



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en electrónica industrial y automática

**Banco de ensayos para una columna de
purificación de biogás**

Autor:

Castro Minaya, Víctor Antonio

Coautor:

Rodero Raya, Rosario

Tutor:

Mazaeda Echevarría, Rogelio

De Prada Moraga, César

Departamento de Ingeniería de

Sistemas y Automática

Valladolid, septiembre 2020.



Agradecimientos

Quiero dar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me han brindado su apoyo a la realización de este Trabajo de Fin de Grado:

En primer lugar, a mis tutores, César y Rogelio, por la guía que me han dado durante este trabajo, a Rosario, por ser una gran compañera en el laboratorio y a todo el personal de Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente por su entrega a la investigación.

A mis amigos, que me han ayudado cuando los he necesitado y me habéis hecho pasar tantos buenos momentos.

Y por último a mi familia, que sin su apoyo y comprensión no hubiese llegado hasta aquí.





Resumen

En la última década se ha observado un considerable aumento en los gases de efecto invernadero debido a la emisión de CO₂ por el consumo de combustibles fósiles.

En la actualidad, se están estudiando la viabilidad de los combustibles de origen renovables como alternativa más amigable con el medio ambiente. Sin embargo, estos combustibles requieren un tratamiento de purificación antes de su consumo.

Este proyecto implementa un banco de ensayos para el estudio de los parámetros ambientales que influyen en la purificación de biogás con el proceso de microalgas-bacterias en una columna de absorción.

Palabras clave

Control de procesos, planta de biogás, FPGA, Labview, control inteligente





Abstract

In the last decade, a considerable increase in greenhouse gases has been observed due to the emission of CO₂ from the consumption of fossil fuels.

Currently, the feasibility of renewable fuels as a more environmentally friendly alternative is being studied. However, these fuels require purification treatment before consumption.

This project implements a tests bench to study the environmental parameters that influence biogas upgrading with the microalgae-bacteria process in an absorption column.

Keywords

Process control, biogas plant, FPGA, Labview, smart control





Índice general

1.	Introducción.....	15
1.1.	Introducción	15
1.2.	Justificación del proyecto.....	17
1.3.	Objetivos.....	18
2.	Teoría en la purificación de biogás	19
2.1.	Motivaciones en la purificación de biogás	19
2.2.	Métodos de purificación de biogás.....	20
2.3.	Purificación de biogás mediante algas-bacterias.....	21
3.	Sistema experimental de la planta	23
3.1.	Descripción de la planta experimental.....	23
3.2.	Elementos	24
3.2.1.	Fotobioreactor HRAP.....	24
3.2.2.	Sedimentador.....	25
3.2.3.	Columna de absorción.....	25
3.2.4.	Acumulador de gases	27
3.2.5.	Analizador de gases.....	27
3.2.6.	Bomba Peristáltica.....	31
3.2.7.	Controlador de flujo másico	33
3.2.8.	Controlador de planta.....	34
3.3.	Ordenador de sobremesa	39
3.4.	Operación y funcionamiento	41
4.	Sistema de control	43
4.1.	Introducción	43
4.2.	VARIABLES DE CONTROL.....	43
4.3.	Esquema de conexiones	45
4.3.1.	Conexión del analizador de gases	45
4.3.2.	Bomba peristáltica.....	47
4.3.3.	Controlador de flujo másico	47
4.3.4.	Controlador myRio 1900	48
4.4.	Software del banco de ensayos.....	52
4.4.1.	Arranque de programa.....	52
4.4.2.	Interfaz de Usuario.....	54
4.4.3.	Implementación de la lógica de programa	60
4.5.	Respuesta escalón del sistema de control del banco de ensayos [13]	63
4.5.1.	Resultados Ensayo 1	64
4.5.2.	Resultados Ensayo 2	68
4.5.3.	Resultados Ensayo 3	72
4.6.	Validación del sistema de control del banco de ensayos frente a variaciones de caudal de biogás bajo diferentes condiciones [13].....	76
4.6.1.	Ensayos de validación con distintas concentraciones de carbono inorgánico (IC)	77
4.6.2.	Ensayos de validación con distintos valores de pH	82



4.6.3.	Ensayos de validación con distintos valores de temperatura	87
5.	<i>Resultados y conclusiones</i>	91
6.	<i>Estudio económico</i>	93
7.	<i>Bibliografía y referencias</i>	95
8.	<i>Anexos</i>	97
8.1.	Protocolo H-Bus.....	97
8.1.1.	Especificación de protocolo.....	97
8.1.2.	Resumen de los comandos más importantes del protocolo H-Bus	99
8.2.	Circuito de acondicionamiento de señales	100
8.2.1.	Descripción	100
8.2.2.	Características.....	101
8.2.3.	Rangos de ajuste.....	102
8.3.	Código de programa.....	102



Índice de figuras

Figura 1: Evolución de la producción de energía en megatoneladas equivalentes de petróleo (Mtoe) a partir de combustibles fósiles desde 1800 hasta 2010	15
Figura 2: Evolución temporal de las emisiones de gases de efecto invernadero	16
Figura 3: biorreactor "open pound" (Izquierda) y biorreactor "raceway" (derecha)	20
Figura 4: Biorreactor de columnas (Izquierda), biorreactor plano (centro) y biorreactor tubular (derecha).....	21
Figura 5: Esquema de purificación mediante algas-bacterias	21
Figura 6: Esquema general de la planta	23
Figura 7: Fotobiorreactor HRAP	24
Figura 8: Sedimentador conectado al HRAP	25
Figura 9: Izquierda: Parte superior de la columna. Derecha: Parte inferior de la columna.....	26
Figura 10: Bolsa Tedlar	27
Figura 11: Analizador de gases INCA	27
Figura 12: Sistema de entradas de muestra de gas.....	28
Figura 13: Ventana de configuración de ciclos de medidas	29
Figura 14: Ventana de configuración de calibración	30
Figura 15: Display de estado y control del analizador	30
Figura 16: Bomba peristáltica modelo D-25V plus	31
Figura 17: Esquema del panel frontal de la bomba peristáltica	31
Figura 18: Esquema del panel posterior de la bomba peristáltica	32
Figura 19: Controlador de flujo másico.	33
Figura 20: Esquema de conexiones eléctricas del Controlador de flujo másico.....	34
Figura 21: FPGA myRIO - 1900	34
Figura 22: Diagrama de bloques de hardware de myRIO-1900	35
Figura 23: Señales primarias/secundarias en los conectores A y B MPX.....	36
Figura 24: Señales del conector C MPS.	37
Figura 25: Esquema de canales de entrada analógicas de myRIO	38
Figura 26: Esquema de canales de salida analógicas de myRIO	38
Figura 27: Esquema de líneas digitales de myRIO.....	39
Figura 28: Interfaz de diseño gráfico de LabVIEW	40
Figura 29: Interfaz de programación de bloques de LabVIEW	41
Figura 30: Esquema de la planta antes de implementar el banco de ensayos	42
Figura 31: Esquema de conexiones de los dispositivos eléctricos	45
Figura 32: Pines de conexión analógica del analizador de gases	46
Figura 33: Pines de conexión analógica de la bomba peristáltica.....	47



Figura 34: Controlador de flujo másico con la conexión RS232	47
Figura 35: Pines de conexión: Superior A y B; Inferior C.....	48
Figura 36: Configuración de pines entradas analógicas en LabVIEW para el conector A	49
Figura 37: Configuración de pines entradas (arriba) y de salidas (abajo) analógicas en LabVIEW para el conector B	50
Figura 38: Configuración de pines de salidas analógicas en LabVIEW para el conector C.....	51
Figura 39: Puerto USB Device del controlador de planta	51
Figura 40: Ventana de selección de proyectos de LabVIEW.....	52
Figura 41: ventana de exploración de proyecto.	53
Figura 42: Interfaz de Usuario del programa principal del controlador de planta	54
Figura 43: Área de gráficos del interfaz de usuario	55
Figura 44: Área de calibración del interfaz de usuario	56
Figura 45: Área de configuración de variación de CFM del interfaz de usuario.....	57
Figura 46: Área de configuración de parámetros de programa del interfaz de usuario.	58
Figura 47: Área de configuración de modo de programa del interfaz de usuario.....	58
Figura 48: Área de control manual de actuadores del interfaz de usuario.	59
Figura 49: Diagrama de purificación de biogás en la columna de absorción	60
Figura 50: Diagrama de flujo de la lógica de programa del banco de ensayos.	62
Figura 51: Evolución temporal de CO ₂ sin control vs con control basado en reglas para el ensayo 1	64
Figura 52: Evolución temporal de L/G en el sistema con control para el ensayo 1	65
Figura 53: Evolución temporal de H ₂ S sin control vs con control basado en reglas para el ensayo 1	66
Figura 54: Evolución temporal de O ₂ sin control vs con control basado en reglas para el ensayo 1	67
Figura 55: Evolución temporal de CH ₄ sin control vs con control basado en reglas para el ensayo 1	67
Figura 56: Evolución temporal de CO ₂ sin control vs con control basado en reglas para el ensayo 2	68
Figura 57: Evolución temporal de L/G en el sistema con control para el ensayo 2	69
Figura 58: Evolución temporal de H ₂ S sin control vs con control basado en reglas para el ensayo 2	70
Figura 59: Evolución temporal de O ₂ sin control vs con control basado en reglas para el ensayo 2	71
Figura 60: Evolución temporal de CH ₄ sin control vs con control basado en reglas para el ensayo 2	71
Figura 61: Evolución temporal de CO ₂ sin control vs con control basado en reglas para el ensayo 3	72
Figura 62: Evolución temporal de L/G en el sistema con control para el ensayo 3	73



Figura 63: Evolución temporal de H ₂ S sin control vs con control basado en reglas para el ensayo 3	74
Figura 64: Evolución temporal de O ₂ sin control vs con control basado en reglas para el ensayo 3	75
Figura 65: Evolución temporal de CH ₄ sin control vs con control basado en reglas para el ensayo 3	75
Figura 66: Evolución temporal de CO ₂ para ensayos de validación con distintas concentraciones de carbono inorgánico para el sistema sin control	78
Figura 67: Evolución temporal de CO ₂ para ensayos de validación con distintas concentraciones de carbono inorgánico para el sistema con control	78
Figura 68: Evolución temporal de H ₂ S para ensayos de validación con distintas concentraciones de carbono inorgánico para el sistema sin control	79
Figura 69: Evolución temporal de H ₂ S para ensayos de validación con distintas concentraciones de carbono inorgánico para el sistema con control	80
Figura 70: Evolución temporal de O ₂ para ensayos de validación con distintas concentraciones de carbono inorgánico para el sistema sin control	81
Figura 71: Evolución temporal de O ₂ para ensayos de validación con distintas concentraciones de carbono inorgánico para el sistema con control.....	81
Figura 72: Evolución temporal de CO ₂ para ensayos de con distintas concentraciones de carbono inorgánico para el sistema con control	82
Figura 73: Evolución temporal de CO ₂ para ensayos de con distintos valores de pH para el sistema sin control.....	83
Figura 74: Esfuerzos de control para pH 10 y pH 8,6.....	83
Figura 75: Evolución temporal de H ₂ S para ensayos de con distintos valores de pH para el sistema sin control.....	84
Figura 76 Evolución temporal de H ₂ S para ensayos de con distintos valores de pH para el sistema con control.....	85
Figura 77: Evolución temporal de O ₂ para ensayos de con distintos valores de pH para el sistema sin control.....	86
Figura 78: Evolución temporal de O ₂ para ensayos de con distintos valores de pH para el sistema con control.....	86
Figura 79: Evolución temporal de CO ₂ para ensayos de con distintos valores de temperatura para el sistema sin control	87
Figura 80: Evolución temporal de CO ₂ para ensayos de con distintos valores de temperatura para el sistema con control	88
Figura 81: Evolución temporal de H ₂ S para ensayos de con distintos valores de temperatura para el sistema sin control	88
Figura 82: Evolución temporal de H ₂ S para ensayos de con distintos valores de temperatura para el sistema con control	89
Figura 83: Evolución temporal de O ₂ para ensayos de con distintos valores de temperatura para el sistema sin control	90
Figura 84: Evolución temporal de O ₂ para ensayos de con distintos valores de temperatura para el sistema con control	90
Figura 85: Fichero de guardado de datos producido por el controlador de planta.	91



Figura 86: Estructura de datos del protocolo H-Bus	98
Figura 87: Diagrama de flujo de la secuencia de comunicación	99
Figura 88: Dimensiones del módulo	101
Figura 89: Partes del circuito de acondicionamiento	101



Índice de tablas

Tabla 1: Comparativa de composición entre Biogás, gas de vertedero y gas natural	17
Tabla 2: Exigencias de composición para biogás de uso comercial	19
Tabla 3: Síntesis de las señales medidas por el analizador.....	28
Tabla 4: Descripción de las señales de los conectores A y B MXP.	36
Tabla 5: Descripción de las señales del conector C MSP.....	37
Tabla 6: Tabla con las variables controladas y manipuladas de la planta	44
Tabla 7: Tabla con las variables monitorizadas	44
Tabla 8: Correspondencia entre pines y señales del analizador de gases.....	46
Tabla 9: Correspondencia de entre pines de la bomba peristáltica	47
Tabla 10: Correspondencia de entre pines del controlador de flujo másico.....	48
Tabla 11. Correspondencia de pines del controlador de planta	49
Tabla 12: Valores de caudal de la bomba peristáltica para la tubería 1.....	63
Tabla 13: Valores de caudal del control basado en reglas para la respuesta escalón del sistema de control.....	76
Tabla 14. Oferta de Analizador de Gases	93
Tabla 15. Oferta de Controlador de Flujo Másico	93
Tabla 16. Oferta de Bomba peristáltica.....	93
Tabla 17. Oferta de Controlador de planta.....	94
Tabla 18. Oferta de Circuito de Acondicionamiento de señales	94
Tabla 19. Coste de dispositivos del banco de ensayos	94
Tabla 20: Lista de comandos más usados en el protocolo H-Bus	100
Tabla 21: Combinación de pines para elegir la configuración deseada en el circuito de acondicionamiento.....	102



1.Introducción

1.1. Introducción

En la actualidad, la gran dependencia de los combustibles fósiles para la producción de energía genera una serie de problemas cuyos efectos están presentes a nivel global. En primer lugar, el aumento de consumo de este tipo de combustibles va creciendo cada año (Figura 1) y esto lleva a un agotamiento de las reservas naturales a medio plazo de esta fuente no renovable [1].

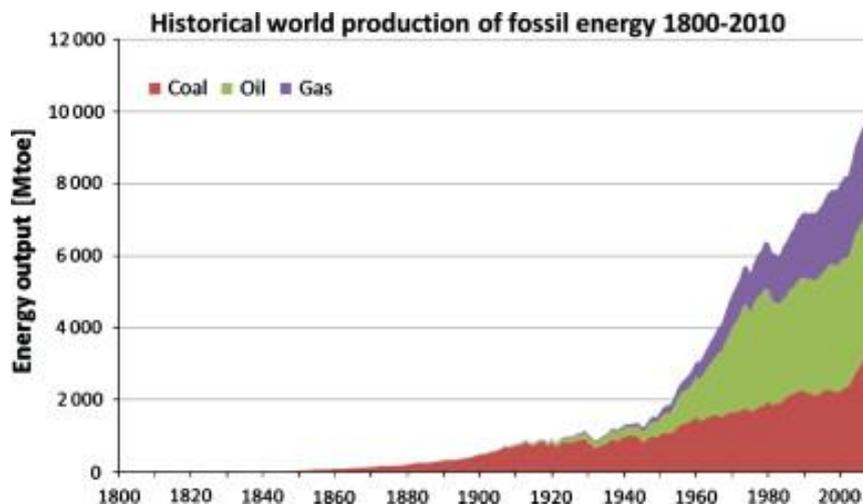


Figura 1. Evolución de la producción de energía en megatoneladas equivalentes de petróleo (Mtoe) a partir de combustibles fósiles desde 1800 hasta 2010

En segundo lugar, el consumo de este tipo de combustibles produce una serie de residuos que tiene grandes impactos a nivel social, económico y ambiental. El principal compuesto de estos residuos es el dióxido de carbono que contribuye al efecto invernadero antropogénico. Entre otros compuestos tenemos son los óxidos de nitrógeno (N_2O y NO_x), compuestos orgánicos volátiles del metano ((p. ej. olefinas, cetonas y aldehídos) y dióxidos de azufre (Figura 2) [2]. Todos estos residuos contribuyen a la contaminación del ecosistema y pueden producir problemas respiratorios en la población.

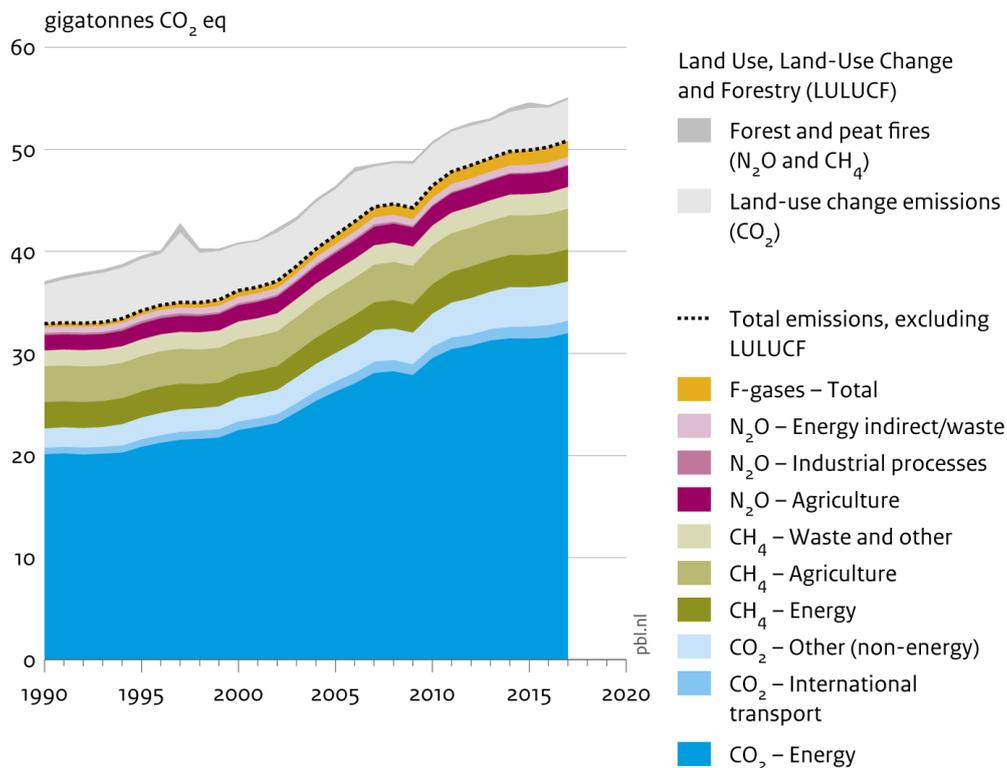
Investigadores en todo el mundo están estudiando nuevas fuentes de energías renovables, viables y sostenibles para cubrir el aumento del consumo energético. Como ejemplo de estas fuentes de energía tenemos la generación de biodiesel como alternativa directa de los combustibles para vehículos. Sin embargo, este tipo de fuente presenta el inconveniente de que depende de áreas extensas de cultivo ya que necesita una gran cantidad de aceites vegetales. Otro ejemplo de fuente de energía alternativa es la energía solar



para la generación de electricidad y agua caliente pero actualmente el volumen de producción de electricidad tiene grandes limitaciones como el almacenamiento.

