airbus no utiliza pilas de combustible, sino que su concepto se basa en el uso de hidrógeno como combustible, modificando para ello quemador, el sistema de combustible y el de control del turbohélice. El objetivo de Airbus, el cual ha establecido una alianza con CFM International, es la creación de un motor de hidrógeno fiable para los aviones.

Se ha descartado la idea del uso de baterías debido a su baja densidad energética, ya que provocaría un aumento del peso para poder compensar la energía necesaria en un vuelo. Sin embargo, otras compañías, como United Airlines, optan por esta alternativa para vuelos de corta distancia y poco pasajeros, usando su avión ES-19, para un rango de 400 km y un máximo de 19 pasajeros. [11] [12]



Figura 2.3. Presentación del proyecto ZEROe de Airbus. [13]

2.1.8 PEMFC JRC ZEROVCELL

La pila que se ha empleado durante este estudio se trata de una PEMFC desarrollada por Joint Research Centre (JRC) de la Comisión Europea. Su principal objetivo es desarrollar un diseño para pruebas de los componentes de la pila que consiga harmonizar el protocolo de testeo de pilas de combustibles individuales PEM para aplicaciones automovilísticas. [14]

2.1.8.1 Criterios de diseño

Los criterios para el diseño de la PEMFC JRC ZEROVCELL son:

- Un área activa de 10 [cm²]
- Canales de gas paralelos que representen los campos de flujo de las pilas de combustible para automóviles.
- Los regímenes del flujo de gas de los reactivos húmedos (aire y H₂) son estequiométricos y constantes.
- A una densidad de corriente de 4 [A/m²] las condiciones estacionarias son:
 - Flujo laminar (Re < 1000).
 - La caída de presiones a través del área activa de los reactivos (ánodo y cátodo) es menor de 10 [kPa].
 - Las variaciones de temperatura a través del área activa son ± 1 °C.
 - La media del cambio de la composición del gas es menor que el 10% de la diferencia entre la entrada y la salida de ambos reactivos.
- Las condiciones de presión, gasto másico, composición de los gases y temperatura son uniformes para todas las entradas. [14]

2.1.8.2 Condiciones operacionales

Las condiciones para la operar la PEMFC JRC ZEROVCELL se resumen en la Tabla 2.3. [14]

Parámetros		Condiciones operacionales		
		Símbolo	Unidades	Configuración
	Temperatura nominal de la celda	T_{cell}	°C	80
Ánodo	Temperatura del combustible en la entrada	$T_{\text{fuel,in}}$	°C	85
	Humedad relativa del combustible en la entrada	$RH_{\text{fuel,in}}$	%	100
	Presión del combustible en la entrada (absoluta)	$P_{\text{fuel,in}}$	kPa	250
	Estequiometría entrada del combustible	λ_{H_2}	-	8
Cátodo	Temperatura del oxidante en la entrada	$T_{\text{ox,in}}$	°C	85
	Humedad relativa del oxidante en la entrada	$RH_{\text{ox,in}}$	%	100
	Presión del oxidante en la entrada (absoluta)	$P_{\text{ox,in}}$	kPa	230
	Estequiometría entrada del oxidante	λ_{O_x}	-	10

Tabla 2.3. Condiciones operacionales para PEMFC JRC ZEROVCELL

2.1.8.3 Membrane Electrode Assembly (MEA)

Como se ha comentado previamente, una PEMFC está compuesta por una membrana de intercambio de protones. Para el caso de la pila de combustible estudiada, el montaje de la membrana del electrodo (MEA) está compuesto por las siguientes partes, que se pueden observar en la Figura 2.4.

- Una membrana recubierta de catalizador (CCM)
- Unas sub-juntas del ánodo y del cátodo que refuerzan los ejes del MEA, para que sea más fácil de utilizar y más resistente. (Sub-gaskets)
- Unas capas para la difusión de los gases que proveen al CCM los reactivos y almacenan la corriente eléctrica. (GDL) [14]

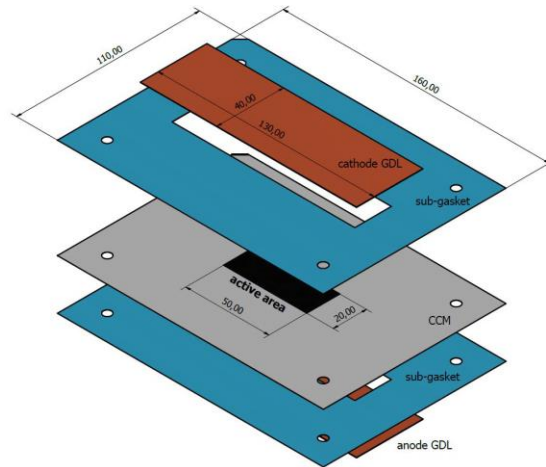


Figura 2.4. Esquema del área activa del MEA. [14]

2.1.8.4 Montaje PEMFC JRC ZEROVCELL

En la Figura 2.5, se puede observar el montaje de la PEMFC JRC ZEROVCELL, el cual se divide en tres vistas, la primera es una vista completa de la pila y la segunda y la tercera son las vistas de los extremos de la placa para el equipo del ánodo y del cátodo respectivamente.

Además, en la figura se pueden observar que los componentes están diferenciados por distintos colores, el amarillo representa el ánodo, el azul el cátodo, el rojo es el circuito del refrigerante y el verde es la cámara de compresión. [14]

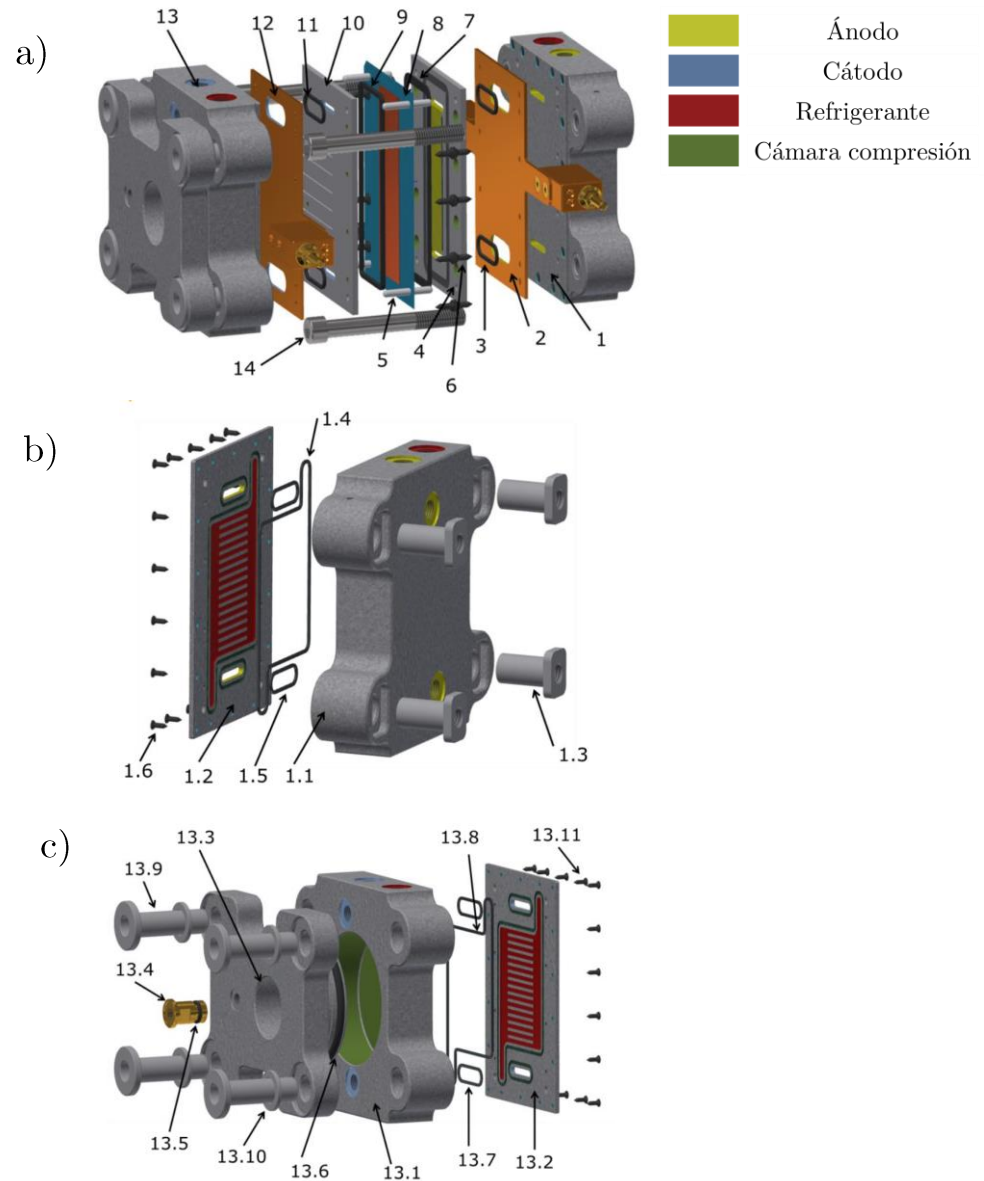


Figura 2.5. Montaje PEMFC JRC ZERO V CELL: a) vista completa, b) equipo ánodo, c) equipo cátodo. [14]

Los componentes de la pila de combustible, según la numeración descrita en la Figura 2.5, se detallan en la Tabla 2.4.

Vista completa (Figura 2.5.a)	
1	Equipo del ánodo en el extremo placa
2	Colector corriente del ánodo
3	Sellado del gas
4	Placa bipolar del ánodo
5	Perno de posicionamiento
6	Tornillos de fijación
7	Sellado ánodo MEA
8	MEA
9	Sellado cátodo MEA
10	Placa bipolar del cátodo
11	Sellado del gas
12	Colector corriente del cátodo
13	Equipo del cátodo en el extremo placa
14	Tornillo de apriete
Equipo del ánodo (Figura 2.5.b)	
1.1	Extremo placa principal del ánodo
1.2	Cubierta extremo placa
1.3	Tuerca
1.4	Sellado circuito refrigerante
1.5	Sellado gas
1.6	Tornillos de fijación
Equipo del cátodo (Figura 2.5.c)	
13.1	Extremo placa principal del cátodo
13.2	Cubierta extremo placa
13.3	Plato de presurizado
13.4	Ajuste manómetro para la cámara de compresión
13.5	Sellado del ajuste manómetro
13.6	Sellado cámara de compresión
13.7	Sellado gas
13.8	Sellado circuito refrigerante
13.9	Funda perno
13.10	Arandela de fijación
13.11	Tornillos de fijación

Tabla 2.4. Componentes PEMFC JRC ZERO7 CELL.

2.2 Banco de gases sintéticos

2.2.1 ¿Qué es un banco de gases sintéticos?

Un banco de gases sintéticos consiste en una plataforma de experimentación con la cual se trata de simular un entorno controlado para extraer los resultados deseados del experimento en cuestión. En este tipo de bancos de ensayo se utilizan gases sintéticos, los cuales se obtienen mediante el proceso de gasificación térmica de materiales orgánicos. Estos son aire, oxígeno, vapor de agua e hidrógeno, los cuales se almacenan en botellas presurizadas para ser inyectadas en el banco. [15]

2.2.2 Partes y componentes

El banco de trabajo utilizado durante el estudio de la pila de hidrógeno está compuesto de las siguientes partes,

1. Generador de gas: cuenta con un máximo de 13 entradas para las especies químicas. Tras la entrada, la especie continua por un tubo con un caudalímetro implantado, que mide su caudal y regula la válvula de entrada de la especie dependiendo de los parámetros establecidos en el controlador. Finalmente, los tubos convergen en uno solo donde se genera la mezcla deseada.



Figura 2.6. Generador de gas del banco de gases sintéticos.

2. Horno: se trata de un tubo eléctrico que genera calor, con una temperatura máxima de 400 [°C].

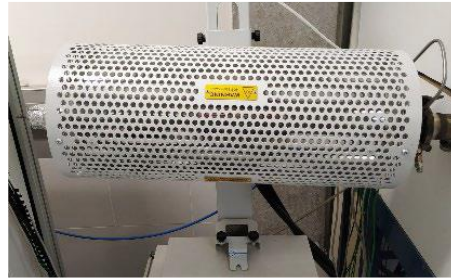


Figura 2.7. Horno del banco de gases sintéticos.

3. Tubería calefactada: se trata de tubería que emiten calor al fluido al pasar. La grande alcanzan una temperatura de 400 [°C] y la pequeña de 150 [°C].



Figura 2.8. Tubería calefactada grande.

4. Humidificador P-serie: establece la humedad, temperatura y caudal de un gas.



Figura 2.9. Humidificador P-serie.

5. Horiba Mexa 730λ: dispositivo para medir la concentración de oxígeno.



Figura 2.10. Horiba Mexa 730λ

6. Micro GC Agilent 990: dispositivo para medir la concentración de hidrógeno.



Figura 2.11. Micro GC Agilent 990.

7. FTIR MSK 2030: dispositivo que analiza hasta 16 especies de gas, incluido agua, detectando el nivel de porcentaje de la especie y su sensibilidad ppm.



Figura 2.12. FTIR MSK 2030.

2.2.3 ¿Cómo funciona?

Para crear las condiciones requeridas, se utilizarán los gases sintéticos, los cuales se inyectarán a la red de tubos del banco para obtener la mezcla de gases que simule el ambiente de estudio. Mediante el banco de trabajo, se puede realizar el estudio de parámetros como humedad, presión, temperatura, y también de las fracciones molares y caudales necesarios para cada gas con los que poder obtener las condiciones deseadas en el análisis. Estos valores se miden mediante sensores, los cuales están asociados a los controladores de las válvulas para poder modificar el flujo del caudal según el valor objetivo de los parámetros del estudio.

3 Herramientas y metodología

En este apartado se explicarán cuáles han sido las herramientas utilizadas para la realización del proyecto, tanto para el proceso de adquisición de los datos como el tratamiento y análisis de estos. También se comentará la metodología aplicada para obtener los resultados del Trabajo. Para ello se ha realizado un análisis previo del banco de gases sintéticos mediante un modelo de simulación y posteriormente se ha realizado un trabajo experimental sobre el propio banco para validar el modelo y mejorarlo.

Contenido

3	Herramientas y metodología.....	41
3.1	Definición de las necesidades del banco de ensayo.....	42
3.2	Simulación: VEMOD.....	46
3.2.1	Diseño del banco de gases sintéticos por simulación.....	47
3.2.2	Entorno de gas	49
3.2.3	Circuito de control	51
3.3	Experimental: banco de gases sintéticos	53
3.3.1	Especificaciones del banco de trabajo.....	53
3.3.2	Línea cátodo.....	54
3.3.3	Línea ánodo.....	54
3.4	Otras herramientas.....	55
3.4.1	Matlab.....	55
3.4.2	Excel	56
3.4.3	Statgraphics	57

3.1 Definición de las necesidades del banco de ensayo

El primer paso del trabajo ha consistido en realizar el esquema conceptual de la instalación para ensayar monoceldas de pilas de combustible que se pretende construir a partir del banco de gases sintéticos. Para ello, es necesario tener en cuenta los siguientes requerimientos y objetivos de funcionamiento desde el punto de vista fluidodinámico:

- La pila de combustible debe ser alimentada de forma independiente por dos corrientes, una de hidrógeno en el ánodo y otra con presencia de oxígeno en el ánodo. En la línea del cátodo se pretende, además, poder trabajar con oxígeno puro, aire sintético estándar o aire enriquecido en oxígeno, con el fin de estudiar el impacto de la concentración de oxígeno en las prestaciones y durabilidad de la celda.
- Ambas corrientes deben poder ser controladas en término de caudal (en función del tamaño de la celda), presión (de 1 a 3 [bar absolutos]) y temperatura (hasta 100 [°C]), de forma simultánea, de modo que ambos lados de la celda operen en las mismas condiciones, evitando esfuerzos termomecánicos que puedan inducir deformaciones en la membrana.
- Además, para la correcta operación de la membrana de intercambio protónico es necesario tener la capacidad de humectar ambas corrientes, con humedades relativas de hasta el 100%.
- Si se pretende operar de forma dinámica, es necesario ajustar de la forma más rápida posible caudal, presión y humedad en función de la potencia objetivo a suministrar, mientras que la temperatura se mantiene aproximadamente constante.

Teniendo en cuenta estos requerimientos, en las primeras fases del trabajo se elaboraron y analizaron distintos esquemas para definir la estructura del banco hasta llegar a la solución final propuesta.

En el esquema de la Figura 3.1 vemos que, en la entrada del cátodo, previo al calentamiento de la línea, se inyecta vapor de agua mediante una válvula mezcladora. A continuación, la mezcla pasa por una tobera mezcladora y entra en un horno de tubo, donde se calienta hasta la temperatura objetivo y entra en la pila. La línea del ánodo pasa primero por un humidificador, y a su salida el FTIR capta los niveles de humedad de la línea. Después entra en un calefactor hasta alcanzar la temperatura

deseada y pasa a la pila. De las líneas de salida de la pila, los niveles de oxígeno del cátodo son leídos mediante el Horiba y los del ánodo por un sensor de H_2 .

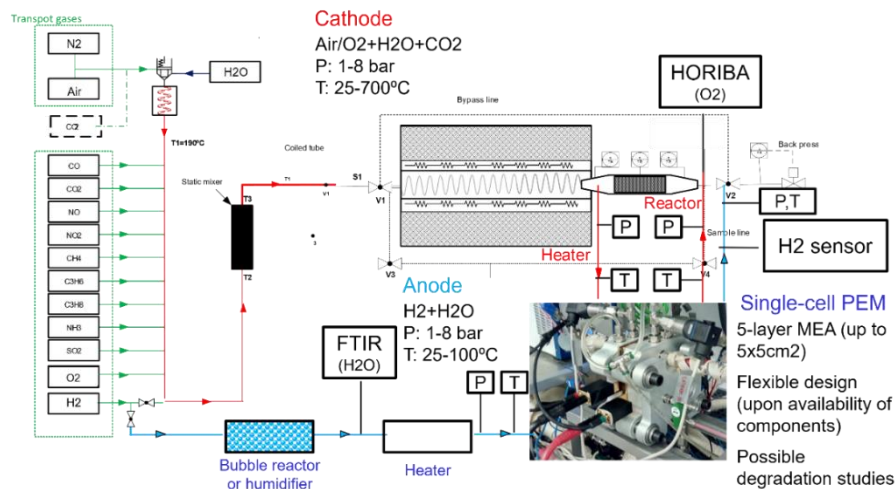


Figura 3.1. Esquema inicial del concepto del banco de ensayos.

Este diseño aprovecha gran parte de la instalación del banco de gases sintéticos ya disponible anteriormente para estudio de sistemas de postratamiento para llevar a cabo el control de la corriente del cátodo. En concreto, el elemento de inyección de agua y el horno de tubo utilizados estaban ya disponibles en el equipo. Sin embargo, en una serie de pruebas iniciales se vio que el sistema de inyección de agua no era capaz de cubrir el rango completo de humedad relativa propuesto anteriormente (hasta el 100%). Además, en el camino del flujo hasta el horno de tubo gran parte del agua condensaba por la caída de temperatura producida desde el sistema de inyección de agua, cuyo volumen estaba calefactado, hasta la entrada del horno. Esto no es un problema cuando se trabaja con sistemas de postratamiento, dado que el horno opera a muy altas temperaturas (por encima de los 200 [°C]) y el agua se reevaporaba. Sin embargo, en las temperaturas típicas de operación de la celda (en torno a 70 [°C]) dicha evaporación no se produce de forma completa, encontrándose agua líquida todavía en la sección donde estaría la entrada de la celda.

Teniendo en cuenta estos problemas, el esquema se modificó como se observa en la Figura 3.2, en el cual se introducen dos líneas del cátodo. La superior es directa, no se ve alterada, mientras que la inferior pasa primero por el horno, se calienta y posteriormente se inyecta el agua con un sistema de inyección similar al de los sistemas SCR (*Selective Catalytic Reduction*) actualmente usados en motores diésel. De este modo, se produce una mezcla con una fracción de agua igual o ligeramente

superior a las condiciones de saturación. Después pasa por un refrigerador y por un separador de gotas de agua para producir una mezcla con 100% de humedad relativa a la temperatura de ensayo. Ambas líneas se unen y pasan por un sistema de detección de gotas. En el ánodo solo tenemos una línea, en la cual primero se inyecta el vapor de agua, después entra en el enfriador y, como en el cátodo, por un separador de gotas y un sistema de detección. Finalmente, ambas líneas entran en la pila. De la salida del ánodo se puede observar que parte de ella vuelve a entrar al sistema para reutilizar el hidrógeno en exceso.

De nuevo, tras el análisis y pruebas preliminares de dicha propuesta se encontraron algunos inconvenientes. Primero, el diseño propuesto de la línea del cátodo con dos líneas paralelas, una seca y otra en condiciones de saturación, tiene como principal ventaja su capacidad para cambiar rápidamente la humedad relativa de entrada a la celda, pero como desventaja que no permite trabajar con diferentes concentraciones de oxígeno, que era uno de los objetivos inicialmente propuestos. Además, en las pruebas realizadas se identificó que el horno de tubo disponible presentaba un control inestable en el rango de temperaturas objetivo de la operación de la pila de combustible a ensayar. Finalmente, conseguir una separación completa de las posibles gotas producidas a través de un separador ciclónico resultaba complejo por la baja velocidad del flujo, especialmente cuando se opera la celda a potencias bajas. En lo que se refiere a la línea del ánodo, los sistemas de inyección de agua disponibles no permitían controlar todo el rango de caudal necesario para cubrir la operación tanto a bajas como a altas humedades relativas.

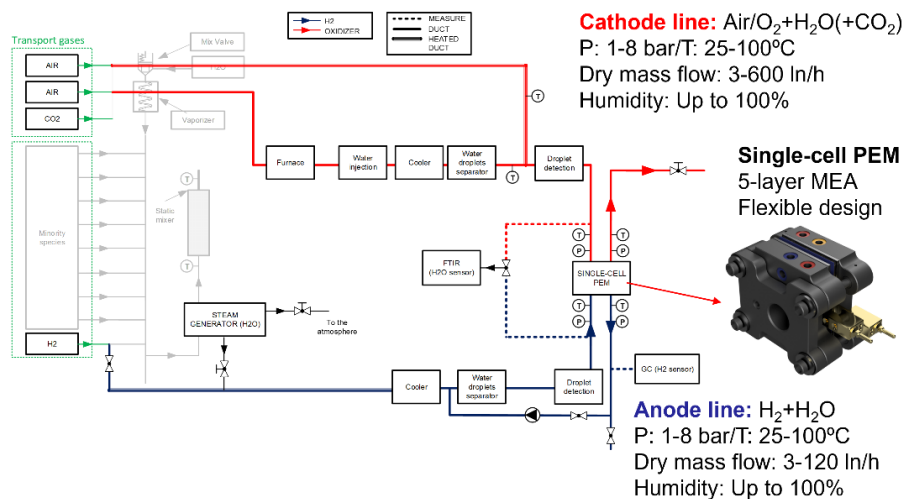


Figura 3.2. Correcciones sobre el esquema inicial del banco de ensayos.

En la Figura 3.3 vemos el esquema final del banco, que soluciona las limitaciones previamente mencionadas. La configuración se divide en dos líneas, la línea que conduce el cátodo, en este caso una mezcla de O_2 y N_2 y la línea del ánodo, con H_2 , en las cuales se leerá mediante sensores su caudal y se controlará su entrada mediante la variación de la apertura de las válvulas. En la línea del ánodo se recupera el concepto de usar dos líneas paralelas, una a alta humedad y otra seca, para mejorar el control de la humedad relativa. La gestión térmica de todas las corrientes se realizará mediante tuberías calefactadas, en sustitución del horno de tubo, más adaptadas al rango de caudal y temperatura objetivo de la instalación. También se controlará la humedad mediante los humidificadores P-serie, tipo membrana, dispositivos capaces de regular la temperatura, humedad y el caudal que se inyectará de H_2O en la mezcla. Finalmente, ambas líneas se unirán y se suministrará la mezcla resultante a la PEMFC, dónde se analizará su rendimiento.

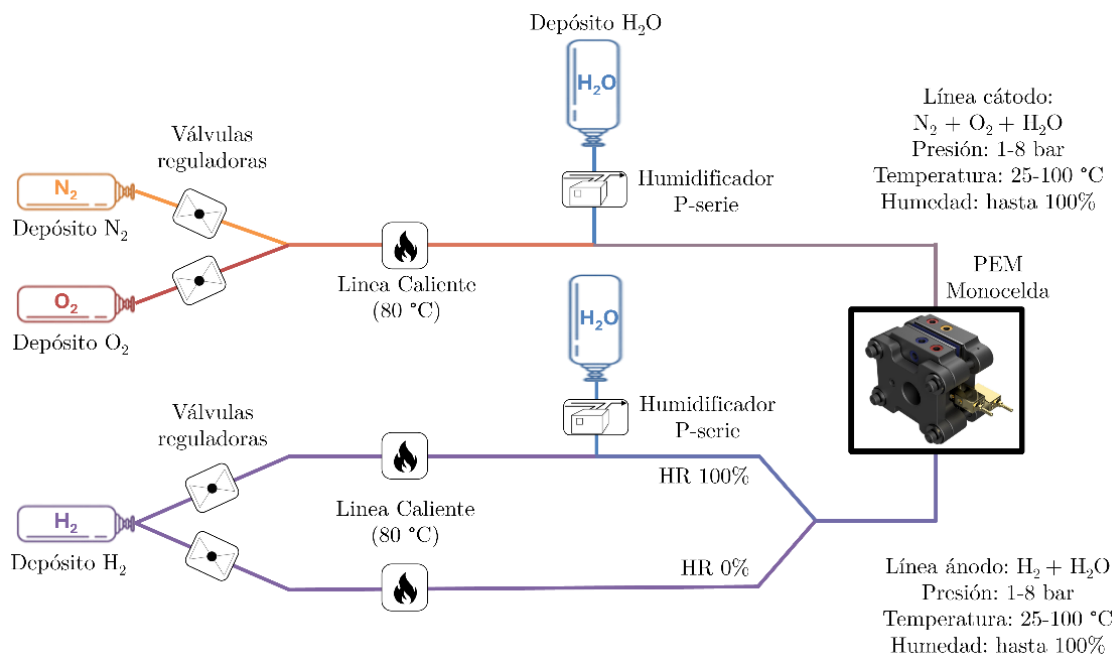


Figura 3.3. Esquema final del banco de ensayos para pilas de combustible.

3.2 Simulación: VEMOD

VEMOD es una plataforma de simulación creada por el Instituto Universitario CMT-Clean Mobility & Thermofluids.

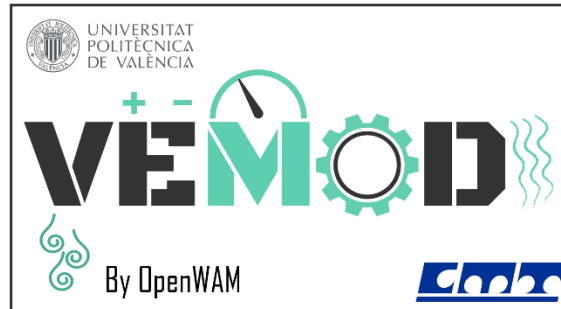


Figura 3.4. Logo de la plataforma de simulación VEMOD.

Esta se encarga de realizar simulaciones unidimensionales de termodinámica y de dinámica de fluidos para flujos compresibles e incompresibles. Se puede emplear para predecir el rendimiento de motores según parámetros como potencia, par de torsión, flujo de aire, eficiencia, consumo de combustible, etc. Pero también se puede utilizar para el estudio otras instalaciones, como bancos de prueba de motores o, en nuestro caso, para un banco de gases sintéticos.

El programa se divide en cuatro entornos, los cuales son,

1. Entorno de gas: es el entorno principal. Se usa para determinar los elementos por los cuales circula el flujo compresible, como las tuberías, turbocompresores, enfriadores, etc.
2. Entorno hidráulico: se utiliza para determinar los elementos del circuito de flujo incompresible, como circuitos lubricantes y refrigerantes.
3. Circuito de control: en este se pueden establecer los controles para modificar los parámetros de entrada en tiempo real, por ejemplo, mediante PID's. Estos se vinculan al entorno principal mediante sensores y actuadores.
4. Circuito eléctrico: este entorno se encarga de simular dispositivos eléctricos, pero aún se encuentra en desarrollo.

3.2.1 Diseño del banco de gases sintéticos por simulación

Primero se ha realizado el diseño y análisis del banco de gases sintético por simulación mediante el programa VEMOD. Para ello se ha seguido el esquema del prediseño del banco de la Figura 3.3, el cual se trasladará a la simulación para probar su funcionalidad. De este primer diseño se irán realizando modificaciones según los resultados obtenidos para mejorar el modelo.

3.2.1.1 Definición de los gases y sus condiciones iniciales

Antes de comenzar a crear el esquema del banco, primero se deben definir los gases con los que se va a trabajar. Para ello en la opción de Fluidos, se establecerá un gas de trabajo, el cual este compuesto por lo distintos gases que se utilizarán durante la simulación. En nuestro caso, los gases utilizados para el banco de gases sintéticos y su composición, dependiendo del estado en el que se encuentren, están definidos en la Tabla 3.1,

Fluidos	Composición atmosférica	Botella de O ₂	Botella de N ₂	Botella de H ₂	Botella de H ₂ O
O ₂	0.21	1	0	0	0
N ₂	0.79	0	1	0	0
H ₂	0	0	0	1	0
H ₂ O	0	0	0	0	1

Tabla 3.1. Composición de los gases en los distintos entornos de la simulación.












Además, se establecerán las condiciones iniciales a las que se encuentren los gases según su entorno una vez comience la simulación, descritas en la Tabla 3.2.

Estado inicial	Composición	Presión [bar]	Temperatura [°C]
O ₂	Botella de O ₂	6	25
N ₂	Botella de N ₂	6	25
H ₂	Botella de H ₂	6	25
H ₂ O (vapor)	Botella de H ₂ O	6	200
Atmosférico	Composición atmosférica	1	25

Tabla 3.2. Condiciones iniciales de los gases según su entorno.

3.2.1.2 Componentes de la simulación

Primero se explicarán cuáles son los componentes que se han utilizado para crear el entorno de gas. Estos vienen definidos en la Tabla 3.3, categorizados según el tipo de componente.

Tipos	Nombre	Símbolo	Descripción
Nodos	Simple		Conexión 1D – 1D simple
	Bifurcación		Conexión 1D – 1D múltiple
	Recuperación		Conexión 1D – 0D
	Depósito		Acumula el gas saliente de la tubería
Válvulas	Reguladora		El coeficiente de descarga depende de la posición de la válvula y se interpola con la posición de la corriente
	Coefficiente de descarga fijo		El coeficiente de descarga es constante y varía dependiendo de la dirección del flujo
Elementos 0D	Pleno		<ul style="list-style-type: none"> – Básico: volumen constante, no se considera la transferencia de calor – Infinito: volumen infinito, su presión, temperatura y composición son constantes
Control	Sensor		Es capaz de leer las variables del modelo en tiempo real
	ECU		Es la centralita electrónica, a la cual se conectan los sensores. Estos le proporcionan información, la cual transmiten a los actuadores para que ejecuten sus comandos
	PID		Es un mecanismo que genera un bucle de realimentación al sistema de control. El valor de la salida se modifica para alcanzar el valor objetivo de la entrada minimizando el error
	Lector señal		Traducen la señal de la salida del sensor para enviarla a los controladores





	Generador señal		Generan una señal, la cual puede ser una constante, el tiempo global de la simulación, un ángulo o el ciclo del motor
	Producto		Devuelve el producto de las entradas
	Actuador		Ejecuta la acción de control sobre el parámetro que se desea actuar
Otros	Enfriador 0D		Intercambia calor hasta alcanzar la temperatura de salida objetivo

Tabla 3.3. Componentes de la simulación del banco de gases sintéticos.

3.2.2 Entorno de gas

Primero se ha realizado el diseño del banco de gases sintético en el entorno de gas, el cual se observa en la Figura 3.5,

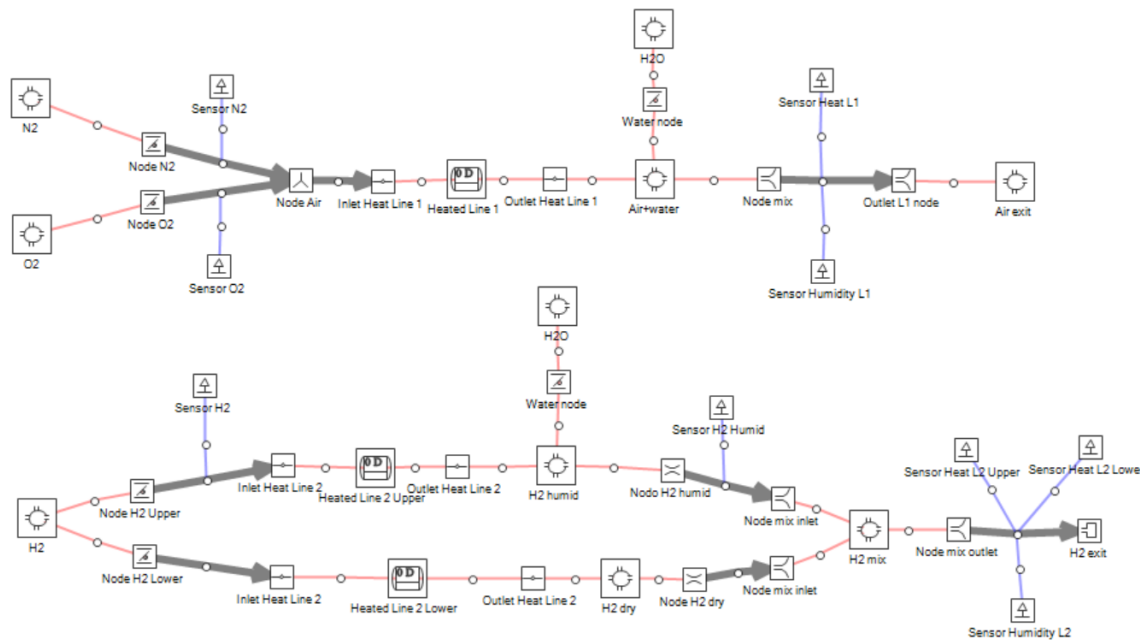


Figura 3.5. Esquema del entorno de gas del banco de gases sintéticos.

En esta figura podemos ver que el sistema se compone por dos líneas. La línea superior se trata de la línea del cátodo y la inferior es la línea del ánodo, las cuales se detallarán a continuación.

3.2.2.1 Línea cátodo

La línea del cátodo está compuesta por N_2 y O_2 . Estos se encuentran en un pleno infinito, en las condiciones iniciales establecidas en la Figura 3.1. Sus caudales se regulan mediante las válvulas reguladoras, que a su vez se controlan con los sensores de flujo másico de N_2 y O_2 . Ambas líneas convergen en una, y el flujo de aire entra a la sección del tubo calefactor. Para simularlo se ha implementado un enfriador 0D, el cual intercambia calor hasta alcanzar la temperatura objetivo. Esta se mide mediante un sensor de temperatura, el cual está situado en la tubería de salida de la mezcla final. Una vez la mezcla de aire alcanza la temperatura deseada, entra en un pleno básico, con volumen constante. A su vez, se inyectará en el pleno la cantidad de agua necesaria en la mezcla final, mediante la regulación de la válvula situada a la salida del depósito de H_2O . Esta se medirá mediante un sensor de humedad, el cual evalúa la fracción molar de agua objetivo en la tubería de salida.