Pese a su gran potencial de producción de energía, tanto el biodiesel como la energía solar, se ven muy limitadas por la tecnología actual o las bajas eficiencias. Por ello, estos ejemplos son incapaces de hacer frente a la demanda energética.

Global greenhouse gas emissions, per type of gas and source, including LULUCF



Source: EDGAR v5.0/v4.3.2 FT 2017 (EC-JRC/PBL, 2018); Houghton and Nassikas (2017)

Figura 2: Evolución temporal de las emisiones de gases de efecto invernadero

Una de las líneas de estudio prometedoras es la producción de energía a partir de biogás generado a partir de la digestión anaerobia de distintas fuentes como las aguas residuales urbanas o los sólidos residuales urbanos [3]. Estas fuentes de energía están compuestas principalmente por metano y son potencialmente un gran sustituto del gas natural ya que la fuente de donde se extrae el biogás es prácticamente inagotable.



La producción de biogás a partir de aguas residuales urbanas o sólidos residuales urbanos contienen muchos elementos indeseados, como el dióxido de carbono, sulfuros, nitratos en forma de amonios, siloxanos y otros compuestos (Tabla 1) [4]. El consumo del biogás sin un refinamiento previo puede producir emisiones contaminantes a la atmósfera y daños graves en las instalaciones donde se use.

	Biogas	Landfill gas	Natural gas (Danish)	Natural gas (Dutch)	
Compounds	Methane (vol. %)	60 - 70	35 - 65	89	81
	Other hydro carbons (vol. %)	0	0	9.4	3.5
	Hydrogen (vol. %)	0	0 - 3	0	-
	Carbon dioxide (vol. %)	30 - 40	15 - 50	0.67	1
	Nitrogen (vol. %)	~0.2	5 - 40	0.28	14
	Oxygen (vol. %)	0	0 - 5	0	0
	Hydrogen sulphide (ppm)	0 - 4000	0 - 100	2.9	-
	Ammonia (ppm)	~100	~5	0	-
	Lower heating value (kWh/Nm ³)	6.5	4.4	11.0	8.8

Tabla 1: Comparativa de composición entre Biogás, gas de vertedero y gas natural

En este proyecto, se analizará la purificación de biogás por el proceso biológico de la asociación simbiótica de microalgas-bacterias en una planta piloto. El metabolismo de dicha asociación eliminará los compuestos no deseados que tienen mayor cantidad en volumen como dióxidos de carbono y ácido sulfúrico.

1.2. Justificación del proyecto

La motivación de la realización de este proyecto se basa en desarrollar un banco de ensayos que pueda servir de soporte en la investigación de la purificación de biogás mediante el proceso biológico de microalgas-bacterias.

La implementación del banco de ensayos se llevará a cabo en una planta piloto de tipo Fotobiorreactor HRAP (High Rate Algal Pond) que está disponible en uno de los laboratorios de la Escuela de Ingenierías Industriales. Este banco de ensayos consta de un soporte hardware/software y se desarrollará en el entorno de LabVIEW de National Instruments.



Los datos obtenidos mediante el banco de ensayos ayudarán al investigador a entender el comportamiento de del proceso de purificación de biogás frente a las variaciones de distintos parámetros relevantes para el investigador. Tras el análisis de estos parámetros se procederá al estudio e implementación de un algoritmo de control que permitan conseguir un cierto nivel de automatización para la purificación de biogás con la instrumentación que disponemos.

1.3. Objetivos

El principal objetivo del presente Trabajo de Fin de Grado es desarrollar un banco de ensayos que permita obtener datos en tiempo real de la planta piloto. De este modo, se podrá estudiar los principales parámetros que influyen en la purificación de la planta piloto.

Posteriormente, una vez que se han analizado dichos parámetros, se procederá a estudiar varios algoritmos de control mediante variaciones o perturbaciones de distintos factores en el banco de ensayos. De esta manera, obtendremos un primer algoritmo a través de datos empíricos.

De esta manera, se procederá a observar la eliminación de algunas impurezas no deseadas del biogás como dióxido de carbono, ácido sulfhídrico, oxígeno disuelto, etc.



2. Teoría en la purificación de biogás

2.1. Motivaciones en la purificación de biogás

La biometanización, o digestión anaerobia, consiste en la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno para obtener biogás. El biogás producido a partir de biometanización de residuos sólidos urbanos o aguas residuales constituye uno de las fuentes más valiosas dentro del ámbito de las energías renovables. Sin embargo, el contenido de CO_2 en el biogás, entre el 25 y el 50% del volumen total, puede constituir un aumento del coste de transporte y una reducción del contenido energético. Además, existe un contenido de H_2S , entre 0-2% vol., que, aunque sea una cantidad pequeña, puede presentar problemas de corrosión, toxicidad y mal olor.

En Europa existe una regulación de la composición de biogás [5] para que pueda usarse comercialmente. Para ello se ha definido la siguiente tabla de composición:

Elemento	Exigencias de composición
CH_4	> 95%
CO_2	< 2,5 – 4%
O_2	< 0.001 – 1%
$H_2S + COS$	< 5 $mg Nm^{-3}$
NH_3	< 41 $mg Nm^{-3}$
BTX	< 500 $mg Nm^{-3}$
Siloxanos	< 10 $mg Nm^{-3}$

Tabla 2: Exigencias de composición para biogás de uso comercial

Para cumplir con esta normativa, existe un gran rango de tecnologías basadas en mecanismos físico-químicos y mecanismos biológicos desarrollados para reducir el CO_2 o H_2S .

2.2. Métodos de purificación de biogás

Existe dos grandes familias que están enfocadas a eliminar tanto el CO_2 como el H_2S [6].

Procesos físicos químicos [5]

Dentro de esta familia tenemos los procesos de desulfurización y los procesos para eliminar el CO_2 . Por un lado, los procesos de desulfurización incluyen precipitación química, adsorción, absorción y separación mediante membranas. Por otro lado, los procesos de eliminación de CO_2 se encuentran los disolventes orgánicos, depuración basados en agua, depuración química, separación mediante membranas, adsorción por oscilación de presión y criogenización de CO_2 .

En general, estos procesos tienen la problemática de no poder eliminar CO_2 y H_2S de forma simultánea. Es posible usar el método de separación mediante membranas para eliminar simultáneamente ambos contaminantes, pero son métodos menos amigables a nivel medioambiental además de presentar costos elevados de producción y mantenimiento.

Procesos biológicos [7]

Por un lado, existen métodos que eliminan únicamente el H_2S como la filtración aeróbica y métodos que eliminan únicamente el CO_2 como los fotobiorreactores de microalgas convencionales.

Por otro lado, la simbiosis microalgas-bacterias en fotobiorreactores presenta la oportunidad de eliminar ambos contaminantes de forma simultánea a un bajo coste y con muy poco impacto ambiental.

Tradicionalmente las algas se cultivan en biorreactores abiertos. Estos biorreactores suelen ser de superficies artificiales en contacto con la atmósfera y donde no hay un control estricto de pH y temperatura. Existen dos tipos básicos de biorreactores abiertos: "open ponds" donde se utilizan simples recipientes de tamaño y forma definidos; "raceways" que tienen forma de canales circulares donde se puede suministrar cierto control sobre el pH y nutrientes.

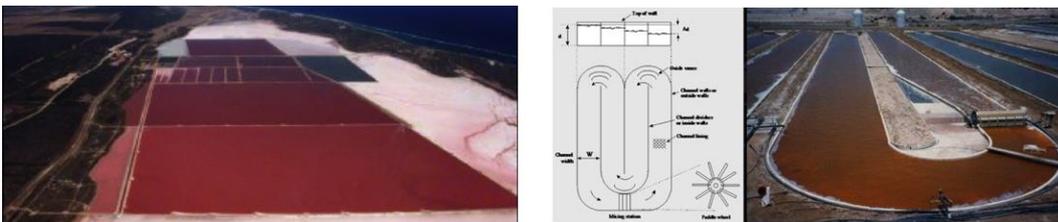


Figura 3: biorreactor "open pond" (Izquierda) y biorreactor "raceway" (derecha)

También se pueden cultivar en biorreactores cerrados llamados así porque mantienen al cultivo completamente aislado del exterior. Son construidos

específicamente para un espécimen concreto. Suelen ser de columnas, reactores planos y reactores tubulares.



Figura 4: Biorreactor de columnas (Izquierda), biorreactor plano (centro) y biorreactor tubular (derecha)

2.3. Purificación de biogás mediante algas-bacterias

En nuestro caso, tendremos un fotobiorreactor abierto tipo raceway a escala de laboratorio donde tendremos un cultivo de algas y bacterias. Las algas necesitan energía solar para consumir CO_2 del biogás mediante la fotosíntesis produciendo a su vez O_2 . Este oxígeno generado, será usado posteriormente por las bacterias oxidantes de azufre para oxidar H_2S a sulfatos.

Mediante el cultivo de bacterias oxidantes de azufre alcalino y microalgas con alta tolerancia al pH, mejora el transporte de los gases ácidos H_2S y CO_2 desde el biogás hasta el caldo de cultivo. De este modo se permite una purificación más efectiva del biogás. En la Figura 5 se muestra un esquema de este proceso [8].

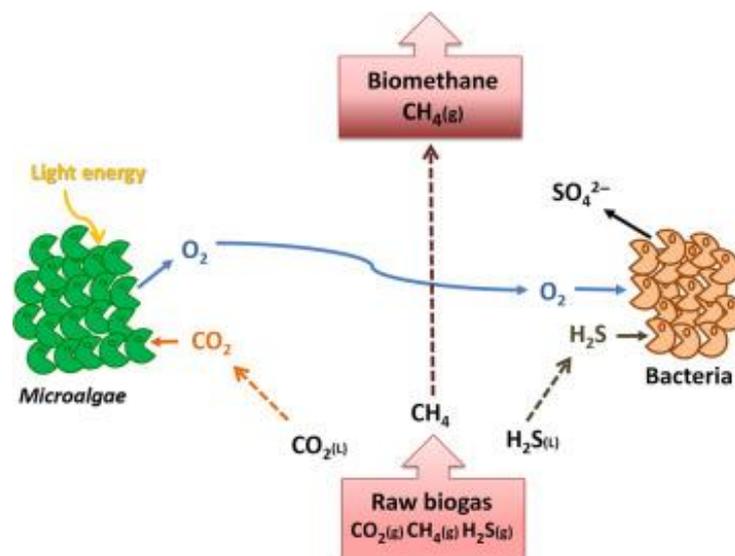


Figura 5: Esquema de purificación mediante algas-bacterias

Además, es necesario indicar que es posible usar aguas residuales para aprovechar sus nutrientes que ayuden al crecimiento de las algas-bacterias.



Esto fomenta a la acumulación de biomasa que se puede aprovechar para otras aplicaciones [9].

3. Sistema experimental de la planta

3.1. Descripción de la planta experimental

El sistema experimental que disponemos es un fotobiorreactor raceway a escala que se encuentra en el laboratorio de ensayos HRAP de la sede Mergelina en la Escuela de Ingenierías Industriales

En la Figura 6 podremos observar el esquema completo de la planta:

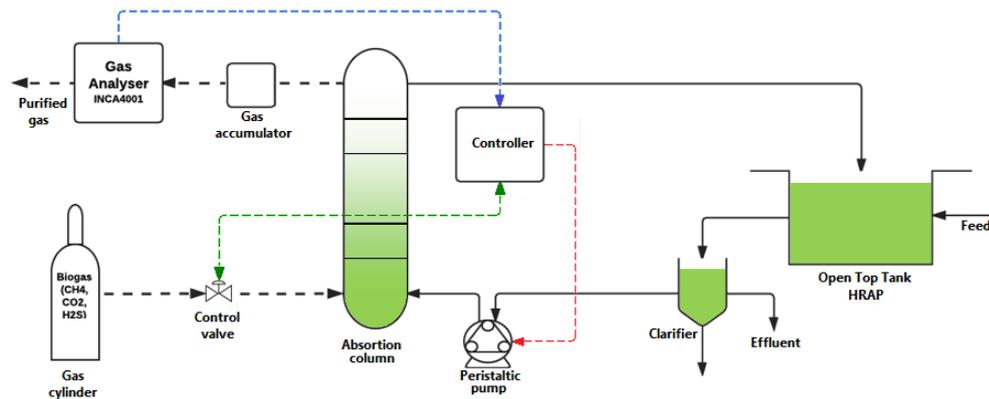


Figura 6: Esquema general de la planta

Nuestra planta se puede dividir en tres partes:

Por un lado, tenemos el circuito correspondiente al cultivo de algas en medio acuoso que consta de un fotobiorreactor HRAP, un sedimentador y una bomba peristáltica.

Por otro lado, tenemos el circuito correspondiente al biogás que consta de una fuente de biogás, un controlador de flujo másico, un acumulador de biogás y un analizador de gases.

Estas dos partes entran en la columna de absorción con flujo en co-corriente en la que se realizará el intercambio de elementos no deseados del biogás con las algas.

La tercera parte se puede considerar al controlador que estará conectada al analizador de gases, a la bomba peristáltica y al controlador de flujo másico.

3.2. Elementos

3.2.1. Fotobioreactor HRAP

El fotobiorreactor High Rate Algal Pond (HRAP) se conforma de placas de 0.9 m de largo y 0.4 m de ancho dispuestos en paralelo y unidos por dos placas curvas de 180° como se muestra en la Figura 7.



Figura 7: Fotobioreactor HRAP

Con esta disposición, por el estanque recirculará el cultivo de microalgas con la ayuda de un molino hidráulico acoplado a un motor.

Además, el fotobiorreactor cuenta con un equipamiento para la manutención de las algas:

- Sistema de iluminación programable para simular la luz solar durante un periodo de 16 horas al día.
- Aguas residuales que contiene los nutrientes necesarios para el metabolismo de las microalgas.
- Solución tampón para mantener el pH estable del medio acuoso de las microalgas.

3.2.2. Sedimentador

Está conectado a la salida del HRAP y su principal función es recibir el exceso del medio líquido y, mediante sedimentación por gravedad, separar el agua clarificada de la biomasa y así evitar posibles obstrucciones en las tuberías o acumulaciones de biomasa en la columna de absorción. De este modo, la biomasa extraída del clarificador es objeto una futura revalorización.

En la Figura 8, se muestra una imagen del sedimentador.



Figura 8: Sedimentador conectado al HRAP

El agua clarificada que se ha separado del sedimentador recirculará por la columna de absorción para el tratamiento del biogás.

3.2.3. Columna de absorción

La columna de absorción se ha diseñado para que el flujo de biogás y el flujo de microalgas entren en co-corriente por dos entradas por la parte inferior. Por la parte superior tendremos una salida para el flujo de biogás purificado y otra salida para el flujo de microalgas con las impurezas absorbidas del biogás.

La columna está en disposición vertical como se muestra en la Figura 9.

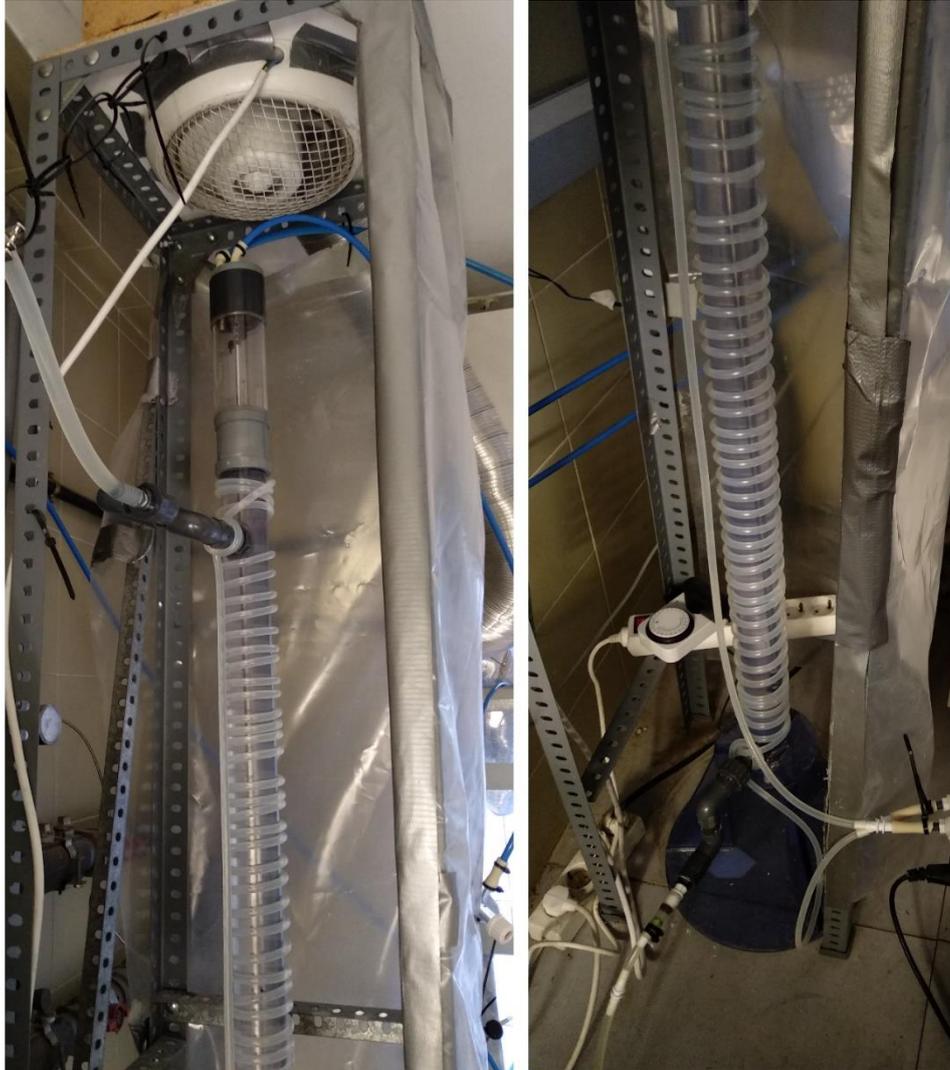


Figura 9: Izquierda: Parte superior de la columna. Derecha: Parte inferior de la columna



3.2.4. Acumulador de gases

El acumulador está hecho de una bolsa Tedlar como se muestra en la Figura 10.



Figura 10: Bolsa Tedlar

Este dispositivo está pensado para acumular 5 litros de biogás, ya depurado, a la salida de la columna de absorción y poder cubrir la demanda de gas del analizador cuyo periodo de muestreo es de 2 horas (como se verá más adelante).

3.2.5. Analizador de gases

El analizador de gases es del modelo INCA 4001 T100-02 de la casa UNION Instruments GmbH como se muestra en la Figura 11.



Figura 11: Analizador de gases INCA

Este dispositivo permite analizar la composición de biogás a la salida de la columna de absorción. Los parámetros que permite analizar son el CO_2 , CH_4 , O_2 , H_2S y opcionalmente H_2 . La medida de CH_4 y el CO_2 se mide mediante una célula NDIR (Non-dispersive infrared sensor) mientras que el O_2 , H_2S y H_2 , mediante células electroquímicas. En la Tabla 3 se muestra una síntesis de estas señales.

Componente	Método medida	Rango	Precisión	Intervalo
CH_4	NDIR	0 – 100% vol	+/- 1 % FS	Pulsado
O_2	EC	0 – 25% vol	+/- 3% MV	Pulsado
CO_2	NDIR	0 – 100% vol	+/- 1% FS	Pulsado
H_2S	EC- μ Puls	0 – 10 000 ppm	+/- 3 ppm (<25 ppm) +/- 15% (>25 ppm)	Pulsado
H_2 (opcional)	EC	0 – 4 000 ppm	+/- 5% FS	Pulsado

Tabla 3: Síntesis de las señales medidas por el analizador.

El sistema de entrada de muestra de gas al analizador se muestra en la Figura 12.

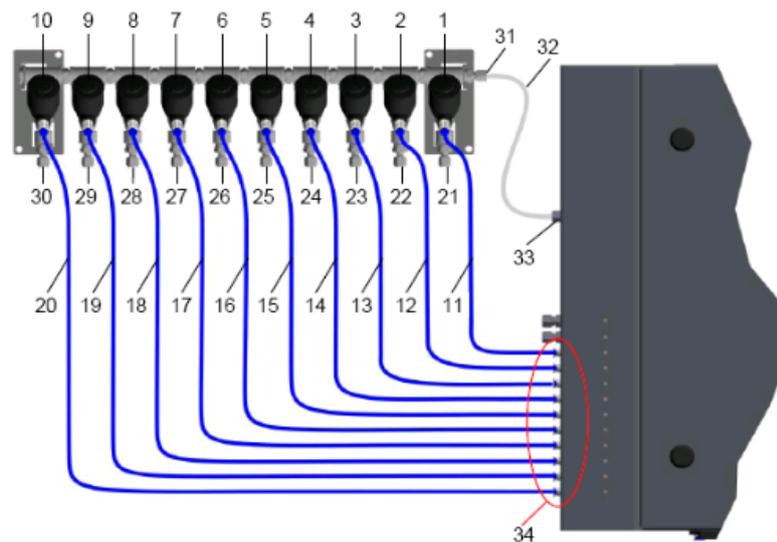


Figura 12: Sistema de entradas de muestra de gas

Dónde:

- 1-10: Válvulas neumáticas.
- 11-20: Actuación con aire de instrumentos para apertura de la válvula.
- 21-30: Entrada de 10 muestras.
- 32: Línea entrada de gas de muestra (tubing PTFE 4 x 6 mm recomendado).



- 33: Entada de gas de muestra (máx. 20 mbar). Compression fitting 6 mm.

En nuestro sistema de purificación solo tendremos un flujo de gas por lo que usaremos solo una entrada.

El equipo mide el contenido de CO_2 , CH_4 , O_2 y H_2S del flujo de biogás y para cada uno genera una señal de 4-20mA que puede ser transmitido mediante señales analógicas vía serie o mediante un cable RS-232 bajo el protocolo H-bus (ver en anexo). Para el presente proyecto, se ha elegido hacer uso de las señales analógicas 4-20mA para la adquisición de medidas.

Además, es necesario que el equipo sea calibrado periódicamente con gases de calibración. La consigna para su calibración es la siguiente:

- Botella de gas de calibración recomendado: CH_4 con un máximo de 25 ppm de H_2S .
- Tiempo de calibración: 10 min.
- Intervalo de calibración 3-6 meses.
- Consumo de gas: Aprox. 5 litros por calibración.

El equipo cuenta con un software que permite configurar los parámetros de medida (Figura 13) y los parámetros de calibración (Figura 14).

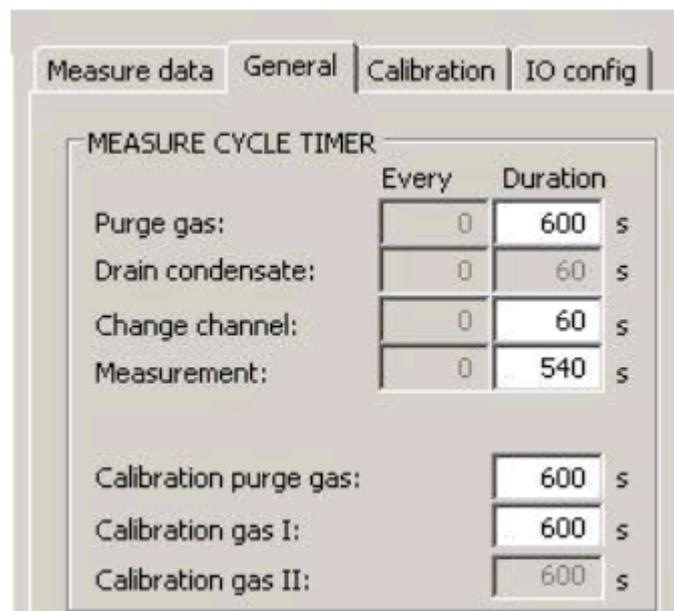


Figura 13: Ventana de configuración de ciclos de medidas

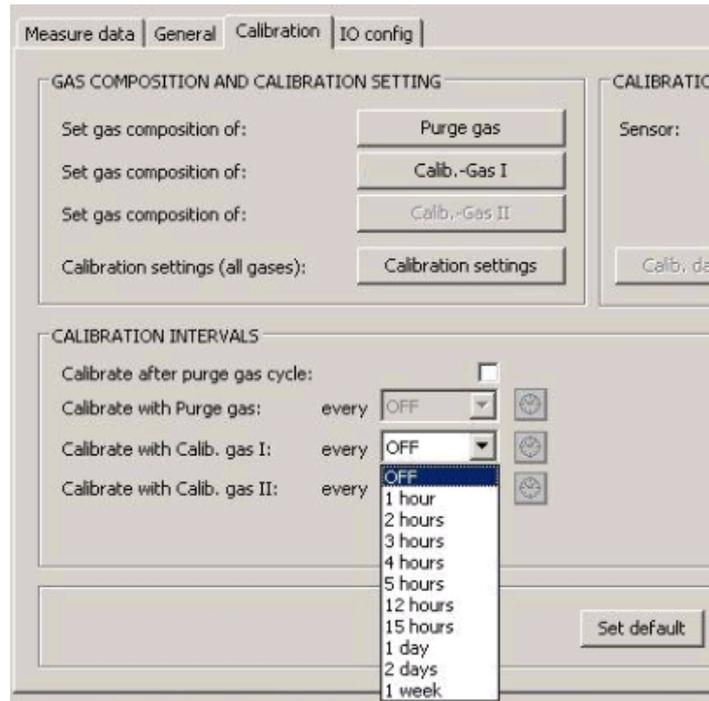


Figura 14: Ventana de configuración de calibración

Por defecto, el analizador de gases tiene una frecuencia de muestreo de dos horas debido a configuraciones propias de fábrica. Este parámetro tendrá mucha influencia para el diseño e implementación del sistema de control.

Por último, en la parte frontal del equipo hay un display que indicará el estado del analizador y permitirá acceder a algunos controles como se muestra en la Figura 15.



Figura 15: Display de estado y control del analizador

3.2.6. Bomba Peristáltica

Disponemos de una bomba peristáltica modelo D-25V plus de la casa DINKO como se muestra en la Figura 16.



Figura 16: Bomba peristáltica modelo D-25V plus

El panel frontal de esta bomba se muestra en la Figura 17.

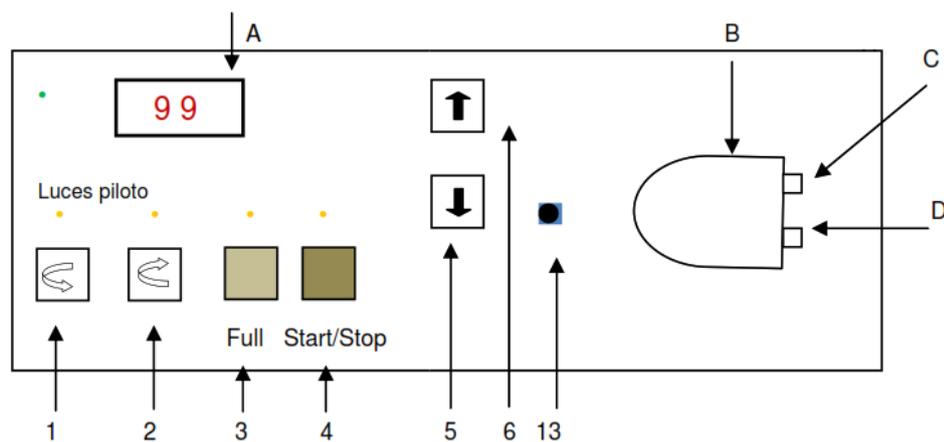


Figura 17: Esquema del panel frontal de la bomba peristáltica

El panel frontal cuenta con un lector digital (A) en % de las revoluciones, dos botones para cambiar el sentido del giro (1 y 2), un botón para girar al máximo (3), un botón de inicio/parada (4), dos botones para disminuir o aumentar las revoluciones (5 y 6) un interruptor para la programación (13), el cabezal



peristáltico (B) con los conectores para los tubos de carga y descarga del fluido (C y D). Este cabezal desmontable permite sustituir los tubos por desgaste o mantenimiento. El panel posterior de esta bomba se muestra en la Figura 18.

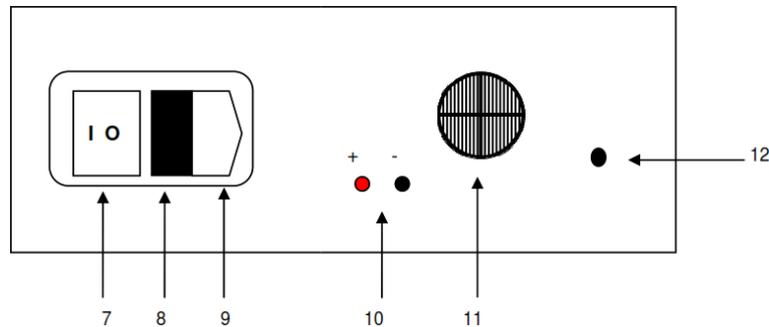


Figura 18: Esquema del panel posterior de la bomba peristáltica

El panel posterior cuenta con un interruptor general (7), un porta-fusibles (8), toma para la alimentación, Entrada de señal analógica 0-10V (10), un ventilador (11) y una entrada para pedal (12).

Nuestro interés sobre esta bomba se centra en la entrada de señal analógica ya que nos permite controlar la bomba mediante una señal externa que será comandada por el controlador.

También es necesario, elegir adecuadamente el diámetro de tubo que va ir instalado en el cabezal ya que la bomba no indica el flujo en mL/min, si no en % de la potencia de la bomba. Actualmente disponemos de dos tipos de tuberías de las cuales extraemos la relación % - mL/min. Se ha probado algunos valores de potencia de la bomba para obtener la relación de caudal en mL/min.

Para nuestro sistema disponemos dos tubos de diferentes diámetros que nos proporcionarán 0,7 mL/min y 2,8 mL/min por cada % potencia de la bomba.

3.2.7. Controlador de flujo másico

El controlador de flujo másico modelo GFC 57 de la casa Aalborg se muestra en la Figura 19.



Figura 19: Controlador de flujo másico.

Este dispositivo nos va a permitir medir el flujo de biogás que va a entrar a la columna de absorción hasta un máximo de 200 mL/min con una precisión de un 1.5% del span. Dispone de un display frontal que nos mostrará el flujo en un instante de tiempo.

Las medidas de flujo de gas que se pueden enviar mediante una señal de salida 4-20 mA ó 0-5 V. A su vez, este dispositivo se puede comandar de forma remota. El esquema de conexiones se muestra en la Figura 20.

PIN FUNCTION

PIN	FUNCTION
1	0 to 5 Vdc Flow Signal Common
2	0 to 5 Vdc Flow Signal Output
3	Common
4	Open (Purge)
5	Common, Power Supply
6	(unassigned)
7	+12 Vdc (Optional +24 Vdc*) Power Supply
8	Remote Setpoint Input
9	4 to 20 mA (-) Flow Signal Return (use with 14)
10	Remote Setpoint Common (use with 8)
11	+5 Vdc Reference Output for Remote Setpoint
12	Valve Off Control
13	Auxiliary +12 Vdc (Optional +24 Vdc*) Power Output (For Loads <100 mA)
14	4 to 20 mA (+) Flow Signal Output
15	Chassis Ground

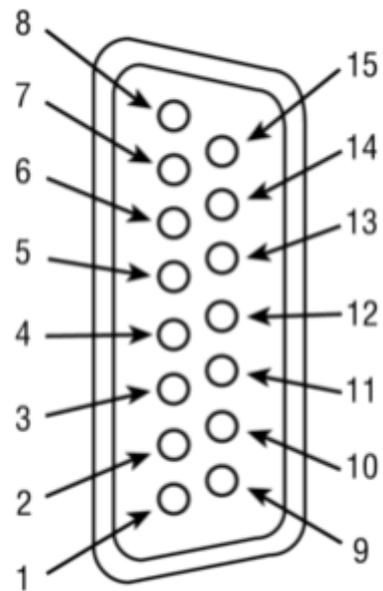


Figura 20: Esquema de conexiones eléctricas del Controlador de flujo másico

En nuestro caso, para registrar el flujo medido usaremos pines relacionados con la salida de datos y para enviar señales de control de flujo usaremos los pines relacionados con señales de entrada.

3.2.8. Controlador de planta

El controlador de la planta es un FPGA modelo myRIO-1900 de la casa National Instruments como se muestra en la Figura 21.

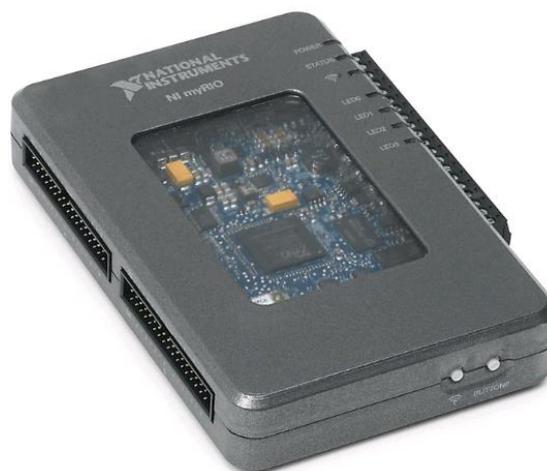


Figura 21: FPGA myRIO - 1900

Este dispositivo portátil de entradas/salidas reconfigurables (RIO) se usa habitualmente para diseñar sistemas de control, robótica y mecatrónica a nivel educativo.

El myRIO 1900 está conformado por dos bloques de hardware incluidos en una tarjeta integrada Xilinx Zynq-7010. Por un lado, tenemos un bloque procesador que soportará funciones de memoria, lógica de programa, conexión Wireless, comunicación con el PC y leds de estado. Por otro lado, tenemos el bloque FPGA, que soportará las entradas analógicas/digitales, las salidas analógicas/digitales además de entrada/salida de audio y un acelerómetro. El diagrama de bloques de hardware se muestra en la Figura 22.

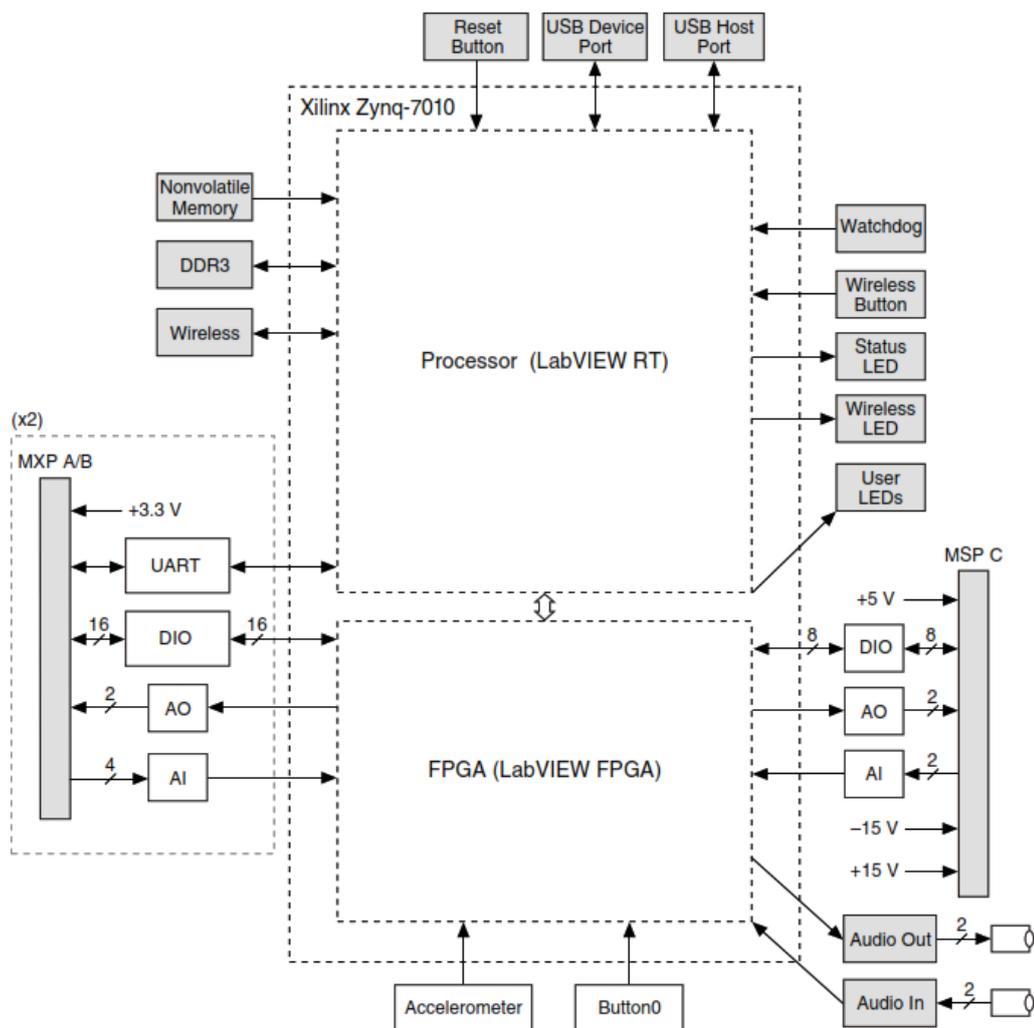


Figura 22: Diagrama de bloques de hardware de myRIO-1900



Este dispositivo cuenta con tres bloques de pines de conexiones. Los dos primeros bloques se agrupan en conectores A y B del puerto de expansión (MXP) y ambos puertos transportarán conjuntos idénticos de señales como se muestra en la Figura 23. La diferenciación entre el conector A y el conector B se hará mediante software como se verá más adelante.

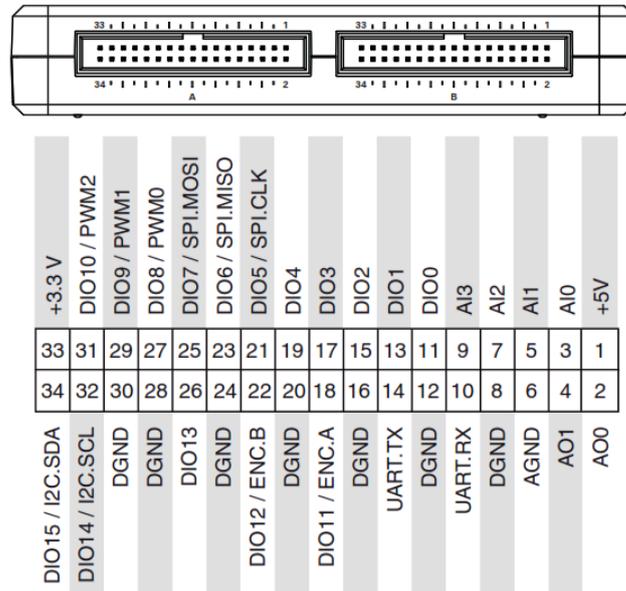


Figura 23: Señales primarias/secundarias en los conectores A y B MPX

Estos conectores nos serán muy útiles para conectar las señales de entrada de control del sistema. En la Tabla 4, se muestra la descripción de las señales de los conectores A y B de expansión.