3.2.2.2 Línea ánodo

La línea del ánodo se descompone en dos partes, una línea superior por donde circulará la mezcla de H_2 con H_2O y una inferior por la cual pase el flujo de H_2 seco.

La línea superior medirá la entrada de H_2 a través de una válvula reguladora, la cual será controlada mediante un caudalímetro que establecerá el flujo másico objetivo que se desea de H_2 . Después, el flujo entrará por la línea calefactada. Como en el caso de la línea del cátodo, el enfriador 0D regulará su temperatura hasta alcanzar el objetivo, medido a través del sensor de temperatura establecido en la salida de la mezcla. Una vez alcanzada la temperatura objetivo, se inyectará a la mezcla el vapor de agua. El caudal de H_2O viene controlado por otra válvula reguladora, que variará dependiendo de las medidas del sensor de humedad establecido en la salida, hasta alcanzar la fracción molar de H_2O objetivo.

La línea inferior actuará de forma distinta. En este caso la entrada del caudal de H_2 no se regulará con un caudalímetro, sino mediante el sensor de humedad a la salida de la mezcla. Este sensor medirá el nivel de humedad que pasa del caudal superior, y abrirá la válvula del caudal de H_2 seco hasta alcanzar el valor objetivo de fracción molar de H_2O deseado en la mezcla. Una vez entre este caudal de H_2 , el cual también pasará por una línea calefactada hasta alcanzar la temperatura objetivo, las dos líneas convergerán, obteniendo la mezcla de H_2 requerida para el funcionamiento correcto de la pila.

3.2.3 Circuito de control

Para controlar los sensores definidos en la sección anterior, se necesita un circuito de control, el cual viene representado en la Figura 3.6. Todos los sensores se enlazarán a la ECU, la cual se encarga de leer la información de estos y transmitirla a los actuadores. A cada sensor se le conectará un lector de la señal, el cual traducirá la información y la transmitirá al PID.

En el PID se establecerán un valor Proporcional, uno Integral y uno Derivativo, los cuales se irán modificando, dependiendo de las condiciones establecidas. La tarea del PID es regular el actuador para que converja a la solución deseada de la forma más rápida y estable posible. Por lo tanto, en el PID se implantará el valor objetivo que se trata de obtener.

Los valores objetivos varían dependiendo del parámetro de estudio. En el caso de los actuadores que controlan la entrada del caudal, el valor objetivo se calculará mediante un producto de tres constantes, la intensidad de la corriente (I), con unidad de medida [mA/cm^2], la estequiometría del compuesto (λ) y una constante K , la cual se calcula mediante la Ecuación 3.1.

$$K = S_{cell} \cdot \frac{PM}{4F} \cdot 10^{-6} \cdot 2.016 \quad (3.1)$$

Siendo S_{cell} el área activa de la celda, de $10 \text{ [cm}^2\text{]}$ y F la constante de Faraday, de valor 96485 [C/mol] . PM es el peso molar del compuesto, siendo 2 [g/mol] para H_2 y 32 [g/mol] para O_2 . El resto de los valores se utilizan para adimensionalizar la constante.

Por lo tanto, el caudal de los compuestos se define según las ecuaciones 3.2, 3.3 y 3.4, en [kg/s]. Para obtener el del nitrógeno se utiliza el caudal másico del oxígeno multiplicado por la fracción másica de la composición atmosférica del aire.

$$\dot{m}_{O_2} = I \cdot \lambda_{O_2} \cdot K_{O_2} \quad (3.2)$$

$$\dot{m}_{N_2} = m_{O_2} \cdot \frac{0.77}{0.23} \quad (3.3)$$

$$\dot{m}_{H_2} = I \cdot \lambda_{H_2} \cdot K_{H_2} \quad (3.4)$$

En el caso de la humedad, el valor objetivo viene determinado por la fracción molar de H_2O que se necesita en la mezcla. Por otro lado, el valor objetivo para los

enfriadores 0D se determinará como la temperatura a la que se desea calentar la mezcla de aire.

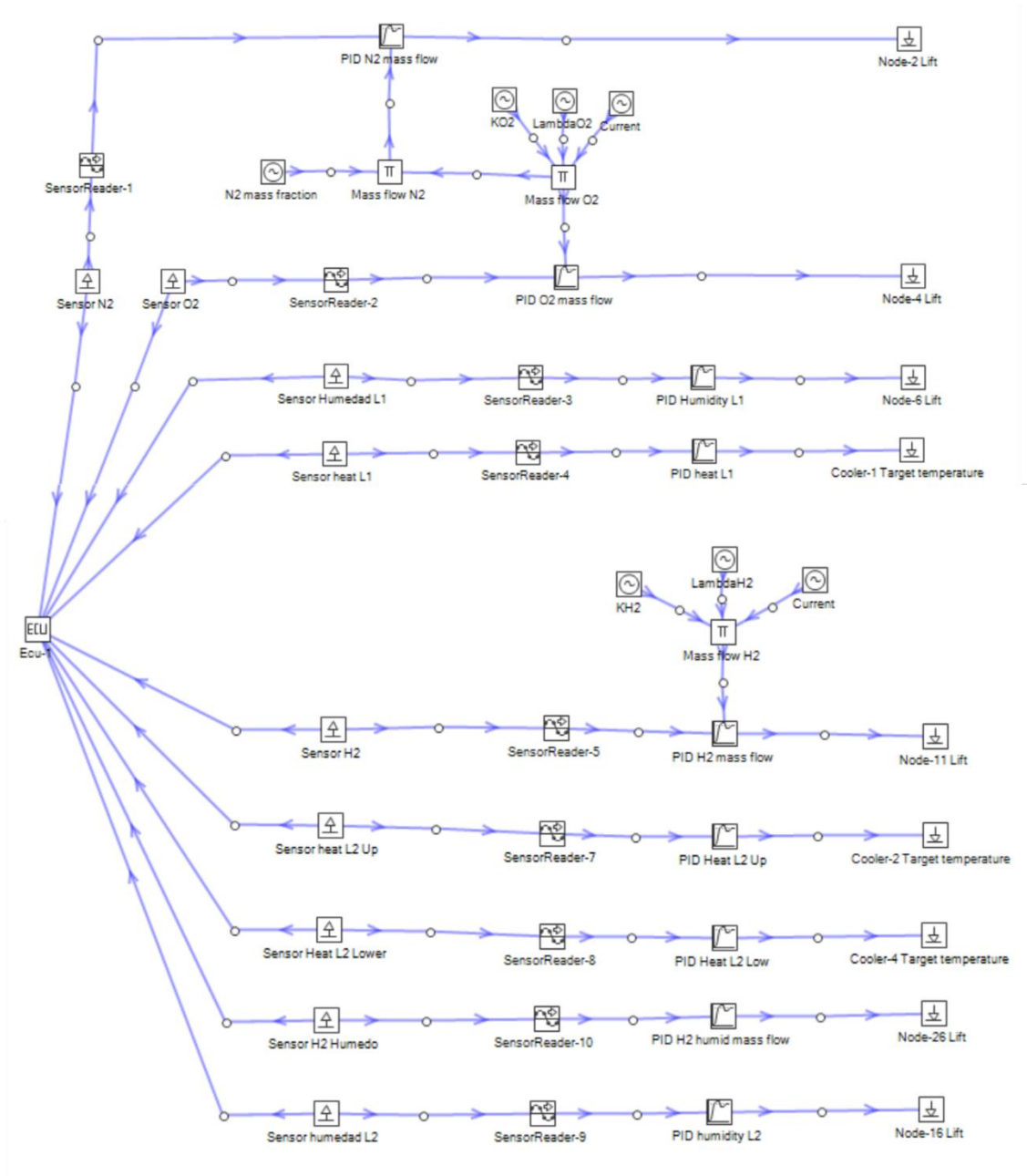


Figura 3.6. Circuito de control para la simulación del banco de trabajo.

3.3 Experimental: banco de gases sintéticos

3.3.1 Especificaciones del banco de trabajo

Según el informe de JRC, los requisitos del banco de trabajo para operar la PEMFC JRC ZERO7CELL son los descritos en la Tabla 3.4. [14]

Parámetros	Unidades	Minimo	Máximo	Límite de protección
General				
Número de bancos de carga	-	1	-	-
Número de fuentes de alimentación	-	1	-	-
Corriente	A	0	100	-
Eliminación de calor	W	0	100	-
Diferencia de presiones entre el combustible y el oxidante	kPa	0	50	80
Diferencia de presiones entre el circuito refrigerante y los compartimentos del ánodo y cátodo	kPa	0	300	-
Aire comprimido	kPa	500	3000	-
Flujo de combustible (Ánodo)				
Temperatura entrada	°C	20	95	100
Humedad relativa entrada	%	0	100	-
Presión relativa entrada	kPa	10	200	300
Presión relativa salida	kPa	10	200	300
Caudal ánodo (seco)	NI/min	0.05	10	-
Diferencia presión entre la entrada y la salida de la celda	kPa	0	60	-
Flujo del oxidante (Cátodo)				
Temperatura entrada	°C	20	95	100
Humedad relativa entrada	%	0	100	-
Presión relativa entrada	kPa	10	200	300
Presión relativa salida	kPa	10	200	300
Caudal ánodo (seco)	NI/min	0.05	20	-
Diferencia presión entre la entrada y la salida de la celda	kPa	0	80	-

Flujo refrigerante al <i>hardware</i>				
Presión entrada	kPa	0	200	300
Caudal refrigerante	l/min	1	3	-
Temperatura entrada y salida	°C	40	90	95
Diferencia presión entre la entrada y la salida	kPa	0	40	-
Conductividad eléctrica refrigerante	μS/cm	0	100	-

Tabla 3.4. Requisitos del banco para configurar la PEMFC JRC ZERO7 CELL.

3.3.2 Línea cátodo

La primera línea se trata de la línea del cátodo, en la cual se inyectarán dos gases, O_2 y N_2 . Estos gases, ubicados en sus respectivas botellas, estarán a una temperatura ambiente de 25 [°C] y a una presión de 6 [bar]. Se medirá el caudal de los gases mediante el uso de válvulas reguladoras, las cuales están asociadas a un controlador. El controlador abrirá y cerrará las válvulas en base al caudal demandado. Los gases se juntarán formando una única corriente de aire, la cual pasará por una tubería de calefacción, para calentar los gases hasta una temperatura de 80 [°C].

Después de alcanzar la temperatura deseada, se inyectará a la mezcla H_2O en condiciones de vapor de agua, por lo que se encuentra a una temperatura de 200 [°C] y una presión de 6 [bar]. La cantidad de agua inyectada se controlará mediante un humidificador P-serie. Este regulará la válvula del agua según alcance el nivel de humedad necesario para el correcto funcionamiento de la pila. Una vez los controladores establezcan los valores requeridos de humedad y de caudal, la mezcla entrará al sistema de la pila de combustible.

3.3.3 Línea ánodo

De forma análoga a la línea del cátodo, la línea del ánodo seguirá un esquema similar. Sin embargo, en este caso se inyectará solamente H_2 , el cual se bifurcará en dos líneas.

La línea superior entrará en el tubo de calefacción hasta alcanzar una temperatura de 80 [°C]. Posteriormente se inyectará H_2O en condiciones de vapor a

la línea de H_2 caliente. Como en el caso del cátodo, se regulará la entrada de vapor de agua según las condiciones de humedad establecidas por el controlador, buscando que la línea superior quede saturada al 100%.

La línea inferior de H_2 también entrará a un tubo de calefacción, hasta los 80 [°C]. Sin embargo, en este caso, no se inyectará agua, ya que se busca que la línea inferior sea seca, con una saturación de 0%. Ambas líneas convergerán en una sola, generando una mezcla entre el H_2 húmedo y el H_2 seco. En esta sección se dispondrá de otro humidificador, el cual controlará la válvula reguladora del caudal de H_2 seco. Esta se abrirá o cerrará en función del nivel de humedad en el flujo, por lo que dejará pasar H_2 seco hasta alcanzar el límite establecido. Una vez se alcance este valor, la mezcla de H_2 entrará en la pila junto con la mezcla de aire, estableciendo las condiciones operacionales de la pila de combustible. Finalmente se analizará su rendimiento para determinar si los resultados obtenidos son los adecuados. Si la respuesta es negativa, se examinará que parámetros se deben modificar para alcanzar los valores deseados y se repetirá el experimento.

Como se puede observar, se trata de un proceso iterativo. El poder agilizar este procedimiento es el motivo por el que se ha realizado un análisis del banco de gases sintéticos por simulación, utilizando la herramienta VEMOD. Mediante las simulaciones efectuadas, se han configurado los controladores y los parámetros de medición, para obtener valores iniciales que poder establecer en el propio banco de trabajo a la hora de realizar los experimentos.

3.4 Otras herramientas

3.4.1 Matlab

El sistema de programación Matlab R2023b se utilizará para la extracción y el estudio de los resultados obtenidos en las simulaciones.

Inicialmente se realizó un código para analizar las simulaciones para ajustar los PIDs, el cual se encuentra en el Anexo A. Para este análisis se creó un script capaz de leer los datos extraídos de las simulaciones de VEMOD y guardarlos en una tabla. Además, se implementó un bucle *switch*, con el cual, dependiendo de la variable de control que se trate de ajustar, se leen las columnas de la tabla correspondientes al actuador y al sensor de dicho control. Finalmente, se dibujan las gráficas de los

resultados obtenidos según la variable de control que se desea estudiar. Se representan dos gráficos, uno para visualizar la variación del actuador en función del tiempo y otro para observar la tendencia que sigue el PID con el tiempo. En esta segunda gráfica, además, se dibuja la línea que representa el valor objetivo de la variable de control, la cual cambiará según cual sea el control estudiado.

Después, a la hora de realizar los estudios paramétricos una vez los PIDs estaban ajustados, este código fue modificado, creando un nuevo código, que también se puede observar en el Anexo A. Este se divide en dos scripts, uno para graficar el funcionamiento de los actuadores y de los PIDs para cada variable, y otro que calcula el tiempo que tarda en establecerse el PID con un error menor del 5%. De forma similar a como se ha explicado previamente, ambos códigos primero leen los archivos extraídos de las simulaciones y los guardan en una tabla. De esta tabla se leen las columnas que se tratan de analizar, que son la de los actuadores y los sensores, pero también las columnas de los valores objetivos, los de entrada y el error de los PIDs. Con estos valores, en el primer *script*, se utilizan para generar las gráficas y en el segundo, mediante un bucle *try*, se usan para encontrar la posición en la que el error relativo, entre el valor objetivo (*setpoint*) y el error absoluto, es menor del 5%. Una vez encuentra el último valor donde se cumple esa condición, devuelve el tiempo en el que ocurre, el cual se trata del tiempo de establecimiento del PID.

Finalmente se ha realizado un tercer código para poder analizar y comparar los resultados obtenidos en los ensayos con los de la simulación. De forma similar a los otros códigos, lee la tabla de datos introducida y establece los parámetros que se desean estudiar con sus respectivas columnas de datos. Después aplica el criterio explicado anteriormente para obtener los tiempos de establecimiento. El resultado de este código es una gráfica comparativa del parámetro que se desea estudiar obtenido en el ensayo con el obtenido por simulación.

3.4.2 Excel

La herramienta de Excel se ha utilizado para diversas funciones. Una de ellas es para el análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones. Los archivos DAT obtenidos tras las simulaciones de VEMOD se han exportado a una hoja de cálculo en Excel, con el fin de poder analizar todos los resultados de la simulación. Se ha utilizado Excel en este caso ya que la tabla generada con todos los datos extraídos

de la simulación es de grandes dimensiones, por lo que, mediante Excel, se consigue leer con comodidad y rapidez los resultados de las variables que se desean examinar, además de poder dibujar gráficas de forma sencilla para visualizar la tendencia de cualquier parámetro que se quiera estudiar.

Para los estudios paramétricos también se ha requerido el uso de Excel, para poder definir las matrices ortogonales de Taguchi, las cuales se han exportado como archivo CSV para cargarlas en la configuración de las simulaciones de VEMOD.

También se hecho uso de Excel para el cálculo de los caudales de las especies utilizadas en el banco de gases, para distintos valores de intensidad de la corriente y de estequiometría. Además, se han calculado los valores máximos y mínimos del flujo según la especie, para establecer los límites de los caudalímetros. Por otro lado, se ha creado un libro en Excel para el cálculo de la humedad, es decir, el valor de la fracción molar de H_2O , según la temperatura, la presión, el caudal de la especie y su gasto másico. Estos valores han sido utilizados para establecer el valor nominal con el que configurar inicialmente las simulaciones.

3.4.3 Statgraphics

Mediante el programa de Statgraphics 19, se han llevado a cabo dos tipos de análisis. El primero se trata de un Análisis de Varianza, también conocido como ANOVA, el cual se ha realizado tanto en el estudio paramétrico de las condiciones de operación como en el estudio del diseño del banco. El objetivo de estos análisis es relacionar los tiempos de establecimiento obtenidos para cada variable con los parámetros que se han analizado en el estudio, y así poder observar cuales son los que tienen una relación significativa.

Por otro lado, se ha realizado con el estudio paramétrico del diseño, un Análisis de Regresión. La finalidad de este tipo de análisis es generar un modelo que relacione las variables independientes, las cuales son los parámetros de diseño, con las variables dependientes, es decir, las variables del banco. Además, se obtiene el R^2 , un coeficiente utilizado para probar una hipótesis, que en este caso indica el porcentaje que explica el modelo ajustado respecto a la variabilidad en el parámetro analizado.

4 Resultados

El objetivo de este apartado es mostrar los resultados obtenidos durante la realización del Trabajo, tanto en la parte de simulación como en la experimental. En primer lugar, se hablará de los parámetros que se han considerado para realizar el análisis de la pila de combustible, que definirán las condiciones de su funcionamiento.

Por otro lado, se explicará el proceso para alcanzar los parámetros objetivos del diseño del banco y con ello definir los condicionantes del estudio. Además, se expondrán las diversas dificultades encontradas durante el diseño de la simulación, y sus correspondientes resoluciones, determinando las limitaciones del estudio.

Una vez establecidas las condiciones y limitaciones del proyecto, se explicará el procedimiento que se ha aplicado para la realización de los estudios paramétricos. Por un lado, se realizará un análisis de las condiciones de operación del banco, y por el otro se estudiarán los parámetros relacionados con el diseño del propio banco. Para realizar estos estudios se aplicarán las matrices ortogonales de Taguchi.

Finalmente, una vez se hayan realizado el análisis de ambos estudios, se aplicarán los resultados y las conclusiones obtenidas en el caso experimental. Se realizarán pruebas con el banco según los valores extraídos de la simulación para validar el modelo, y se ajustarán conforme a los resultados experimentales.

Contenido

4.1	Factores considerados durante el estudio.....	59
4.2	Limitaciones y condicionantes del estudio.....	59
4.3	Análisis de los resultados obtenidos mediante la simulación.....	64
4.3.1	Metodología del análisis paramétrico	64
4.3.2	Análisis paramétrico de las condiciones de operación.....	66
4.3.3	Análisis paramétrico del diseño del banco.....	73
4.4	Análisis de los resultados obtenidos experimentalmente.....	82

4.1 Factores considerados durante el estudio

Para el estudio de la pila de hidrógeno se han tenido en cuenta una serie de parámetros que influyen en su comportamiento y rendimiento. Estas variables consideradas definirán el control del funcionamiento del banco de trabajo, analizando sus resultados según los objetivos del estudio, y son,

1. Caudales: se debe regular la entrada de los gases del ánodo y del cátodo, es decir, del caudal másico de N_2 , O_2 y H_2 , calculado mediante las ecuaciones 3.2, 3.3 y 3.4. Para variar el caudal, se modificará la corriente eléctrica que se aplicará en el banco, la cual es directamente proporcional, mientras que la estequiometría se mantendrá constante.
2. Temperatura: se controlará el nivel de calor proporcionado por el tubo calefactado para que la mezcla de aire resultante esté a la temperatura adecuada para el funcionamiento de la pila.
3. Humedad: se debe estudiar la cantidad de agua que se inyecta en la mezcla de gases tanto del cátodo como del ánodo. Para ello se medirá la fracción molar de agua que se desea conseguir en cada línea, de forma independiente.

Otros parámetros a tener en cuenta son las condiciones de contorno del banco y las variables relacionadas con el diseño de sus componentes, los cuales pueden alterar el rendimiento del banco de trabajo son. Por lo tanto, se realizará un análisis tanto de las condiciones operacionales de banco como su diseño.

4.2 Limitaciones y condicionantes del estudio

Previamente al estudio paramétrico de las variables, primero se ha tenido que realizar numerosas pruebas para lograr que la simulación funcionase de forma correcta y se obtuviesen resultados satisfactorios.

Previamente a la realización del modelo, se tuvo que estudiar el diseño del banco de trabajo, de forma que el concepto del banco de gases experimental se pudiese trasladar a la simulación. Se realizaron diversas pruebas para decidir cuáles eran los componentes adecuados para que funcionase la simulación de forma correcta. Para probar el modelo, primero solo se diseñó la línea del cátodo, y cuando se calibró y se obtenían buenos resultados, se introdujo la línea del ánodo. Al principio se establecieron las líneas calefactadas después de la inyección del agua, pero para

conseguir que se mantuviese la temperatura del vapor, se decidió colocar la línea calefactada antes de las válvulas de H_2O . Aparecieron diversos problemas respecto a la presurización de las líneas, provocando que, en la línea inferior, parte de flujo se revirtiese, y entrase H_2 húmedo en la línea seca, por lo que la humedad no se estabilizaba, como se observa en la Figura 4.1. Para solucionarlo, se establecieron válvulas de coeficiente de descarga fijo a la salida de ambas líneas, obteniendo finalmente el diseño que se observa en la Figura 3.5.

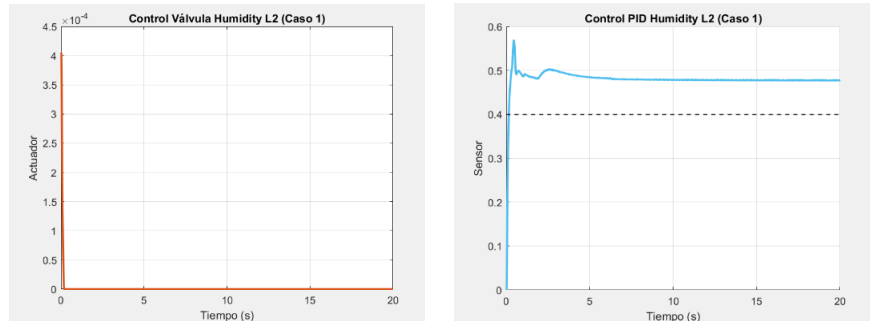


Figura 4.1. Resultados obtenidos con el problema de presurizado del ánodo.

Después se realizó el estudio del control, tanto de las válvulas como de los enfriadores 0D. Considerando las variables que se desean controlar durante la simulación, se definieron los sensores necesarios para poder actuar sobre ellas. Para conseguir una buena respuesta sobre dichas actuaciones, fue necesario el ajuste de los PIDs. Por lo tanto, tras numerosas pruebas, se obtuvo la configuración de los valores del Proporcional y del Integral que generasen buenos resultados, para que la respuesta se establezca de forma rápida y robusta, sin grandes sobreoscilaciones. En el caso del PID de la humedad de la línea de H_2 , se ha definido negativo, ya que actúa de forma inversa al resto de actuadores, debido a que debe abrir la válvula del caudal de H_2 seco para reducir la humedad entrante de la línea de H_2 húmedo. Para lograr el ajuste de los PIDs, surgieron dificultades a la hora de alcanzar la estabilidad de la temperatura de salida en la línea del ánodo, la cual provocaba que la humedad no lograra alcanzar el valor objetivo. Para resolverlo, se tuvo que reducir el coeficiente de intercambio de calor de las tuberías de salida. En la Figura 4.2 vemos en la parte superior los resultados obtenidos con un coeficiente de intercambio de 1 y en la inferior con un coeficiente de 0.3. Esto implica que, a la hora de realizar el ensayo de forma experimental, será de vital importancia que las tuberías calefactadas estén bien aisladas para impedir que se pierda temperatura.

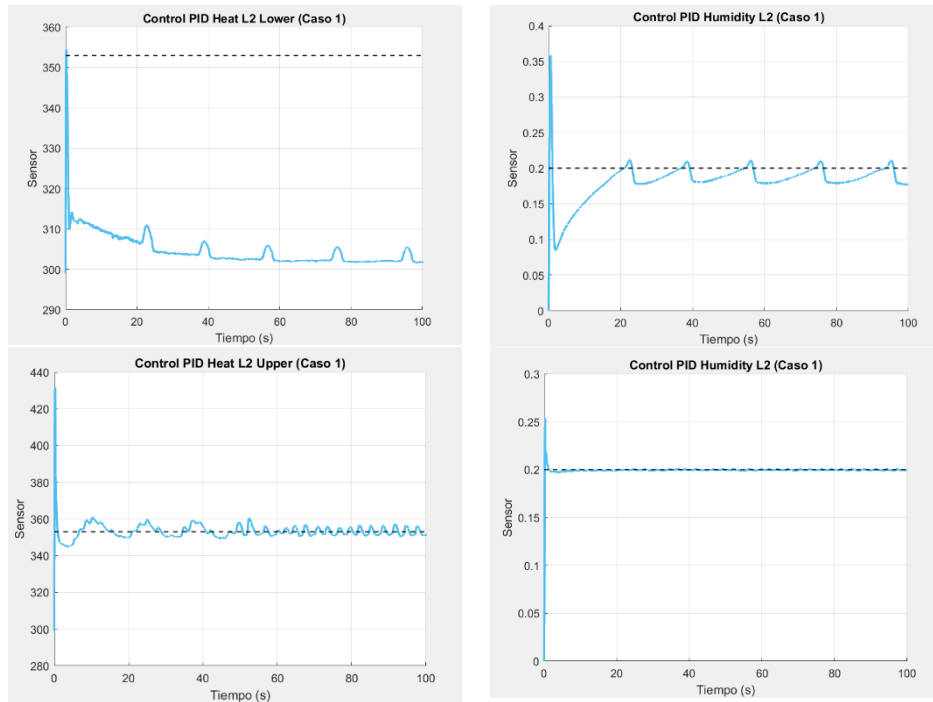


Figura 4.2. Comparación resultados calor y humedad al aislar la tubería.

Finalmente, los parámetros obtenidos para la configuración del caso final son los definidos en la Tabla 4.1, Tabla 4.2, Tabla 4.3 y Tabla 4.4.

Condiciones de contorno	
Presión [Pa]	
Ambiente	100000
Gas	600000
Temperatura [K]	
Ambiente	298.15
Vapor	473.15

Tabla 4.1. Condiciones de contorno de la simulación.

Parámetros de diseño	
Diámetros [mm]	
Tuberías	0.006
Válvulas	0.006
Longitudes [m]	
Tuberías N ₂ y O ₂	0.5
Tuberías H ₂	0.5
Tubería calefactada	2.5
Tubería de salida	0.5
Volumen [m ³]	
Depósitos	2.00E-04
Enfriadores	1.41E-05

Tabla 4.2. Parámetros de diseño del banco en la simulación.

Valores objetivo PID	
Parámetros cálculo caudal	
I [mA/cm ²]	700
λ_{O_2} [-]	2
λ_{H_2} [-]	1.5
K_{O_2} [-]	1.67E-09
K_{H_2} [-]	1.05E-10
Caudales [kg/s]	
N ₂	7.83E-06
O ₂	2.34E-06
H ₂	1.10E-07
Fracción molar H ₂ O [-]	
Humedad cátodo	0.2
Humedad ánodo	0.2
H ₂ húmedo	0.68
Calor [K]	353

Tabla 4.3. Valores objetivo establecidos en los PIDs de la simulación.

Valores de los PIDs	
N_2	
P	I
21	25
O_2	
P	I
20	25
Humedad cátodo	
P	I
0.1	0.01
Calor cátodo	
P	I
6	13
H_2	
P	I
6	22
Calor ánodo línea superior	
P	I
0.001	16
Calor ánodo línea inferior	
P	I
0.001	26
H_2 húmedo	
P	I
0.1	0.01
Humedad ánodo	
P	I
-0.5	-0.1

Tabla 4.4. Valores de los PIDs de los parámetros de estudio.

4.3 Análisis de los resultados obtenidos mediante la simulación

4.3.1 Metodología del análisis paramétrico

A fin de estudiar la robustez del modelo generado se van a realizar una serie de estudios paramétricos que analicen la sensibilidad de su respuesta a variaciones tanto de las condiciones de operación (dentro de los rangos típicos de trabajo) como de los parámetros de diseño del banco, que pueden verse modificados en la fase final de construcción e implementación física de la instalación.

Para ello se ha utilizado el método de las matrices ortogonales de Taguchi para diseño de experimentos, que permite analizar una cantidad alta de parámetros con un número de simulaciones reducido. Esta matriz depende del número de parámetros y niveles a estudiar que se establezcan como objetivo. En nuestro caso se analizarán 5 parámetros, los cuales vienen definidos por 3 niveles ($P=5$ y $L=3$). Cuando el parámetro a esté a nivel 1, el parámetro b será ensayado dos veces en cada nivel, al igual que los parámetros c y d . Esto significa que, con 3 niveles, por 6 veces que serán ensayados cada nivel de cada parámetro, se necesitarán realizar 18 simulaciones. [16]

Taguchi (P=5, L=3)					
Run	a	b	c	d	e
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	2	1	1	2	2
5	2	2	2	3	3
6	2	3	3	1	1
7	3	1	2	1	3
8	3	2	3	2	1
9	3	3	1	3	2
10	1	1	3	3	2
11	1	2	1	1	3
12	1	3	2	2	1
13	2	1	2	3	1
14	2	2	3	1	2
15	2	3	1	2	3
16	3	1	3	2	3
17	3	2	1	3	1
18	3	3	2	1	2

Tabla 4.5. Matriz ortogonal de Taguchi para 5 parámetros con 3 niveles.

4.3.2 Estudio paramétrico de las condiciones de operación

Primero se realizará un estudio paramétrico respecto a las condiciones de operación bajo las cuales actúa el banco de gases sintéticos. Los parámetros que se han tenido en cuenta para este análisis son,

1. Calor L1/L2: la temperatura que se debe alcanzar a la salida de la línea, tanto del ánodo como del cátodo.
2. Humedad L1: la humedad que se debe obtener en la línea del cátodo.
3. Humedad L2: la humedad que se debe obtener en la línea del ánodo.
4. Intensidad: la intensidad de la corriente, la cual afecta al caudal de O_2 , N_2 y H_2 que se inyectará a la entrada de cada línea.
5. P_{amb} : la presión ambiente a la que se encuentra el banco de trabajo.

Los niveles que se aplicarán durante el estudio son,

1. Valor nominal: es el valor teórico que se ha establecido para el diseño inicial de la simulación, según los cálculos realizados de forma preliminar en base a ciertas hipótesis establecidas.
2. Valor inferior: por debajo del nominal.
3. Valor superior: por encima del nominal.

La Tabla 4.6 establece los valores de cada parámetro que se han considerado a lo largo del estudio.

Estudio paramétrico condiciones de operación			
Variables	Valor nominal	Valor inferior	Valor superior
Calor L1/L2 [K]	353.15	323	373
Humedad L1 [-]	0.2	0.05	0.33
Humedad L2 [-]	0.2	0.05	0.5
Intensidad [mA/cm ²]	700	300	2000
P_{amb} [Pa]	100000	100000	300000

Tabla 4.6. Valores estudio paramétrico de las condiciones de operación del banco.

Con los valores de la Tabla 4.6 se definirá la matriz ortogonal de Taguchi que se utilizará para este estudio, la cual viene definida en la Tabla 4.7.

Matriz ortogonal de Taguchi para las condiciones de operación					
Run	Calor L1/L2 [K]	Humedad L1 [-]	Humedad L2 [-]	Intensidad [mA/cm ²]	P _{amb} [Pa]
1	353.15	0.2	0.2	700	100000
2	353.15	0.05	0.05	300	100000
3	353.15	0.33	0.5	2000	300000
4	323	0.2	0.2	300	100000
5	323	0.05	0.05	2000	300000
6	323	0.33	0.5	700	100000
7	373	0.2	0.05	700	300000
8	373	0.05	0.5	300	100000
9	373	0.33	0.2	2000	100000
10	353.15	0.2	0.5	2000	100000
11	353.15	0.05	0.2	700	300000
12	353.15	0.33	0.05	300	100000
13	323	0.2	0.05	2000	100000
14	323	0.05	0.5	700	100000
15	323	0.33	0.2	300	300000
16	373	0.2	0.5	300	300000
17	373	0.05	0.2	2000	100000
18	373	0.33	0.05	700	100000

Tabla 4.7. Matriz ortogonal de Taguchi para las condiciones de operación.

Esta matriz se introducirá en la configuración del caso en VEMOD, obteniendo así los resultados para las 18 simulaciones. Mediante el código realizado con Matlab, que se muestra en el Anexo A, se analizarán estos resultados efectuando dos tipos de gráficas para cada parámetro de control del banco. Una de las gráficas representará el comportamiento del actuador para poder alcanzar el valor objetivo, mientras que la otra gráfica mostrará la conducta que ejerce el PID para estabilizarse. Por último, también se obtendrá el tiempo de estabilización, es decir, el tiempo que tarda el PID en alcanzar un error menor del 5% respecto al valor objetivo del mismo.

En la Figura 4.3 y Figura 4.4 se observan las gráficas obtenidas en el Caso 1, que se trata de la simulación en la que todas las variables se encuentran a nivel 1, es

decir, en valor nominal. El resto de los resultados de estas simulaciones se encuentran incorporadas en el Anexo B.

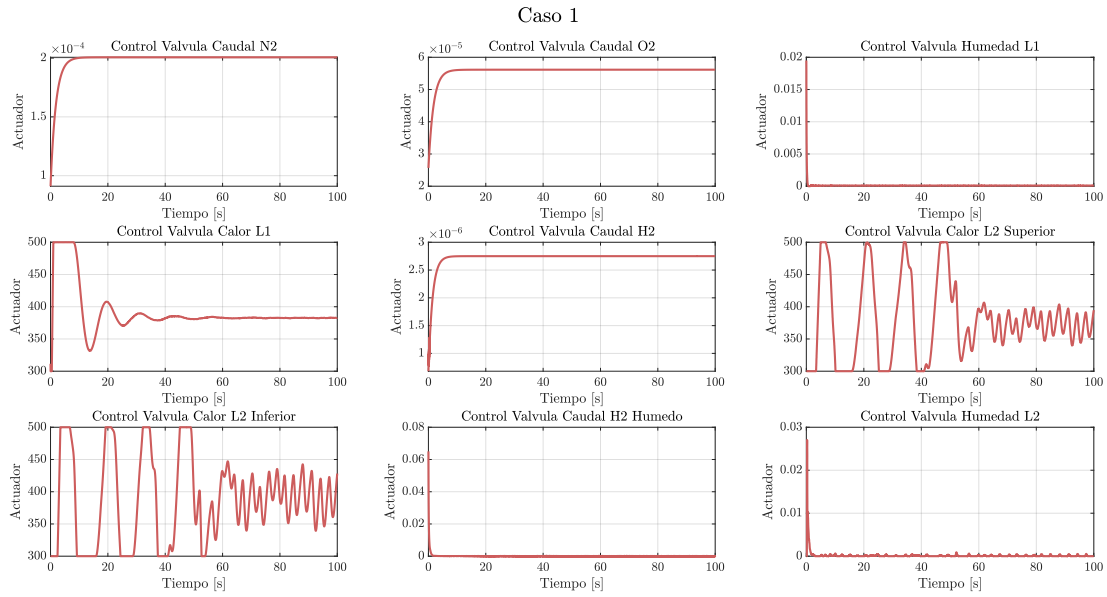


Figura 4.3. Respuesta del actuador en el Caso 1 para el estudio de las condiciones de operación.