Signal Name	Reference	Direction	Description
+5 V	DGND	Output	+5 V power output
AIO <0...3>	AGND	Input	0-5 V, referenced, single-ended analog input channels
AO <0..1>	AGND	Output	0-5 V, referenced, single-ended analog output.
AGND	N/A	N/A	Reference for the analog input and output.
+3.3 V	DGND	Output	+3.3 V power output
DIO <0..15>	DGND	Input or Output	General-purpose digital lines with 3.3 V output, 3.3 V / 5 V V-compatible input.
UART.RX	DGND	Input	UART receive input. UART lines are electrically identical to DIO lines
UART.TX	DGND	Output	UART transmit output. UART lines are electrically identical to DIO lines
DGND	N/A	N/A	Reference for digital lines and +5 V and +3.3 V

Tabla 4: Descripción de las señales de los conectores A y B MXP.

El tercer bloque de pines de conexiones agrupa las señales del conector C del puerto del sistema Mini (MSP) como se muestra en la Figura 24.

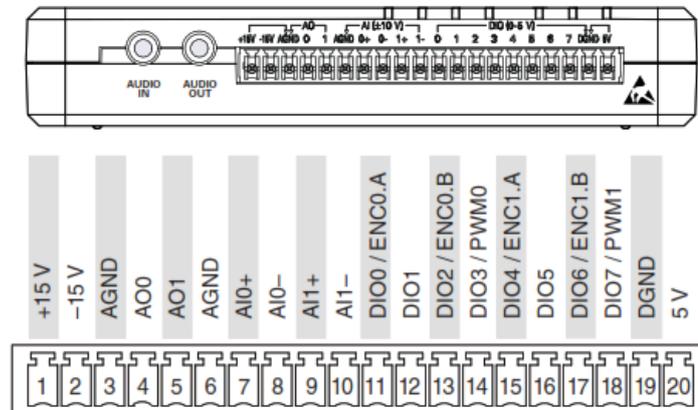


Figura 24: Señales del conector C MPS.

Este puerto está conectadas las señales analógicas controladas de nuestro sistema. En la Tabla 5, se muestra la descripción de las señales en el conector C MSP.

Signal Name	Reference	Direction	Description
+15 V / -15 V	AGND	Output	+15 V / -15 V power output
AIO+ / AIO-; AI1+ / AI1-	AGND	Input	±10 V, diferencial analog input channels
AO <0..1>	AGND	Output	±10 V, referenced, single-ended analog output channels
AGND	N/A	N/A	Reference for the analog input and output and +15 V / -15 V power output
+5V	DGND	Output	+5 V power output
DIO <0..7>	DGND	Input or Output	General-purpose digital lines with 3.3 V output, 3.3 V / 5 V V-compatible input.
DGND	N/A	N/A	Reference for digital lines and +5 V power output

Tabla 5: Descripción de las señales del conector C MSP.

Canales analógicos:

Las entradas y salidas analógicas se encuentran repartidas en los conectores A, B y C.

- **Entradas analógicas**

Los conectores A y B tienen cuatro canales analógicas (AIO, AI1, AI2 y AI3) que se usan para medir señales de 0-5V. El conector C tiene dos canales de alta impedancia (AIO y AI1) para medir señales de 0-10V.

Todos estos canales se multiplexan a un único convertidor analógico-digital que muestrea todas a la vez.

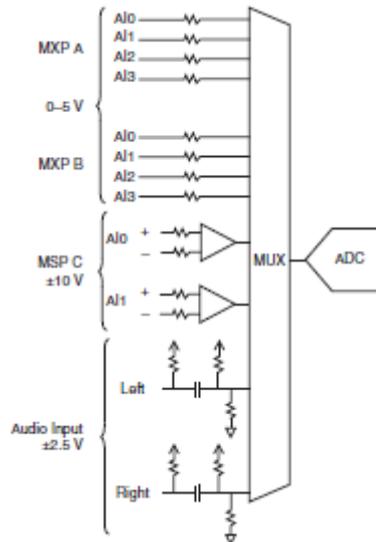


Figura 25: Esquema de canales de entrada analógicas de myRIO

- **Salida analógica:**

Los conectores A y B tienen dos canales de salida analógica por conector (A00 Y A01) y se utilizan para generar señales de 0-5V.

El conector C tiene dos canales (A00 y A01) y se utilizan para generar señales de 0-10V.

Cada canal tiene asignado un convertidor digital-analógico y todos pueden actualizarse simultáneamente.

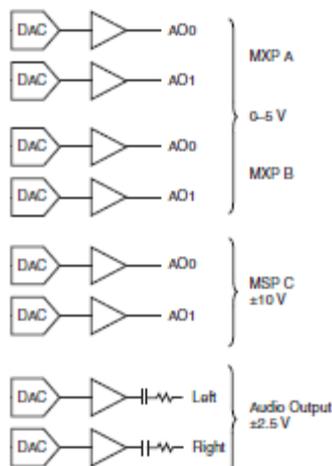


Figura 26: Esquema de canales de salida analógicas de myRIO



Líneas digitales

Las líneas de entradas/salidas digitales (DIO) se encuentran repartidas en los conectores A, B y C y son de propósito general de 3,3V.

Los conectores A y B tienen 16 líneas DIO por conector. Las líneas DIO0-DIO13 tienen una resistencia pull-up de 40 k Ω a 3,3V y las líneas DIO14-DIO15 tienen resistencias pull-up de 2,1 k Ω a 3,3V.

El conector C tiene 8 líneas DIO con resistencias pull-down de 40 k Ω a tierra.

Adicionalmente, existen pines DGND que funcionará como referencia para todas las líneas DIO.

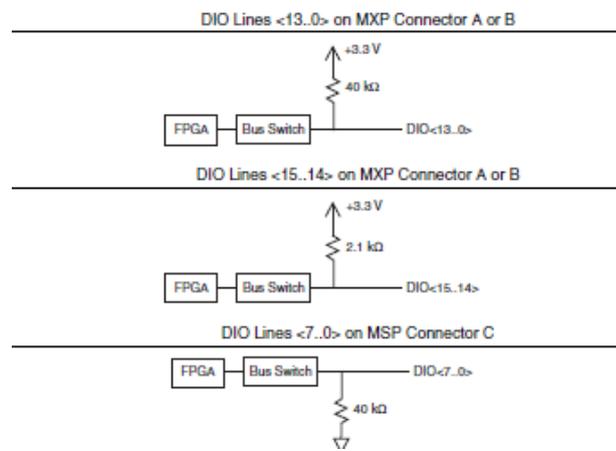


Figura 27: Esquema de líneas digitales de myRIO

3.3. Ordenador de sobremesa

National Instruments proporciona el software LabVIEW para nuestro controlador de planta myRio-1900 que es necesario instalarlo en un ordenador con Windows 7 o superior. Con LabVIEW podremos diseñar el IHM según las necesidades del investigador mediante la ventana de diseño como se muestra en la Figura 28.

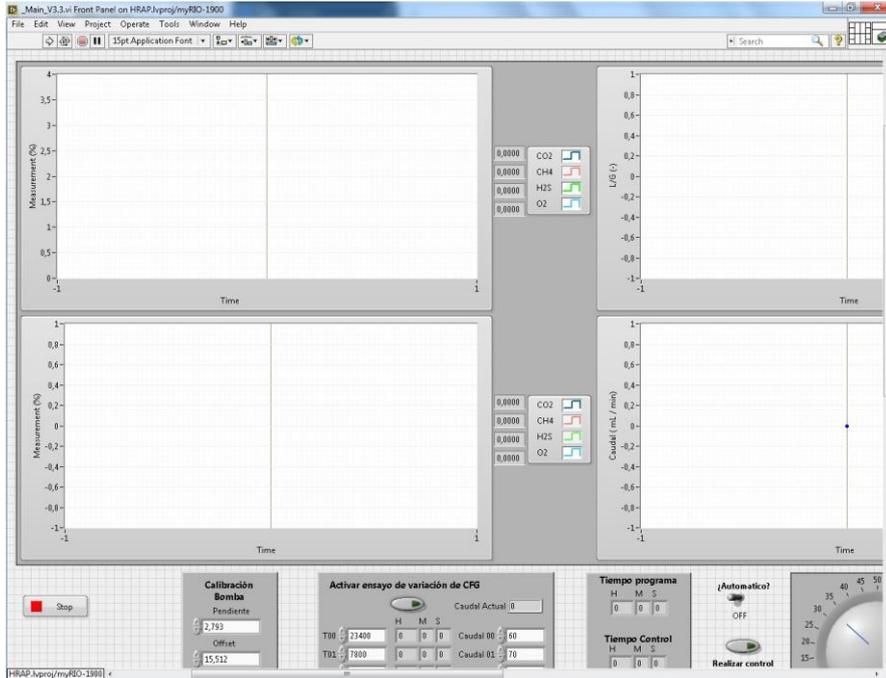


Figura 28: Interfaz de diseño gráfico de LabVIEW

Además, mediante su ventana de programación de bloques, podremos diseñar la lógica que existirá detrás del IHM para poder gobernar sobre todos los elementos conectados y gestionar las señales de todos los captadores. También se podrá programar el algoritmo de control para implementar la automatización de la purificación de biogás. Esta ventana se puede mostrar en la Figura 29.

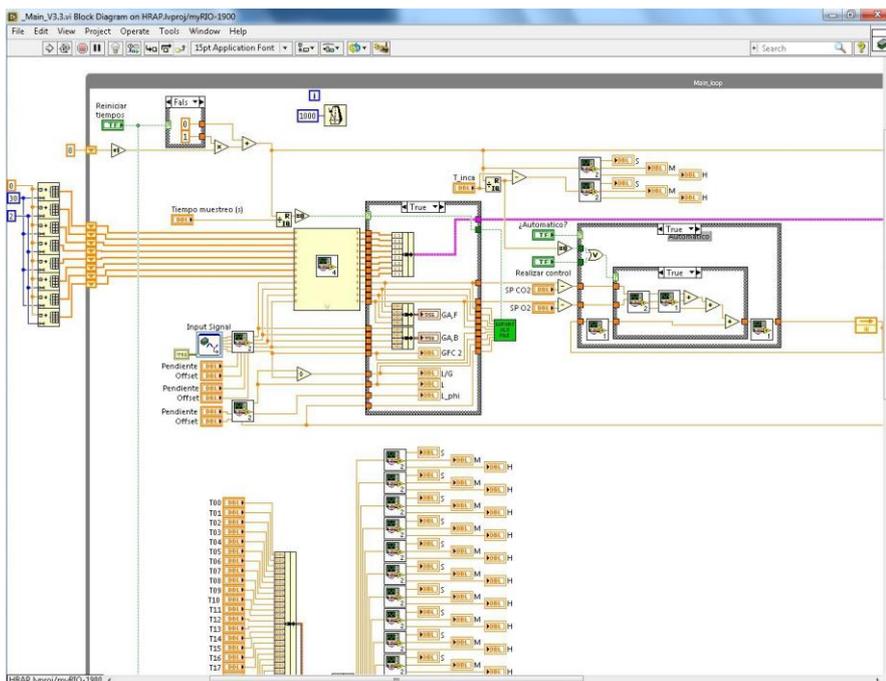




Figura 29: Interfaz de programación de bloques de LabVIEW

3.4. Operación y funcionamiento

El principal parámetro que marcará las condiciones de operación es la relación entre el flujo de microalgas en medio acuoso (L) [10] y el flujo de gas (G) que existe a la entrada de la columna de absorción [11]. Este parámetro, L/G [12], determinará la mejor transferencia de impurezas del biogás al medio acuoso y el estudio de este parámetro está entre 0,25 y 1,5.

- a) Circuito de biogás: Este circuito tiene como fuente una bombona de biogás con una concentración conocida de CH_4 , CO_2 , H_2S y O_2 .

La generación de flujo de biogás que entrará a la columna de absorción estará regulada por el controlador de flujo másico (CFM) que en principio estaba controlada manualmente. El CFM tendrá dos modos de operación en función del tipo de ensayo:

- Ensayo para optimizar la absorción de impurezas mediante un flujo de biogás constante y conocido controlado por el CFM a la entrada de la columna de absorción con unas condiciones ambientales determinadas.
- Ensayos para optimizar la absorción de impurezas mediante el CFM con la simulación de un flujo de biogás producido en una planta depuradora. La producción de la planta depuradora se simulará mediante perfiles conocidos de producción de biogás en función del tiempo.

En ambos casos, podemos determinar el flujo de medio acuoso necesario para obtener la mejor absorción de impurezas en el biogás mediante un algoritmo basado en reglas que explicaremos más adelante.

La concentración de biogás a la salida de la columna de absorción se mediará mediante el analizador de gases.

El biogás purificado se reservará en recipientes adecuados para otros estudios que se estén llevando a cabo en otros laboratorios asociados.

- b) Circuito de microalgas en medio acuoso: Este circuito tiene como fuente el fotobiorreactor HRAP donde se cultivan las microalgas. Como se comentó en apartados anteriores, es necesario usar un afluente clarificado mediante el sedimentador para que no se acumulen biomasa (microalgas) en la columna de absorción. El caudal que necesita el sedimentador para cumplir la relación L/G, lo va a proporcionar la bomba peristáltica que en un principio estaba controlado manualmente.



El fluido de microalgas con las impurezas que haya podido absorber del biogás, volverá al Fotobiorreactor HRAP para que pueda renovarse.

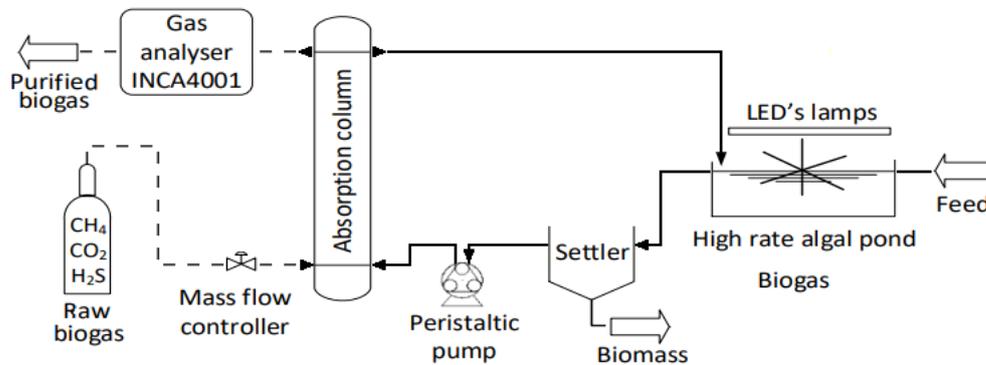


Figura 30: Esquema de la planta antes de implementar el banco de ensayos

En la columna de absorción se llevará a cabo la transferencia de las impurezas del biogás al fluido con las microalgas. Tanto el biogás como el fluido con microalgas entrarán en la columna de absorción en co-corriente para que produzca la mayor transferencia posible sin comprometer la limpieza de la columna por acumulación de biomasa.



4. Sistema de control

4.1. Introducción

Con la implementación del banco de ensayos se pretende automatizar algunas pruebas para estudiar mejor la absorción de las impurezas de biogás mediante microalgas.

Con el sistema de control, se pretende realizar dos grandes tareas:

Por un lado, automatizar tareas que el investigador realizaba manualmente como registrar la composición de gases a la salida de la columna de absorción, registrar los valores de caudales y realizar cambios en los actuadores. El banco de ensayos ofrece una única plataforma, mediante una interfaz o HMI instalada en un ordenador de mesa, en la que el investigador realizará todas las configuraciones necesarias para realizar los ensayos y dejar que se ejecuten todas las secuencias de las pruebas de forma automática. A este modo de funcionamiento se le conocerá como “Sistema Manual”.

Por otro lado, se pretende implementar un sistema de control que sea capaz de conseguir la mejor purificación de biogás. Debido a la naturaleza biológica de la planta y las restricciones existentes de la frecuencia de muestreo, se ha propuesto un primer método de control basado en reglas que describiremos más adelante. A este modo de funcionamiento se le conocerá como “Sistema Automático”.

De este modo, la plataforma permite realizar una operación estable, segura e independiente de los ensayos de la planta. Los datos obtenidos tendrán mucha más precisión por lo que el investigador podrá dedicarse a analizar los datos para obtener los resultados.

4.2. Variables de control

Es necesario describir los parámetros y las variables manipuladas y controladas que constituyen el sistema. En primer lugar, está la variable controlada que es la variable principal y la que se desea regular para conseguir nuestros objetivos. Se relaciona con el punto de consigna o setpoint del sistema, que será el valor deseado u objetivo del sistema para dicha variable esencial. De este modo, nuestro objetivo de control será mantener la variable en el setpoint que desee el investigador.

Las variables controladas no tendrían sentido si no existiera la variable manipulada. Esta variable es modificada por el controlador de tal manera que afecte el valor de la variable controlada, Ajustaremos la variable manipulada para mantener la variable controlada en torno al punto de consigna deseado mediante nuestro elemento de actuador o elemento final de control. En nuestro



caso, tendremos control directo sobre la bomba peristáltica que proporcionará flujo de líquido a la columna de absorción procedente del cultivo de microalgas-bacterias. Nuestra principal variable controlada será el CH₄, ya que nuestro principal objetivo será maximizar el contenido neto de este gas en el volumen total.

En segundo lugar, como se explicó en el capítulo 2.3, la optimización de CH₄ implica una reducción directa de CO₂, gracias a las microalgas, y de H₂S, gracias a las bacterias. También tendremos que mantener monitorizada la cantidad de O₂ (oxígeno disuelto) en el biogás ya que el volumen de ésta depende de la velocidad de producción por parte de las microalgas y la velocidad de consumo de las bacterias.

Por último, el flujo de biogás sin procesar que alimenta a la columna de absorción está regulada por el controlador de flujo másico. Como se comentó en el apartado 3.3.

En la Tabla 6, se muestra todas las variables de nuestro sistema:

Señal	Tipo señal	Unidad	Etiqueta	Equipo
CH ₄	Controlada	% vol.	v_CH4	Analizador de gases
Flujo líquido	Manipulada	Voltios	v_CFM	Bomba peristáltica
Flujo de gas	Perturbación	L/min	v_PUMP	Controlador de flujo

Tabla 6: Tabla con las variables controladas y manipuladas de la planta

Por otra parte, para el investigador será muy importante realizar el seguimiento de los contaminantes como se muestra en la Tabla 7:

Señal	Tipo señal	Unidad	Etiqueta	Equipo
CO ₂	Monitorizada	% vol.	v_CO2	Analizador de gases
H ₂ S	Monitorizada	Ppm	v_H2S	Analizador de gases
O ₂	Monitorizada	% vol.	v_O2	Analizador de gases

Tabla 7: Tabla con las variables monitorizadas

Debido a la naturaleza biológica del sistema, es necesario hacer un seguimiento de la eficacia de absorción de los contaminantes mediante la simbiosis algas-bacterias en función de las características de los ensayos que decida realizar el investigador como puede ser la relación L/G, temperatura, el pH, los perfiles de perturbación del flujo de biogás, etc.

4.3. Esquema de conexiones

Como comentábamos en la sección anterior, en el PC de sobremesa estará instalado el software del controlador que gobernará todo el sistema.

Todos los dispositivos estarán conectados al controlador y a su vez este estará conectado al PC. El esquema de conexiones se muestra en la Figura 31.

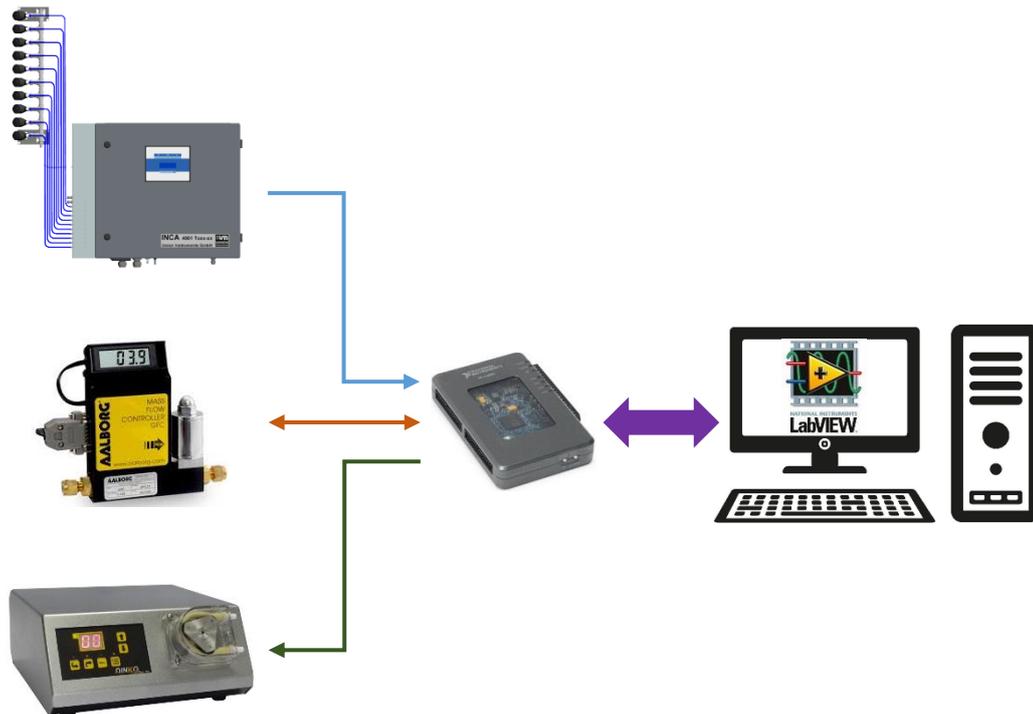


Figura 31: Esquema de conexiones de los dispositivos eléctricos

4.3.1. Conexión del analizador de gases

El manual del analizador de gases INCA nos indica que el módulo con los pines que nos servirá para leer las señales de la composición del biogás se encuentra en el interior del dispositivo. Los cuatro pines con señales analógicas de 4~20 mA se muestran en la Figura 32.

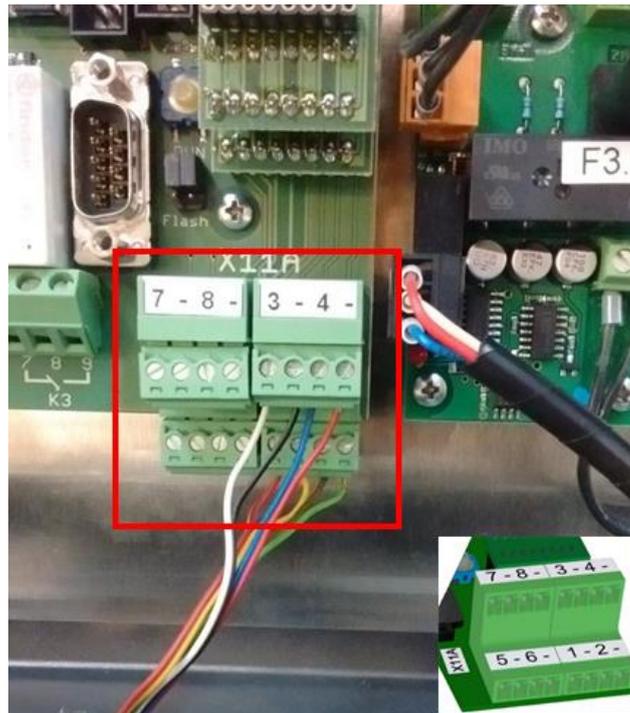


Figura 32: Pines de conexión analógica del analizador de gases

En la tabla, se muestra la relación de los pines con las señales.

Pin	Function	Color	Signal
1	Analog output 1 – signal/signal 4-20 mA	Red	CO2 +
-	1 GND	Yellow	CO2 -
2	Analog output 2 – signal/signal 4-20 mA	Brown	CH4 +
-	2 GND	Green	CH4 -
3	Analog output 3 – signal/signal 4-20 mA	White	H2S +
-	3 GND	Black	H2S -
4	Analog output 4 – signal/signal 4-20 mA	Blue	O2 +
-	4 GND	Orange	O2 -

Tabla 8: Correspondencia entre pines y señales del analizador de gases

Ya que el analizador de gases transmite señales de 4-20 mA y el controlador solo tiene entradas que miden tensión, es necesario implementar un circuito de acondicionamiento que es capaz transformar las señales de 4~20 mA a 0~5 V. Cada una de las cuatro señales tendrá un circuito independiente. Las características de este circuito se pueden encontrar en los anexos.

Las conexiones desde el analizador de gases al controlador, se describirán más adelante.

4.3.2. Bomba peristáltica

La bomba peristáltica solo dispone una conexión de 0-10 V para poder controlarlo de forma remota.

DESCRIPCIÓN DEL PANEL POSTERIOR

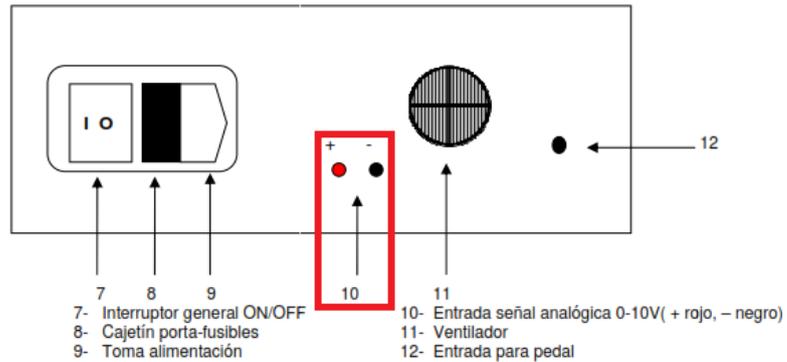


Figura 33: Pines de conexión analógica de la bomba peristáltica

Pin	Function	Color	Signal
+	Entrada analógica 0 – 10 V	Red	Bomba+
-	GND	Black	Bomba-

Tabla 9: Correspondencia de entre pines de la bomba peristáltica

Esta señal estará conectada directamente a uno de las señales de salida analógica del controlador para poder realizar el control remoto.

4.3.3. Controlador de flujo másico

Este dispositivo dispone de una conexión tipo RS232 como se muestra en la figura 32.



Figura 34: Controlador de flujo másico con la conexión RS232

En la figura 20 en el apartado 3.2.7 podemos apreciar el esquema de pines del controlador de flujo másico. La relación de conexión de pines se muestra en la siguiente tabla.

Pin	Description	Pin	Description
1 & 2	0 - 5 Vdc output	5 & 7	+12 Vdc power supply
3 & 4	Purge	8 & 10	0 - 5 Vdc or 4 - 20 mA remote setpoint
3 & 12	Valve off control	9 & 14	4-20 mA output
5 & 13	Auxiliary + 12 Vdc	10 & 11	+5 Vdc control source

Tabla 10: Correspondencia de entre pines del controlador de flujo másico

En nuestro caso, la señal de salida se corresponde con los pines 1-2, para registrar el flujo, y la señal de entrada se corresponde con los pines 8-10 para enviar señales de control de flujo.

4.3.4. Controlador myRio 1900

Como se vio en el apartado 3.2.8, el controlador de planta dispone de tres bloques de conexiones (o conectores) A, B y C.



Figura 35: Pines de conexión: Superior A y B; Inferior C



Las señales del analizador de gases, de la bomba peristáltica y del controlador de flujo másico conectados al controlador se puede muestra en la siguiente tabla:

Dispositivo	Conector de controlador	Pin o canal	Nombre de señal	Tipo de señal	Descripción
Analizador de gases	A	9	CO2	Entrada	Señal de lectura de CO2
	A	7	CH4	Entrada	Señal de lectura de CH4
	A	5	H2S	Entrada	Señal de lectura de H2S
	A	3	O2	Entrada	Señal de lectura de O2
	A	6	GND	-	GND para las señales de gas
Controlador de flujo másico	B	7	CFM_in	Entrada	Señal de lectura del CFM
	B	4	CFM_out	Salida	Señal de setpoint
	B	6	GND	-	GND para las señales del CFM
Bomba peristáltica	C	4	Pump	Salida	Señal de setpoint
	C	3	GND	-	GND para la bomba

Tabla 11. Correspondencia de pines del controlador de planta

Es necesario configurar los pines de entrada y de salida del controlador de planta con el software LabVIEW para que pueda definir y declarar correctamente su funcionamiento. Esta configuración se muestra a continuación:

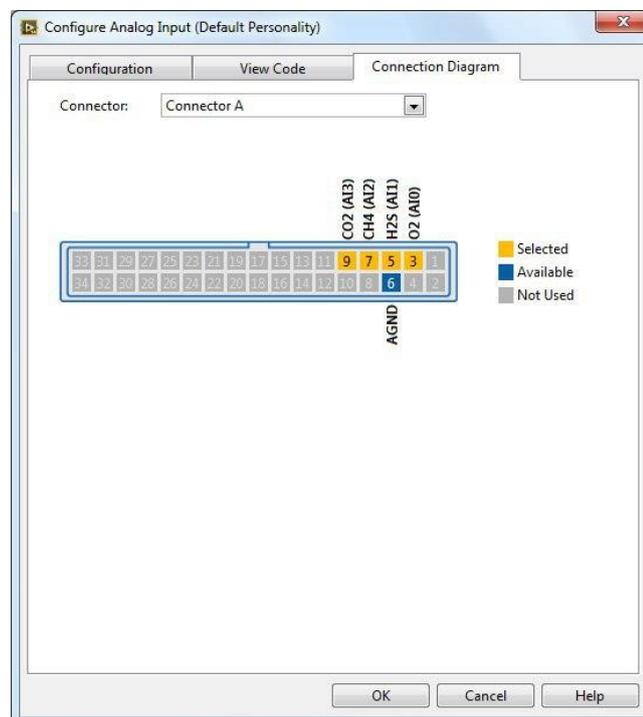


Figura 36: Configuración de pines entradas analógicas en LabVIEW para el conector A

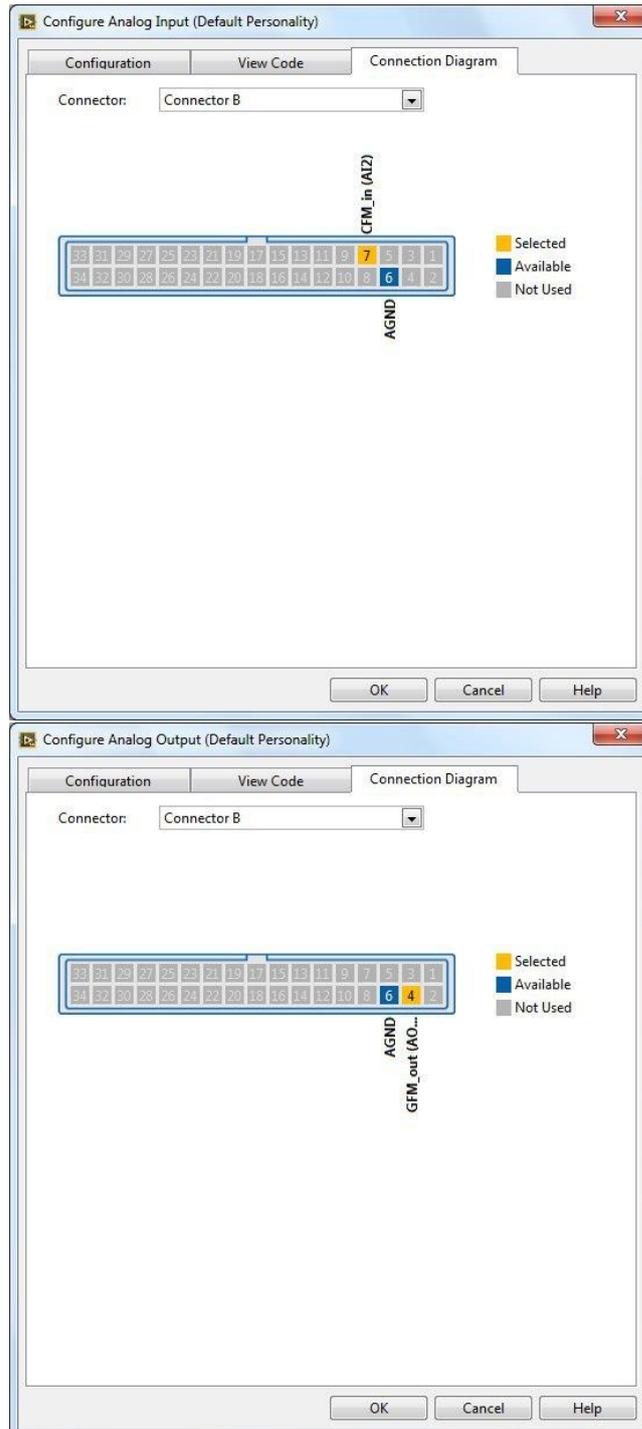


Figura 37: Configuración de pines entradas (arriba) y de salidas (abajo) analógicas en LabVIEW para el conector B

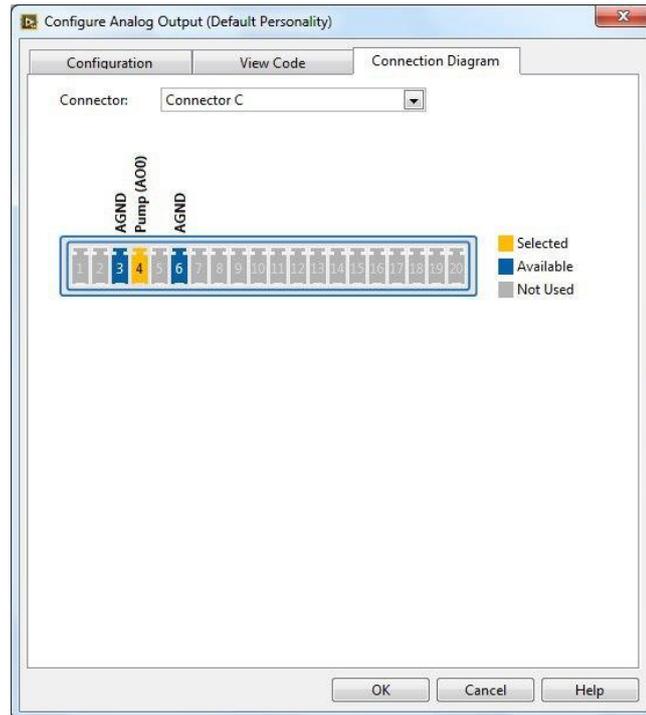


Figura 38: Configuración de pines de salidas analógicas en LabVIEW para el conector C

Con esta configuración se puede usar un conector exclusivamente para cada dispositivo que tengamos conectado.

Todos los datos que el controlador de planta reciba se puede enviar por WIFI o por USB DEVICE que se muestra a continuación:



Figura 39: Puerto USB Device del controlador de planta



4.4. Software del banco de ensayos

El software de control del banco de ensayos está desarrollado bajo LabVIEW myRIO 2014 de National Instruments. LabVIEW es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico pensado para sistemas hardware y software de pruebas, control y diseño, simulado o real y embebido.

Debido a que estamos haciendo uso del controlador de planta myRIO 1900, es necesario trabajar con este entorno de desarrollo. La unidad programación de LabVIEW está definido en un fichero con extensión “vi” y presenta dos áreas de trabajo.

Por un lado, tenemos el entorno de Interfaz de usuario o “Front Pane” donde se integrará todos los elementos necesarios para que el investigador pueda interactuar con el sistema como, por ejemplo, botones, gráficos, ruletas, etc.

Por otro lado, tenemos el entorno de diagramas de bloque o “Block Diagram”, donde se integrará el código fuente del sistema.

4.4.1. Arranque de programa

Al iniciar el programa, el programa nos mostrará la ventana de selección de proyectos como se muestra en la Figura 40. En nuestro caso, el proyecto que de desarrollo se llama “HRAP” con extensión “lvproj”.

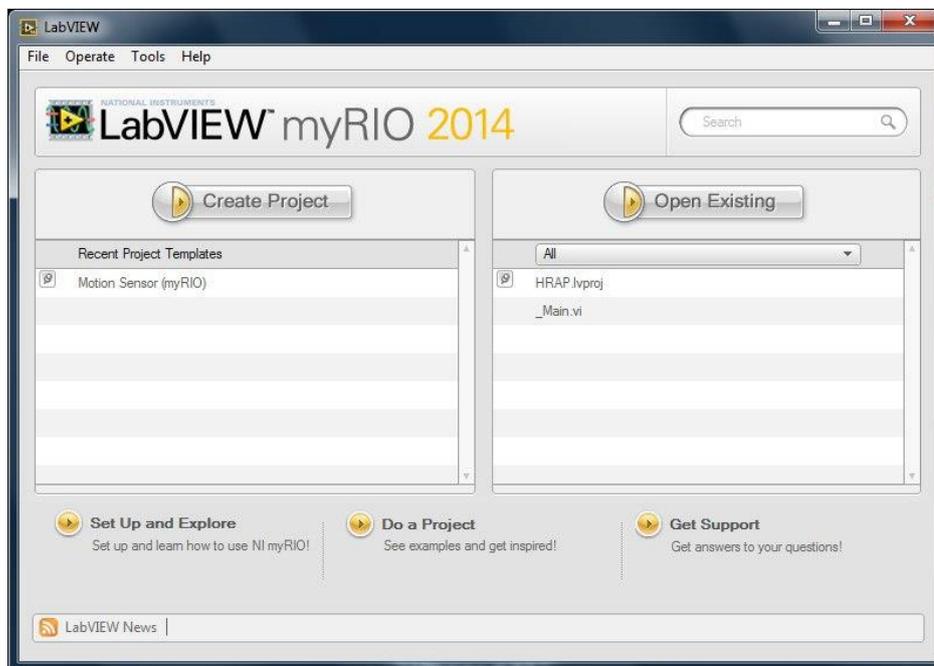


Figura 40: Ventana de selección de proyectos de LabVIEW.



Tras seleccionar y abrir nuestro proyecto, LabVIEW presenta la ventana de exploración de proyecto donde se muestra todos lo relacionado al entorno del proyecto como dispositivos (PC o controlador), ficheros de código y opciones de configuración del proyecto.