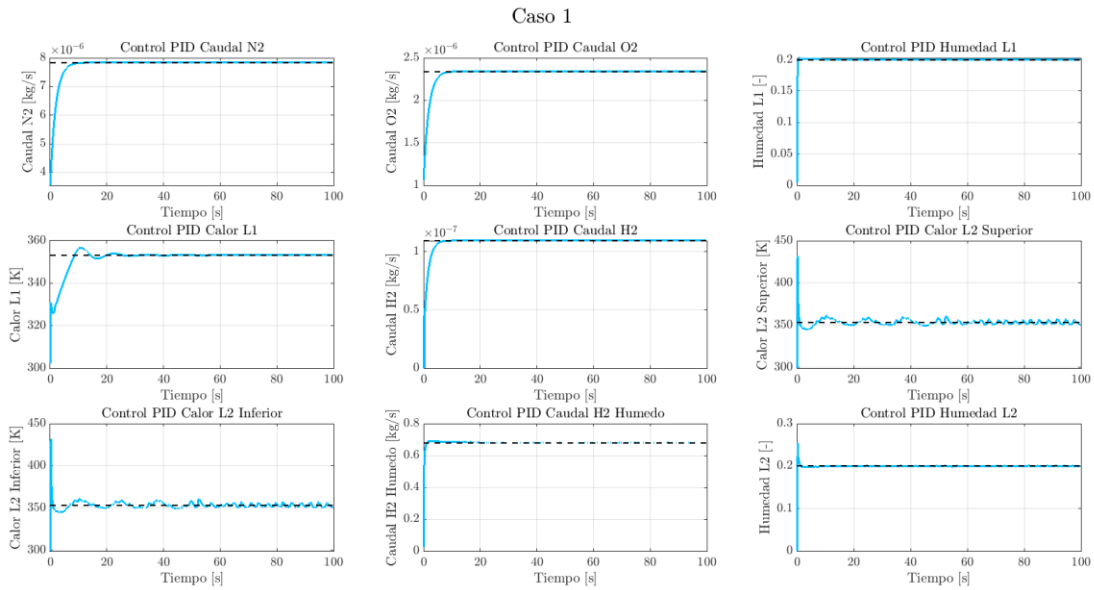


Figura 4.4. Respuesta de los PIDs en el Caso 1 para las condiciones de operación.

Finalmente, la Tabla 4.8 resume los tiempos de establecimiento obtenidos en todos los parámetros para todas las simulaciones lanzadas.

Run	Caudal N2	Caudal O2	Humedad L1	Calor L1	Caudal H2	Calor L2 Superior	Calor L2 Inferior	Caudal H2 húmedo	Humedad L2
1	4.46	4.20	0.32	3.36	3.86	0.06	0.06	0.57	0.18
2	4.46	4.20	0.30	18.26	2.28	2.57	2.57	0.47	11.17
3	4.46	4.20	0.83	0.22	3.96	0.13	0.13	1.05	99.99
4	4.46	4.20	0.32	0.01	2.28	0.03	0.03	0.57	0.18
5	4.46	4.20	0.80	0.73	3.98	0.07	0.07	1.09	14.33
6	4.46	4.20	0.35	0.01	3.86	0.03	0.03	0.60	99.99
7	4.46	4.20	0.80	16.55	3.90	3.05	3.05	1.04	14.36
8	4.46	4.20	0.30	40.23	2.28	0.08	0.08	0.60	99.99
9	4.46	4.20	0.36	1.76	3.94	2.17	2.17	0.57	0.18
10	4.46	4.20	0.32	1.59	3.94	0.06	0.06	0.60	99.99
11	4.46	4.20	0.79	17.94	3.87	0.13	0.13	1.06	0.39
12	4.46	4.20	0.35	1.80	2.28	2.57	2.57	0.47	11.17
13	4.46	4.20	0.32	0.01	3.94	0.03	0.03	0.47	11.44
14	4.46	4.20	0.30	1.67	3.86	0.03	0.03	0.60	99.99
15	4.46	4.20	0.82	0.03	2.28	0.07	0.07	1.06	0.39
16	4.46	4.20	0.80	37.28	2.28	0.17	0.17	1.05	99.99
17	4.46	4.20	0.28	5.56	3.94	2.17	2.17	0.57	0.18
18	4.46	4.20	0.35	4.27	3.86	6.19	6.19	0.47	11.79

Tabla 4.8. Tiempos de establecimiento para las condiciones de operación.

4.3.2.1 Análisis de la Varianza de las condiciones de operación

Mediante la matriz de Taguchi de las condiciones de operación, Tabla 4.7 y los resultados obtenidos de los tiempos de establecimiento de los parámetros, Tabla 4.8, se realizará un análisis de la Varianza con Statgraphics.

Para ello se realizará una ANOVA Multifactorial en la que los factores serán las 5 condiciones de operación estudiadas y las variables dependientes serán los 9 parámetros que se están analizando. El resumen de los resultados de dicho análisis se muestra en la Tabla 4.8, siendo el dato más relevante el Valor-P, cuyo valor es tanto más bajo cuanto mayor es la importancia de dicho parámetro en la respuesta que se está analizando (en nuestro caso, el tiempo de estabilización). De este modo, se fija un umbral de dicho Valor-p de 0.05, que representa que dicho parámetro tiene influencia sobre la respuesta con un intervalo de confianza del 95%.

Para los dos primeros parámetros, los caudales de N_2 y O_2 , no se puede realizar el estudio, ya que, como podemos observar en la Tabla 4.8, el tiempo de estabilización no varía, lo que indica que estos parámetros no son dependientes de las condiciones de operación estudiadas. Por ejemplo, para el caso de la Humedad en la línea del cátodo se obtienen los siguientes resultados:

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Calor L1/L2	0.0000444444	2	0.0000222222	0.21	0.8150
B: Humedad L1	0.00714444	2	0.00357222	33.73	0.0001
C: Humedad L2	0.0000777778	2	0.0000388889	0.37	0.7038
D: Intensidad	0.0000444444	2	0.0000222222	0.21	0.8150
E: P_{amb}	0.937669	1	0.937669	8854.06	0.0000
RESIDUOS	0.000847222	8	0.000105903		
TOTAL	0.945828	17			

Tabla 4.9. Resumen del ANOVA Multifactorial para la Humedad L1.

Como podemos observar en la Tabla 4.9, para el caso de la humedad en el cátodo, las variables de las que es dependiente son la Humedad L1 y la presión ambiente (P_{amb}), ya que el Valor-P es inferior a 0.05.

La Figura 4.5 representa el Gráfico de Residuos para la humedad en el cátodo, con la cual podemos examinar la bondad de ajuste del ANOVA. Si miramos el eje Y, comprobamos que los valores de los residuos son muy pequeños, por lo que podemos afirmar que el análisis realizado cumple con los supuestos de los mínimos cuadrados ordinarios.

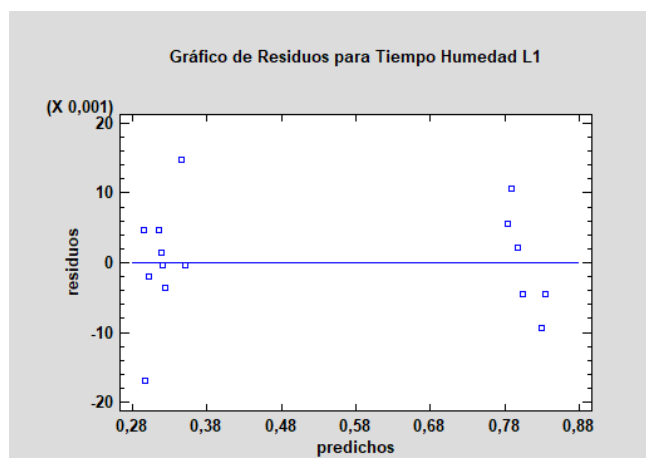


Figura 4.5. Gráfico de Residuos para la Humedad en el cátodo.

La Tabla 4.10 resume los resultados obtenidos con el ANOVA multifactorial para todos los parámetros, en los que la X indica cuales son las variables de las que dependen, es decir, en la que se obtiene un Valor-P inferior a 0.05.

	Calor L1/L2	Humedad L1	Humedad L2	Intensidad	P _{amb}
Caudal N ₂					
Caudal O ₂					
Humedad L1		X			X
Calor L1	X	X		X	
Caudal H ₂				X	X
Calor L2 Superior	X		X		
Calor L2 Inferior	X		X		
Caudal H ₂ húmedo			X		X
Humedad L2			X		X

Tabla 4.10. Dependencia de las variables respecto a las condiciones de operación.

Como se puede observar, excepto por el caso de los caudales de N₂ y O₂, el resto de las variables son dependientes de las condiciones de operación. Los caudales de N₂ y O₂, al no depender de ningún factor nos indica que los PIDs diseñados no se ven alterados ante una variación de las condiciones, por lo que son muy robustos. Sin embargo, el caudal de H₂ sí se ve afectado por la variación de intensidad y de la presión ambiental, pero, cómo podemos ver en la Tabla 4.8, los tiempos obtenidos son bastante homogéneos, por lo que podemos afirmar que el PID responde de forma adecuada ante cualquier variación de las condiciones.

Por otro lado, el calor de la línea del cátodo depende del calor que se requiere, de la humedad y de la intensidad. En la Tabla 4.8 se comprueba que los tiempos son bajos excepto en los casos 8 y 16, los cuales coinciden cuando el calor y la humedad están en nivel máximo, y la intensidad en nivel inferior. Esto significa que, bajo dichas condiciones, el PID no logra una buena respuesta, por lo que se debe evitar usar esos valores para que la respuesta sea más rápida.

En cambio, para el calor del ánodo, también dependientes del calor y la humedad, muestran tiempos de establecimiento bajos. Sin embargo, si observamos las gráficas del Anexo B, en algunos casos como el 2, el 5 o el 7, los cuales coinciden cuando el valor de la humedad en el ánodo es mínimo, aparecen sobreoscilaciones. Esto supone que la respuesta no logra estabilizarse por completo en el valor objetivo, y aunque el error no sea muy elevado, es preferible evitar estas condiciones.

En los casos de humedad y del caudal de H_2 húmedo, dependen lógicamente del valor de la humedad en la línea, y de la presión atmosférica. En el caso de la humedad de la línea del cátodo, los tiempos de establecimiento son en general bajos, nunca superan el segundo, por lo que se puede confirmar que el PID actúa de forma rápida y robusta. Lo mismo se puede concluir para el caso del caudal de H_2 húmedo, ya que los tiempos obtenidos son rápidos y uniformes. No obstante, para el ánodo, aparecen mayores dificultades a la hora de alcanzar el valor objetivo. Como vemos en la Tabla 4.8, y se puede comprobar en las gráficas del Anexo B, en los casos 3, 6, 8, 10, 14 y 16 el PID no logra estabilizarse. Estos coinciden cuando el valor de la humedad es el máximo, por lo que podemos deducir que el diseño del caso no es compatible con un valor objetivo de humedad de 0.5, y se tendrá que establecer valores inferiores a este.

4.3.3 Estudio paramétrico del diseño del banco

De forma análoga al estudio previo, se realizará un estudio paramétrico respecto a las variables de diseño del banco de gases sintéticos, considerando como parámetros:

1. Longitud tubería calefactada: para las tuberías por las cuales se calentarán los gases de las líneas.
2. Longitud entradas y salidas: se tiene en cuenta tanto las tuberías de entrada de O_2 , N_2 y H_2 como las tuberías de salida después de las tuberías calefactadas.
3. Volumen H_2O : volumen del pleno de la mezcla del gas con agua.
4. Volumen Enfriador: volúmenes de los enfriadores que se encuentran en la línea del cátodo y del ánodo, los cuales representan las tuberías calefactadas.
5. Diámetro válvulas, común para todos los caudalímetros disponibles.

Los niveles que se aplicarán serán los mismos que los del estudio paramétrico de las condiciones, definidos en la Tabla 4.11:

Estudio paramétrico de diseño			
VARIABLES	Valor nominal	Valor inferior	Valor superior
Longitud tubería calefactada [m]	2.5	1	4
Longitud entradas y salidas [m]	0.5	0.1	1
Volumen H_2O [m^3]	0.0002	1.00E-04	5.00E-04
Volumen Enfriador [m^3]	1.41E-05	1.00E-05	1.00E-04
Diámetro válvulas [mm]	0.006	0.003	0.01

Tabla 4.11. Valores estudio paramétrico de los parámetros de diseño del banco.

Con estos valores se definirá la matriz ortogonal de Taguchi para este caso.

Matriz ortogonal de Taguchi para los parámetros de diseño					
Run	Longitud tubería calefactada [m]	Longitud entradas y salidas [m]	Volumen H ₂ O [m ³]	Volumen Enfriador [m ³]	Diámetro válvulas [mm]
1	2.5	0.5	0.0002	1.41E-05	0.006
2	2.5	0.1	1.00E-04	1.00E-05	0.003
3	2.5	1	5.00E-04	1.00E-04	0.01
4	1	0.5	0.0002	1.00E-05	0.003
5	1	0.1	1.00E-04	1.00E-04	0.01
6	1	1	5.00E-04	1.41E-05	0.006
7	4	0.5	1.00E-04	1.41E-05	0.01
8	4	0.1	5.00E-04	1.00E-05	0.006
9	4	1	0.0002	1.00E-04	0.003
10	2.5	0.5	5.00E-04	1.00E-04	0.003
11	2.5	0.1	0.0002	1.41E-05	0.01
12	2.5	1	1.00E-04	1.00E-05	0.006
13	1	0.5	1.00E-04	1.00E-04	0.006
14	1	0.1	5.00E-04	1.41E-05	0.003
15	1	1	0.0002	1.00E-05	0.01
16	4	0.5	5.00E-04	1.00E-05	0.01
17	4	0.1	0.0002	1.00E-04	0.006
18	4	1	1.00E-04	1.41E-05	0.003

Tabla 4.12. Matriz ortogonal de Taguchi para los parámetros de diseño.

Como se ha explicado en el estudio anterior, esta matriz se introducirá en la configuración del caso en VEMOD, obteniendo así los resultados para las 18 simulaciones. En la Figura 4.6 y Figura 4.7 se observan las respuestas obtenidas para el Caso 1, con los valores nominales, las cuales son idénticas a las del estudio de las condiciones de operación, ya que ambos se tratan del caso estándar con el que se ha realizado el diseño del banco. El resto de las gráficas se encuentran en el Anexo B.

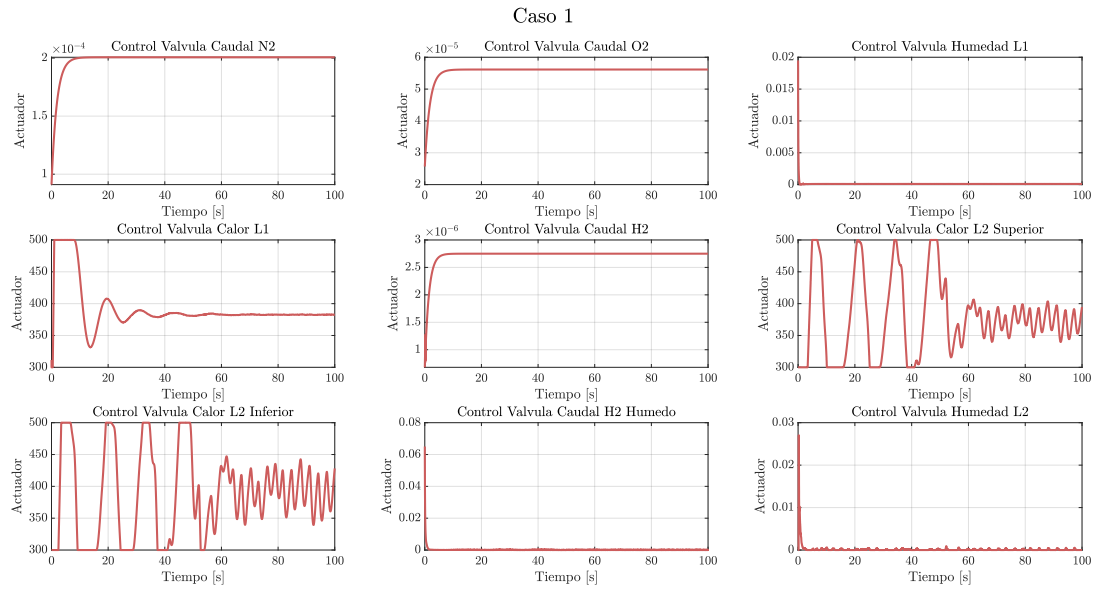


Figura 4.6. Respuesta del actuador en el Caso 1 para los parámetros de diseño.

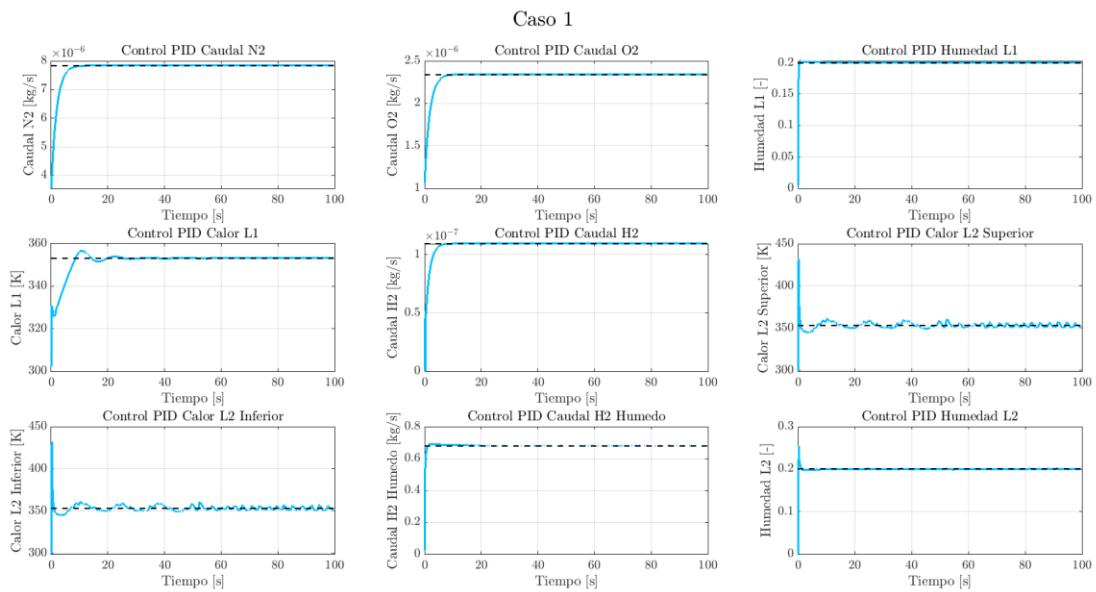


Figura 4.7. Respuesta de los PIDs en el Caso 1 para los parámetros de diseño.

En la Tabla 4.13 se encuentran los tiempos de establecimiento obtenidos en el estudio de los parámetros de diseño.

Run	Caudal N2	Caudal O2	Humedad L1	Calor L1	Caudal H2	Calor L2 Superior	Calor L2 Inferior	Caudal H2 húmedo	Humedad L2
1	4.46	4.20	0.32	3.36	3.86	0.06	0.06	0.57	0.18
2	13.87	13.03	0.54	5.11	9.33	1.14	1.14	40.02	8.54
3	99.99	99.99	0.83	0.12	0.86	99.99	99.99	1.46	99.99
4	13.87	13.03	1.01	0.09	9.33	0.08	0.08	1.25	0.49
5	99.99	99.99	0.16	0.07	1.71	0.01	0.01	88.92	9.77
6	4.46	4.20	0.74	0.02	3.86	0.10	0.10	1.08	99.99
7	99.99	99.99	0.20	3.67	1.68	99.99	99.99	0.35	10.99
8	4.46	4.20	0.64	52.56	2.28	0.12	0.12	0.88	99.99
9	13.87	13.02	1.59	4.67	14.22	99.99	99.99	2.71	0.59
10	13.87	13.02	2.35	4.66	14.22	0.37	0.37	3.30	99.99
11	99.96	99.96	0.31	5.00	1.66	0.04	0.04	32.07	0.23
12	4.46	4.20	0.23	2.06	2.28	19.77	19.77	0.26	9.89
13	4.46	4.20	0.18	0.01	3.94	0.02	0.02	0.93	16.64
14	13.87	13.02	2.11	1.39	13.85	0.11	0.11	2.27	99.99
15	99.97	99.97	0.37	0.01	99.97	0.05	0.05	0.56	0.26
16	99.98	99.98	0.70	12.43	99.98	0.20	0.20	1.20	99.99
17	4.46	4.20	0.27	6.24	3.94	0.05	0.05	95.53	0.13
18	13.87	13.03	0.64	4.68	13.85	49.48	49.48	0.81	16.63

Tabla 4.13. Tiempos de establecimiento para los parámetros de diseño.

4.3.3.1 Análisis de la Varianza de los parámetros de diseño

Como se ha explicado para el estudio de las condiciones de operación, se realizará de forma análoga un ANOVA multifactorial para los parámetros de diseño, analizando los Valores-P obtenidos. Con la Tabla 4.14, se resumen de que parámetros depende cada variable, los cuales vienen señalizados con una X cuando su Valor-P es inferior a 0.05.

Según los resultados obtenidos, en las variables de calor, tanto en el ánodo como en el cátodo, y en el caudal de H₂ no se encuentra una dependencia con los parámetros de diseño, lo cual no es correcto según se puede observar en la Tabla 4.13. Para el calor del cátodo, en el caso 8, el tiempo de establecimiento es muy elevado, pero es difícil concretar a que parámetro se debe. Por otro lado, el calor del ánodo, para los casos 3, 7, 9 y el 18, la respuesta y tiempo para estabilizarse no son

favorables, pero tampoco se consigue encontrar una relación directa con los parámetros de diseño. Por último, para el caudal de H_2 , en general se consigue estabilizar de forma rápida y segura en todos los casos, exceptuando 15 y 16, donde el PID se satura. El que no exista una correlación entre los parámetros y cómo actúan estas variables se debe a que no dependen principalmente de un único parámetro, sino de cómo actúan todos en su conjunto.

	Longitud tubería calefactada	Longitud entradas y salidas	Volumen H_2O	Volumen Enfriador	Diámetro válvulas
Caudal N_2					X
Caudal O_2					X
Humedad L1			X		X
Calor L1					
Caudal H_2					
Calor L2 Superior					
Calor L2 Inferior					
Caudal H_2 húmedo		X			
Humedad L2		X	X		

Tabla 4.14. Dependencia de las variables respecto a los parámetros de diseño.

Para el caso de los caudales del cátodo, N_2 y O_2 , estos dependen del diámetro de las válvulas. En los casos 3, 5, 7, 11, 15 y 16, los cuales coinciden cuando el diámetro es máximo, 0.01 [m], los PIDs se saturan, por lo que se deberán utilizar válvulas con un diámetro inferior.

En el caso de la humedad en el cátodo, vemos una dependencia con el volumen de H_2O y el diámetro de las válvulas. Viendo la Tabla 4.13 vemos que los tiempos obtenidos son bastante rápidos y homogéneos, por lo que podemos concluir que se pueden modificar los parámetros de diseño sin influir de forma drástica sobre la humedad del cátodo. Sin embargo, para el ánodo, se observa que depende también del volumen de H_2O , pero en este caso influye la longitud de las tuberías de entrada y salida. En los casos 3, 6, 8, 10, 14 y 16, no se consigue estabilizar la respuesta, que ocurre cuando el valor del volumen de H_2O es máximo, por lo que se tendrá que utilizar un volumen del depósito de la mezcla con agua más pequeño. Por último, el caudal de H_2 húmedo se ve afectado por la longitud de las entradas y salidas. Viendo las gráficas del caso 2, 5, 11 y 17, aparece una pequeña oscilación, la cual se da cuando la longitud de la tubería es de 0.1 [m], es decir, el valor inferior, por lo que es recomendable que la tubería sea más larga, aunque este parámetro no afecta de forma drástica en la respuesta, ya que se sigue estabilizando.

4.3.3.2 Análisis de Regresión de los parámetros de diseño

Además del Análisis de Varianza, para el estudio del diseño del banco, se ha realizado un Análisis de Regresión, con la finalidad de encontrar un modelo de regresión lineal que se ajuste a los parámetros analizados y poder con él optimizar el diseño del banco.

Para realizar este análisis se ha empleado un modelo de regresión múltiple donde las variables dependientes son las variables del estudio y las independientes son los parámetros de diseño. Por ejemplo, para el caudal de N_2 se obtienen los siguientes resultados, Tabla 4.15, Tabla 4.16 y Tabla 4.17.

Análisis de Varianza					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	24733.0	5	4946.6	6.97	0.0029
Residuo	8522.06	12	710.172		
Total	33255.1	17			

Tabla 4.15. Análisis de Varianza del modelo para el Caudal N_2 .

Puesto que el valor-P en la ANOVA es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95%.

R-cuadrada [%]	74.37
R-cuadrada ajustada a G1 [%]	63.69
Error estándar del estimado [-]	26.65
Error absoluto medio [-]	20.45
Estadístico Durbin-Watson [-]	2.23 (P=0.77)

Tabla 4.16. Resultados del Análisis de Regresión para el Caudal N_2 .

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 74.37% de la variabilidad en el Caudal N_2 . El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 63.69%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 26.65. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones. El error absoluto medio (MAE) de 20.45 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden presentado en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es mayor que 0.05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95%.

Finalmente, la ecuación del modelo ajustado es,

$$\begin{aligned}
 \text{Caudal } N_2 = & -42.44 + 0.00056 \cdot \text{Longitud tubería calefactada} \\
 & + 0.0016 \cdot \text{Longitud entradas y salidas} \\
 & + 1.99 \cdot \text{Volumen } H_2O + 56.58 \cdot \text{Volumen Enfriador} \\
 & + 12927.3 \cdot \text{Diámetro válvulas}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Para simplificar el modelo, nos fijaremos en el Valor-P de las variables independientes, definidas en la Tabla 4.17,

Parámetro	Valor-P
CONSTANTE	0.1128
Longitud tubería calefactada	0.9999
Longitud entradas y salidas	0.9999
Volumen H2O	1.0000
Volumen Enfriador	0.9997
Diámetro válvulas	0.0001

Tabla 4.17. Valor-P de los parámetros del modelo del Caudal N_2 .

Como podemos ver el valor-P más alto de las variables independientes es 1, que corresponde al Volumen H₂O. Puesto que el valor-P es mayor que 0.05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95%. Consecuentemente, debería considerarse eliminar este término del modelo.

El resto de los resultados se incorporarán en el Anexo B, por lo que a continuación se definirán las ecuaciones de los modelos ajustados para cada variable,

$$\begin{aligned} \text{Caudal } O_2 = & -43.55 + 0.00056 \cdot \text{Longitud tubería calefactada} \\ & + 0.0016 \cdot \text{Longitud entradas y salidas} \\ & + 5.8 \cdot \text{Volumen } H_2O + 27.54 \cdot \text{Volumen Enfriador} \\ & + 13045 \cdot \text{Diámetro válvulas} \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} \text{Humedad L1} = & 0.88 - 0.029 \cdot \text{Longitud tubería calefactada} \\ & + 0.061 \cdot \text{Longitud entradas y salidas} \\ & + 2185.88 \cdot \text{Volumen } H_2O + 2845.39 \cdot \text{Volumen Enfriador} \\ & - 127.27 \cdot \text{Diámetro válvulas} \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \text{Calor L1} = & -3.48 + 4.59 \cdot \text{Longitud tubería calefactada} \\ & - 10.62 \cdot \text{Longitud entradas y salidas} \\ & + 24456.4 \cdot \text{Volumen } H_2O - 59241.2 \cdot \text{Volumen Enfriador} \\ & - 80.97 \cdot \text{Diámetro válvulas} \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} \text{Caudal } H_2 = & -15.89 + 0.18 \cdot \text{Longitud tubería calefactada} \\ & + 18.19 \cdot \text{Longitud entradas y salidas} \\ & + 33040.9 \cdot \text{Volumen } H_2O - 186398 \cdot \text{Volumen Enfriador} \\ & + 3370.04 \cdot \text{Diámetro válvulas} \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \text{Calor L2 Superior} = & -53.6 + 13.86 \cdot \text{Longitud tubería calefactada} \\ & + 49.88 \cdot \text{Longitud entradas y salidas} \\ & - 22202.6 \cdot \text{Volumen } H_2O + 225801 \cdot \text{Volumen Enfriador} \\ & + 1511.85 \cdot \text{Diámetro válvulas} \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \text{Calor L2 Inferior} = & -53.6 + 13.86 \cdot \text{Longitud tubería calefactada} \\ & + 49.88 \cdot \text{Longitud entradas y salidas} \\ & - 22202.6 \cdot \text{Volumen } H_2O + 225801 \cdot \text{Volumen Enfriador} \\ & + 1511.85 \cdot \text{Diámetro válvulas} \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} \text{Caudal } H_2 \text{ húmedo} = & 29.99 + 0.36 \cdot \text{Longitud tubería calefactada} \\ & - 44.91 \cdot \text{Longitud entradas y salidas} \\ & - 54519.3 \cdot \text{Volumen } H_2O + 287469 \cdot \text{Volumen Enfriador} \\ & + 1728.17 \cdot \text{Diámetro válvulas} \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} \text{Humedad L2} = & 20.17 - 4.88 \cdot \text{Longitud tubería calefactada} \\ & - 40.92 \cdot \text{Longitud entradas y salidas} \\ & + 183555 \cdot \text{Volumen } H_2O + 33715.5 \cdot \text{Volumen Enfriador} \\ & + 2249.42 \cdot \text{Diámetro válvulas} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Para simplificar la Ecuación 4.2, observando los Valores-P obtenidos, vemos que los de mayor valor son de 0.9999, por lo que cualquier parámetro de longitud o de volumen no son relevantes en el modelo del caudal O_2 y pueden ser eliminados. Respecto al valor-P del modelo, se obtiene un valor menor de 0.05, por lo que existe una relación significativa entre las variables.

Para la humedad en el cátodo, Ecuación 4.3, se obtiene el valor-P más alto para la variable independiente de Longitud entradas y salidas, por lo que podemos ignorarla. Además, se obtiene un valor-P del modelo inferior a 0.05.

Respecto al calor del ánodo, para simplificar su modelo debería eliminarse el parámetro Diámetro válvulas, ya que es el de mayor valor-P. Sin embargo, en este caso, el valor-P del modelo es superior a 0.05, por lo que no hay una relación significativa entre las variables. También vemos que el R-cuadrado es 51.07%, el cual es muy bajo, lo que nos indica que el modelo obtenido no es muy exacto y se deberían aumentar los datos para poder mejorarlo.

Esto ocurre también para el Caudal H_2 , en el cual se obtiene un R-cuadrado de 25.83%, lo que significa que el modelo de la Ecuación 4.5 no consigue explicar la variabilidad de las variables, ya que no hay relación entre las variables al ser el valor-P del modelo superior a 0.05. Aun así, si se tratase de simplificar el modelo, el término menos significativo en este caso es la Longitud de la tubería calefactada.

Para el calor del ánodo, tanto en la línea superior como en la inferior, el parámetro despreciable es el Volumen H_2O . En este caso la R-cuadrado también es baja, un 53.38%, y el valor-P del modelo es superior a 0.05, por lo que con los datos obtenidos no se consigue deducir la relación entre las variables.

En el caso del Caudal H_2 húmedo, el valor-P más alto coincide con la Longitud de la tubería calefactada, por lo que se debería considerar eliminarse. El valor-P del modelo es menor que 0.05, por lo que, sí existe una relación entre las variables, y la R-cuadrado obtenida es de 61.04%.

Finalmente, en la humedad del ánodo, se obtiene que la variable despreciable es el Volumen del Enfriador. El valor-P del modelo obtenido es menor que 0.05, por lo que existe una relación y el R-cuadrado ajustado es 62.56%.

4.4 Análisis de los resultados obtenidos experimentalmente

Debido a las dificultades encontradas en la fabricación y adquisición de la pila de combustible y los componentes necesario para su instalación del banco de gases sintéticos, se ha producido un retraso en el comienzo de los ensayos, por lo que no se ha podido realizar un estudio global del funcionamiento del banco. Sin embargo, se han podido efectuar algunas pruebas sobre algunos componentes del banco definitivo de forma individual, y se han empezado a realizar ensayos con la línea del cátodo. Una de las pruebas realizadas es el tiempo que tardan en estabilizarse los sensores de temperatura y humedad del cátodo, introduciendo una variación tipo escalón con el fin de ver cómo reaccionan. Para la temperatura se ha introducido un escalón a 388,15 [K] y para la humedad de 0.477 [-]. Estos resultados se han comparado con los obtenidos en la simulación, estableciendo las mismas condiciones, como se observa en la Figura 4.8 y Figura 4.9.

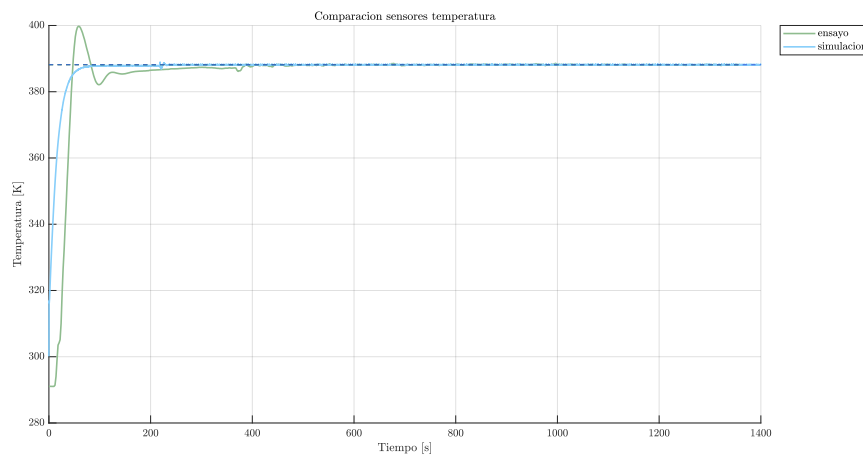


Figura 4.8. Comparación respuestas de los sensores de temperatura.

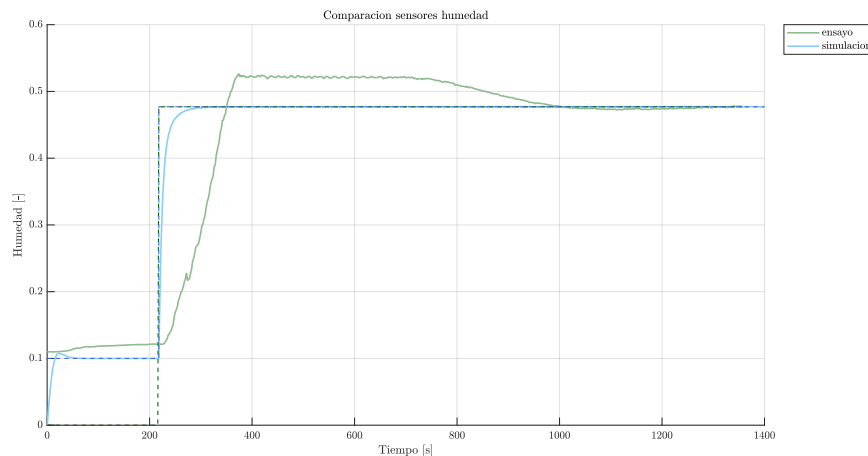


Figura 4.9. Comparación respuestas de los sensores de humedad.

Los tiempos de establecimiento obtenidos se resumen en la Tabla 4.18.

Tiempos [s]	Ensayo	Simulación
Temperatura	40	20.8
Humedad	848	244.9

Tabla 4.18. Comparación tiempos de establecimiento de la temperatura y la humedad.

Como podemos observar, los tiempos obtenidos en la simulación son menores que los del ensayo. Esto se debe a que el objetivo al realizar el diseño de los PID es obtener el menor tiempo de establecimiento sin condicionar la robustez. Sin embargo, en la respuesta física real, afectan otros parámetros que no se pueden tener en cuenta en la simulación, y que provocan que la respuesta sea más lenta y menos robusta. Por lo tanto, el método para validar el modelo con los ensayos es ajustar los PID para que se adapten de forma más similar a la respuesta real, y a su vez, ajustar el banco de ensayos según los resultados de las simulaciones para obtener una mejor respuesta.

5 Conclusiones

Finalmente, en esta sección se resumirán las conclusiones que se han desarrollado durante la elaboración del Trabajo Final de Grado. Se explicarán las soluciones finales que se han adoptado gracias a los análisis realizados y los resultados obtenidos en ellos. También se mostrarán otras soluciones alternativas que pueden ser válidas a la hora de establecer los parámetros del banco de pruebas. Por último, se describirán cuáles son los trabajos futuros que se pueden llevar a cabo para expandir y desarrollar el trabajo realizado durante este proyecto.

Contenido

5.1	Solución adoptada.....	84
5.2	Soluciones alternativas	86
5.3	Trabajos futuros.....	86

5.1 Solución adoptada

Para poder concluir en una solución final debemos establecer primero cuales son las pautas que se han seguido para alcanzar. El primer paso que se ha seguido es el diseño del modelo para ajustarlo de la forma más precisa al banco real. Después se comenzó con el ajuste de los controles, con el objetivo de lograr la respuesta más rápida posible dentro de los criterios de estabilidad. Una vez alcanzado un buen ajuste de los PIDs, se realizaron los estudios paramétricos de las condiciones de operación y del diseño con el fin de analizar la robustez de los PIDs. Además, para establecer una relación entre los parámetros y las variables estudiadas, se efectuaron los Análisis de Varianza con el fin de determinar el efecto que provocan ciertos parámetros a la hora de lograr estabilizar las variables. Finalmente, realizando ensayos en el propio banco, se debe comparar las respuestas obtenidas con el modelo frente a la respuesta real, y tratar de ajustar los PIDs y las condiciones del banco para que ambas respuestas sean similares, a la vez que eficientes.

Mediante los resultados obtenidos en el apartado anterior, se han llegado a diferentes soluciones según el estudio paramétrico elaborado. Por un lado, se han

realizado pruebas respecto a las condiciones de operación, y por otro lado se han estudiado ciertos parámetros relacionados con el diseño del banco de gases.

Para el caso de las condiciones de operación, tenemos que analizar los resultados obtenidos en el estudio paramétrico, observando las gráficas para cada simulación y los tiempos de establecimiento obtenidos en la Tabla 4.8. A su vez habrá que tener en cuenta el Análisis de Varianza realizado con los resultados del estudio. Según la Tabla 4.10, excepto por el caso de los caudales de N_2 y O_2 , el resto de los parámetros tienen una relación significativa con las condiciones operativas que debe tenerse en cuenta a la hora de establecer las propiedades del banco. En general, observando las gráficas, los mejores resultados globales se obtienen en el primer caso, cuando las condiciones están en valor nominal, ya que son los valores que se han utilizado para calibrar los PIDs en primer lugar. Sin embargo, hay otros ejemplos, como en el Caso 4 o el 15, donde se consigue reducir los tiempos de establecimiento de las variables de calor, pero las respuestas son más inestables. Es por ello por lo que se tiene que buscar una respuesta rápida pero robusta, por lo que teniendo en cuenta el caso nominal como la solución adoptada, ciertos parámetros de esta se pueden variar ligeramente con el fin de encontrar una mayor rapidez, pero asegurando su robustez.

Por otro lado, de forma análoga al estudio de las condiciones, se procederá al análisis del estudio paramétrico del diseño, con el fin de encontrar cual es la solución más adecuada para establecer las dimensiones del banco. En este caso también se añadirá el Análisis de Regresión realizado previamente. Como hemos podido observar en el Apartado 4, para este estudio las relaciones entre los parámetros de diseño y las variables no son tan claras. Partiendo de nuevo del Caso 1, con los valores nominales, observando el resto de los casos vemos que algunas variables se pueden optimizar, pero que otras no logran estabilizarse debido a los cambios realizados. El diseño no repercute directamente sobre ciertas variables, pero debido a que todas están relaciones entre sí, su alteración provoca que el sistema se desestabilice. Gracias al Análisis de Regresión, se han obtenido los modelos ajustados de las variables. Aunque algunos de ellos no son adecuados, debido a un valor R^2 demasiado bajo, el resto de los modelos se pueden utilizar a la hora de optimizar el banco. Variando los parámetros de diseño que son más relevantes para dicha variable, se puede probar para obtener el valor objetivo deseado, o de forma inversa, sabiendo

el valor que se deseada de la variable del banco, se puede tratar de encontrar cuales son los parámetros de diseño que mejor se le ajusta.

A la hora de comparar los resultados del ensayo, se ha comprobado que la simulación es más rápida y robusta, por lo que, aunque se pierda eficiencia en la respuesta, se deben ajustar los PIDs para que se asemeje al caso real.

5.2 Soluciones alternativas

Como se ha comentado previamente, aunque las soluciones que mejor resultado dan son cuando las condiciones operativas y los parámetros de diseño están en valor nominal, esto no significa que sea una solución única. Al haberse diseñado la simulación bajo estas condiciones, los PIDs se han ajustado respecto a estos valores, por lo que es lógico que se obtengan la mejor respuesta. Sin embargo, en base a los resultados obtenidos, y en vista a que el modelo se puede optimizar, siempre es factible buscar otros valores con los que se prevea una mejora, y ajustar los PIDs respecto a estos. Principalmente, para el estudio paramétrico del diseño, habiendo establecido ciertos rangos en los cuales el sistema no funciona de forma correcta y obtenidos los modelos ajustados, se pueden probar con estos diferentes valores, y una vez se haya previsto que pueden generar un buen resultado, modificar el diseño del banco de tal forma que se consiga optimizar. Por lo tanto, podemos concluir que el modelo realizado es flexible y se puede modificar con facilidad, por lo que hay margen de mejora y de optimización de los resultados, pero se ha logrado establecer una base sólida con la que poder trabajar y analizar el banco.

5.3 Trabajos futuros

Los trabajos futuros que se pueden considerar para desarrollar el proyecto se pueden aplicar tanto al modelo creado como a el análisis experimental del banco. A partir del modelo diseñado, se puede realizar en un futuro otro tipo de estudios paramétricos, con distintos parámetros que no se hayan utilizado previamente. Procediendo de forma similar a como se ha realizado en este proyecto, se pueden probar distintas variables a distintos niveles con el fin de establecer una relación entre ellas que sea significativa a la hora de configurar el banco.

Por otro lado, dado que la validación de forma experimental ha sido escasa debido a retrasos en la preparación del banco, es fundamental que, con las bases del modelo creadas, se sigan realizando pruebas en el banco para poder validar de forma más exacta la simulación, y con ello obtener mejores resultados a la hora de analizar la pila de combustible.

Uno de los objetivos del modelo de simulación, es poder utilizarlo directamente para calibrar el propio banco. Mediante el programa que calibra los caudalímetros y el resto de los sensores del banco, se puede integrar la simulación para que el banco obtenga directamente los resultados de los PIDs para poder ajustar los actuadores, y que modificando el modelo, se aplique al banco de forma inmediata.

Parte II.
Pliego de condiciones

1 Introducción y objeto

En el Pliego de Condiciones se presenta la normativa que regula la realización del Trabajo de Fin de Grado. Por lo tanto, se explicarán los artículos y las cláusulas que regulan el ambiente de trabajo para la ejecución del proyecto de forma segura, tanto en el ámbito técnico como en los aspectos legales vinculados a este.

Todas las responsabilidades, obligaciones, compromisos, derechos y garantías se relatarán a lo largo de este capítulo. Es de vital importancia conocerlas y cumplimentarlas a la hora de llevar a cabo cualquiera actividad, ya que suponen un compromiso legal entre los implicados en el Trabajo.

Contenido

1	Introducción y objeto	91
2	Condiciones de los componentes.....	93
2.1	Descripción pliego de condiciones de los componentes	93
2.2	Control de calidad.....	93
2.3	Componentes banco de gases sintéticos.....	94
2.4	Equipos informáticos.....	94
3	Condiciones del entorno de trabajo	95
3.1	Descripción pliego condiciones del entorno de trabajo.....	95
3.2	Condiciones de la sala del banco de ensayos.....	95
3.2.1	Condiciones del área experimental	95
3.2.2	Normativas de operación de la sala.....	96
3.3	Condiciones de la sala de análisis de los resultados.....	97
3.3.1	Ergonomía.....	98
3.3.2	Condiciones del ambiente de la sala	99
3.4	Instalaciones eléctricas	100
3.5	Medidas de emergencia.....	100

4	Puesta en Servicio y ajustes finales	101
4.1	Condiciones del uso del banco de gases sintéticos.....	101
4.1.1	Instalación.....	101
4.1.2	Puesta en marcha y apagado.....	101
4.1.3	Mantenimiento	102
4.2	Marco legal para el uso del banco de pruebas	103

2 Condiciones de los componentes

2.1 Descripción pliego de condiciones de los componentes

Para la realización del Trabajo de Fin de Grado se ha hecho uso de un banco de gases sintéticos para el análisis de una pila de combustible. Primero se debe tener en cuenta de que la pila esté en buenas condiciones para su uso. También se debe analizar que los componentes del banco de trabajo, así como los gases sintéticos que se utilicen durante el experimento estén dentro de la normativa.

El análisis de la pila supone también una serie de instrumentación de medida y de análisis de datos la cual debe estar regulada bajo un marco legal. Además, la sala debe cumplir con ciertos requisitos para la correcta utilización del banco de trabajo, con el fin de que no haya lugar a accidentes que supongan un riesgo en el personal y en el material.

Los materiales y componentes utilizados durante la realización del proyecto deberán estar exentos de irregularidades y defectos, que supongan un riesgo en el montaje y la manipulación del banco de trabajo. También se deberán rechazar aquellos materiales que puedan afectar de forma negativa al comportamiento del banco.

2.2 Control de calidad

Antes de iniciar la instalación del banco de gases sintéticos, se deberá realizar un análisis previo de todos los componentes con los que se vaya a trabajar. Para ello se someterá a un control a todas las unidades que componen el banco, bajo el criterio comprendido en los manuales de fabricación de dichos componentes. En estos manuales que dispondrá el fabricante, se debe encontrar toda la información para poder realizar un análisis efectivo del material utilizado. Además, el proveedor de los equipos deberá aportar los correspondientes certificados de origen y garantías, así como especificar cuáles son los ensayos y pruebas necesarias para su uso correcto.

2.3 Componentes banco de gases sintéticos

Para este Trabajo se ha dispuesto de un banco de gases sintéticos, con el cual se probará la pila de combustible utilizada durante el estudio. El banco estará compuesto por una serie de componentes necesarios para recrear las condiciones que se desean testar en la pila, entre ellos los gases sintéticos utilizados en el ensayo y toda la instrumentación para la adquisición de los datos. Estos deben pasar por una serie de pruebas con el fin de asegurar su correcto funcionamiento. Además, todos los equipos de medición tendrán que ser calibrados antes de su puesta en uso.

2.4 Equipos informáticos

Para la realización del Trabajo se han utilizado diversos sistemas de software, por lo que se ha requerido el uso de equipos informáticos. Los programas utilizados han sido los siguientes,

1. VEMOD: para la realización de la simulación del banco de gases, el cual su licencia es gratuita ya que se trata de un programa del CMT.
2. Matlab R2023b y Excel: para el análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones y el cálculo de los parámetros estudiados, los cuales sus licencias han sido aportadas por la propia universidad.
3. Word y Power Point: para la elaboración del documento del Trabajo de Fin de Grado y su presentación, adquiriendo las licencias gracias a la UPV.

Para obtener las licencias de estos programas se debe aceptar las condiciones indicadas en el EULA (End-User License Agreement), los cuales cumplen con el Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual.

3 Condiciones del entorno de trabajo

3.1 Descripción pliego condiciones del entorno de trabajo

Esta sección recogerá las normativas y cláusulas referentes a las condiciones del puesto de trabajo. Se tendrá en cuenta toda la zona que engloba el entorno donde se encuentra el banco de gases sintéticos, el cual vendrá regulado por una serie de normas que establecen las condiciones de los elementos requeridos en un área experimental para garantizar la seguridad del personal.

También se debe regular la zona donde se realizará el análisis de los resultados obtenidos, fuera del entorno del banco de gases. Se definirán sus condiciones bajo el Real Decreto 488/1997 que establece las características de seguridad y salud mínimas necesarias para el debido uso de instalaciones con pantallas de visualización.

Además, las garantías y responsabilidades para establecer un adecuado nivel de protección de la salud de los trabajadores frente a los riesgos derivados de las condiciones de trabajo estarán reguladas bajo el marco legal de la Ley 31/1995 sobre Prevención de Riesgos Laborales.

3.2 Condiciones de la sala del banco de ensayos

3.2.1 Condiciones del área experimental

Debido a que se trata de un proyecto experimental, se deberán considerar los condicionantes de una sala de experimentos para asegurar que los ensayos se han realizado en un espacio adecuado para ello. Es por ello de vital importancia que la sala donde se encuentra todos los componentes esté dentro de las normativas de uso, para evitar daños en el material y riesgos en la seguridad del personal.

Aunque en nuestro caso, el proyecto se basa en el análisis de una pila de combustible, el banco de ensayos con el que se trabaja también es usado para otro tipo de experimentos, lo cuales pueden implicar el uso de motores o de turbinas. Por lo tanto, la sala de trabajo está aislada acústicamente, en paredes, ventanas y puertas. Gracias a ello, si se realizan ensayos con elementos que provoquen niveles de ruido por encima de lo permitido, la insonorización de la sala evitará que este se propague

por el edificio, respetando así la normativa establecida en el anexo NBE-CA-82 de la Norma Básica de la Edificación. [17]

También, al trabajar con gases, es fundamental que la sala esté acondicionada, por un posible riesgo de fugas. Además, debe haber un sistema de extractores encargados de renovar el aire mediante vías de canalización.

Debido a que el entorno de trabajo está expuesto a altos niveles de peligro de incendio por el uso de gases inflamables, se deberá instalar un extintor de eficacia 21 A/113 B según el Código Técnico de la Edificación (CTE). Este debe colocarse en un lugar de fácil acceso y bien señalizado. También la sala debe incluir un sistema de sensores de detección de incendios, regulados bajo la norma NBE-CPI/91. [18]

En caso de una emergencia, es obligatorio que haya instalado de un botón rojo de accionamiento de parada de emergencia según la directiva europea EU 2006/42/EG. Este será activado en caso de que ocurra algún fallo o se perciba una situación peligrosa. [19]

La sala debe disponer de un botiquín de primeros auxilios, el cual se utilizará en caso de que se ocurra un accidente. También, debido al riesgo de se desprendan partículas o se exponga a sustancias peligrosas, será obligatorio la instalación de un puesto de lavado de ojos.

En caso de peligro por derrame de una sustancia peligrosa, la sala debe disponer de productos de limpieza y de contenedores específicos para el depositado de los residuos, que sean accesibles para cualquier usuario de la sala.

Además, todo el espacio de trabajo debe estar debidamente señalizado, proporcionando una indicación o una obligación relativa a la seguridad o la salud en el trabajo mediante una señal, ya sea visual o acústica. Estas señales vendrán reguladas bajo el Real Decreto 485/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en el trabajo. [20]

3.2.2 Normativas de operación de la sala

Las normativas de operación descritas a continuación son indispensables para el uso debido del banco de trabajo. Estas deberán seguirse por cualquier usuario que tenga acceso al interior de la sala, ya sea personal del departamento o un operario.

1. Se debe cerrar la puerta antes de iniciar ningún ensayo, con el fin de que se mantenga la seguridad dentro de ella, impidiendo el acceso a personal ajeno al proyecto, además de controlar el nivel de ruido producido.
2. Dentro de la sala solo estará permitido la estancia de personal cualificado, siendo el número de personas presentes el mínimo indispensable. Este personal deberá certificar que está acreditado para la operación del banco, ya sea por un título o por recomendación del departamento.
3. Si se produce un derrame de alguna sustancia, se deberá proceder a su limpieza de forma inmediata, manteniendo las normativas de seguridad, siendo recomendado el uso de guantes y de mascarilla.
4. En caso de detectarse una fuga de gases, el proceso de actuación recomendado es primero cerrar los grifos conectados al banco y avisar al responsable de la instalación para determinar cómo proceder con la actuación de emergencia.

El procedimiento que seguir en caso de fugas y vertidos viene detallado en el NTP-399, el cual guía de buenas prácticas, por lo que sus indicaciones no son obligatorias, pero si son recomendables. [21]

3.3 Condiciones de la sala de análisis de los resultados

Fuera de la sala experimental donde se encuentra el banco de trabajo, se establecerá una zona donde se analizarán los resultados obtenidos en los ensayos, y se controlarán la actuación del banco sin necesidad de acceder a la sala de experimentos. Por lo tanto, este lugar será considerado el puesto de trabajo, ya que la mayoría de las operaciones se realizarán desde ahí. Este espacio estará compuesto por una serie de ordenadores, los cuales se utilizarán para la visualización de los datos adquiridos durante el periodo que el banco esté funcionando, y un programa que permita la modificación de los parámetros del banco. Este entorno vendrá regulado por el Decreto Real 488/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización, donde se incluirá la pantalla, el teclado, la mesa o superficie de trabajo y el asiento.

3.3.1 Ergonomía

Según la Guía Técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relativos a la utilización de equipos con pantallas de visualización elaborada por el INSST, los requisitos mínimos son los descritos a continuación, [22]

1. Pantalla

- Los caracteres deberán estar bien definidos y claros, con una dimensión adecuada.
- La imagen deberá ser estable, sin destellos ni inestabilidades.
- Se podrá ajustar la luminosidad y el contraste.
- Se podrá orientar e inclinar para ser adaptada según las necesidades del usuario.
- Se podrá usar un pedestal o mesa regulable.
- No deberá tener reflejos ni reverberaciones.
- La distancia de colocación no debe estar situada a menos de 300 mm, y se situará a una altura coincida con los ojos del usuario de manera que la línea de visión horizontal y la trazada sea de 40°.
- La forma de la flexión del cuello estará entre 0° y 25°.

2. Teclado

- Será inclinable e independiente de la pantalla para poder adoptar una postura cómoda.
- Habrá espacio suficiente delante para apoyar los brazos.
- La superficie será mate para evitar reflejos.
- La disposición y características de las teclas serán de fácil uso.
- Los símbolos deberán destacar y ser legibles.

3. Mesa o superficie de trabajo

- Deberán ser poco reflectantes y con una superficie suficiente que admita la colocación de todos los accesorios y permita una posición cómoda
- El soporte debe ser estable y regulable para evitar movimientos de cabeza y ojos incómodos.

4. Asiento

- Debe ser estable, permitiendo libertad de movimiento y comodidad.
- La altura debe ser regulable.
- El respaldo debe ser reclinable y regulable.
- Se pondrá un reposapiés según se desee por el usuario.

3.3.2 Condiciones del ambiente de la sala

Según el BOE nº97, del 23 de abril de la INSST, el puesto de trabajo debe estar acondicionado para permitir un movimiento libre, con un espacio suficiente que posibilite cambios de postura.

Respecto a la iluminación, tanto la general como la especial deberá garantizar unos niveles y una relación de luminancias entre la pantalla y el entorno adecuados. el nivel de iluminación promedio deberá estar comprendido en el rango de 300 lux a 500 lux. Estas características técnicas deberán regularse para evitar reflejos y deslumbramientos. Para ello, los puestos de trabajo se colocarán de forma que las fuentes de luz como ventanas no molesten al usuario. Además, las ventanas deberán venir equipadas con dispositivos de cobertura para atenuar la luz del día.

El ruido producido por lo equipos se deberá tener en cuenta para no perturbar la atención ni la palabra. Para trabajos de rutina de oficina, el nivel recomendado se encuentra entre los 45-55 dB, mientras que salas de reuniones o tareas donde se deba estar concentrado, estos niveles bajarán a los 35-45 dB.

Para regular el calor, los equipos no deberán producir calor adicional que moleste al usuario. Los rangos de temperatura del aire se establecen, para verano, en torno a 23-26 °C y para invierno de 20 a 24 °C. Respecto a la humedad, se deberá mantener comprendida entre el 30% y el 70%.

Finalmente, para garantizar la seguridad y salud de los trabajadores, es fundamental regular los niveles de radiación óptica y electromagnética que emiten las pantallas, reduciéndose a niveles insignificantes. [22]

3.4 Instalaciones eléctricas

Las instalaciones eléctricas están reguladas bajo el Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión (REBT). Este reglamento establece estableció un esquema normativo para garantizar la seguridad del usuario frente a accidentes y asegurar un funcionamiento normal de las instalaciones. Su puesta en servicio se llevará a cabo por empresas autorizadas por la autoridad competente de la Generalitat Valenciana.

Para su correcto funcionamiento, los cables y otros componentes se deberán situar en zonas libres de peligros, donde las condiciones sean las adecuadas para garantizar un buen mantenimiento. También se deberá tener en cuenta los requerimientos respecto a las emisiones electromagnéticas, por lo que se colocarán en lugares dónde no resulten un riesgo para los trabajadores. [23]

3.5 Medidas de emergencia

El edificio dónde se encuentra tanto el banco de gases sintético como el puesto de trabajo debe de disponer de las medidas necesarias para la evacuación del edificio en caso de que ocurra un incidente. Las salidas de emergencia deberán estar debidamente señalizadas y colocadas para proporcionar una vía de escape rápida y segura. Estas vendrán reguladas por el Real Decreto 485/1997 sobre disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en el trabajo.

Se dispondrán de dos tipos de puertas, las de salida, para permitir una evacuación rápida del edificio en caso de emergencia, pero también habrá puertas contra el fuego, para reducir la propagación del fuego en caso de incendio. Cada planta deberá contar con mínimo dos puertas y su señalización deberá ser clara, utilizando el cartel de emergencia, de fondo verde. [24]

4 Puesta en servicio y ajustes finales

4.1 Condiciones del uso del banco de gases sintéticos

Para un uso correcto del banco de gases se deben seguir las indicaciones dispuestas por el proveedor del banco. Las características y especificaciones, así como las instrucciones para su uso, funcionamiento y mantenimiento deben venir detalladas en el Manual del Fabricante.

4.1.1 Instalación

El banco de gases sintéticos está compuesto por distintos componentes, los cuales han sido proveídos por diferentes empresas. Es por ello por lo que se deberá entender el funcionamiento de cada componente para poder realizar un ensamblaje correcto entre las partes. Una vez el banco de trabajo haya sido montado, el sistema simulará las condiciones ambientales que se traten de estudiar. Además, se instalarán una serie de sensores de temperatura y de humedad, además de caudalímetros, para examinar las condiciones a las que el banco está funcionando. Al final del circuito, se instalará la pila de combustible con la que se realizarán las pruebas. En las vías de entrada pasará la mezcla de gases generada en el banco, y en las vías de salida se unirá al sistema de medida, para analizar los resultados obtenidos y realizar las modificaciones oportunas en las condiciones de ambiente.

4.1.2 Puesta en marcha y apagado

Tanto para encender como para apagar el banco de gases, primero se deberá comprobar que no existen peligros en la sala experimental. Una vez se asegure que se puede proceder de forma segura, se encenderá primero el sistema de recirculación del aire y los sistemas de adquisición de datos. Se debe realizar una comprobación de que todos los sistemas funcionan de forma correcta. En caso afirmativo, se procederá a encender el banco de gases. Se inicializarán las condiciones que se desean probar, y se dejará un tiempo para que los sensores y los actuadores consigan estabilizar los valores objetivos.

Para el apagado de la instalación, se procederá de forma similar. Primero se cortará el flujo de los gases, y se esperará un tiempo a que el sistema baje de forma gradual su temperatura y presión. Una vez se garantice que el banco está estable, se procederá al apagado de toda la instalación.

4.1.3 Mantenimiento

Para la prevención de riesgos y garantizar la seguridad de los usuarios, es de vital importancia realizar un mantenimiento adecuado, con el fin de aumentar la durabilidad de los componentes del sistema. El mantenimiento que realizar en este tipo de sistemas complejos, los cuales incluyen tanto sistemas eléctricos, como electrónicos, mecánicos y de software, debe adecuarse al componente.

Para el caso de componentes eléctricos y electrónicos, en los cuales suelen presentar fallos aleatorios, lo más recomendable es realizar un mantenimiento preventivo sistemático. Para ello se realizarán tareas frecuentes y sencillas, como la comprobación del estado de los sensores o el cambio periódico de cables y conexiones que puedan provocar cortocircuitos.

Por otro lado, para los componentes mecánicos, se conoce su tasa de fallos de forma general, ya que es aportada por el fabricante en el manual. Por lo tanto, el tipo de mantenimiento más recomendable para estos casos es el preventivo predictivo, en el cual se monitoriza el estado de la máquina. Cuando lo determine el manual o se perciban síntomas de desgaste como vibraciones, ruidos, cambios en las prestaciones, etc., se procederá con las tareas de mantenimiento. Estas aplicarán técnicas como ultrasonidos, uso de líquidos penetrantes y otras, para comprobar el estado del componente, y determinar si es necesario su cambio o se puede seguir utilizando y durante cuánto tiempo.

En el caso del sistema de software utilizado, se puede conocer con seguridad su vida útil. Sin embargo, sobre todo la etapa inicial de su uso, pueden surgir fallos aleatorios, los cuales son difíciles de anticipar. Por lo tanto, el procedimiento recomendado para este tipo de sistemas es un mantenimiento predictivo vigilado, en el cual se aplique en los primeros años de vida, y cuando se asegure que el sistema funciona de forma correcta durante un largo periodo, realizar un mantenimiento predictivo, hasta que la vida útil del componente se acerque a su fin y entre en obsolescencia.

4.2 Marco legal para el uso del banco de pruebas

Para mantener la integridad tanto de los componentes del banco de gases, como de la seguridad de los empleados que trabajen con él, se debe de conocer los procedimientos para utilizar el banco de forma correcta.

Debido a los cambios en la política energética realizados por el Comité Europeo, en los últimos años España ha realizado profundas modificaciones con el fin de adecuar el marco normativo y estratégico a los compromisos internacionales sobre energía y clima. En consecuencia, España ha iniciado un Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR) para confirmar su compromiso con la transición ecológica. Para garantizar el cumplimiento de los objetivos de la PRTR, se ha creado el Real Decreto 568/2022, el cual establece el marco general del banco de pruebas regulatorio para el fomento de la investigación y la innovación en el sector eléctrico.

Este se divide en cuatro capítulos. El primero contiene las disposiciones generales, estableciendo el objeto y el ámbito de la aplicación. El segundo concreta el régimen de acceso y participación en los proyectos en el banco de pruebas. El capítulo III dispone el régimen de funcionamiento del banco, cómo se llevará a cabo el seguimiento del proyecto y el fin de este, ya sea de forma anticipada, definitiva o por desistimiento de los participantes. Por último, el capítulo IV contempla una serie de disposiciones relativas a la colaboración de otros agentes, confidencialidad, regulaciones y la elaboración de un informe anual. [25]

Parte III.

Presupuesto

1 Introducción y objeto

El objetivo de esta parte es calcular, de forma aproximada, el coste total que implica la realización de este Trabajo. El importe total del proyecto se dividirá en los costes del personal y en los costes del material, tanto del banco de gases y sus componentes como del equipo de medidas y los sistemas informáticos.

Primero se realizarán dos presupuestos parciales. Por un lado, se calculará el coste global que supone la parte experimental del proyecto, y por otro lado se obtendrá el gasto total de la parte computacional.

Finalmente se sumarán ambos presupuestos para obtener el Presupuesto de Ejecución Material (PEM). A este se le deberá añadir el porcentaje para Gastos Generales (GG), del 13% al 17% y el 6% para el Beneficio Industrial (BI) del contratista, obteniendo el Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC). Para calcular el Presupuesto de Inversión se le deberá sumar el IVA, de tipo general, que es un 21%.

Contenido

1	Introducción y objeto	107
2	Costes del proyecto.....	108
2.1	Costes equipos y sistemas informáticos	108
2.2	Costes del personal.....	110
3	Presupuesto del proyecto.....	111
3.1	Parte experimental.....	111
3.2	Parte computacional.....	111
3.3	Presupuesto total	113

2 Costes del proyecto

2.1 Costes equipos y sistemas informáticos

Primero se detallarán cuáles han sido los costes del equipo utilizado durante la parte experimental y durante el estudio computacional. Se indicará el precio de compra de cada componente, su vida útil y se estimará su coste en función de la amortización del producto.

La amortización se calcula como el cociente entre la diferencia del valor inicial activo y el valor residual, el cual se considerará nulo, y el tiempo estimado que se tardará en conseguir amortizar la compra. En el equipo utilizado durante los ensayos, para los dispositivos de menor precio se ha considerado un tiempo de amortización de 2 años, pero para los más caros, este tiempo aumentará hasta los 10 años. Sin embargo, para los equipos informáticos, el tiempo de amortización de un ordenador de sobremesa ronda los 5 años, mientras que, para los portátiles, se reduce a los 3 años. Para los sistemas de *software*, su tiempo de amortización coincidirá con su vida útil, ya que depende de la duración de su licencia.

Se ha considerado que el uso global del equipo será alrededor de 1920 horas al año, considerando que en un año laboral hay un promedio de 240 días hábiles y que una jornada laboral suele tener una duración de 8 horas.

En la Tabla 2.1 se describen los precios de los componentes y materiales que se han utilizado para la fabricación de la pila de combustible, y se calculará su precio total, el cual se añadirá en los costes del equipo. Para la pila se ha fabricado la MEA y la placa bipolar, se han impreso y mecanizado los extremos de las líneas del ánodo y el cátodo, además de todos los conectores, pernos y las cubiertas. También se ha realizado la compra de dos planchas de EPDM y un film PTFE.

Componentes pila	Precio [€]
MEA y placa bipolar	4586.45
Extremos ánodo y cátodo	2,848.72
Conectores	1,180.94
Juntas planas	187.84
Total	8,803.95

Tabla 2.1. Precio de los componentes y total de la pila de combustible.

En la Tabla 2.2 se especifican todos los componentes que se han necesitado para realizar los ensayos. Para el banco de gases sintéticos se ha realizado la compra del generador de gases, las tres tuberías calefactadas, un humidificador y los dispositivos utilizados para el análisis de los datos. También se ha comprado toda la circuitería, que incluye las líneas, válvulas, racores, etc., los sensores de temperatura y humedad, ya que los caudalímetros ya vienen incluidos en el generador de gas y las botellas de gases sintéticos.

Coste del equipo de ensayos			
Equipo	Precio [€]	Amortización [años]	[€/hora]
Pila de combustible	8,803.95	2	2.29
Generador de gas	72,000	10	3.75
Tuberías calefactadas	5,412	2	1.41
Humidificador P-serie	19,470	5	2.03
Horiba Mexa 730λ	21,705	2	5.65
Micro GC Agilent 990	21,800	2	5.68
FTIR MSK 2030	30,450	2	7.93
Circuitería	4,290	2	1.12
Sensores	432	1	0.23
Gases sintéticos	1000	1	0.52
Total			30.63

Tabla 2.2. Costes del equipo del banco de gases sintéticos.

En la Tabla 2.3 se adjunta los precios de los equipos informáticos utilizados tanto para el análisis de los resultados experimentales y por simulación. Además, se incluyen las licencias que se han necesitado para la elaboración del Trabajo. No se ha tenido en cuenta el programa de simulación utilizado, VEMOD, ya que se trata de un programa libre desarrollado por el CMT, por lo que no tiene licencia.

Coste del equipo informático y <i>software</i>			
Equipo	Precio [€]	Vida útil [años]	[€/hora]
Ordenador sobremesa	2000	5	0.21
Ordenador portátil	700	3	0.12
Licencia Matlab R2023b	900	1	0.47
Licencia Statgraphics 19	924	1	0.48
Licencia Microsoft Office	69	1	0.04
Total			1.32

Tabla 2.3. Costes de los sistemas informáticos y licencias.

2.2 Costes del personal

Para la realización del proyecto se ha necesitado la participación de un ingeniero doctor, el cual es el tutor que supervisa la realización del Trabajo, del técnico de laboratorio, encargado del montaje y mantenimiento del banco de ensayos, y del alumno, el cual se ha considerado que obtendrá un sueldo de ingeniero junior.

En la Tabla 2.4 se detalla el coste que implica la contratación de este personal,

Personal	[€/hora]
Ingeniero doctor	35
Técnico de laboratorio	18
Ingeniero junior	15

Tabla 2.4. Costes del personal.

3 Presupuesto del proyecto

3.1 Parte experimental

Para la elaboración de la parte experimental del proyecto solo se tendrán en cuenta el material y los componentes utilizados en el banco de gases sintéticos, además de los programas usados para la adquisición de los resultados. En cuanto al personal, para la realización de las pruebas realizadas en el banco de ensayos ha participado tanto el tutor, como los técnicos del laboratorio y el alumno.

Debido a que la fabricación de la pila de combustible no terminó hasta finales del año pasado y por retrasos en la obtención de componentes para el banco de trabajo, este no estuvo en disposición para su uso hasta mediados de mayo. Por lo tanto, se considerarán que los ensayos se han realizado durante el plazo del mes de junio, con un total de 20 días laborales, lo que resulta en 160 horas, de los cuales para la realización de los ensayos se han utilizado unas 40 horas.

Descripción	Unidades [hora]	Precio por unidad [€/hora]	Importe [€]
Ingeniero doctor	40	35	1400
Técnico de laboratorio	40	18	720
Alumno	40	15	600
Banco de ensayos	40	30.6	1224.09
Total			3944.09

Tabla 3.1. Presupuesto parte experimental del proyecto.

3.2 Parte computacional

En la parte computacional del proyecto se tendrá en cuenta el tiempo empleado para la elaboración de la simulación del banco de gases mediante VEMOD. También se considerarán las horas que se han necesitado para el tratamiento de los datos obtenidos de la simulación mediante Matlab y Excel y el tiempo dedicado a la comparación con los datos obtenidos experimentalmente. Además, se incluirán las

horas que se han utilizado en la elaboración del Trabajo, respecto a la revisión bibliográfica y la comprensión del funcionamiento del banco.