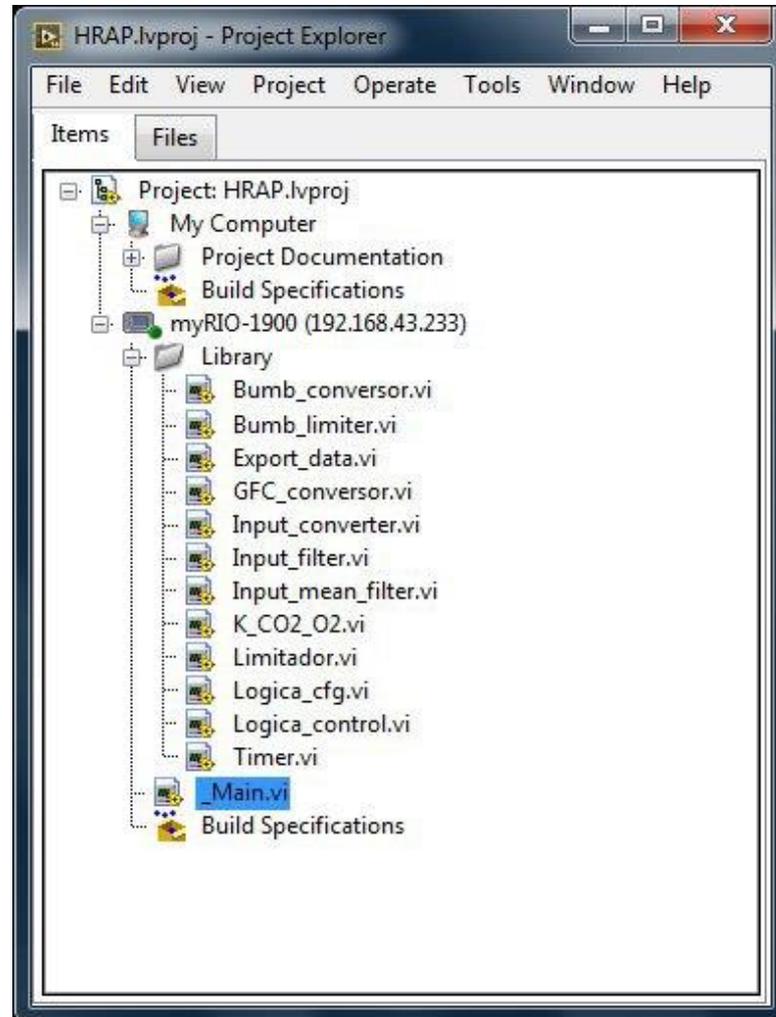


Figura 41: ventana de exploración de proyecto.

Como se puede observar, dentro de la estructura del proyecto HRAP existe dos partes, “My Computer” y “myRIO-1900”. Nuestro controlador de planta se corresponde a “myRIO-1900” y está asociado al IP 192.168.43.233. Esto significa que las comunicaciones entre el PC y el propio controlador se realizan mediante WIFI en la que ambos están conectados.

El fichero donde está definido el interfaz de usuario (IHM) y el código principal del programa se encuentra en “_Main.vi”. Los ficheros relacionados con funciones del programa están ubicados dentro de la carpeta “Library”.

4.4.2. Interfaz de Usuario

Si hacemos doble clic en el fichero “_Main.vi”, se abrirá la siguiente ventana:

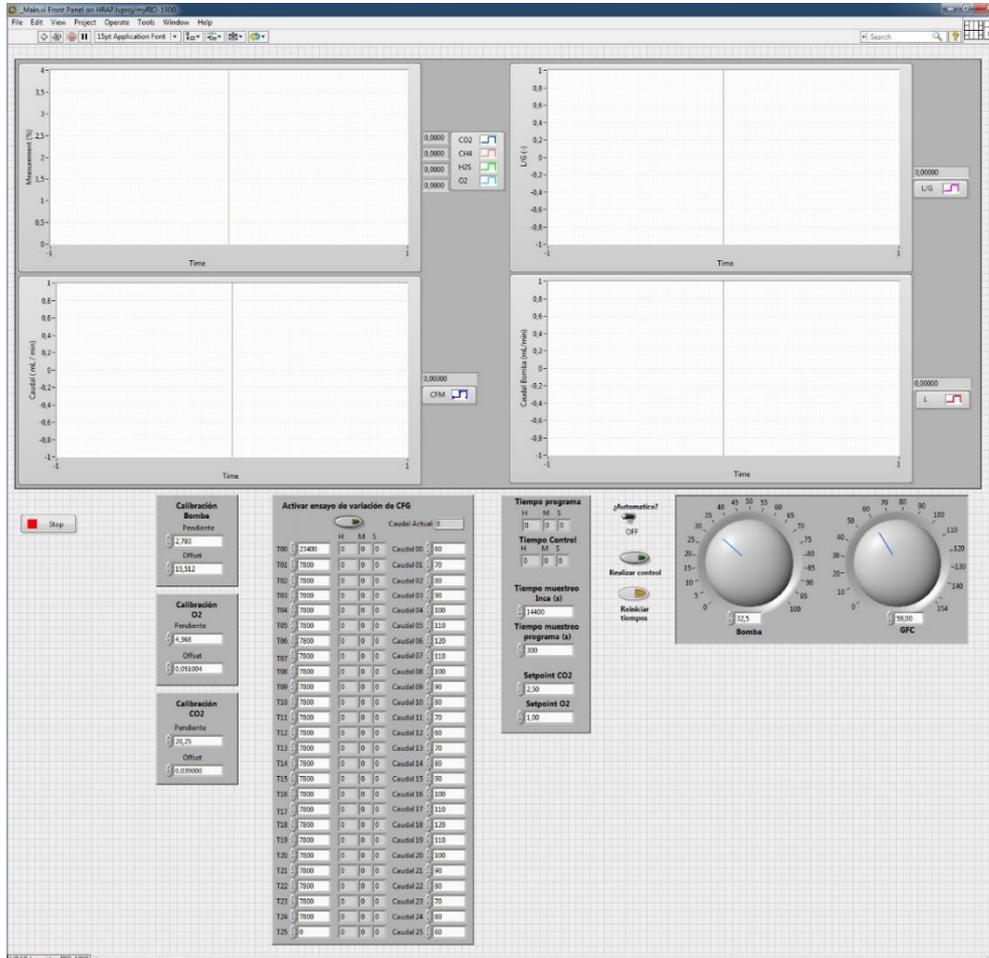


Figura 42: Interfaz de Usuario del programa principal del controlador de planta

En ella podemos ver distintos elementos que el investigador podrá usar para interactuar con el banco de ensayos y de esta manera poder configurar y realizar las pruebas que necesite.

El interfaz de usuario se puede dividir en 6 partes.

Área de gráficos:

En esta zona se pretende mostrar la evolución temporal de los distintos parámetros que se puede monitorizar en el banco de ensayos y que son de interés para el investigador.



Figura 43: Área de gráficos del interfaz de usuario

- En la Figura 43 se muestra en detalle cuatro gráficas representativas:
- Medida de cantidad de CO₂ (en %), CH₄ (en %), H₂S (ppm) y O₂ (en %).
 - Caudal de gas sin refinar (CFM) en mL/min.
 - Ratio de caudal de líquido y caudal de gas, L/G, sin unidades.
 - Caudal de líquido que contiene las microalgas en mL/min.



Área de calibración

En esta zona, se habilita los parámetros necesarios para la calibración de los elementos que lo requieren, como se muestra a continuación:

Calibración	Parámetro	Valor
Bomba	Pendiente	2,793
	Offset	15,512
O2	Pendiente	4,368
	Offset	0,051004
CO2	Pendiente	20,25
	Offset	0,039000

Figura 44: Área de calibración del interfaz de usuario

Por cada parámetro que se puede calibrar, tenemos dos variables, pendiente y offset, los cuales se pueden configurar antes de iniciar los ensayos si se requiere. Como se puede observar tiene unos valores iniciales que se han calculado previamente en función de los valores eléctricos obtenidos de forma experimental.



Área de configuración de variación de CFM

En esta zona, se puede configurar el perfil de variación del flujo de gas que vamos a purificar, mediante el controlador de flujo másico, que tenemos a la entrada de la columna de absorción.

Activar ensayo de variación de CFG

Caudal Actual 60

		H	M	S	
T00	23400	6	30	0	Caudal 00 60
T01	7800	8	40	0	Caudal 01 70
T02	7800	10	50	0	Caudal 02 80
T03	7800	13	0	0	Caudal 03 90
T04	7800	15	10	0	Caudal 04 100
T05	7800	17	20	0	Caudal 05 110
T06	7800	19	30	0	Caudal 06 120
T07	7800	21	40	0	Caudal 07 110
T08	7800	23	50	0	Caudal 08 100
T09	7800	26	0	0	Caudal 09 90
T10	7800	28	10	0	Caudal 10 80
T11	7800	30	20	0	Caudal 11 70
T12	7800	32	30	0	Caudal 12 60
T13	7800	34	40	0	Caudal 13 70
T14	7800	36	50	0	Caudal 14 80
T15	7800	39	0	0	Caudal 15 90
T16	7800	41	10	0	Caudal 16 100
T17	7800	43	20	0	Caudal 17 110
T18	7800	45	30	0	Caudal 18 120
T19	7800	47	40	0	Caudal 19 110
T20	7800	49	50	0	Caudal 20 100
T21	7800	52	0	0	Caudal 21 90
T22	7800	54	10	0	Caudal 22 80
T23	7800	56	20	0	Caudal 23 70
T24	7800	58	30	0	Caudal 24 60
T25	0	58	30	0	Caudal 25 60

Figura 45: Área de configuración de variación de CFM del interfaz de usuario

Como podemos observar en la Figura 1Figura 45, esta zona está definida por las siguientes partes:

Un botón de activación del experimento, el caudal actual del CFM y los puntos que definen el perfil de gas a purificar. Dicho perfil de gas está definido por 26 puntos mediante la duración y el caudal de cada punto y activar el botón.



Área de configuración de parámetros de programa

Esta zona define los tiempos del sistema y los setpoint de las principales impurezas del biogás.

Figura 46: Área de configuración de parámetros de programa del interfaz de usuario.

Los tiempos de programa se compone por el tiempo de muestreo por el analizador de gases, ya que se configura mediante su propio software, y el tiempo de muestreo de programa, que es el guardado de todos los datos del sistema en un fichero csv para su posterior análisis.

Los setpoint que se van a configurar se corresponden al CO₂ y el O₂ debido a que se pretende reducir los contaminantes del biogás.

Área de configuración de modo de programa

En esta zona, el investigador puede elegir entre los dos modos de programa: Modo Manual y Modo automático.



Figura 47: Área de configuración de modo de programa del interfaz de usuario

Además, Un botón para adelantar la aplicación de las reglas de control, si el investigador lo desea, y reiniciar los tiempos de programa.

Área de control manual de actuadores

En esta zona, el investigador podrá controlar los valores que tendrá la bomba peristáltica y el controlador de flujo de gas cuando el sistema está operando en modo manual.

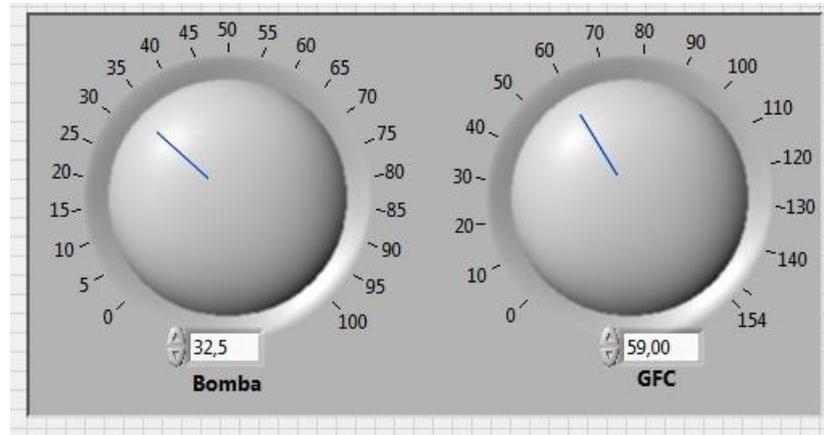


Figura 48: Área de control manual de actuadores del interfaz de usuario.

Por un lado, el control de la bomba peristáltica, o simplemente “bomba”, permite modificar el valor del caudal (en mL/min) del líquido de microalgas que entra en la columna de absorción. En otras palabras, este parámetro se conoce como “L”.

Por otro lado, el controlador de flujo másico, “CFM” o “GFC”, permite modificar el valor del caudal (en mL/min) del biogás que entra en la columna de absorción. Este parámetro se conoce como “G”.

De este modo, el investigador podrá modificar el valor de L para conseguir la mejor relación de L/G.

4.4.3. Implementación de la lógica de programa

En el capítulo 2.3, con el método de las microalgas-bacterias, la eliminación de los contaminantes se puede resumir mediante el siguiente diagrama:

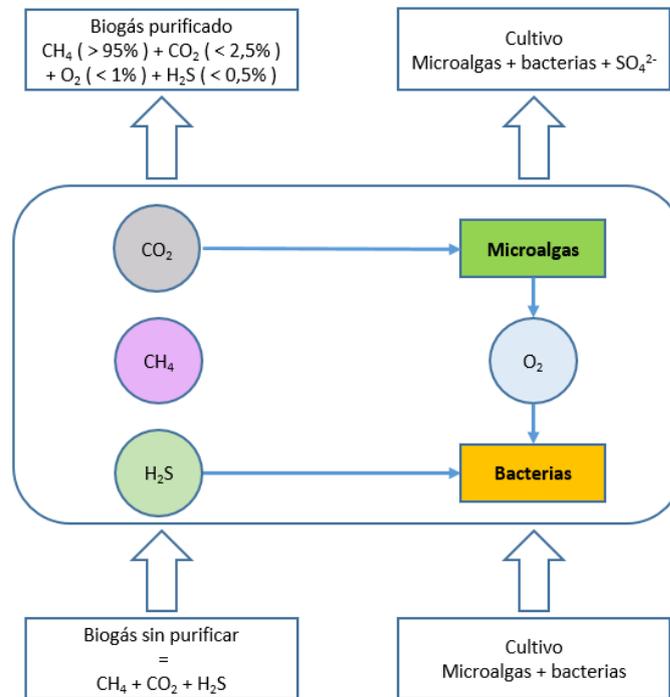


Figura 49: Diagrama de purificación de biogás en la columna de absorción

Experimentalmente se ha comprobado que las microalgas consumirán gran parte del dióxido de carbono y producirá oxígeno en este proceso. Las bacterias consumirán el sulfuro de hidrógeno y, para este proceso, necesitarán el oxígeno que ha producido las microalgas.

A la salida de la columna de absorción tendremos:

CH_4 – Gran parte de la composición del biogás enriquecido con metano

CO_2 – El dióxido de carbono que no ha podido consumir las bacterias

O_2 – El oxígeno que ha producido las microalgas y que las bacterias no han podido consumir.

H_2S – El sulfuro de hidrógeno que no ha podido consumir

La relación de líquido de cultivo y biogás (L / G) en la columna de absorción de biogás representa un parámetro operativo importante que puede usarse como una variable manipulada para mantener el contenido de CO_2 y O_2 del



biogás que cumple con los requisitos de la mayoría de las regulaciones internacionales ($\leq 2.5\%$ y $\leq 1.0\%$, respectivamente). En este sentido, un aumento del flujo de gas reduce la transferencia de masa entre la fase líquida y la fase gaseosa debido al menor tiempo de residencia del gas como a la coalescencia de la burbuja. Por el contrario, un aumento en la velocidad de flujo del líquido implica una mayor absorción de gas en la fase líquida debido a la mayor área de contacto.

La cantidad de oxígeno en el biogás purificado tendrá mucho impacto ya que su presencia en altas cantidades puede resultar explosivo por lo que es importante mantenerlo a unos niveles bajos.

El sistema intentará alcanzar la mejor depuración de biogás a partir de un control basado en reglas mediante la variación del parámetro L/G. Dicho control consiste en un conjunto de valores de L/G en función los principales contaminantes del biogás, es decir CO_2 y O_2 , en % de vol.

Para poder describir las reglas, se han definido las siguientes expresiones:

- v_{CO_2} = Valor de CO_2 en % vol. proporcionado por el analizador de gases.
- v_{O_2} = Valor de O_2 en % vol. proporcionado por el analizador de gases.
- sp_{CO_2} = Valor de CO_2 en % vol. deseado por el investigador. Fijado a 2,5%
- sp_{O_2} = valor de O_2 en % vol deseado por el investigador. Fijado a 1%
- $e_{\text{CO}_2} = v_{\text{CO}_2} - sp_{\text{CO}_2}$ = Error de CO_2
- $e_{\text{O}_2} = v_{\text{O}_2} - sp_{\text{O}_2}$ = Error de O_2

Las reglas del sistema de control se han declarado de la siguiente forma:

- Regla 1: Si $e_{\text{CO}_2} < 0$ y $e_{\text{O}_2} < 0$, entonces disminuimos el caudal de la bomba peristáltica. Las concentraciones de los contaminantes están por debajo del setpoint por lo que se reduce el caudal para ahorrar energía.
- Regla 2: Si $e_{\text{CO}_2} < 0$ y $e_{\text{O}_2} > 0$, entonces disminuimos el de la bomba peristáltica. La concentración de O_2 es alta por lo que se reduce el caudal para disminuir su concentración.
- Regla 3: Si $e_{\text{CO}_2} > 0$ y $e_{\text{O}_2} < 0$, entonces aumentamos el caudal de la bomba peristáltica. La cantidad de O_2 es menor que el setpoint



por lo que aumentaremos el caudal para disminuir la concentración de CO₂.

- Regla 4: Si $e_{CO_2} > 0$ y $e_{O_2} > 0$, entonces disminuimos el caudal de la bomba peristáltica. La concentración de O₂ es alta por lo que se reduce el caudal por razones de seguridad, aunque la cantidad de CO₂ sea alta.

Las reglas 2 y 4 se pueden agrupar en una sola regla en el momento de escribir el código de que rige el control.

Para las pruebas en la que se requiera sistema controlado se hará uso del modo “automático” donde se ha implementado las reglas anteriores. El uso del modo “manual” se efectuará para los ensayos que se realicen sin las reglas de control y poder comparar los resultados frente al sistema controlado. En la Figura 50 se muestra el diagrama de flujo de la lógica del programa.

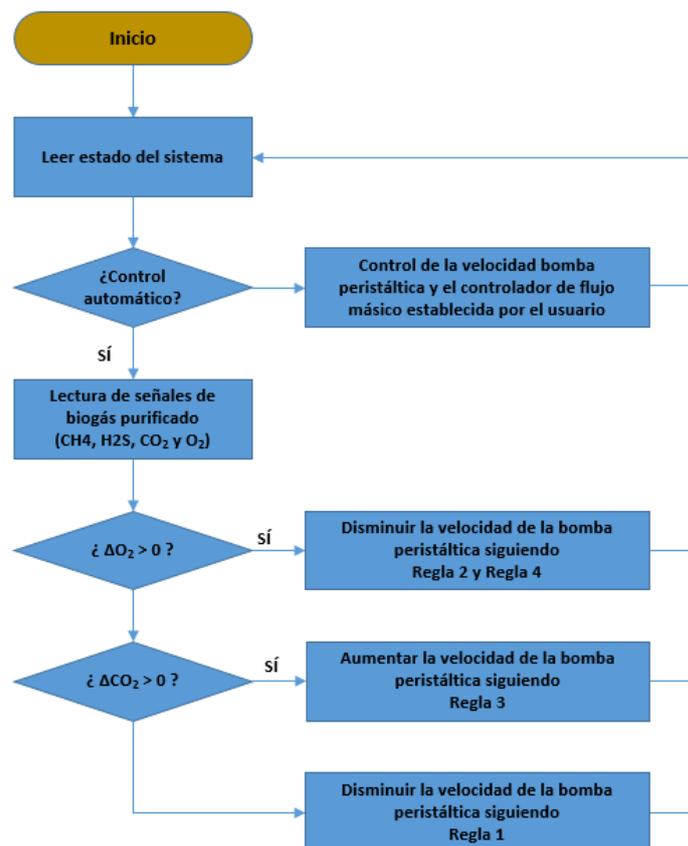


Figura 50: Diagrama de flujo de la lógica de programa del banco de ensayos.