En esta parte se ha llevado a cabo por parte del alumno con la ayuda y orientación del tutor para poder elaborar un buen estudio del proyecto.

La parte de simulación se inició desde principio de curso, por lo que se llevan varios meses realizando el modelo del banco de gases. También se incluirá todo el postproceso de los ensayos, es decir, el análisis de los datos una vez obtenidos los resultados.

Descripción	Unidades [hora]	Precio por unidad [€/hora]	Importe [€]
Ingeniero doctor	100	35	3500
Alumno	350	15	5250
Ordenador sobremesa	40	0.21	8.33
Ordenador portátil	350	0.12	42.53
Licencia Matlab	150	0.47	70.31
Licencia Statgraphics	10	0.48	4.81
Licencia paquete Office	150	0.04	5.39
Total			8881.38

Tabla 3.2. Presupuesto parte computacional del proyecto.

3.3 Presupuesto total

Para obtener el presupuesto total del Trabajo, primero se debe calcular el PEM, el cual consistirá en la suma de ambos presupuestos parciales, el experimental y el computacional. A este resultado se le deberá añadir un 15% de Gasto Generales y un 6% para el Beneficio Industrial de la empresa que ha contratado al CMT, obteniendo así el PEC. Finalmente, se le añadirá el IVA del 21%, consiguiendo el Presupuesto de Inversión, el cual se trata del presupuesto total.

Concepto	Importe [€]
Presupuesto experimental	3944.09
Presupuesto computacional	8881.38
Presupuesto de Ejecución Materia (PEM)	12825.48
Gastos Generales (15%)	1923.82
Beneficio Industrial (6%)	769.53
Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC)	15518.83
IVA (21%)	3258.95
Presupuesto de Inversión	18777.78

Tabla 3.3. Presupuesto total del Trabajo.

El Presupuesto de Inversión asciende a **DIECIOCHO MIL SETECIENTOS SETENTA Y SIETE EUROS CON SETENTA Y OCHO CÉNTIMOS.**

Bibliografía

- [1] C. K. Maria-Mirela Curmei, «European Parliament,» Parlamento Europeo, 30 Septiembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/71/la-politica-de-medio-ambiente-principios-generales-y-marco-basico>.
- [2] Consejo de la Unión Europea, «Consilium,» Consejo Europeo, 21 Marzo 2024. [En línea]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/>.
- [3] Ferrovial, «Ferrovial,» Ferrovial, 5 Octubre 2022. [En línea]. Available: <https://www.ferrovial.com/es/stem/bateria/>.
- [4] Ferrovial, «Ferrovial,» Ferrovial, 9 Diciembre 2022. [En línea]. Available: <https://www.ferrovial.com/es/stem/pila-de-combustible/>.
- [5] Admin, «Energías Renovables,» 1 Enero 2015. [En línea]. Available: <https://www.energiasrenovablesinfo.com/hidrogeno/pilas-combustible-ventajas-inconvenientes/>.
- [6] Centro Nacional del Hidrógeno, «Centro Nacional Del Hidrógeno.,» 7 Febrero 2019. [En línea]. Available: <https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>.
- [7] R. Fidalgo, «Pila de hidrógeno.,» 4 Julio 2022. [En línea]. Available: <https://www.autocasion.com/diccionario/pila-de-hidrogeno> .
- [8] E. Moron, «Hive Blog,» 2022. [En línea]. Available: <https://hive.blog/hive-196387/@emiliomoron/pilas-de-combustible-de-hidrogeno-limitaciones-y-una-posible-solucion>.
- [9] Rosetta-technology, «Rosetta technology solutions,» n.d.. [En línea]. Available: <https://rosetta-technology.com/es/aula-tecnica/notas-tecnicas/pila-combustibe-hidrogeno-como-funcionan>.

- [10] D. G. Enríquez, «Revista digital INESEM,» 18 Mayo 2023. [En línea]. Available: <https://www.inesem.es/revistadigital/gestion-integrada/la-pila-de-hidrogeno/> .
- [11] S. Alcalde, «Airbus crea el primer avión propulsado totalmente con hidrógeno,» National Geographic España, 3 Enero 2023. [En línea]. Available: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/airbus-crea-primer-avion-propulsado-totalmente-hidrogeno_15938.
- [12] D. Nuevo, «eshidrogeno,» eshidrogeno, 21 Septiembre 2023. [En línea]. Available: <https://eshidrogeno.com/avion-hidrogeno/>.
- [13] J. Cantagalli, «Driving ECO,» 22 Septiembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.drivingeco.com/aviones-comerciales-cero-emisiones-airbus-2035/airbus-zeroe-concepts-description/>.
- [14] B. T. and T. G., “Development of reference hardware for a harmonised testing of PEM single fuel cells,” Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2021.
- [15] Asociación Española del Gas (SEDIGAS), «Gasrenovable.org,» n.d. [En línea]. Available: <https://www.gasrenovable.org/tipos-gas-renovable/gas-sintetico/>.
- [16] J. M. Cimbala, «Taguchi Orthogonal Arrays,» Penn State University, Pensilvania, 2014.
- [17] Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, «BOE-A-1988-23328,» 29 Septiembre 1988. [En línea]. Available: [https://www.boe.es/eli/es/o/1988/09/29/\(3\)](https://www.boe.es/eli/es/o/1988/09/29/(3)).
- [18] J. P. E. Vidal, «Asepeyo,» Diciembre 2015. [En línea]. Available: https://prevencion.asepeyo.es/wp-content/uploads/L3E08002V3-Art%C3%ADculo-Extintores-de-incendio_Asepeyo.pdf.
- [19] Automation24, «automation24,» 21 Febrero 2023. [En línea]. Available: <https://media.automation24.com/shopsystem/infopages/not->

halt/automation24-whitepaper-guida-compacta-de-parada-de-emergencia-es.pdf.

- [20] Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, «BOE-A-1997-8668,» 14 Abril 1997. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/eli/es/rd/1997/04/14/485/con>.
- [21] INSHT, «INSST.es,» 1992. [En línea]. Available: https://www.insst.es/documents/94886/326853/ntp_399.pdf/3899f1f9-7c3f-4289-893e-665a9cbb5246?version=1.2&t=1692963851033.
- [22] Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), «innst.es,» Junio 2021. [En línea]. Available: <https://www.insst.es/documents/94886/203536/Guia+tecnica+para+la+evaluacion+y+prevencion+de+los+riesgos+relativos+a+la+utilizacion+de+equipos+con+pantallas+de+visualizacion+2021.pdf/581d3633-5a01-9a7d-104f-1fdb6574e2b1?t=1711457089176>.
- [23] Ministerio de Ciencia y Tecnología, «BOE-A-2002-18099,» 2 Agosto 2002. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2002/08/02/842/con>.
- [24] Yoigo, «Home Go Blog,» Yoigo, 27 Septiembre 2022. [En línea]. Available: <https://homego.es/blog/salida-de-emergencia-normativa-y-senalizacion-obligatoria/>.
- [25] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «BOE-A-2022-11511,» 11 Julio 2022. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2022/07/11/568>.
- [26] Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, «BOE-A-1991-6428,» 1 Marzo 1991. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/eli/es/rd/1991/03/01/279>.

Parte IV.
Anexo

A. Códigos de Matlab

- Código para analizar variables simulación

```

caso = 1;

nFile = sprintf('banco de trabajo_Case-%d_plots.dat', caso);
filename = nFile;
Archivo = readtable(filename);

control = 'HumidityL1';

time = Archivo.Time_s_;

switch control
    case 'N2MassFlow'
        nactuator = 64;
        nsensor = 1;
        varTitle = 'Caudal N2';
        yTitle = 'Caudal N2 [kg/s]';

        case 'O2MassFlow'
            nactuator = 65;
            nsensor = 2;
            varTitle = 'Caudal O2';
            yTitle = 'Caudal O2 [kg/s]';

        case 'HumidityL1'
            nactuator = 66;
            nsensor = 3;
            varTitle = 'Humedad L1';
            yTitle = 'Humedad L1 [-]';

        case 'HeatL1'
            nactuator = 91;
            nsensor = 4;
            varTitle = 'Calor L1';
            yTitle = 'Calor L1 [K]';

        case 'H2MassFlow'
            nactuator = 111;
            nsensor = 5;
            varTitle = 'Caudal H2';
            yTitle = 'Caudal H2 [kg/s]';

        case 'HeatL2Up'
            nactuator = 110;
            nsensor = 10;
            varTitle = 'Calor L2 Superior';
            yTitle = 'Calor L2 Superior [K]';

        case 'HeatL2Low'
            nactuator = 113;
            nsensor = 12;

```

```

varTitle = 'Calor L2 Inferior';
yTitle = 'Calor L2 Inferior [K]';

case 'H2HumidMassFlow'
nactuador = 123;
nsensor = 11;
varTitle = 'Caudal H2 húmedo';
yTitle = 'Caudal H2 húmedo [-]';

case 'HumidityL2'
nactuador = 112;
nsensor = 6;
varTitle = 'Humedad L2';
yTitle = 'Humedad L2 [-]';
end

structuactor = num2str(nactuador);
actuador = eval(strcat('Archivo.ECU_Actuator_',structuactor
,'___Output_0'));

strsensor = num2str(nsensor);
sensor = eval(strcat('Archivo.ECU_Sensor_',strsensor,'___'));

input = eval(strcat('Archivo.Controller_PID',control,'_Input___'));
setpoint =
eval(strcat('Archivo.Controller_PID',control,'_SetPoint___'));
error = eval(strcat('Archivo.Controller_PID',control,'_Error___'));

error_rel = error./setpoint;

    try
        pos_setpoint = find(error_rel>0.05,1,'last');
        time_set = Archivo(pos_setpoint,1);
    catch
        time_set = 100;
    end

nTitlePID = sprintf('Sensor %s simulacion',varTitle);

figure
hold on
plot(time,sensor,'Color','#4DBEEE','LineWidth',2)
plot(time,setpoint,'k--','LineWidth',1)
grid on
ax = gca;
ax.TickLabelInterpreter = 'latex';
title(nTitlePID,'Interpreter','latex')
ylabel(yTitle,'Interpreter','latex')
xlabel('Tiempo [s]','Interpreter','latex')

array2table(time_set)

```

- Código para los estudios paramétricos

```

caso = 1;
nFile = sprintf('banco de trabajo_Case-%d_plots.dat', caso);

filename = nFile;
Archivo = readtable(filename);

time = Archivo.Time_s_;
control =
["N2MassFlow", "O2MassFlow", "HumidityL1", "HeatL1", "H2MassFlow", "HeatL2Up",
"HeatL2Low", "H2HumidMassFlow", "HumidityL2"];
titulo = ["Caudal N2", "Caudal O2", "Humedad L1", "Calor L1", "Caudal
H2", "Calor L2 Superior", "Calor L2 Inferior", "Caudal H2 Humedo", "Humedad
L2"];
unidades = ["kg/s", "kg/s", "-", "K", "kg/s", "K", "K", "kg/s", "-"];
nactuador = [64, 65, 66, 91, 111, 110, 113, 123, 112];
nsensor = [1, 2, 3, 4, 5, 10, 12, 11, 6];

for j = 1:length(nsensor)

    structuactor = num2str(nactuador(j));
    actuador = eval(strcat('Archivo.ECU_Actuator_', structuactor
, '___Output_0'));

    strsensor = num2str(nsensor(j));
    sensor = eval(strcat('Archivo.ECU_Sensor_', strsensor, '___'));

    input =
eval(strcat('Archivo.Controller_PID', control(j), '_Input___'));
    setpoint =
eval(strcat('Archivo.Controller_PID', control(j), '_SetPoint___'));
    error =
eval(strcat('Archivo.Controller_PID', control(j), '_Error___'));

    nTitleValvula = sprintf('Control Valvula %s', titulo(j));
    nTitlePID = sprintf('Control PID %s', titulo(j));
    yTitle = sprintf('%s [%s]', titulo(j), unidades(j));
    ncaso = sprintf('Caso %d', caso);

    subplot(3,3,j);
    plot(time, actuador, 'Color', "#CD5C5C", 'LineWidth', 1.5);
    grid on
    ax = gca;
    ax.TickLabelInterpreter = 'latex';
    title(nTitleValvula, 'Interpreter', 'latex')
    ylabel('Actuador', 'Interpreter', 'latex');
    xlabel('Tiempo [s]', 'Interpreter', 'latex');
    sgtitle(ncaso, 'Interpreter', 'latex')

    subplot(3,3,j)
    plot(time, sensor, 'Color', "#00BFFF", 'LineWidth', 1.5)
    hold on
    plot(time, setpoint, 'k--', 'LineWidth', 1)
    grid on

```

```

ax = gca;
ax.TickLabelInterpreter = 'latex';
title(nTitlePID,'Interpreter','latex')
ylabel(yTitle,'Interpreter','latex')
xlabel('Tiempo [s]','Interpreter','latex')
sgtitle(ncaso,'Interpreter','latex')

```

```
end
```

- Código para el cálculo del tiempo de establecimiento

```

caso = 1;
nFile = sprintf('banco de trabajo_Case-%d_plots.dat',caso);

filename = nFile;
Archivo = readtable(filename);

time = Archivo.Time_s_;
control =
["N2MassFlow", "O2MassFlow", "HumidityL1", "HeatL1", "H2MassFlow", "HeatL2Up",
"HeatL2Low", "H2HumidMassFlow", "HumidityL2"];
nactuador = [64,65,66,91,111,110,113,123,112];
nsensor = [1,2,3,4,5,10,12,11,6];

for j = 1:length(nsensor)

    structuador = num2str(nactuador(j));
    actuator = eval(strcat('Archivo.ECU_Actuator_',structuador
, '___Output_0'));

    strsensor = num2str(nsensor(j));
    sensor = eval(strcat('Archivo.ECU_Sensor_',strsensor, '___'));

    input =
eval(strcat('Archivo.Controller_PID',control(j), '_Input___'));
    setpoint =
eval(strcat('Archivo.Controller_PID',control(j), '_SetPoint___'));
    error =
eval(strcat('Archivo.Controller_PID',control(j), '_Error___'));
    error_rel = error/setpoint;

    try
        pos_setpoint = find(error_rel>0.05,1,'last');
        time_set(j) = Archivo{pos_setpoint,1};
    catch
        time_set(j) = 100;
    end

end

array2table(time_set)

```

- Código para graficar los ensayos del banco

```

nFile = sprintf('Caso experimental.xlsx');

filename = nFile;
Archivo = readtable(filename);

% ENSAYO (e)
tiempo_e = Archivo.Tiempo_ensayo;
Temperatura_e = Archivo.PV_Temperature_ensayo_K;
Setpoint_temp_e = Archivo.SP_Temperature_ensayo_K;
Humedad_e = Archivo.PV_Humidity_ensayo_kgs;
Setpoint_humedad_e = Archivo.SP_Humidity_ensayo_kgs;

error_rel_temp_e = abs((Temperatura_e(:,1)-
Setpoint_temp_e(:,1))./Setpoint_temp_e(:,1));
error_rel_hum_e = abs((Humedad_e(:,1)-
Setpoint_humedad_e(:,1))./Setpoint_humedad_e(:,1));

try
    pos_setpoint_temp_e = find(error_rel_temp_e>0.05,1,'last');
    time_set_temp_e = Archivo(pos_setpoint_temp_e,1);
end

try
    pos_setpoint_hum_e = find(error_rel_hum_e>0.05,1,'last');
    time_set_hum_e = Archivo(pos_setpoint_hum_e,1);
end

% SIMULACIÓN (s)
tiempo_s = Archivo.Tiempo_sim;
Temperatura_s = Archivo.PV_Temperature_sim;
Setpoint_temp_s = Archivo.SP_Temperature_sim;
Humedad_s = Archivo.PV_Humidity_sim;
Setpoint_humedad_s = Archivo.SP_Humidity_sim;

Error_abs_temp_s = Archivo.Error_Temperature_sim;
Error_abs_hum_s = Archivo.Error_Humidity_sim;

error_rel_temp_s = Error_abs_temp_s./Setpoint_temp_s;
error_rel_hum_s = Error_abs_hum_s./Setpoint_humedad_s;

try
    pos_setpoint_temp_s = find(error_rel_temp_s>0.05,1,'last');
    time_set_temp_s = Archivo(pos_setpoint_temp_s,2);
end

try
    pos_setpoint_hum_s = find(error_rel_hum_s>0.05,1,'last');
    time_set_hum_s = Archivo(pos_setpoint_hum_s,2);
end

figure
hold on
plot(tiempo_e,Temperatura_e,'Color','#8FBC8F','LineWidth',1.5);

```

```

plot(tiempo_s, Temperatura_s, 'Color', "#87CEFA", 'LineWidth', 1.5);
plot(tiempo_e, Setpoint_temp_e, 'Color', "#006400", 'LineWidth', 1,
'LineStyle', '--');
plot(tiempo_s, Setpoint_temp_s, 'Color', "#4169E1", 'LineWidth', 1,
'LineStyle', '--');
grid on
ax = gca;
ax.TickLabelInterpreter = 'latex';
title('Comparacion sensores temperatura', 'Interpreter', 'latex')
ylabel('Temperatura [K]', 'Interpreter', 'latex');
xlabel('Tiempo [s]', 'Interpreter', 'latex');
lgd =
legend('ensayo', 'simulacion', 'Location', 'bestoutside', 'Interpreter',
'latex');
lgd.FontSize = 10;

figure
hold on
plot(tiempo_e, Humedad_e, 'Color', "#8FBC8F", 'LineWidth', 1.5);
plot(tiempo_s, Humedad_s, 'Color', "#87CEFA", 'LineWidth', 1.5);
plot(tiempo_e, Setpoint_humedad_e, 'Color', "#006400", 'LineWidth', 1,
'LineStyle', '--');
plot(tiempo_s, Setpoint_humedad_s, 'Color', "#4169E1", 'LineWidth', 1,
'LineStyle', '--');
grid on
ax = gca;
ax.TickLabelInterpreter = 'latex';
title('Comparacion sensores humedad', 'Interpreter', 'latex')
ylabel('Humedad [-]', 'Interpreter', 'latex');
xlabel('Tiempo [s]', 'Interpreter', 'latex');
lgd =
legend('ensayo', 'simulacion', 'Location', 'bestoutside', 'Interpreter',
'latex');
lgd.FontSize = 10;

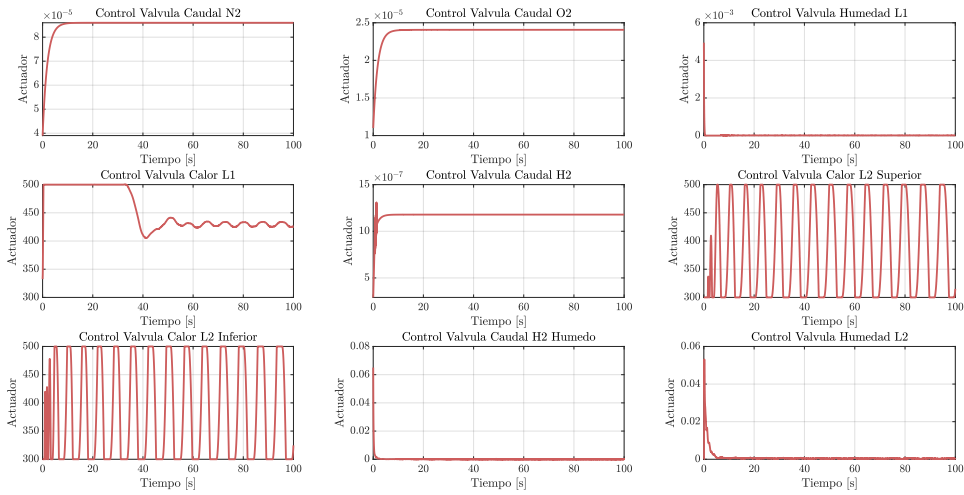
time_set_hum = cat(2, time_set_hum_e, time_set_hum_s)
time_set_temp = cat(2, time_set_temp_e, time_set_temp_s)

```

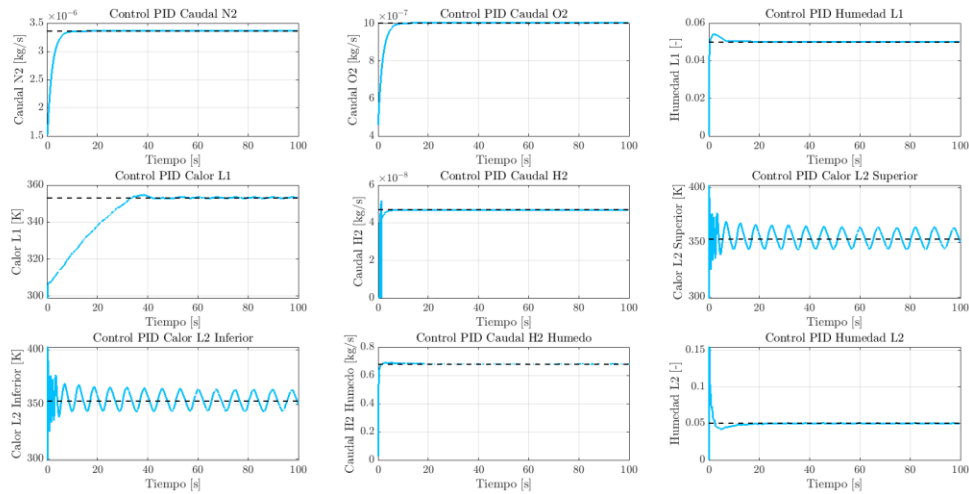
B. Resultados y análisis de los estudios paramétricos

- Estudio paramétrico de las condiciones de operación

Caso 2

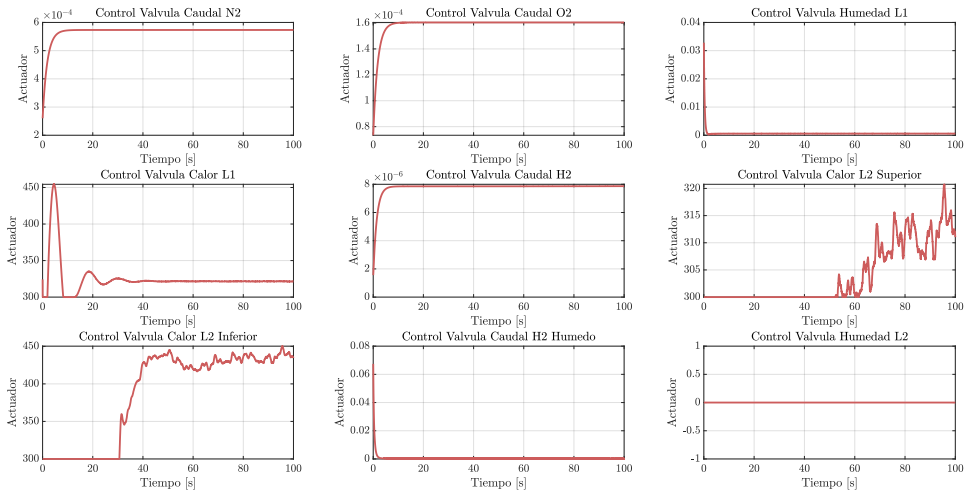


Caso 2

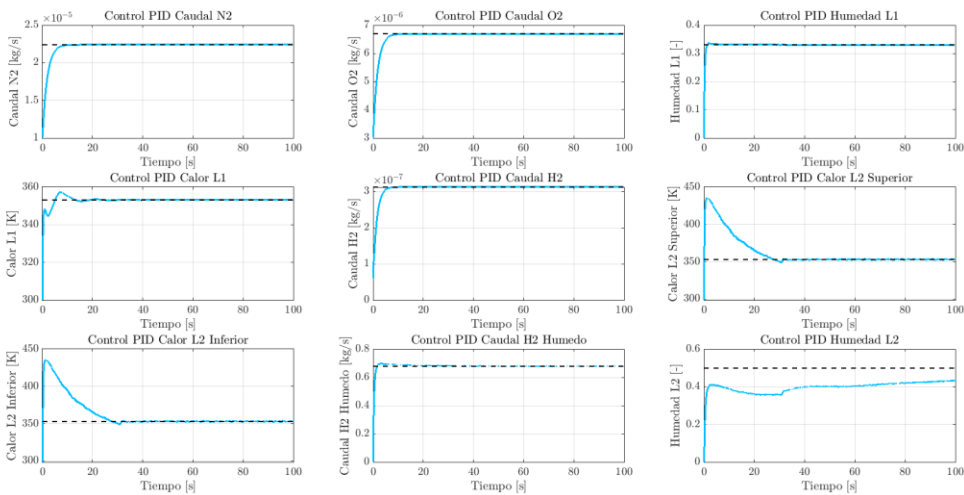


Resultados y análisis de los estudios paramétricos

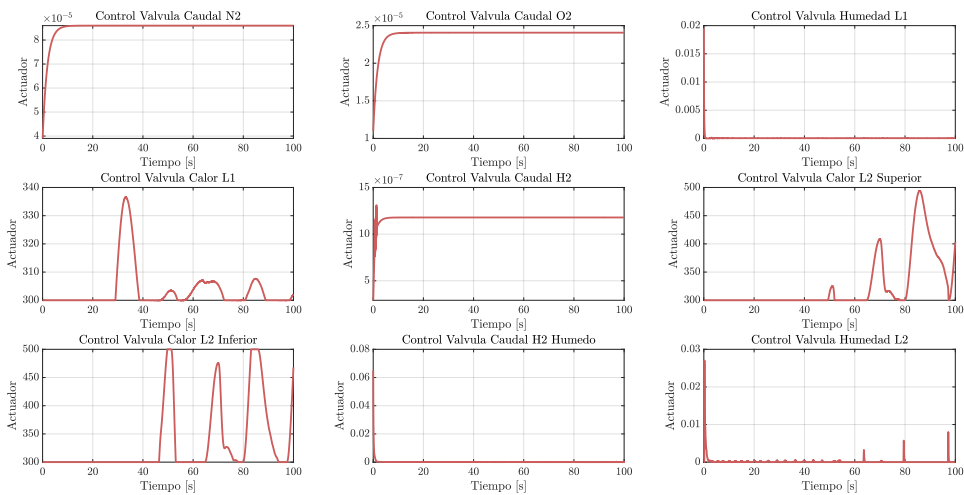
Caso 3



Caso 3

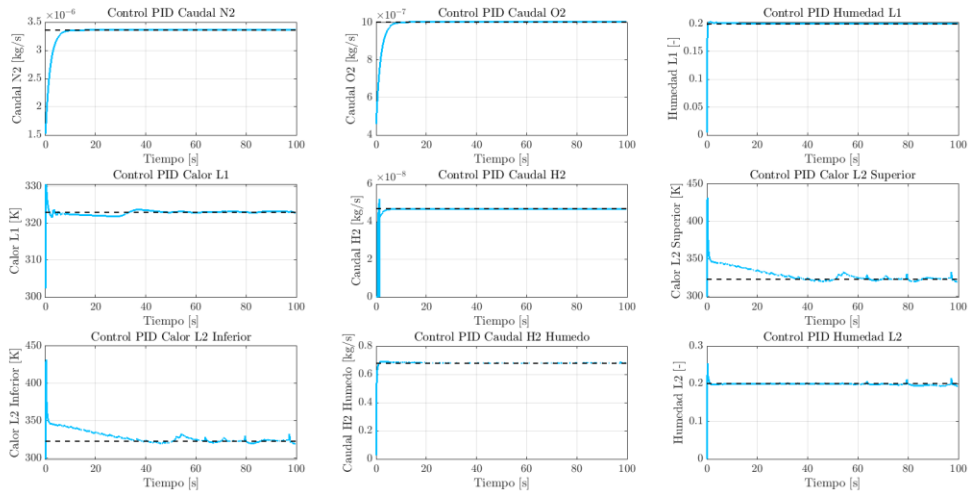


Caso 4

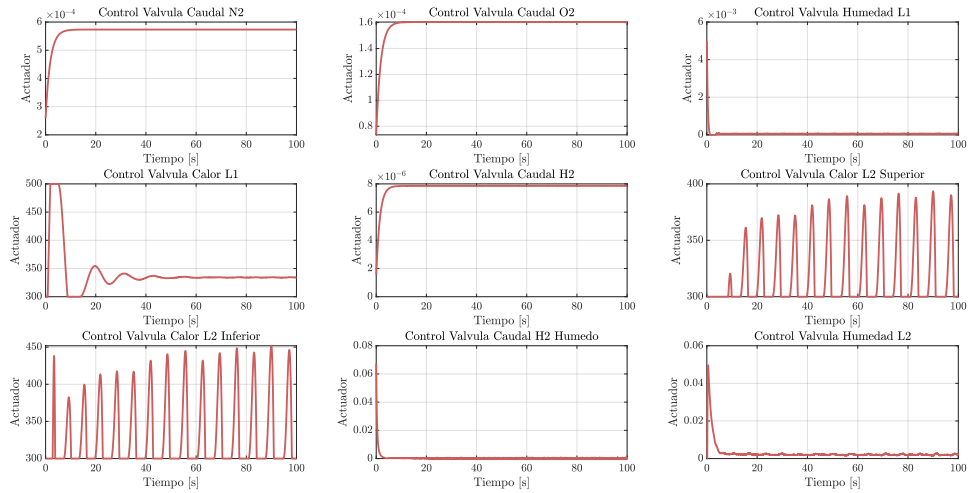


Resultados y análisis de los estudios paramétricos

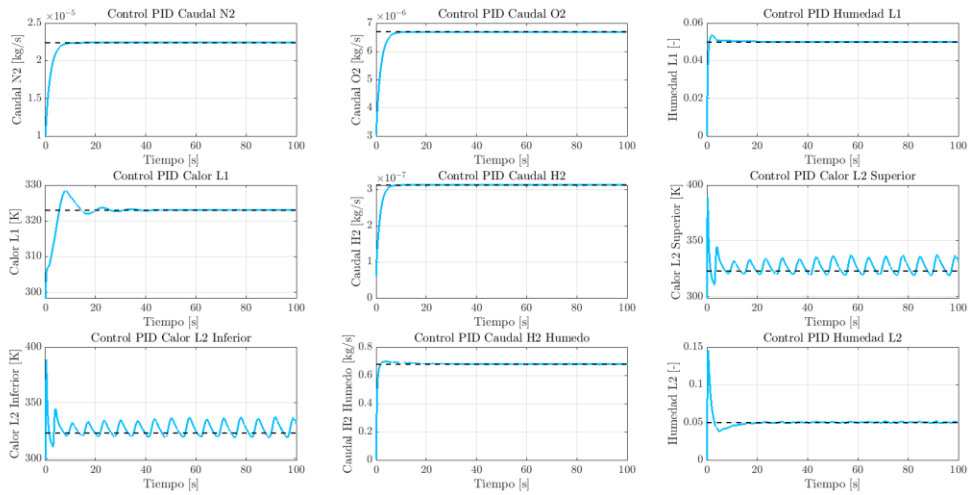
Caso 4



Caso 5

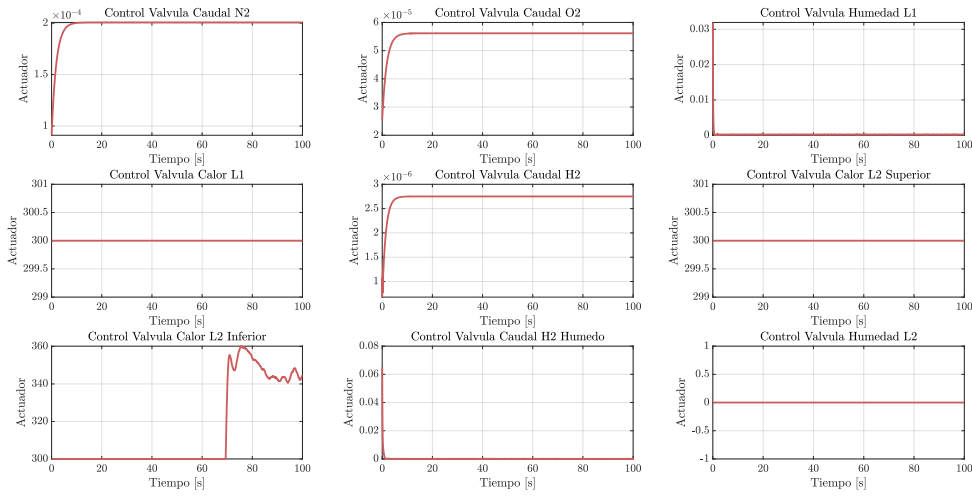


Caso 5

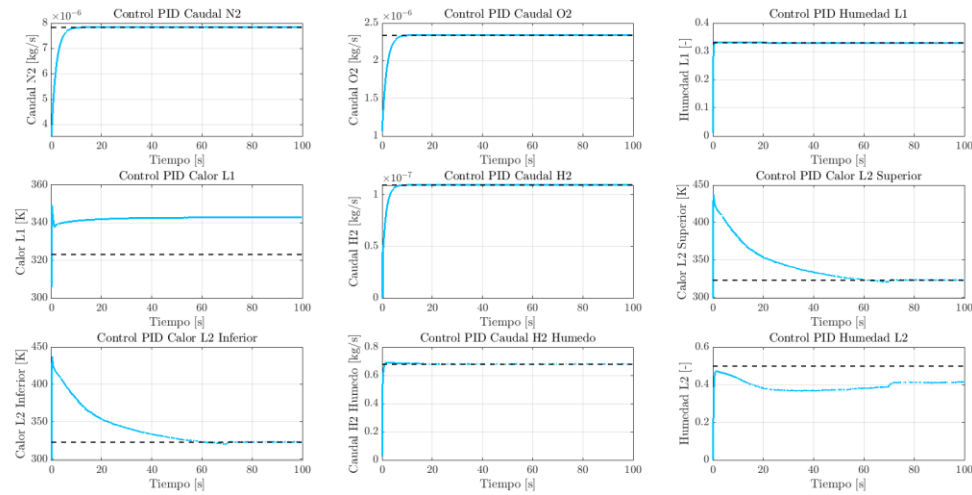


Resultados y análisis de los estudios paramétricos

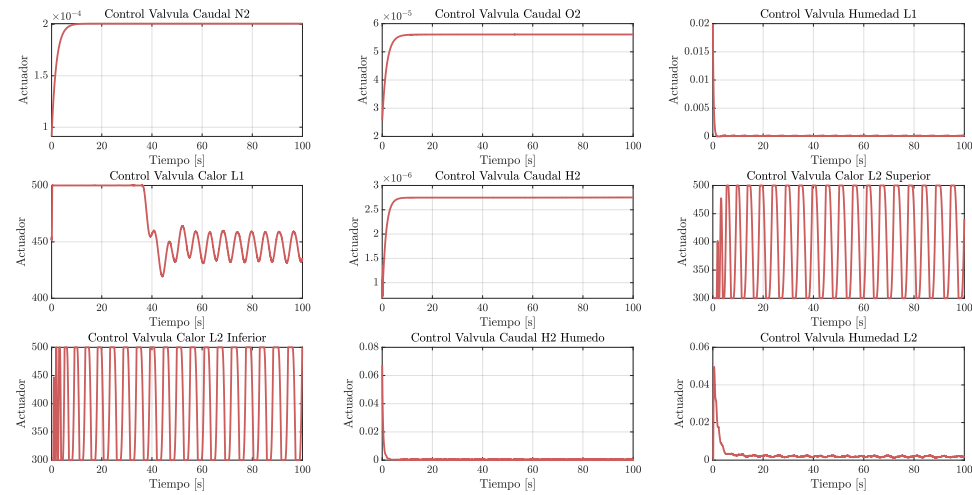
Caso 6



Caso 6

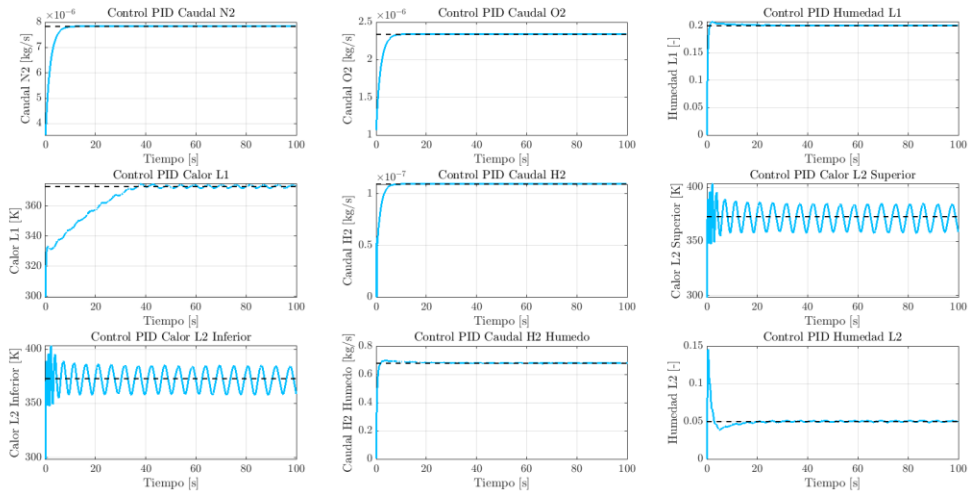


Caso 7

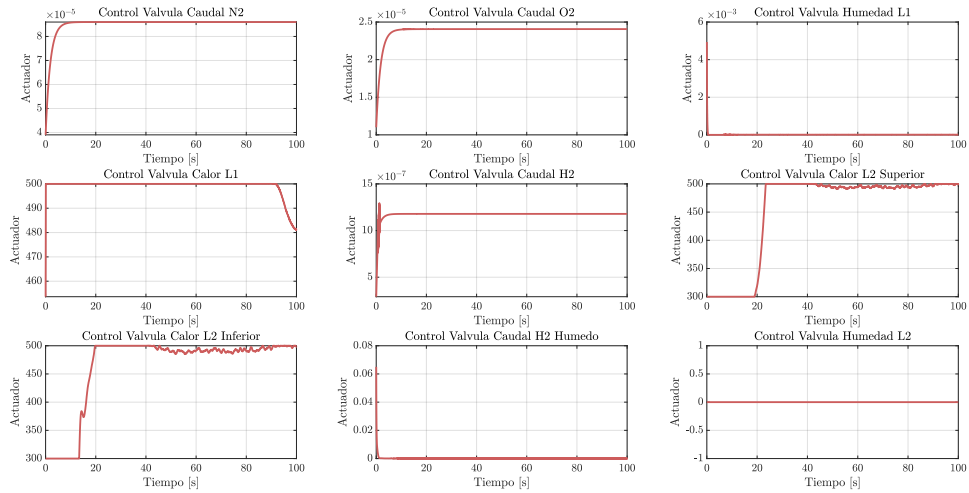


Resultados y análisis de los estudios paramétricos

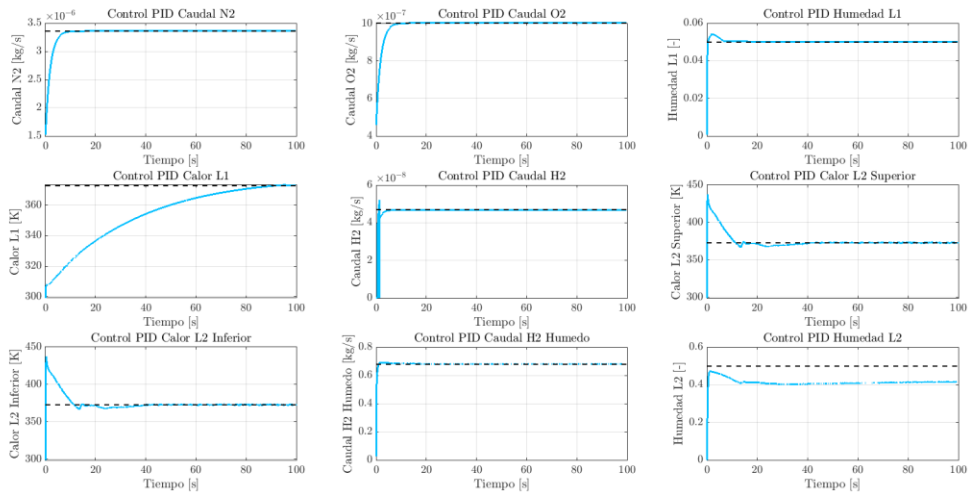
Caso 7



Caso 8

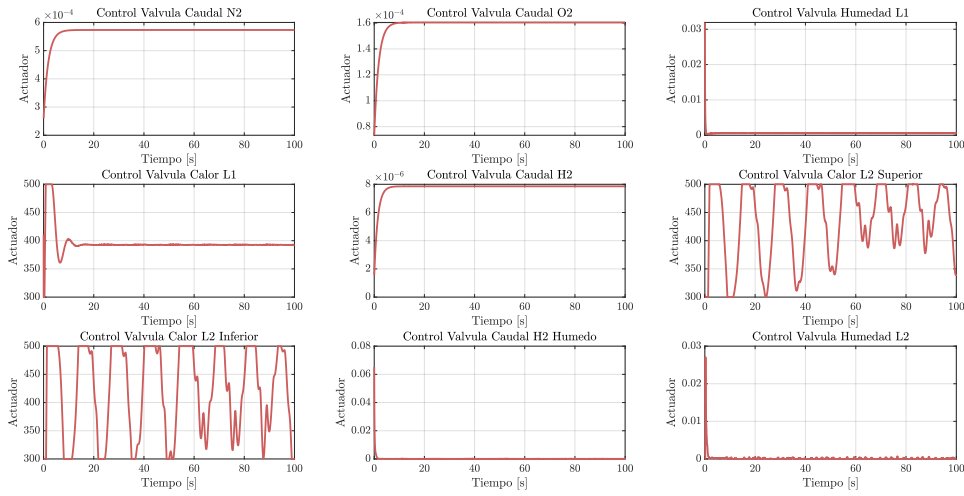


Caso 8

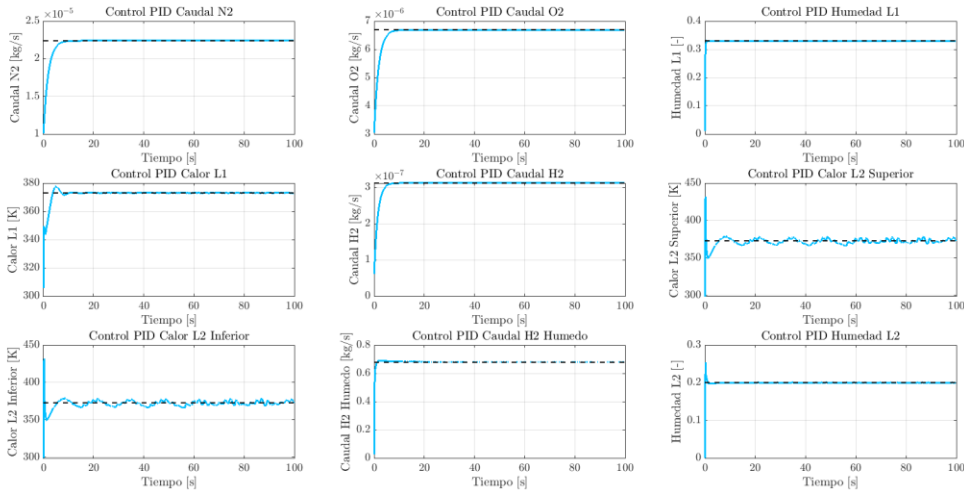


Resultados y análisis de los estudios paramétricos

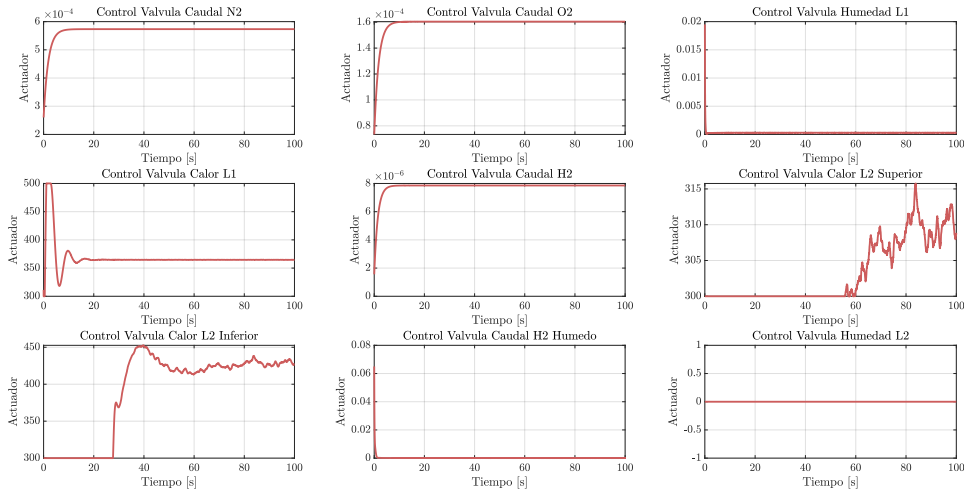
Caso 9



Caso 9

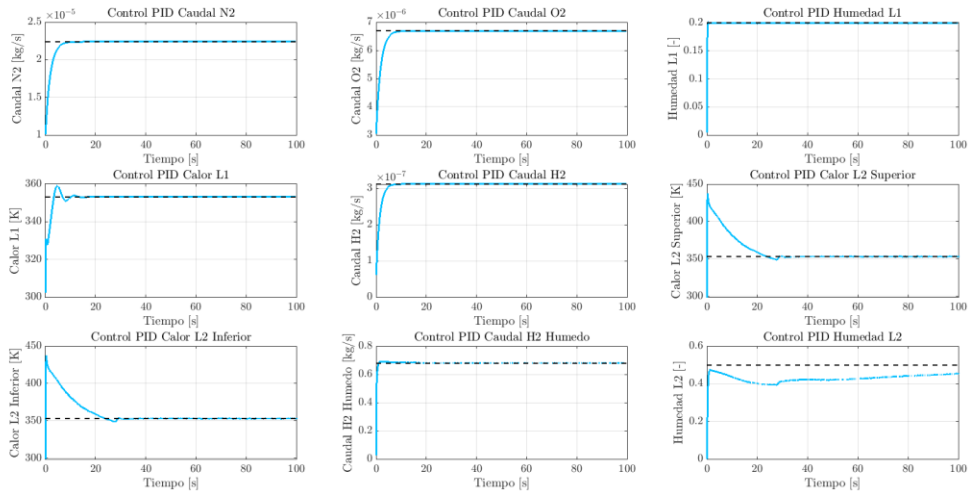


Caso 10

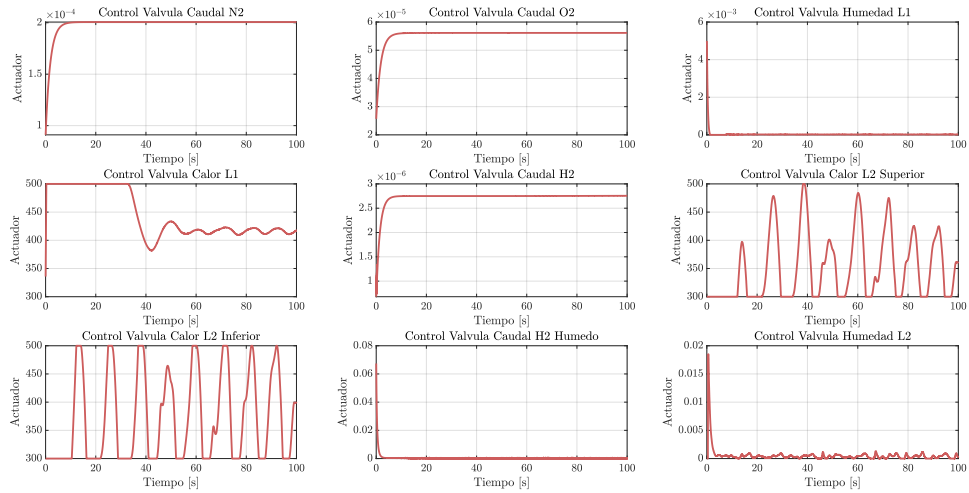


Resultados y análisis de los estudios paramétricos

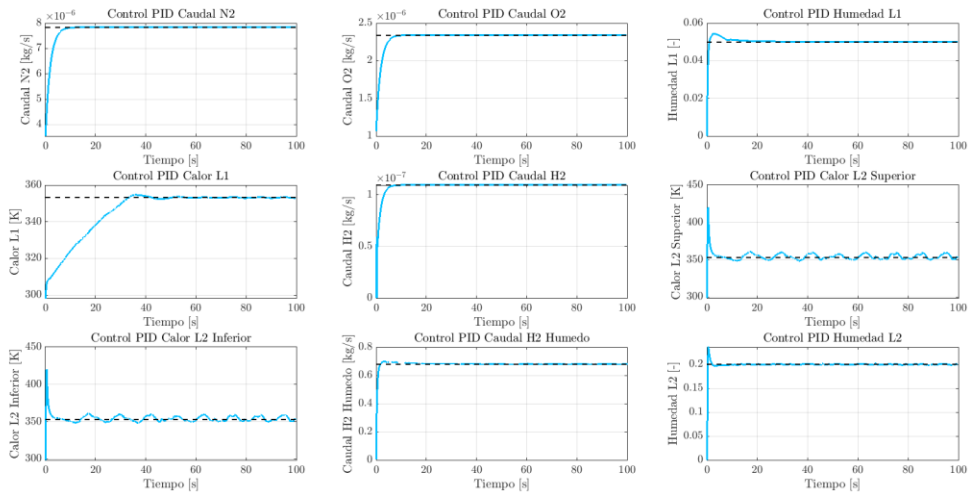
Caso 10



Caso 11

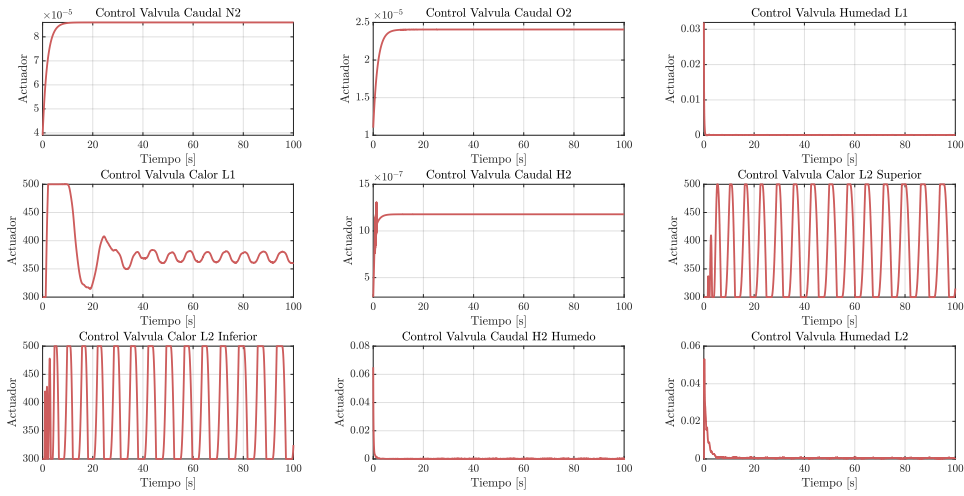


Caso 11

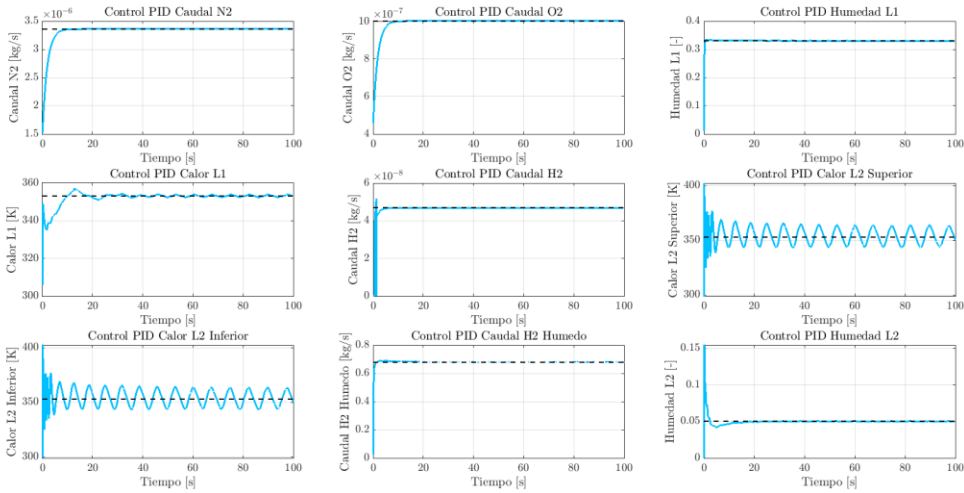


Resultados y análisis de los estudios paramétricos

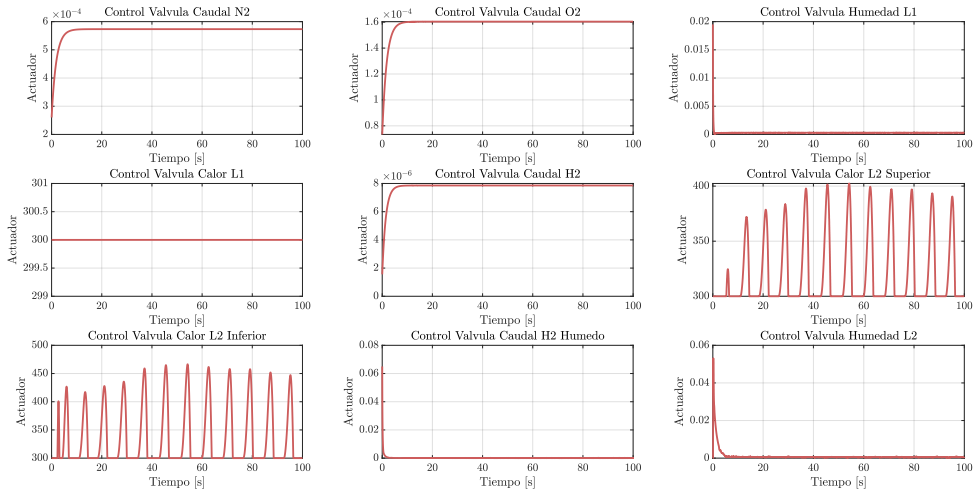
Caso 12



Caso 12

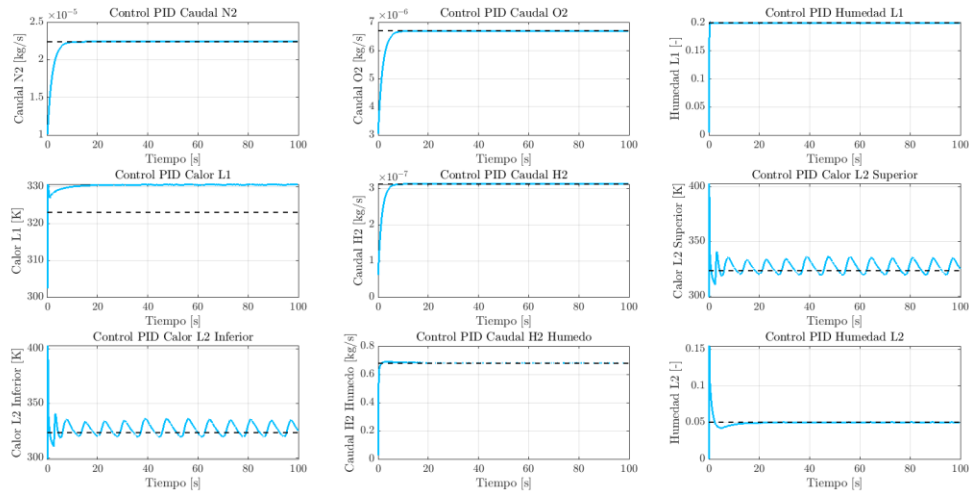


Caso 13

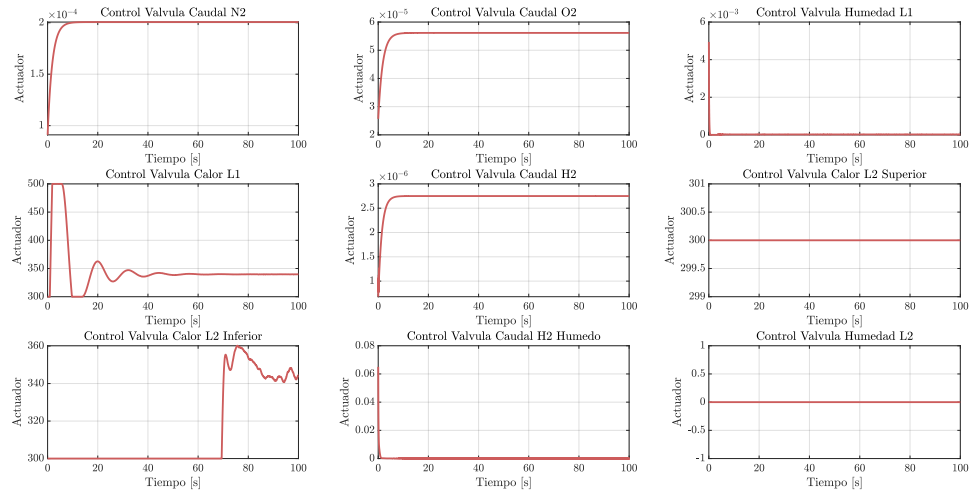


Resultados y análisis de los estudios paramétricos

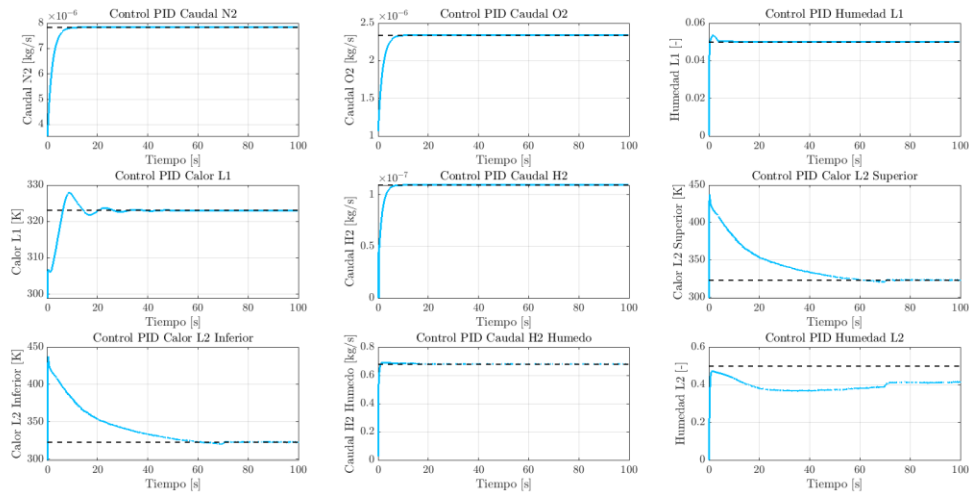
Caso 13



Caso 14

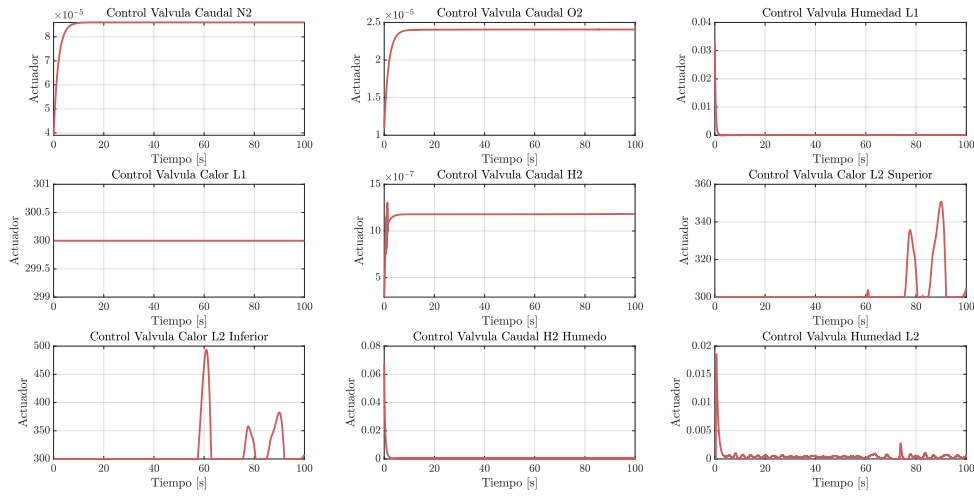


Caso 14

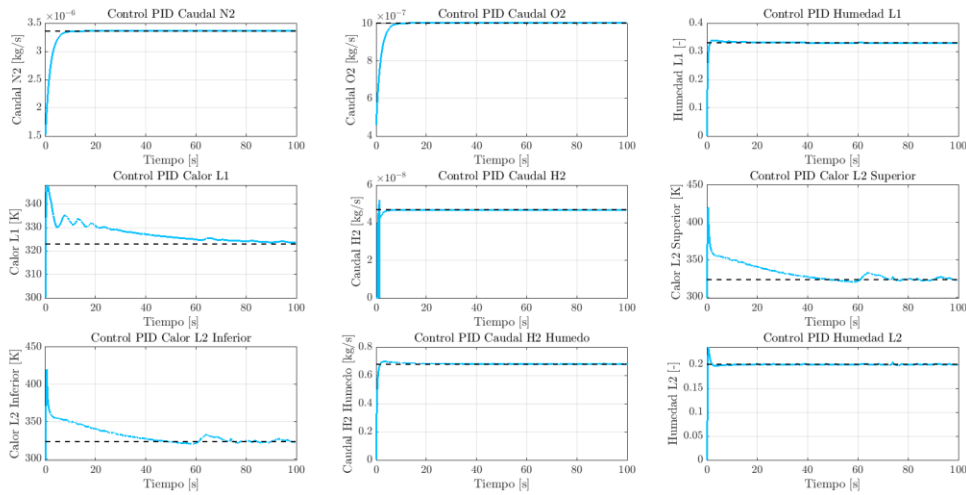


Resultados y análisis de los estudios paramétricos

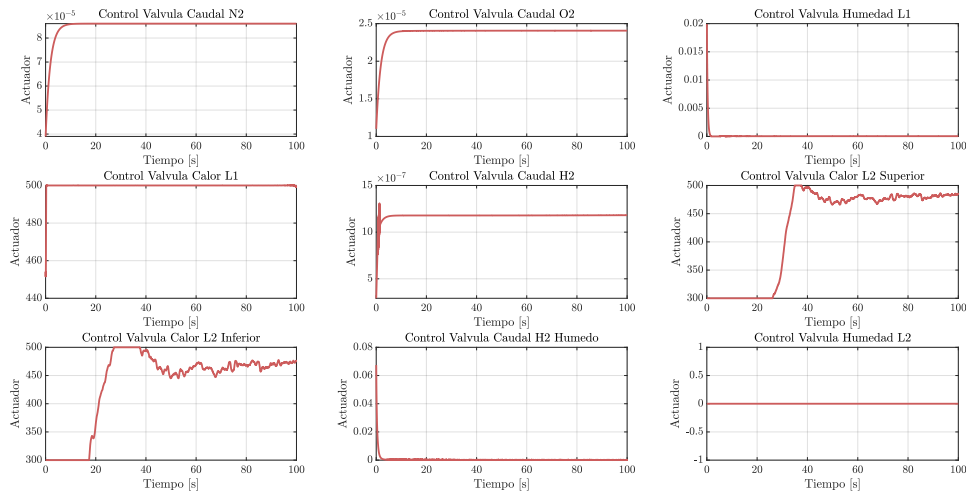
Caso 15



Caso 15

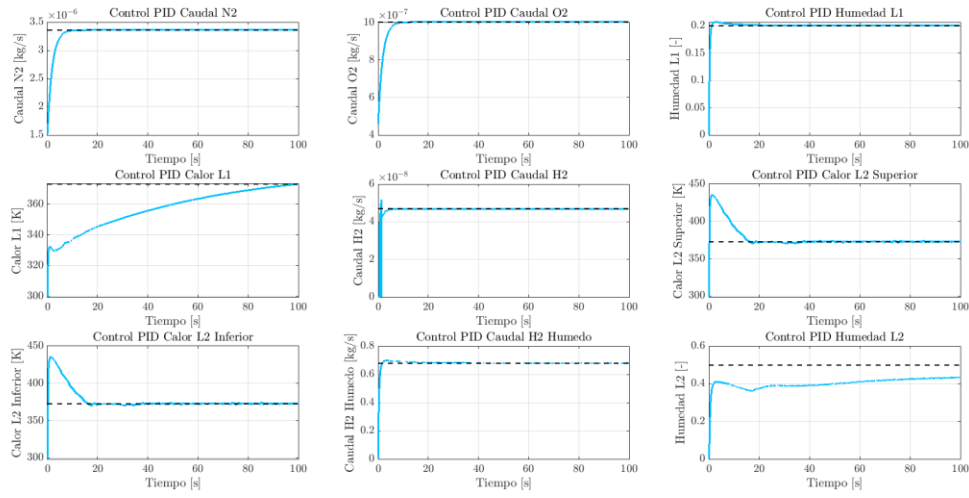


Caso 16

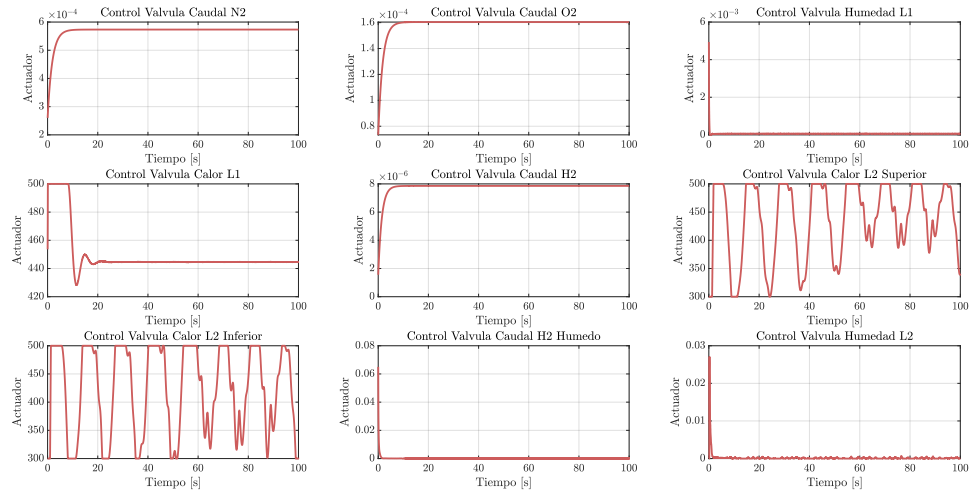


Resultados y análisis de los estudios paramétricos

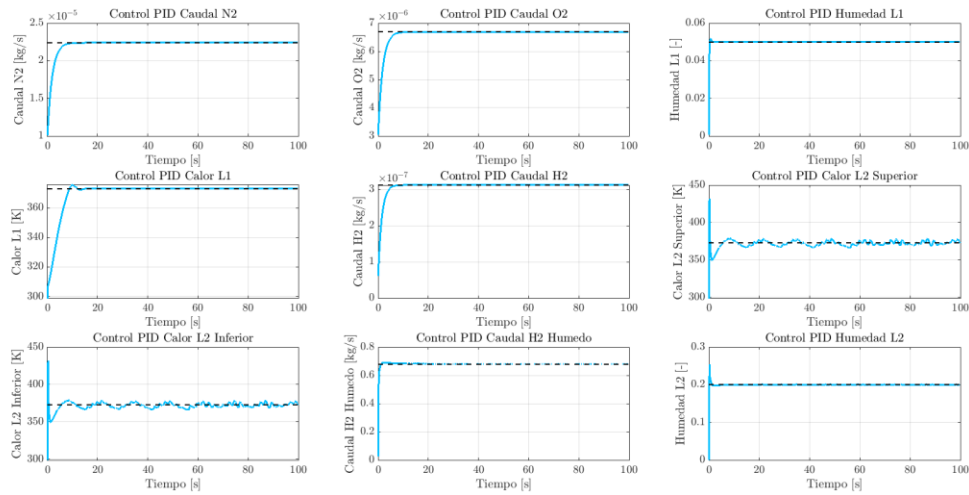
Caso 16



Caso 17

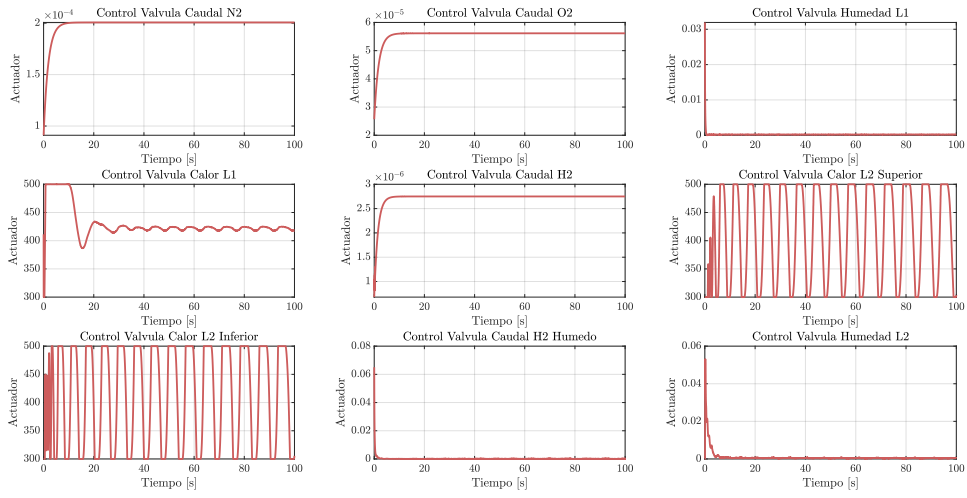


Caso 17

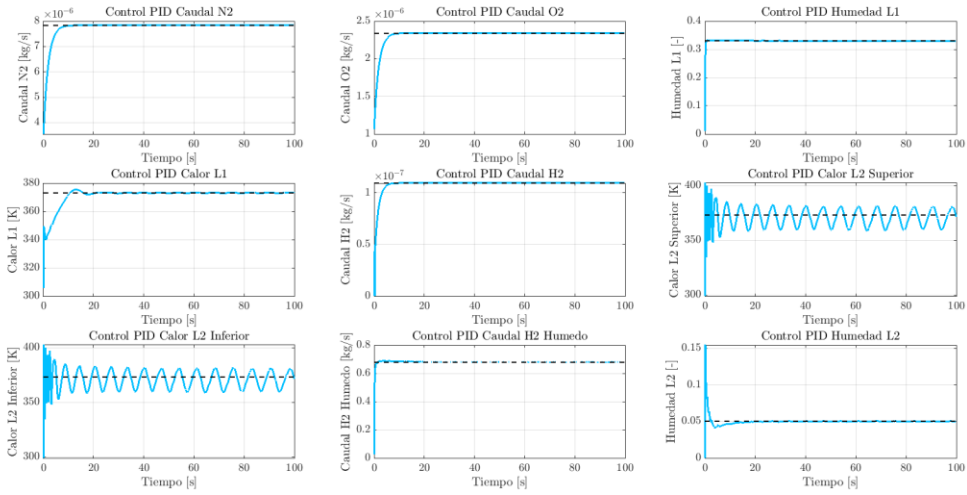


Resultados y análisis de los estudios paramétricos

Caso 18



Caso 18



▪ ANOVA multifactorial de las condiciones de operación

Calor L1					
Fuente	Suma de Cuadrados	G1	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Calor L1/L2	900,513	2	450,256	11,59	0,0043
B: Humedad L1	502,669	2	251,335	6,47	0,0213
C: Humedad L2	247,679	2	123,839	3,19	0,0959
D: Intensidad	652,504	2	326,252	8,40	0,0108
E: P _{amb}	124,583	1	124,583	3,21	0,1111
RESIDUOS	310,726	8	38,8408		
TOTAL	2738,67	17			