4.5. Respuesta escalón del sistema de control del banco de ensayos [13]

Con el fin de comprobar la efectividad y la robustez del sistema de control, se ha propuesto tres ensayos donde tendremos perturbaciones en el caudal de biogás:

1. Ensayo 1: Variación de 4 horas del caudal de gas de 60 a 150 mL/min y nuevamente a 60 mL/min para probar la respuesta del sistema en el caso variaciones grandes de caudal de biogás.
2. Ensayo 2: Variación similar de caudal de gas, pero con una duración de 12 horas para garantizar que el sistema de control pueda mantener el estado estable.
3. Ensayo 3: Variación de caudal de gas con incrementos graduales de 10 mL/min cada dos horas de 60 a 120 mL/min en las primeras 12 horas y luego disminuciones graduales a 60 mL/min en las siguientes 12 horas. Este perfil se corresponde a una simulación de producción real de biogás.

La acción de control se verá influenciada por la capacidad de la bolsa Tedlar donde se acumulará el gas que va a medir el analizador de gases ya que esta requiere de un volumen mínimo para poder realizar las medidas. Teniendo en cuenta esto, la actuación del control se realiza cada hora para los ensayos 1 y 2 mientras que para el ensayo 3 se realiza cada 2 horas.

Para el control basado en reglas, se ha propuesto el uso de la tubería 1 para la bomba peristáltica de tal manera que nos proporciona 0,7 mL/min por cada porcentaje de potencia de la bomba. Dichos valores se resumen en la siguiente tabla:

Regla	e_O2	e_CO2	Potencia de bomba (%)	Caudal de bomba (mL/min)	
Regla 1	<= 1	[-2,5 ; -1]	-7,5	-1,8	
		(-1 ; -0,5]	-5	-3,6	
		(-0,5 ; 0]	-2,5	-5,4	
Regla 3		(0 ; 0,5]	15	10,7	
		(0,5 ; 1]	20	14,3	
		(1 ; 5]	35	17,9	
		(5 ; 10]	30	21,5	
Reglas 2 y 4		>1	> 10	40	28,6
			[0 ; 0,5]	-15	-10,7
			(0,5 ; 1]	-20	-14,3
	(1 ; 5]		-25	-17,9	
		>5	-30	-21,5	

Tabla 12: Valores de caudal de la bomba peristáltica para la tubería 1.



Todos los ensayos se realizarán sin control para poder comparar los resultados del sistema con el control basado en reglas. Los ensayos sin control se implementarán con un caudal constante de 29 mL/min mientras que los ensayos con control, el caudal inicial será de 29 mL/min.

Los ensayos se han realizado a temperatura ambiente (20°C), con pH igual a 10 y el índice de concentración de carbono inorgánico entre 2500 y 3000 mg/L.

4.5.1. Resultados Ensayo 1

Los resultados del ensayo 1 se muestran a continuación:

Evolución temporal de CO₂

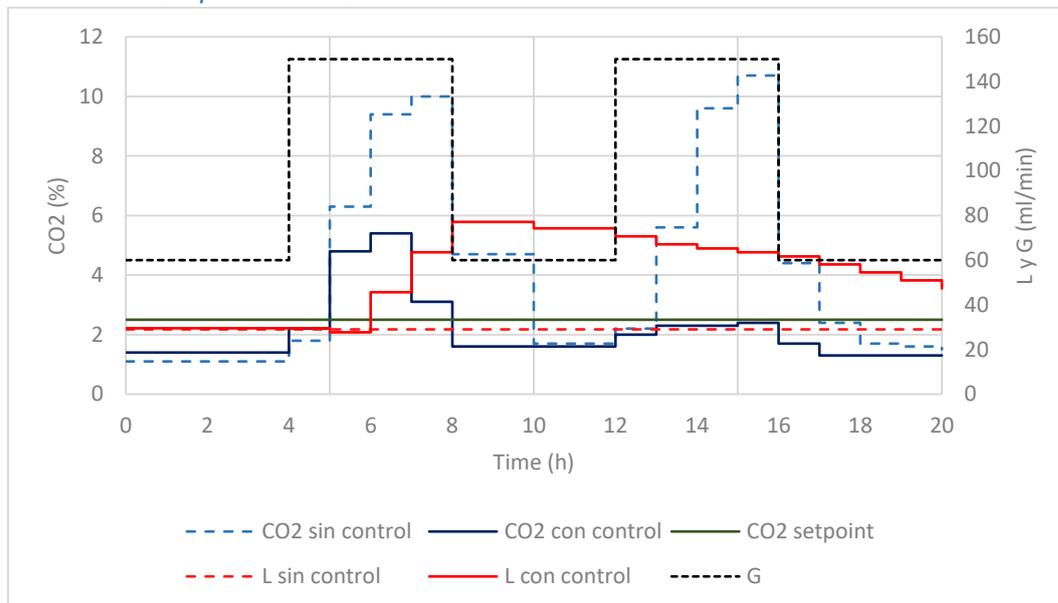


Figura 51: Evolución temporal de CO₂ sin control vs con control basado en reglas para el ensayo 1

En la evolución temporal de CO₂, para el sistema sin control, observamos lo siguiente:

El escalón de 60 a 150 mL/min de gas (curva “G” en Figura 51) tiene un gran impacto ya que la concentración de CO₂ (curva “CO₂ sin control” en Figura 51) aumenta hasta un máximo de 10,0% en el primer escalón y 10,7% en el segundo escalón

En los caudales de gas de 60 mL/min obtenemos un L/G de 0,5 y en caudales de 150 mL/min se reduce de 0,2. Esta reducción impacta negativamente en la transferencia de CO₂ y H₂S del gas al líquido debido a la



acidificación (reducción de pH) del líquido de microalgas y por la propia saturación de concentración de CO₂ y H₂S ya que el líquido recircula (ver Figura 6).

En la evolución temporal de CO₂, para el sistema con control, observamos lo siguiente:

El primer escalón de 60 a 150 mL/min de gas (curva “G” en Figura 51) tiene un impacto menor que en el sistema sin control ya que la concentración de CO₂ (curva “CO₂ con control” en Figura 51) va aumentando hasta un máximo de 5,4%. Mientras esto ocurre, el caudal de líquido (curva “L con control” en Figura 51) va aumentando hasta conseguir una concentración de CO₂ menor al setpoint (regla 3) después de dos acciones de control.

En el segundo escalón, la concentración de CO₂ aumenta y el sistema consigue que la concentración se mantenga en valores menores al setpoint (curva CO₂ setpoint en Figura 51). Mientras tanto, el caudal de L va disminuyendo ya que nos encontramos ante valores inferiores al setpoint de CO₂ y de O₂ (curva “O₂ setpoint” Figura 51) (regla 1).

Durante todo el experimento, se ha registrado un L/G máximo de 1,28, correspondiente a un caudal de 77 mL/min de líquido (curva “L control” en Figura 51) y 60 mL/min de gas lo que se traduce en un aumento considerado en los esfuerzos de control para disminuir la concentración de CO₂. La evolución completa de L/G se puede observar en la Figura 52.

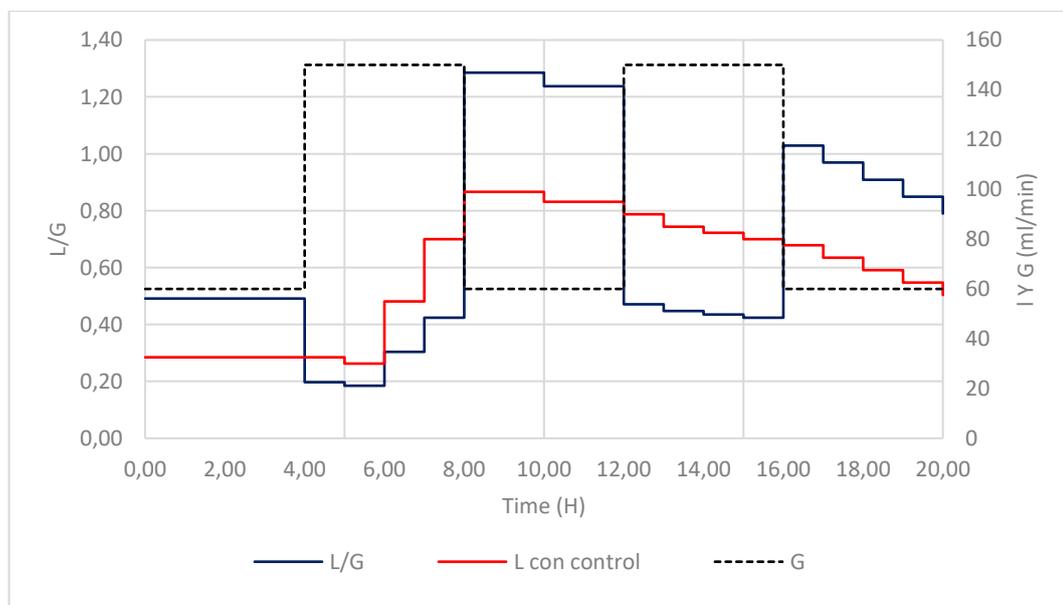


Figura 52: Evolución temporal de L/G en el sistema con control para el ensayo 1



Evolución temporal de H₂S

Para el sistema sin control, se observa que la concentración de H₂S (curva “H₂S sin control” en Figura 53) tiene un comportamiento similar que en el caso de CO₂ sin control con un máximo de 393 ppm en el primer salto y 414 ppm en el segundo salto.

Para el sistema con control, se registran valores máximos de 8 ppm de H₂S (curva “H₂S con control” en Figura 53) en el primer escalón y luego se reduce esta cantidad a 0 ppm. De este modo, se puede comprobar que la reducción de concentraciones de H₂S es mucho más efectiva que en el CO₂

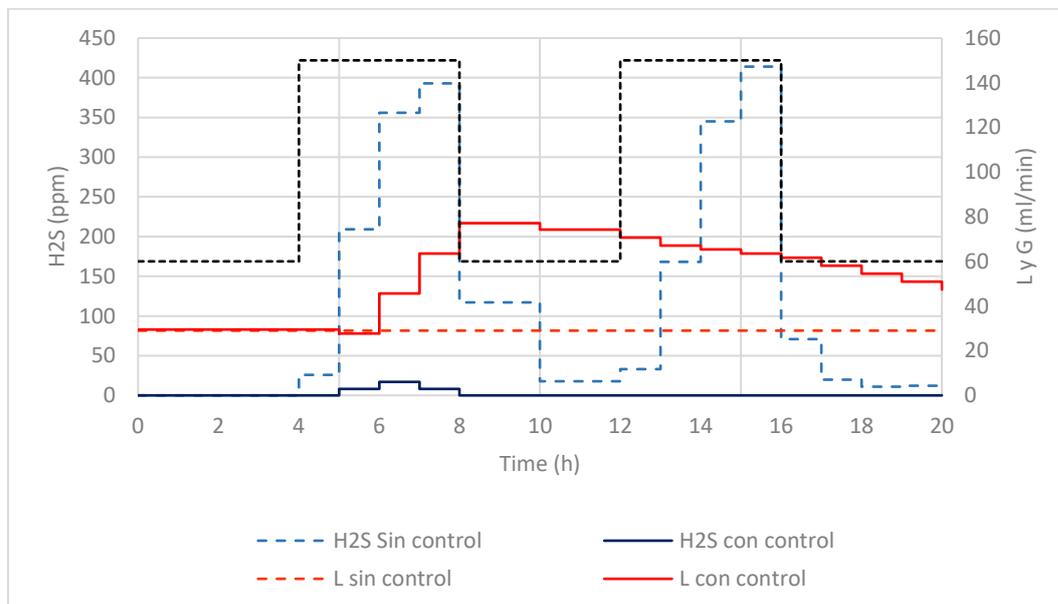


Figura 53: Evolución temporal de H₂S sin control vs con control basado en reglas para el ensayo 1

Evolución temporal de O₂

En el caso de la evolución de la concentración de O₂, siempre se mantiene por debajo del setpoint deseado (1%) tanto para el sistema sin control como en con control.

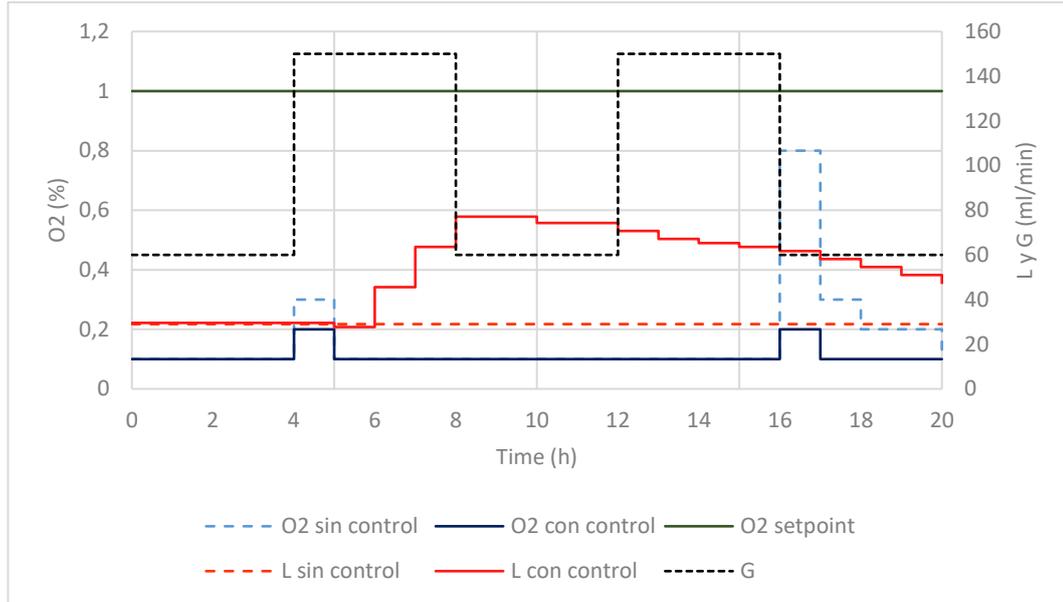


Figura 54: Evolución temporal de O₂ sin control vs con control basado en reglas para el ensayo 1

Evolución temporal de CH₄

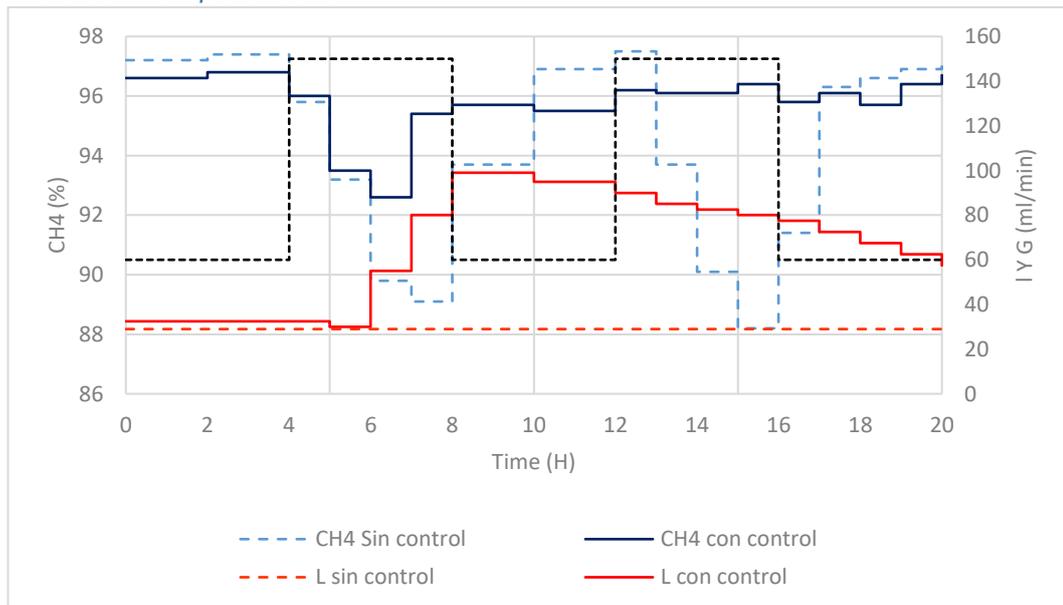


Figura 55: Evolución temporal de CH₄ sin control vs con control basado en reglas para el ensayo 1

Para el sistema sin control, en el primer salto, tenemos una concentración mínima de CH₄ (curva “CH₄ sin control” en Figura 55) de 89,1 % mientras que en el segundo salto tenemos un mínimo de 88,4%. La calidad de biometano tiene una tendencia hacia abajo con cada salto debido al impacto que tiene la reducción de pH en el líquido.

Para el sistema con control, en el primer salto obtenemos una concentración mínima de CH₄ (curva “CH₄ con control” en Figura 55) mínimo de 92,6% mientras que en el segundo salto obtenemos una concentración mayores de 95%.

La tendencia a la mejora en purificación del biogás se ve enormemente impactado con la introducción del control basado en reglas. Con este ensayo se demuestra una buena respuesta del sistema del control frente a variaciones bruscas del caudal de gas.

4.5.2. Resultados Ensayo 2

Los resultados del ensayo 2 se muestran a continuación:

Evolución temporal de CO₂

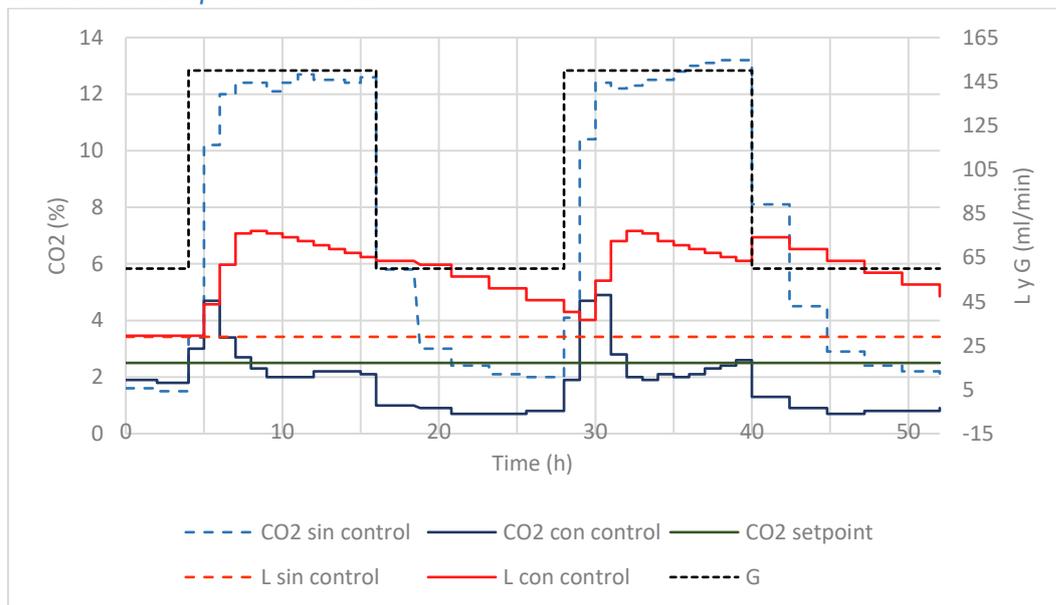


Figura 56: Evolución temporal de CO₂ sin control vs con control basado en reglas para el ensayo 2

En la evolución temporal de CO₂, para el sistema sin control, observamos lo siguiente:

El escalón de 60 a 150 mL/min de gas tiene un gran impacto ya que la concentración de gas (curva “CO₂ sin control” en Figura 56) aumenta hasta 12,5% en el primer escalón y 13,2% en el segundo escalón.

En el primer escalón, la concentración de CO₂ (curva “CO₂ con control” en Figura 56) se mantiene casi constante después de 4~5 horas de haberse realizado el salto. En el segundo escalón la concentración de CO₂ tiene una baja tendencia a aumentar.