Caudal H2					
Fuente	Suma de Cuadrados	G1	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Calor L1/L2	0,0000111111	2	0,00000555556	0,06	0,9445
B: Humedad L1	0,0000777778	2	0,0000388889	0,40	0,6812
C: Humedad L2	0,000477778	2	0,000238889	2,47	0,1457
D: Intensidad	10,6367	2	5,31837	55096,81	0,0000
E: P _{amb}	0,00134444	1	0,00134444	13,93	0,0058
RESIDUOS	0,000772222	8	0,0000965278		
TOTAL	10,6394	17			

Calor L2 Superior					
Fuente	Suma de Cuadrados	G1	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Calor L1/L2	15,6038	2	7,80191	10,01	0,0066
B: Humedad L1	5,57068	2	2,78534	3,57	0,0778
C: Humedad L2	17,1955	2	8,59777	11,04	0,0050
D: Intensidad	2,24218	2	1,12109	1,44	0,2925
E: P _{amb}	2,12674	1	2,12674	2,73	0,1371
RESIDUOS	6,23295	8	0,779118		
TOTAL	48,9719	17			

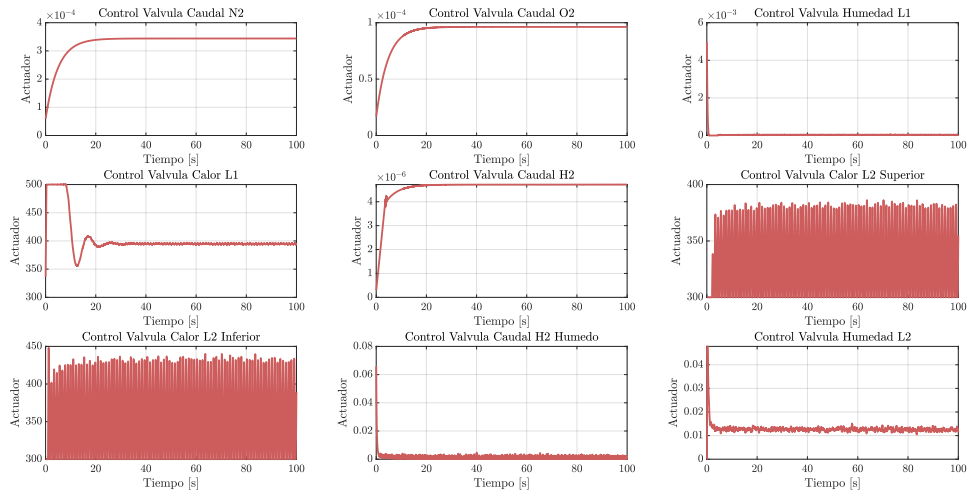
Calor L2 Inferior					
Fuente	Suma de Cuadrados	G1	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Calor L1/L2	15,6038	2	7,80191	10,01	0,0066
B: Humedad L1	5,57068	2	2,78534	3,57	0,0778
C: Humedad L2	17,1955	2	8,59777	11,04	0,0050
D: Intensidad	2,24218	2	1,12109	1,44	0,2925
E: P _{amb}	2,12674	1	2,12674	2,73	0,1371
RESIDUOS	6,23295	8	0,779118		
TOTAL	48,9719	17			

Caudal H2 húmedo					
Fuente	Suma de Cuadrados	G1	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Calor L1/L2	0,00241111	2	0,00120556	1,00	0,4094
B: Humedad L1	0,00241111	2	0,00120556	1,00	0,4094
C: Humedad L2	0,0223444	2	0,0111722	9,27	0,0082
D: Intensidad	0,00174444	2	0,000872222	0,72	0,5141
E: P _{amb}	1,04721	1	1,04721	869,16	0,0000
RESIDUOS	0,00963889	8	0,00120486		
TOTAL	1,08576	17			

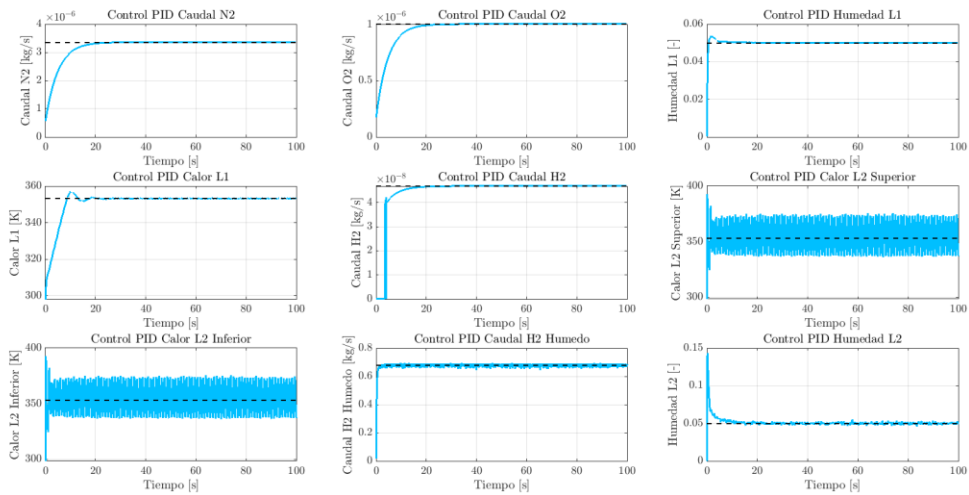
Humedad L2					
Fuente	Suma de Cuadrados	G1	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Calor L1/L2	1,37521	2	0,687606	1,38	0,3048
B: Humedad L1	0,743144	2	0,371572	0,75	0,5039
C: Humedad L2	35542,4	2	17771,2	35754,31	0,0000
D: Intensidad	1,40181	2	0,700906	1,41	0,2988
E: P _{amb}	4,44507	1	4,44507	8,94	0,0173
RESIDUOS	3,9763	8	0,497037		
TOTAL	35554,4	17			

Estudio paramétrico del diseño del banco

Caso 2

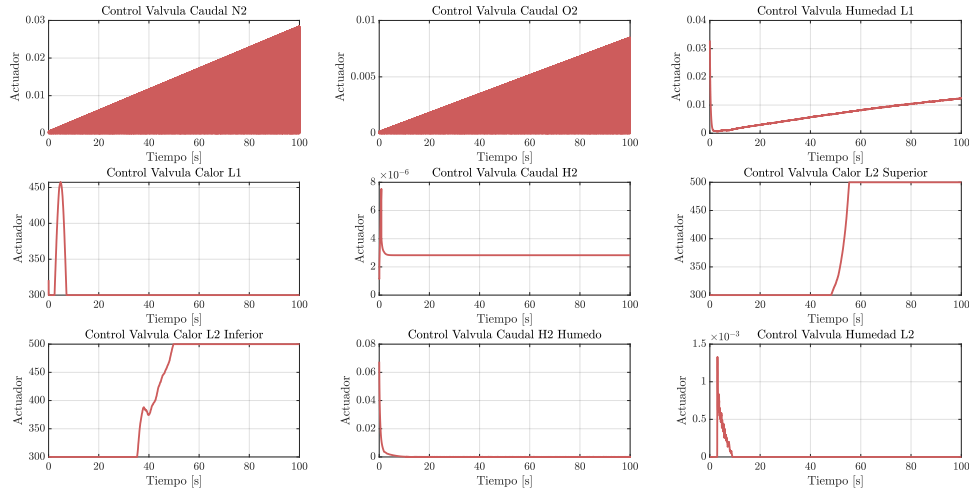


Caso 2

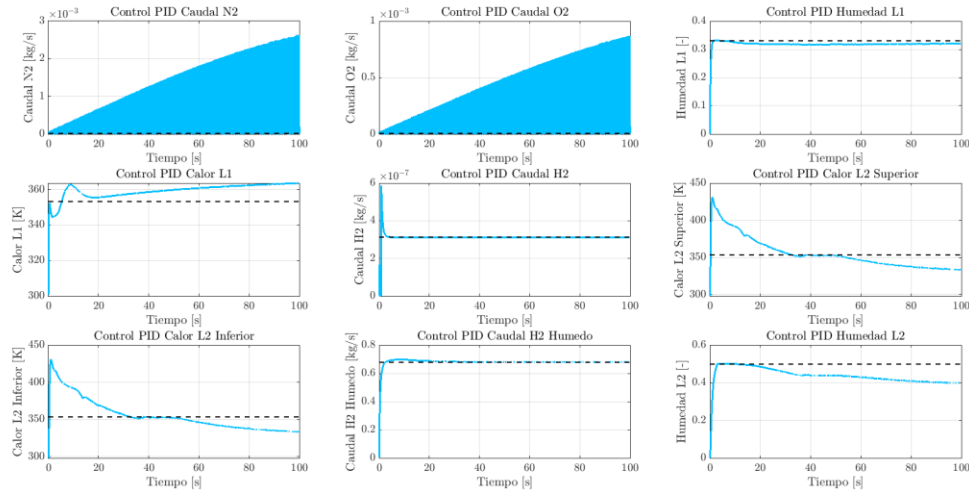


Resultados y análisis de los estudios paramétricos

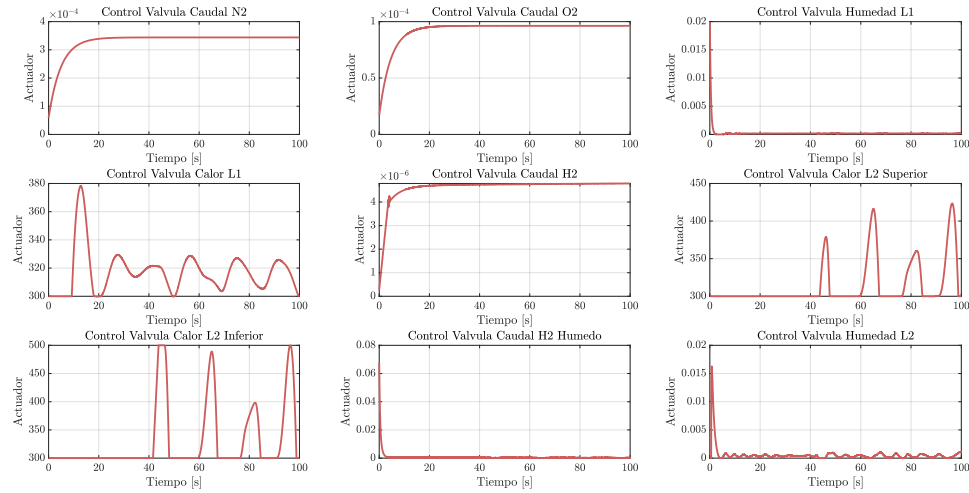
Caso 3



Caso 3

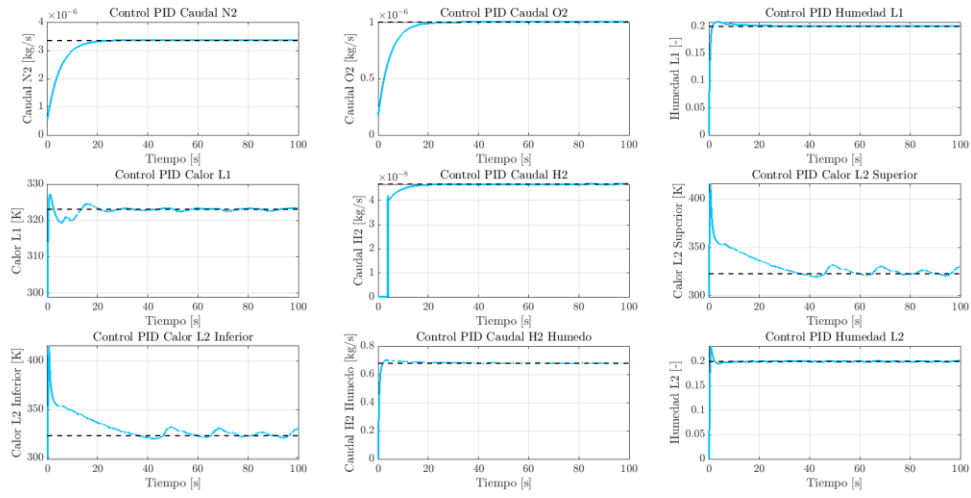


Caso 4

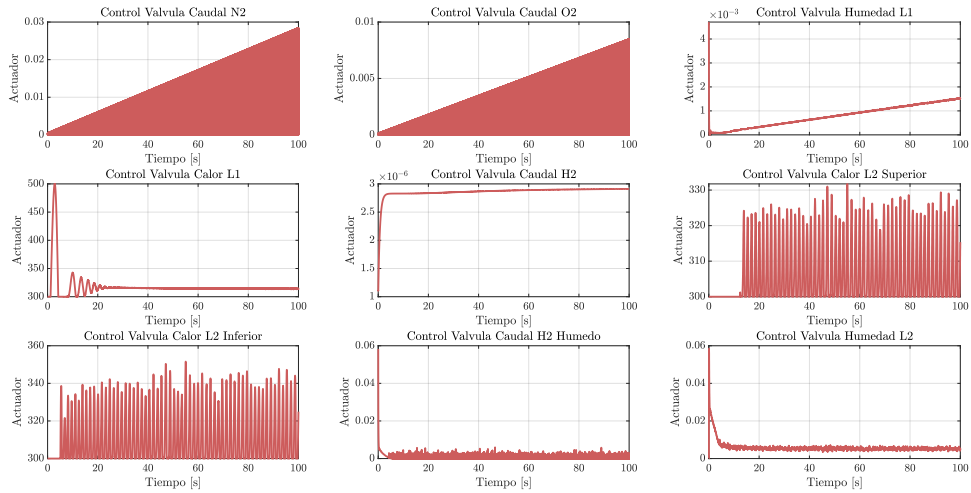


Resultados y análisis de los estudios paramétricos

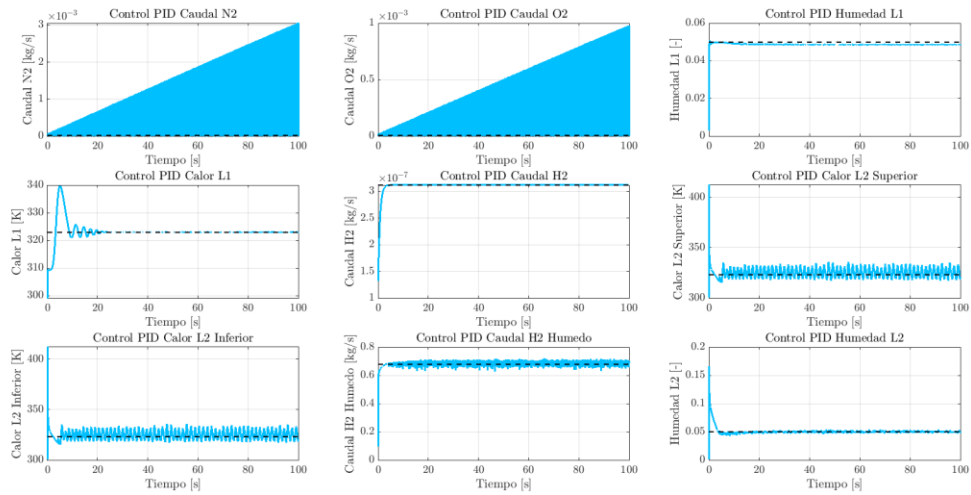
Caso 4



Caso 5

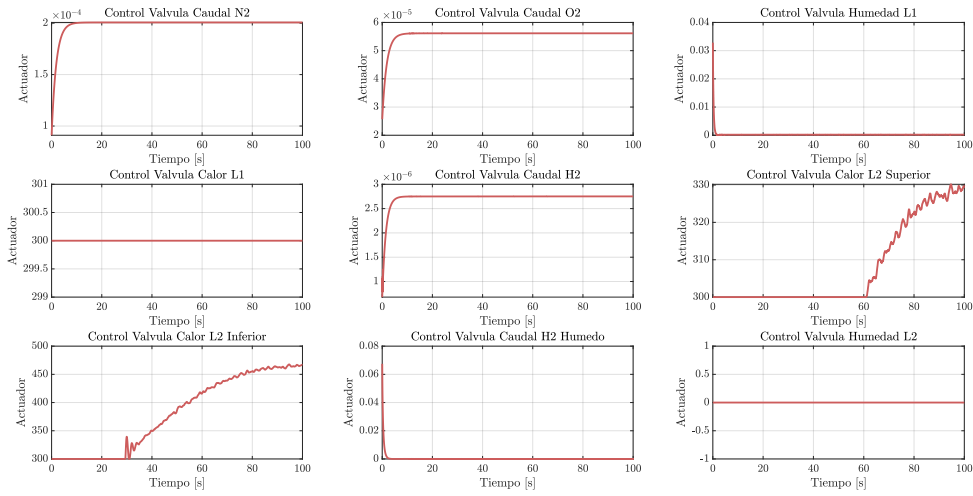


Caso 5

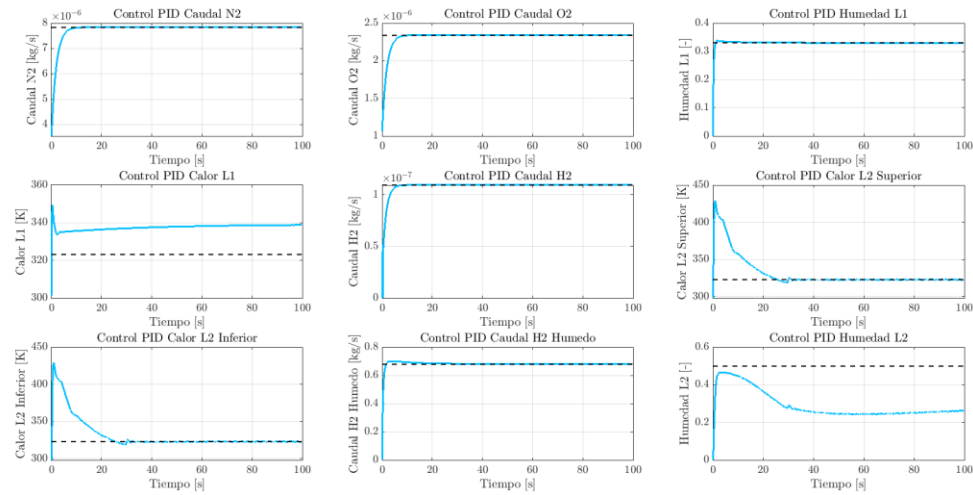


Resultados y análisis de los estudios paramétricos

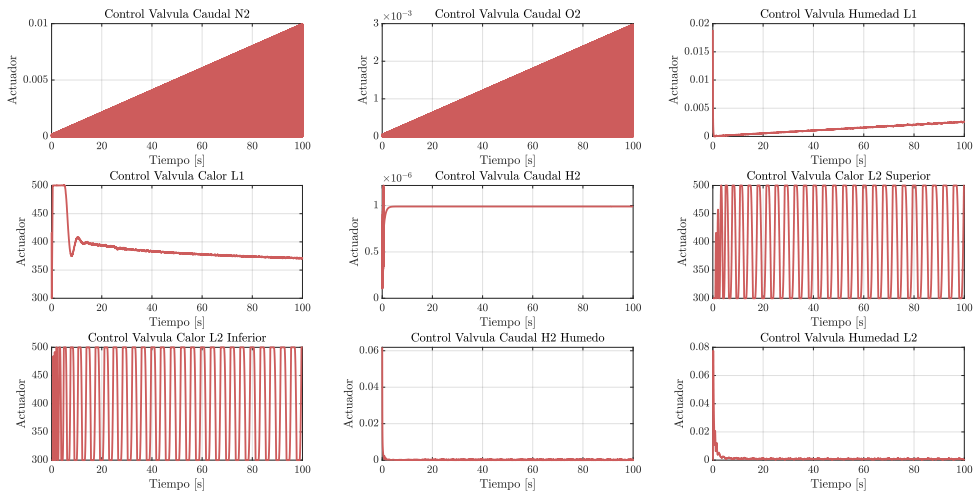
Caso 6



Caso 6

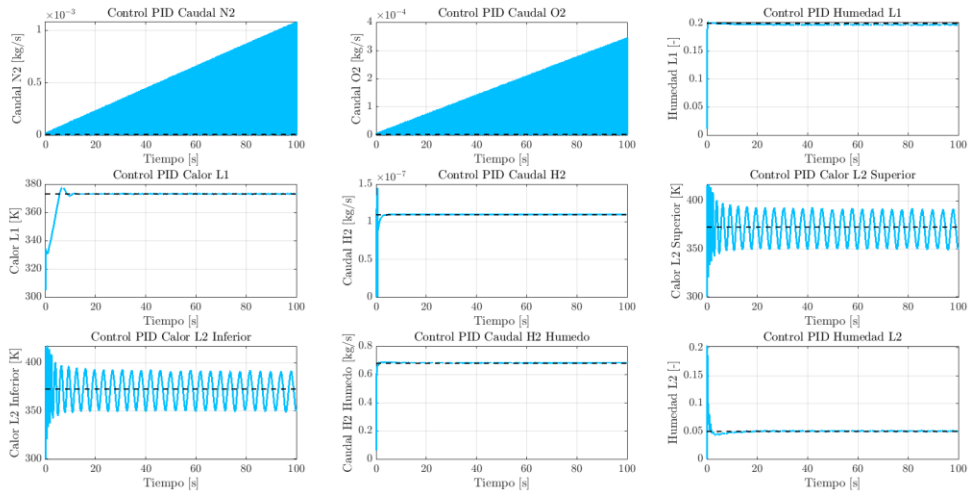


Caso 7

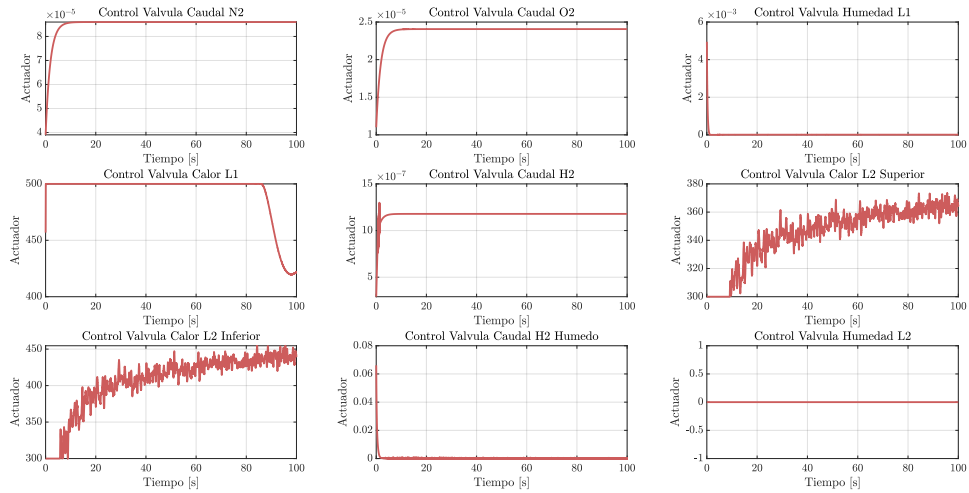


Resultados y análisis de los estudios paramétricos

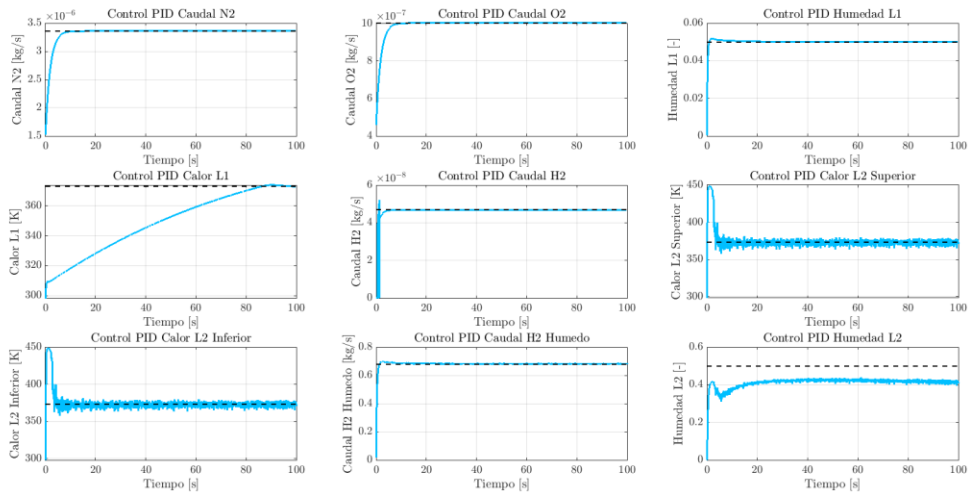
Caso 7



Caso 8

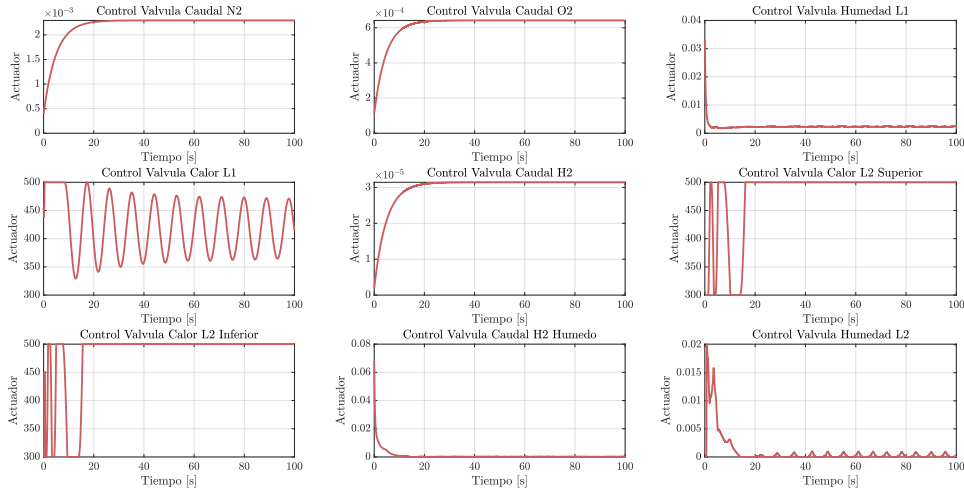


Caso 8

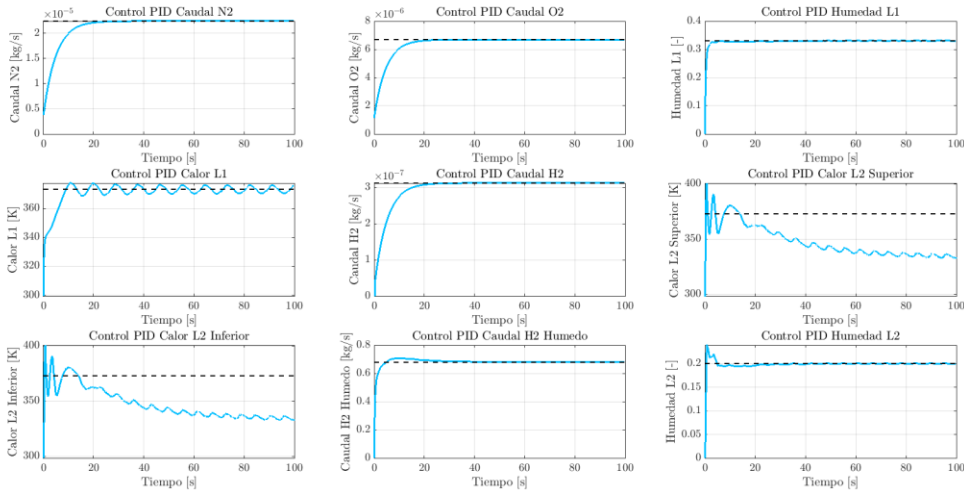


Resultados y análisis de los estudios paramétricos

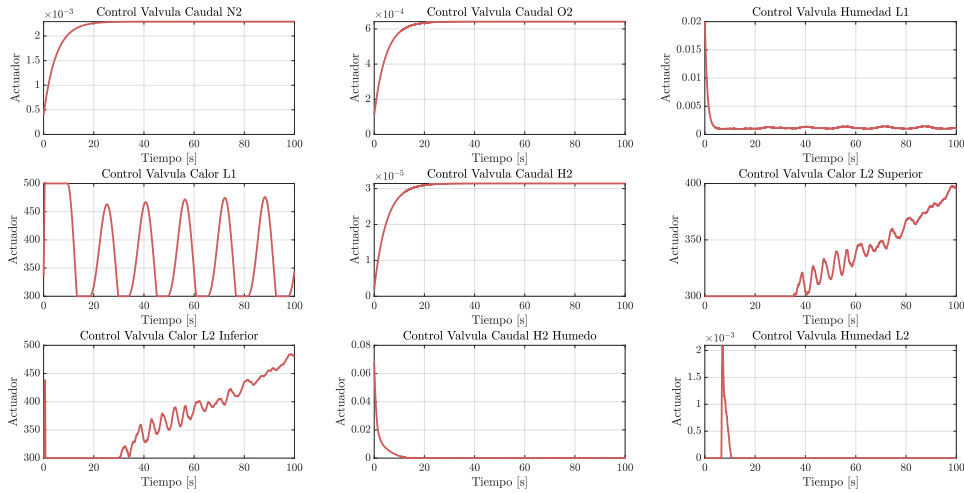
Caso 9



Caso 9

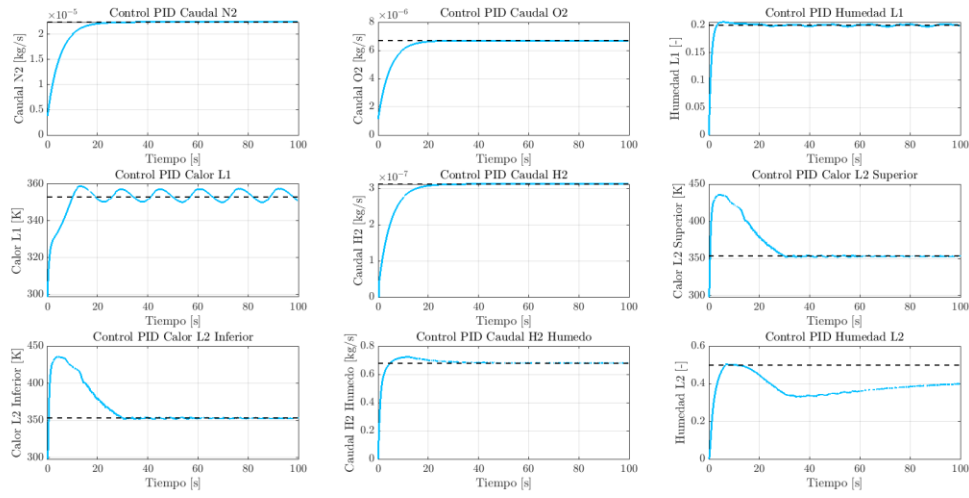


Caso 10

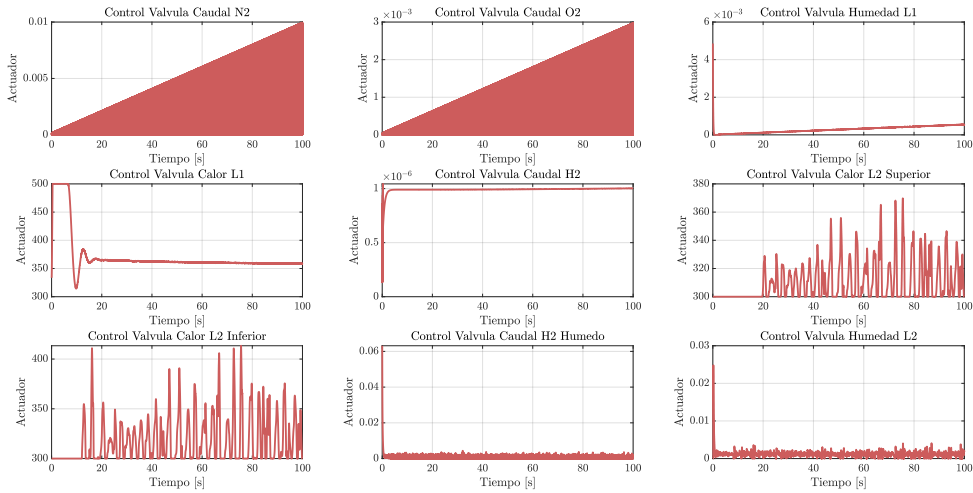


Resultados y análisis de los estudios paramétricos

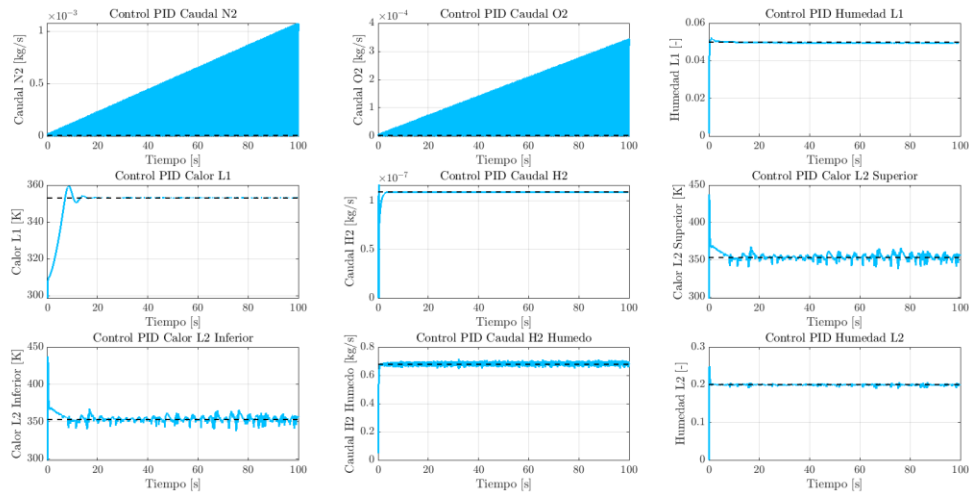
Caso 10



Caso 11

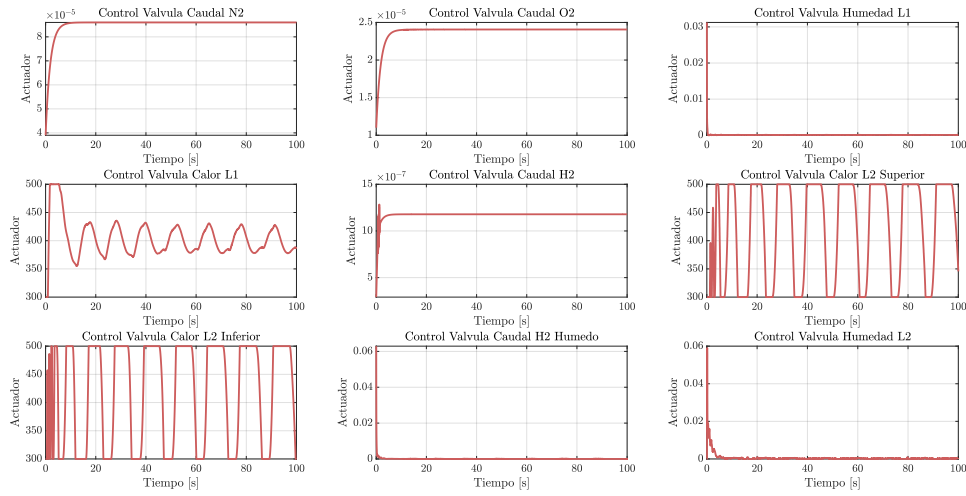


Caso 11

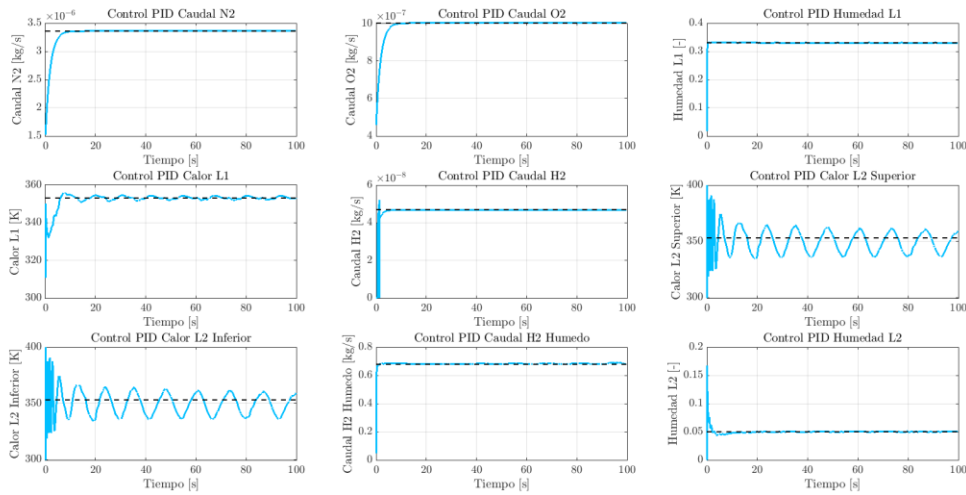


Resultados y análisis de los estudios paramétricos

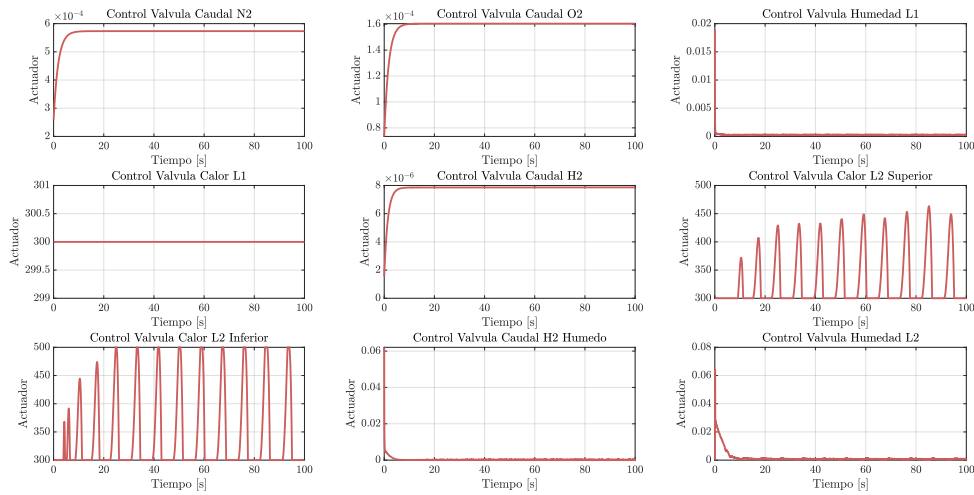
Caso 12



Caso 12

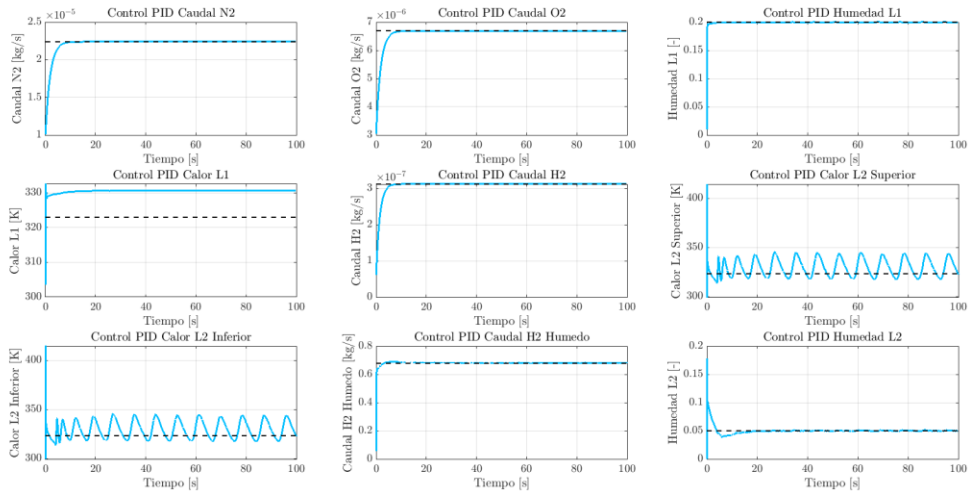


Caso 13

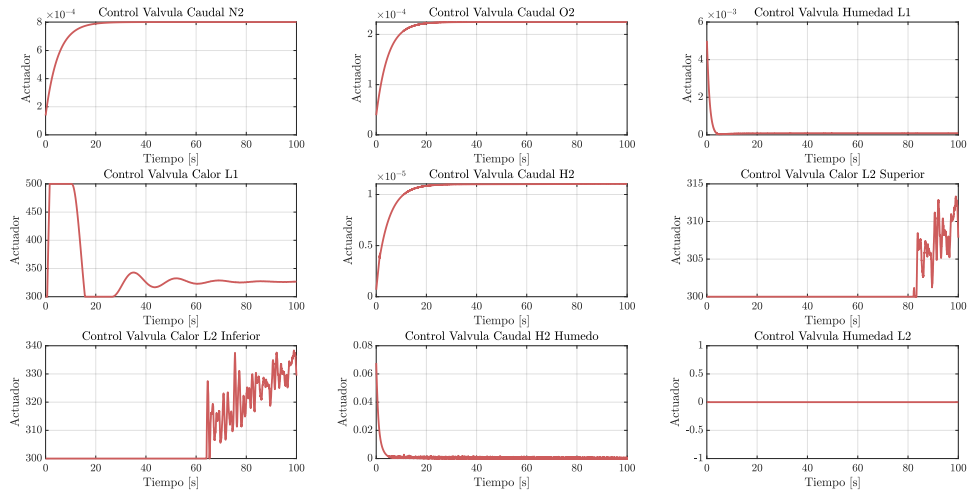


Resultados y análisis de los estudios paramétricos

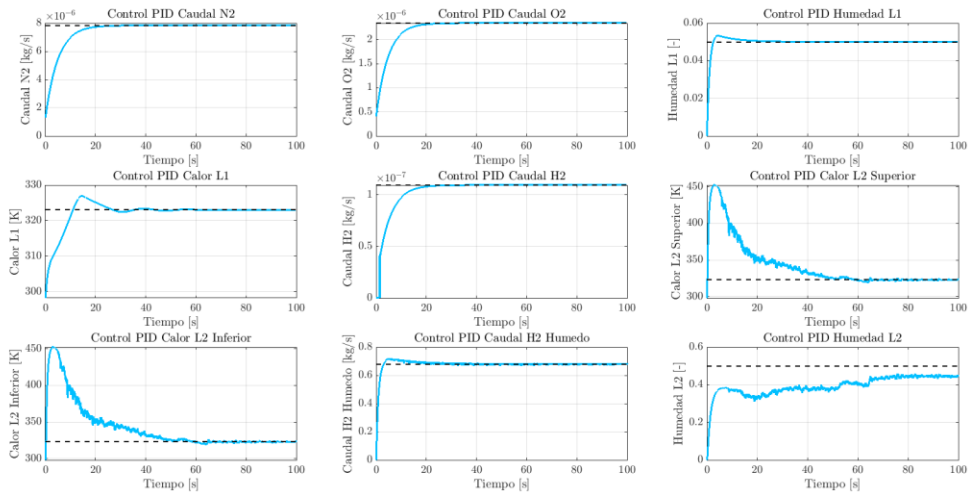
Caso 13



Caso 14

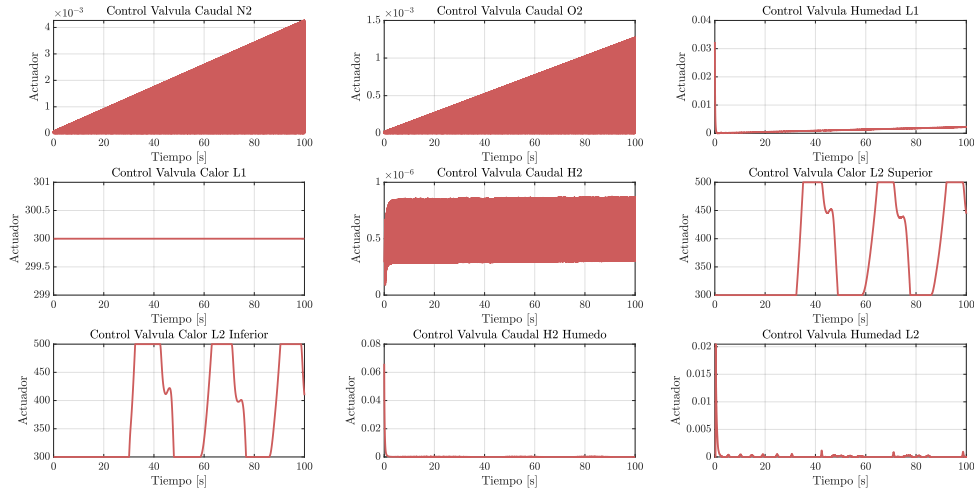


Caso 14

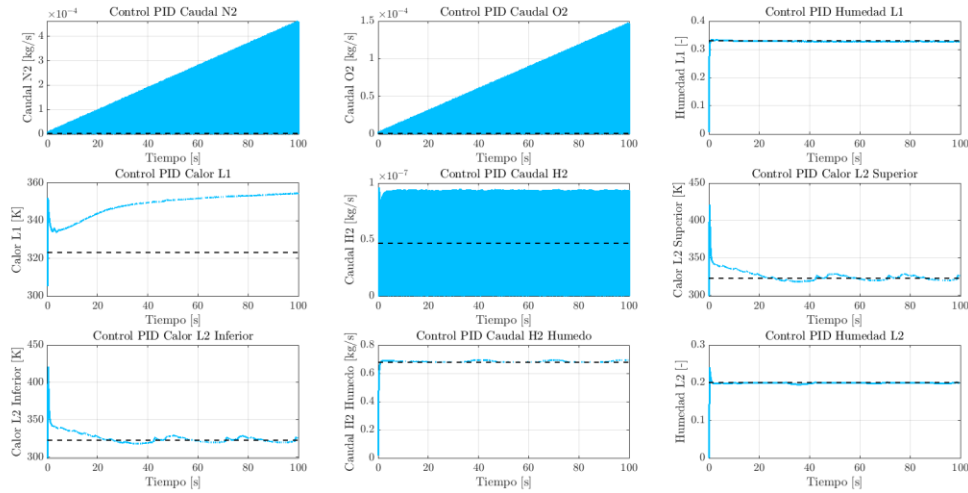


Resultados y análisis de los estudios paramétricos

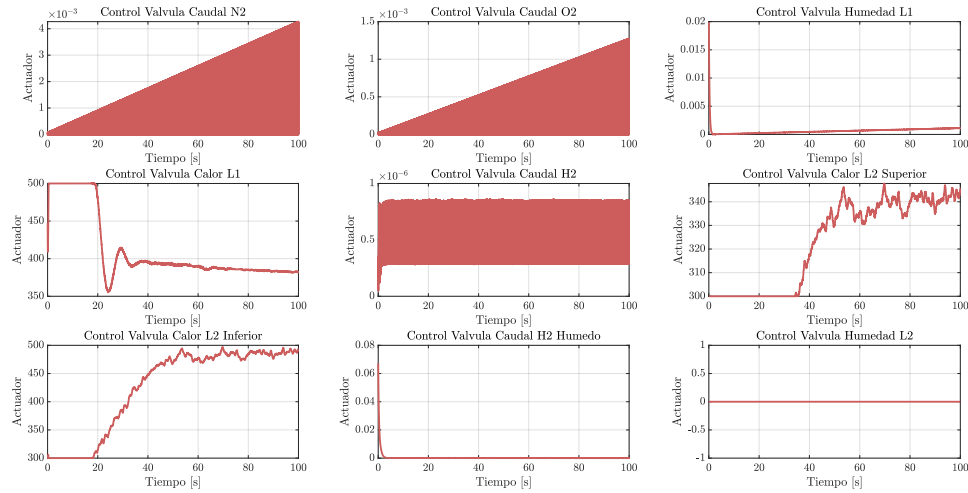
Caso 15



Caso 15

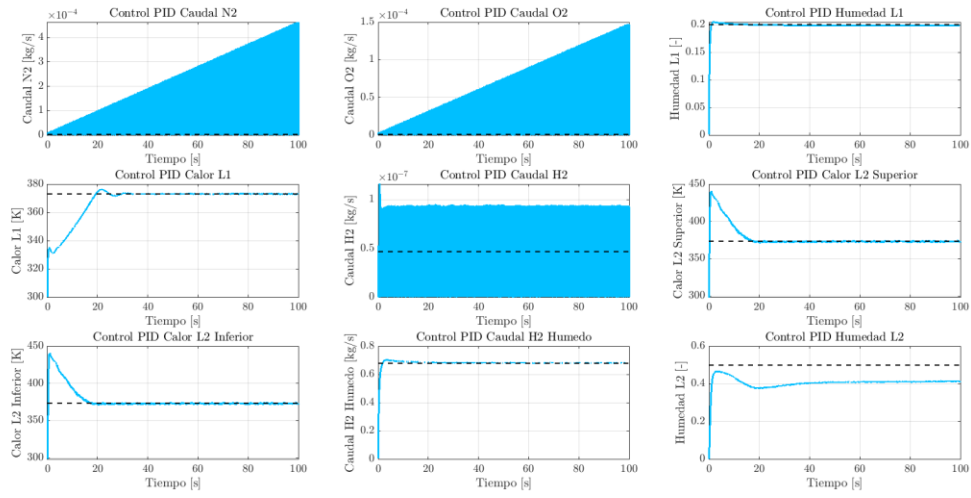


Caso 16

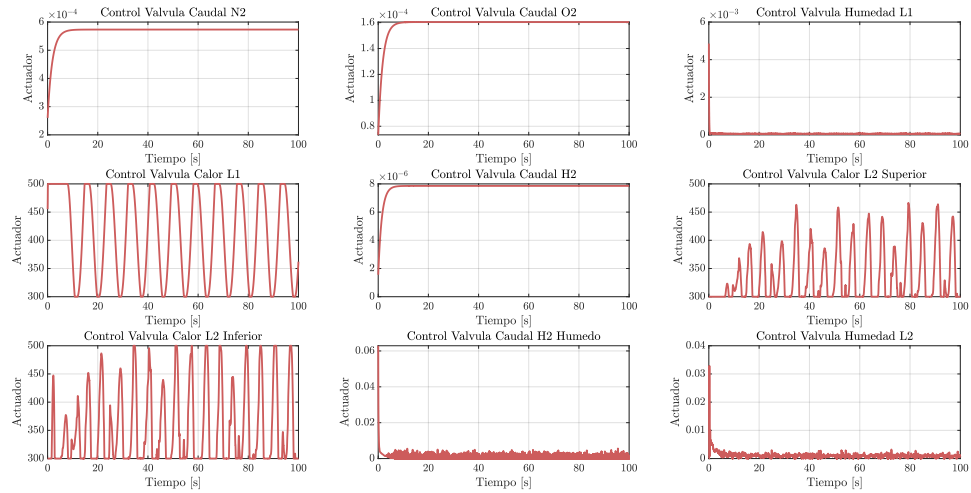


Resultados y análisis de los estudios paramétricos

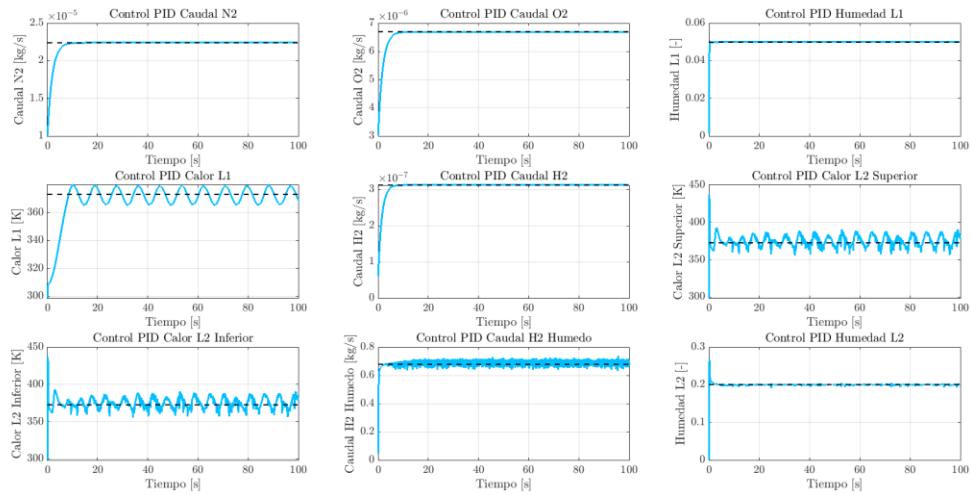
Caso 16



Caso 17

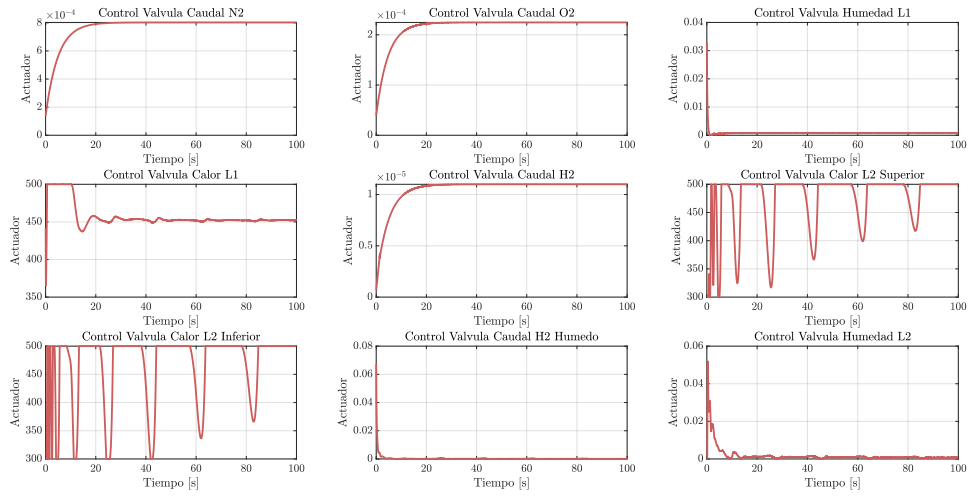


Caso 17

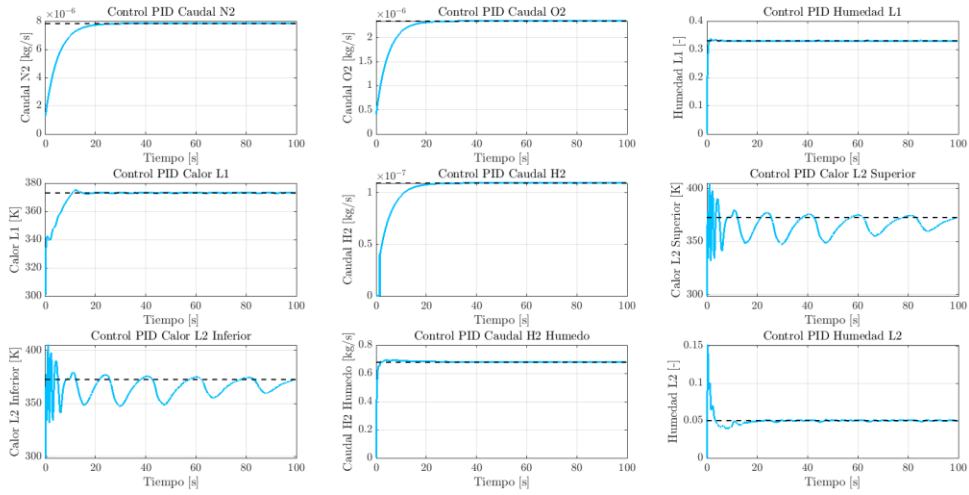


Resultados y análisis de los estudios paramétricos

Caso 18



Caso 18



▪ ANOVA multifactorial de los parámetros de diseño

Caudal N ₂					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Longitud tubería calefactada	0,0000337012	2	0,0000168506	0,29	0,7536
B: Longitud entradas y salidas	0,0000329014	2	0,0000164507	0,29	0,7585
C: Volumen H ₂ O	0,000233669	2	0,000116835	2,04	0,2001
D: Volumen Enfriador	0,0000994014	2	0,0000497007	0,87	0,4601
E: Diámetro válvulas	33255,1	2	16627,5	290736489,78	0,0000
RESIDUOS	0,000400338	7	0,0000571911		
TOTAL	33255,1	17			

Caudal O ₂					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Longitud tubería calefactada	0,0000328687	2	0,0000164344	0,21	0,8163
B: Longitud entradas y salidas	0,000033034	2	0,000016517	0,21	0,8155
C: Volumen H ₂ O	0,000301302	2	0,000150651	1,92	0,2170
D: Volumen Enfriador	0,0000332354	2	0,0000166177	0,21	0,8145
E: Diámetro válvulas	33625,7	2	16812,9	213760477,49	0,0000
RESIDUOS	0,000550569	7	0,0000786528		
TOTAL	33625,7	17			

Humedad L1					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Longitud tubería calefactada	0,0318127	2	0,0159063	0,17	0,8492
B: Longitud entradas y salidas	0,0444096	2	0,0222048	0,23	0,7976
C: Volumen H2O	2,51734	2	1,25867	13,24	0,0042
D: Volumen Enfriador	0,299129	2	0,149565	1,57	0,2727
E: Diámetro válvulas	3,6958	2	1,8479	19,44	0,0014
RESIDUOS	0,665397	7	0,0950567		
TOTAL	7,25389	17			

Calor L1					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Longitud tubería calefactada	626,19	2	313,095	3,31	0,0972
B: Longitud entradas y salidas	319,371	2	159,686	1,69	0,2519
C: Volumen H2O	321,534	2	160,767	1,70	0,2500
D: Volumen Enfriador	340,43	2	170,215	1,80	0,2339
E: Diámetro válvulas	208,362	2	104,181	1,10	0,3836
RESIDUOS	661,615	7	94,5164		
TOTAL	2477,5	17			

Caudal H ₂					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Longitud tubería calefactada	1159,06	2	579,528	0,70	0,5262
B: Longitud entradas y salidas	1139,52	2	569,76	0,69	0,5314
C: Volumen H2O	1138,85	2	569,425	0,69	0,5316

Resultados y análisis de los estudios
paramétricos

D: Volumen Enfriador	3775,9	2	1887,95	2,30	0,1711
E: Diámetro válvulas	3035,92	2	1517,96	1,85	0,2271
RESIDUOS	5756,01	7	822,287		
TOTAL	16005,3	17			

Calor L2 Superior					
Fuente	Suma de Cuadrados	G1	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Longitud tubería calefactada	5187,39	2	2593,69	2,39	0,1615
B: Longitud entradas y salidas	6115,15	2	3057,58	2,82	0,1264
C: Volumen H2O	541,832	2	270,916	0,25	0,7855
D: Volumen Enfriador	2840,16	2	1420,08	1,31	0,3287
E: Diámetro válvulas	2891,3	2	1445,65	1,33	0,3231
RESIDUOS	7588,54	7	1084,08		
TOTAL	25164,4	17			

Calor L2 Inferior					
Fuente	Suma de Cuadrados	G1	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Longitud tubería calefactada	5187,39	2	2593,69	2,39	0,1615
B: Longitud entradas y salidas	6115,15	2	3057,58	2,82	0,1264
C: Volumen H2O	541,832	2	270,916	0,25	0,7855
D: Volumen Enfriador	2840,16	2	1420,08	1,31	0,3287
E: Diámetro válvulas	2891,3	2	1445,65	1,33	0,3231
RESIDUOS	7588,54	7	1084,08		
TOTAL	25164,4	17			

Resultados y análisis de los estudios
paramétricos

Caudal H2 húmedo					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Longitud tubería calefactada	50,4775	2	25,2388	0,05	0,9535
B: Longitud entradas y salidas	7081,26	2	3540,63	6,72	0,0235
C: Volumen H2O	1648,53	2	824,264	1,56	0,2743
D: Volumen Enfriador	2577,64	2	1288,82	2,45	0,1564
E: Diámetro válvulas	474,248	2	237,124	0,45	0,6548
RESIDUOS	3687,41	7	526,772		
TOTAL	15519,6	17			

Humedad L2					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Longitud tubería calefactada	1679,96	2	839,982	1,85	0,2266
B: Longitud entradas y salidas	5870,96	2	2935,48	6,46	0,0257
C: Volumen H2O	23951,9	2	11975,9	26,36	0,0006
D: Volumen Enfriador	40,6386	2	20,3193	0,04	0,9565
E: Diámetro válvulas	2094,51	2	1047,25	2,30	0,1702
RESIDUOS	3180,44	7	454,349		
TOTAL	36818,4	17			

■ Modelo Regresión Múltiple de los parámetros de diseño

Análisis de Varianza Caudal O ₂					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	25185,5	5	5037,09	7,16	0,0026
Residuo	8440,26	12	703,355		
Total	33625,7	17			

Parámetros Análisis Regresión Caudal O ₂	
R-cuadrada [%]	74.90
R-cuadrada ajustada a Gl [%]	64.44
Error estándar del estimado [-]	26.52
Error absoluto medio [-]	20.35
Estadístico Durbin-Watson [-]	2.23 (P=0.77)

Valores-P Caudal O ₂	
Parámetro	Valor-P
CONSTANTE	0,1031
Longitud tubería calefactada	0,9999
Longitud entradas y salidas	0,9999
Volumen H ₂ O	0,9999
Volumen Enfriador	0,9999
Diámetro válvulas	0,0001

Análisis de Varianza Humedad L1					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	5,16537	5	1,03307	5,94	0,0055
Residuo	2,08852	12	0,174044		
Total	7,25389	17			

Parámetros Análisis Regresión Humedad L1	
R-cuadrada [%]	71.21
R-cuadrada ajustada a Gl [%]	59.21
Error estándar del estimado [-]	0.42
Error absoluto medio [-]	0.29
Estadístico Durbin-Watson [-]	2.27 (P=0.8)

Valores-P Humedad L1	
Parámetro	Valor-P
CONSTANTE	0,0429
Longitud tubería calefactada	0,7202
Longitud entradas y salidas	0,8237
Volumen H2O	0,0026
Volumen Enfriador	0,2530
Diámetro válvulas	0,0030

Análisis de Varianza Calor L1					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1265,2	5	253,04	2,50	0,0894
Residuo	1212,3	12	101,025		
Total	2477,5	17			

Parámetros Análisis Regresión Calor L1	
R-cuadrada [%]	51.07
R-cuadrada ajustada a Gl [%]	30.68
Error estándar del estimado [-]	10.05
Error absoluto medio [-]	5.70
Estadístico Durbin-Watson [-]	2.36 (P=0.85)

Valores-P Calor L1	
Parámetro	Valor-P
CONSTANTE	0,7165
Longitud tubería calefactada	0,0351
Longitud entradas y salidas	0,1248
Volumen H2O	0,1048
Volumen Enfriador	0,3199
Diámetro válvulas	0,9235

Análisis de Varianza Caudal H ₂					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	4133,6	5	826,72	0,84	0,5490
Residuo	11871,7	12	989,305		
Total	16005,3	17			

Parámetros Análisis Regresión Caudal H₂	
R-cuadrada [%]	25.83
R-cuadrada ajustada a G1 [%]	0
Error estándar del estimado [-]	31.45
Error absoluto medio [-]	19.27
Estadístico Durbin-Watson [-]	1.13 (P=0.06)

Valores-P Caudal H₂	
Parámetro	Valor-P
CONSTANTE	0,5973
Longitud tubería calefactada	0,9764
Longitud entradas y salidas	0,3841
Volumen H₂O	0,4634
Volumen Enfriador	0,3174
Diámetro válvulas	0,2169

Análisis de Varianza Calor L2 Superior					
Fuente	Suma de Cuadrados	G1	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	13432,3	5	2686,45	2,75	0,0703
Residuo	11732,1	12	977,676		
Total	25164,4	17			

Parámetros Análisis Regresión Calor L2 Superior	
R-cuadrada [%]	53.38
R-cuadrada ajustada a G1 [%]	33.95
Error estándar del estimado [-]	31.27
Error absoluto medio [-]	20.74
Estadístico Durbin-Watson [-]	1.97 (P=0.59)

Valores-P Calor L2 Superior	
Parámetro	Valor-P
CONSTANTE	0,0904
Longitud tubería calefactada	0,0400
Longitud entradas y salidas	0,0283
Volumen H₂O	0,6179
Volumen Enfriador	0,2277
Diámetro válvulas	0,5673

Análisis de Varianza Calor L2 Inferior					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	13432,3	5	2686,45	2,75	0,0703
Residuo	11732,1	12	977,676		
Total	25164,4	17			

Parámetros Análisis Regresión Calor L2 Inferior	
R-cuadrada [%]	53.38
R-cuadrada ajustada a Gl [%]	33.95
Error estándar del estimado [-]	31.27
Error absoluto medio [-]	20.74
Estadístico Durbin-Watson [-]	1.97 (P=0.59)

Valores-P Calor L2 Inferior	
Parámetro	Valor-P
CONSTANTE	0,0904
Longitud tubería calefactada	0,0400
Longitud entradas y salidas	0,0283
Volumen H2O	0,6179
Volumen Enfriador	0,2277
Diámetro válvulas	0,5673

Análisis de Varianza Caudal H₂ húmedo					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	9472,96	5	1894,59	3,76	0,0279
Residuo	6046,59	12	503,883		
Total	15519,6	17			

Parámetros Análisis Regresión Caudal H₂ húmedo	
R-cuadrada [%]	61.04
R-cuadrada ajustada a Gl [%]	44.81
Error estándar del estimado [-]	22.45
Error absoluto medio [-]	13.92
Estadístico Durbin-Watson [-]	1.79 (P=0.44)

Valores-P Caudal H₂ húmedo	
Parámetro	Valor-P
CONSTANTE	0,1768
Longitud tubería calefactada	0,9351
Longitud entradas y salidas	0,0088
Volumen H₂O	0,1054
Volumen Enfriador	0,0436
Diámetro válvulas	0,3674

Análisis de Varianza Humedad L2					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	23032,2	5	4606,44	4,01	0,0227
Residuo	13786,2	12	1148,85		
Total	36818,4	17			

Parámetros Análisis Regresión Humedad L2	
R-cuadrada [%]	62.56
R-cuadrada ajustada a Gl [%]	46.95
Error estándar del estimado [-]	33.89
Error absoluto medio [-]	22.46
Estadístico Durbin-Watson [-]	2.44 (P=0.88)

Valores-P Humedad L2	
Parámetro	Valor-P
CONSTANTE	0,5347
Longitud tubería calefactada	0,4689
Longitud entradas y salidas	0,0838
Volumen H₂O	0,0021
Volumen Enfriador	0,8639
Diámetro válvulas	0,4352

C. Relación del Trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030

Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS)	Alto	Medio	Bajo	No procede
1 Fin de la pobreza.				X
2 Hambre cero.				X
3 Salud y bienestar.	X			
4 Educación de calidad.				X
5 Igualdad de género.				X
6 Agua limpia y saneamiento.	X			
7 Energía asequible y no contaminante.	X			
8 Trabajo decente y crecimiento económico.		X		
9 Industria, innovación e infraestructuras.		X		
10 Reducción de las desigualdades.				X
11 Ciudades y comunidades sostenibles.	X			
12 Producción y consumo responsables.		X		
13 Acción por el clima.	X			
14 Vida submarina.	X			
15 Vida de ecosistemas terrestres.	X			
16 Paz, justicia e instituciones sólidas.				X
17 Alianzas para lograr objetivos.			X	



Mediante el uso de las pilas de hidrógeno, se reduce la difusión de gases contaminantes, lo que contribuye a una mejora de salud y del bienestar de la población. De esta forma se puede disminuir la aparición de enfermedades debido a la contaminación del aire, como el cáncer de pulmón o accidentes cerebrovasculares.

Relación del Trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030



Una de las causas de la contaminación del agua es por el vertido de combustibles fósiles. Con las pilas de hidrógeno, se reduce el uso de carburantes sucios, logrando así que se contaminen menos las aguas.



Es vital que, para garantizar que todo el mundo tenga acceso a la energía en 2030, se debe aumentar las inversiones en energía renovables, como las pilas de combustible.



Mediante el desarrollo de nuevas tecnologías, aumenta la necesidad de generar nuevos puestos de trabajo y la creación de nuevos sectores comerciales, lo que conlleva a un crecimiento económico.



Gracias al crecimiento de las energías renovables, se ayuda al proceso de industrialización sostenible, promoviendo con ello que se adopten tecnologías y procesos industriales limpios.



Las pilas de hidrógeno son una nueva vía para desarrollar un transporte público limpio, que esté al alcance de todos y con ello poder reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades.



Fomentando el desarrollo y accesibilidad de las pilas de hidrógeno, se ayuda a los países en desarrollo a fortalecer su capacidad tecnológica para avanzar hacia modalidades de producción más sostenibles.



Uno de los objetivos principales del desarrollo de alternativas cero emisiones es conseguir reducir el cambio climático, además de lograr adaptarse a un futuro sin combustibles fósiles.



Como se ha explicado en el ODS 6, reduciendo el uso de combustibles fósiles, que contaminan las aguas, se mejora la calidad de los océanos, lo que conlleva a la protección de los ecosistemas marinos.



El uso de coches de combustión conlleva a la contaminación de los ecosistemas terrestres. Fomentando el desarrollo de coches de hidrógeno, se promueve la conservación de la biodiversidad.



Promoviendo el desarrollo de tecnologías ecológicas para su divulgación en países en desarrollo, se ayuda a generar interés por mejorar y avanzar en los objetivos establecidos previamente.