Para el sistema con control, observamos lo siguiente:

En el primer escalón de 60 a 150 mL/min, la concentración de CO₂ (curva “CO₂ con control” en Figura 56) aumenta hasta un máximo de 4,7%. Mientras esto ocurre, el caudal de líquido (curva “L con control” en Figura 56) va aumentando hasta que, después de dos acciones de control, la concentración de CO₂ empieza a reducirse (regla 3). Es necesario otras dos acciones de control adicionales para poder reducir la concentración por debajo del setpoint y mantenerlo (regla 1).

En el segundo escalón, ocurre algo similar con el primer escalón a diferencia que se tarda 3 acciones de control en empezar a reducir la concentración de CO₂ y una acción de control más en reducir dicha concentración por debajo del valor del setpoint (regla 3) y mantenerlo (regla 1).

Los rangos de L/G para este test se parecen bastante a los que se han observado en el test 1. En ambos escalones de 150 mL/min, se ha registrado un L/G máximo de 0,51, con L igual a 76,04 mL/min. En el primer periodo donde G se reduce a 60 mL/min, se ha registrado un L/G de 1,06 mientras que, en el segundo periodo, un L/G de 1,24. La evolución completa de L/G se puede observar en la Figura 57.

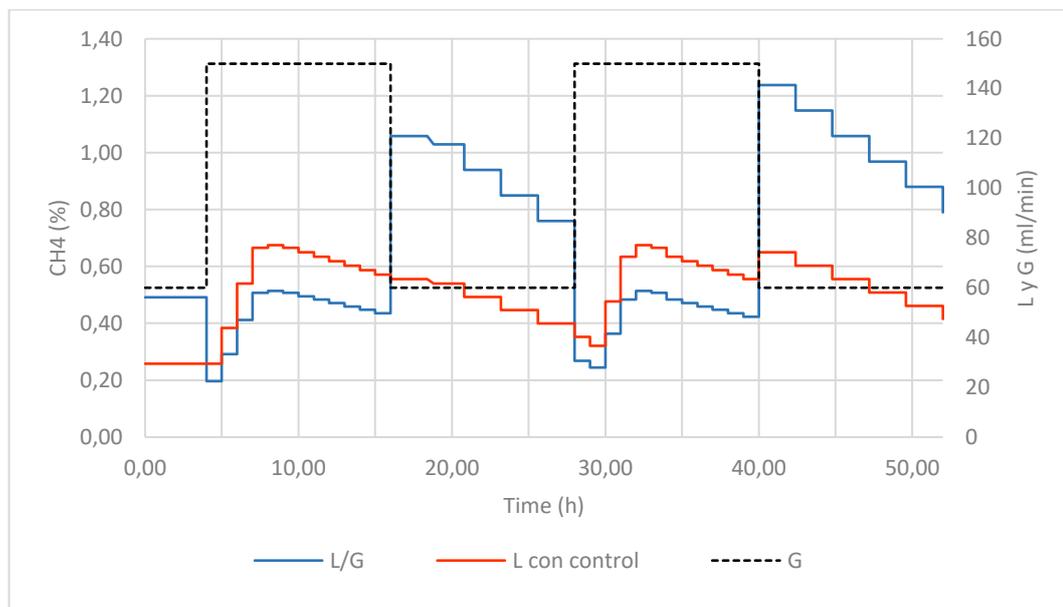


Figura 57: Evolución temporal de L/G en el sistema con control para el ensayo 2

Evolución temporal de H₂S

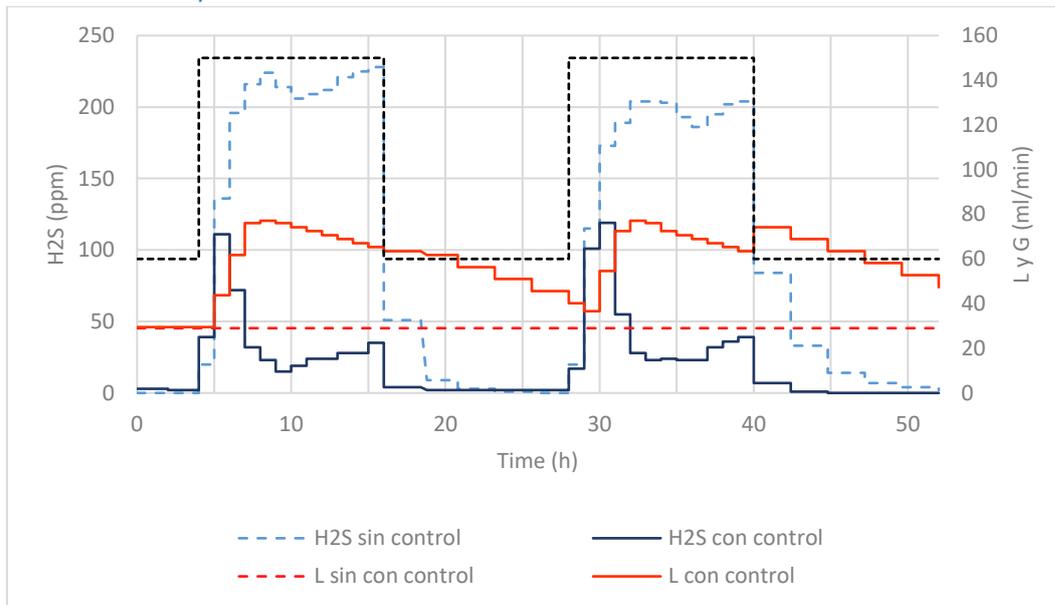


Figura 58: Evolución temporal de H₂S sin control vs con control basado en reglas para el ensayo 2

En el caso del sistema sin control, tenemos una cantidad máxima de H₂S (curva “H₂S sin control” en Figura 58) de 150 ppm para el primer escalón y 204 ppm para el segundo escalón. Estos valores son más bajos que en el primer ensayo. La reducción de H₂S se podría deber a otros factores como el aumento del oxígeno disuelto en el líquido de cultivo lo que promovería su consumo por parte de las bacterias cuando el líquido vuelve a recircular a la columna de absorción.

En el caso del sistema con control, la concentración de H₂S (curva “H₂S con control” en Figura 58) se alcanza un máximo de 111 ppm en el primer escalón y 120 ppm. Después de los dos picos, se obtiene una buena limpieza de H₂S tras la actuación de control.

Evolución temporal de O₂

Al igual que en el test 1, la cantidad de O₂ se mantiene por debajo del setpoint tanto para el sistema sin control como con control.

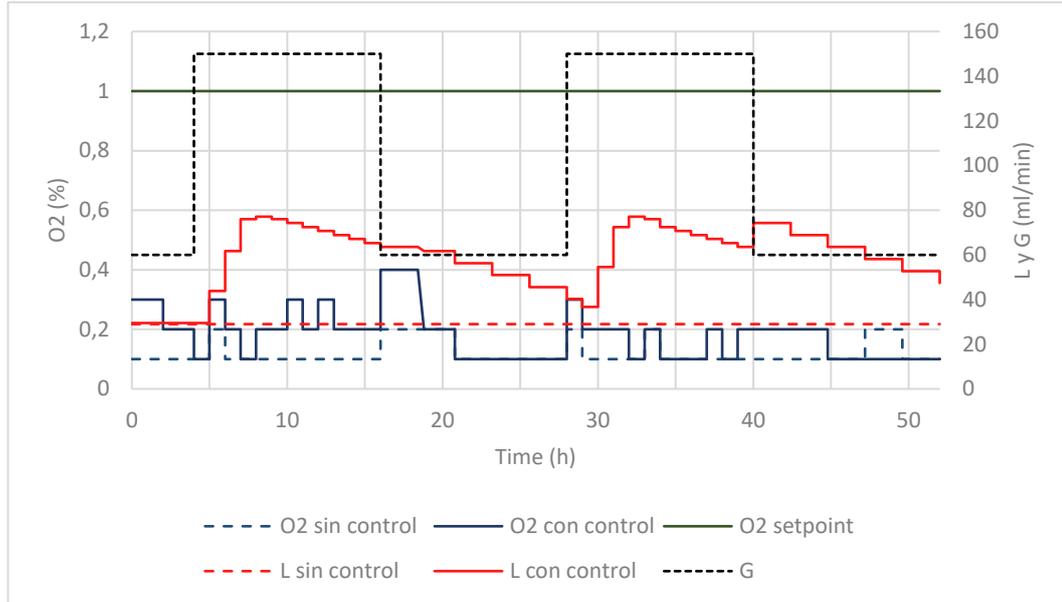


Figura 59: Evolución temporal de O2 sin control vs con control basado en reglas para el ensayo 2

Evolución temporal de CH4

Para el sistema con control, se ha conseguido una cantidad mínima de 93,4 % de CH4. Después de tres acciones de control, la concentración de CH4 (curva “CH4 con control” en Figura 60) estabiliza y podemos conseguir una mejor calidad de biogás con una concentración superior al 95% de CH4.

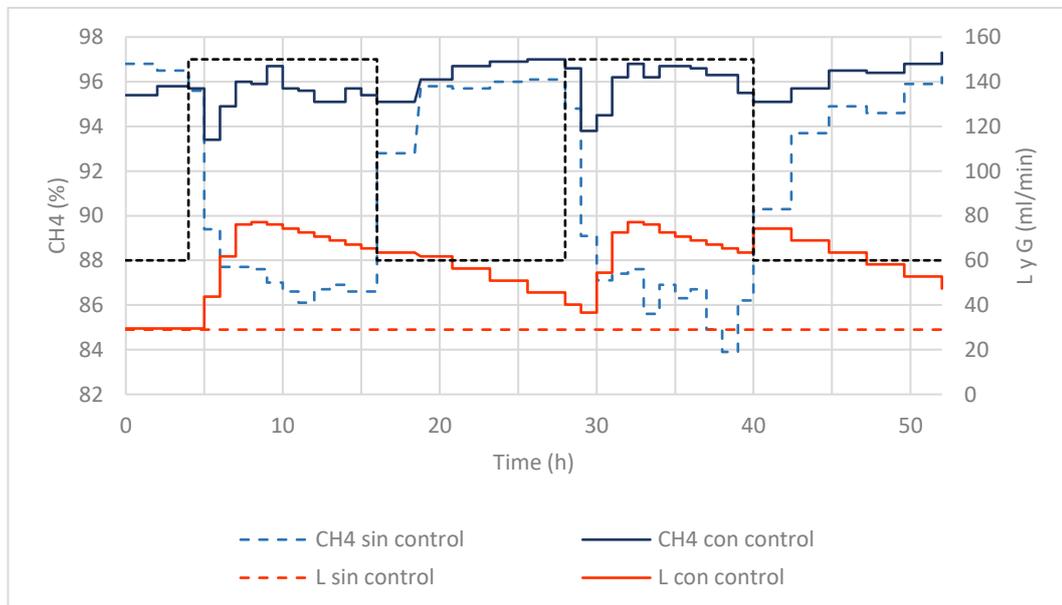


Figura 60: Evolución temporal de CH4 sin control vs con control basado en reglas para el ensayo 2



Se puede observar que conseguimos reducir la cantidad de CO₂ y O₂ con los estándares internacionales (CO₂ < 2,5% y O₂ < 1%) además de obtener la mejor calidad de biogás (CH₄ > 95%).

Con este ensayo podemos confirmar que la implementación del control basado en reglas nos permite conseguir una respuesta más rápida, precisa y estable que el sistema sin control.

4.5.3. Resultados Ensayo 3

Los resultados del ensayo 3 se muestran a continuación:

Evolución temporal de CO₂

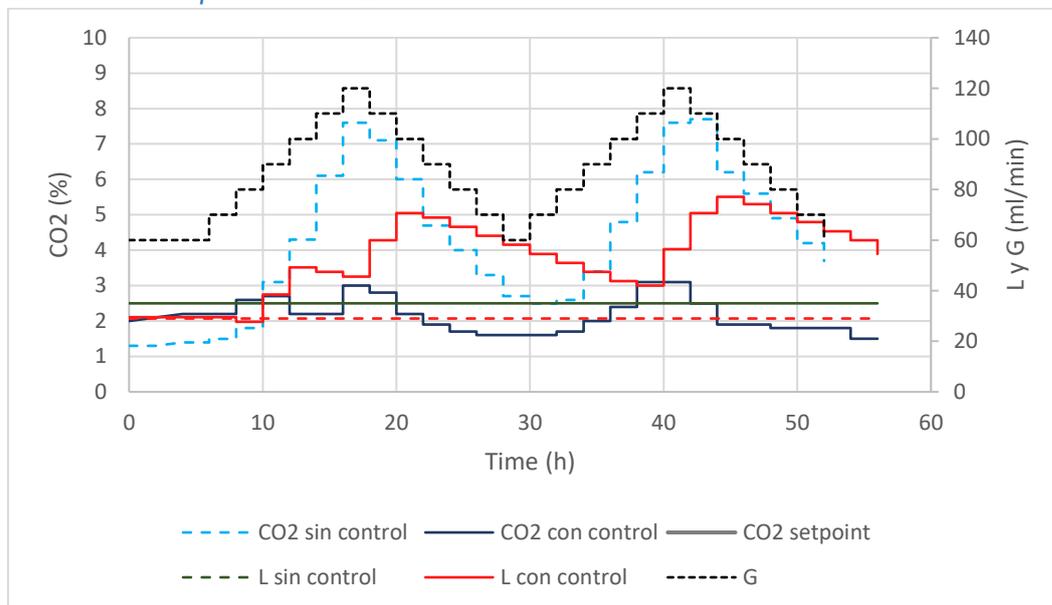


Figura 61: Evolución temporal de CO₂ sin control vs con control basado en reglas para el ensayo 3

En la evolución temporal de CO₂, para el sistema sin control, observamos lo siguiente:

En el escalón 60 a 120 mL/min (curva “G” en Figura 61), se observa que la concentración de CO₂ (curva “CO₂ sin control” en Figura 61) va aumentando progresivamente hasta superar el setpoint (curva “CO₂ setpoint” en Figura 61) llegando a alcanzar un máximo de 7,8%, para un flujo de 90 mL/min de gas (con L/G igual a 0,33) y luego la concentración no consigue llegar a valores por debajo setpoint hasta el final de la prueba.

En la evolución temporal de CO₂, para el sistema con control, observamos lo siguiente:



Tenemos tres picos de concentración de CO₂ (curva “CO₂ con control” en Figura 61), dos en el primer salto con valor 2,7% y 3% y uno en el segundo salto con valor 3,1%. Se observa que el caudal de L aumenta cuando concentración de CO₂ superan el setpoint (regla 1) para intentar reducir su concentración. Cuando ya se consigue reducir la concentración por debajo del setpoint, el caudal de líquido se reducirá según la regla 3. La evolución de L/G se muestra en Figura 62.

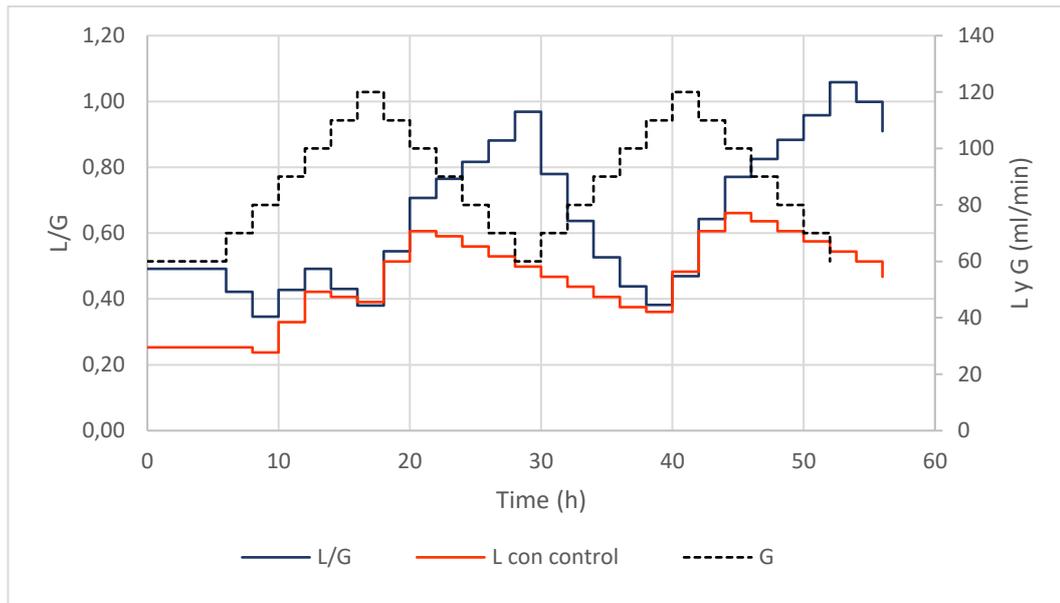


Figura 62: Evolución temporal de L/G en el sistema con control para el ensayo 3

Evolución temporal de H₂S

En la evolución temporal de H₂S, para el sistema sin control, observamos lo siguiente:

Se observa un pico máximo de 280 ppm de H₂S cuando la variación de caudal llega por primera vez a 120 mL/min. En la segunda vez, se observa un pico de 256 ppm de H₂s.

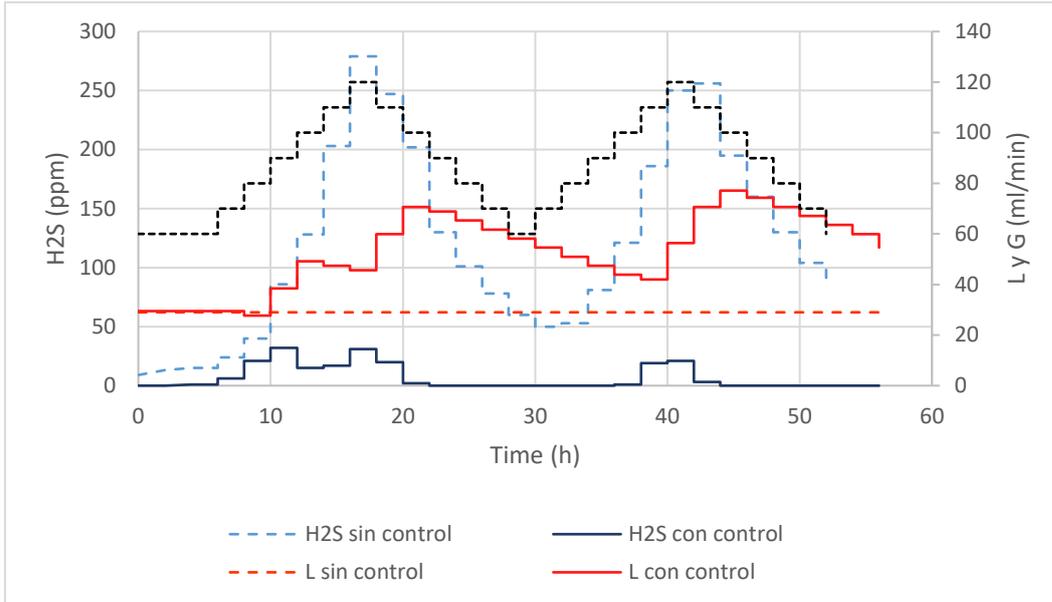


Figura 63: Evolución temporal de H₂S sin control vs con control basado en reglas para el ensayo 3

En la evolución temporal de H₂S, para el sistema sin control, observamos lo siguiente:

Durante el primer escalón, se observa una subida en la concentración de H₂S hasta un máximo de 32 ppm que se verán reducidas debido a las acciones de control. Una vez supero esto, la concentración de H₂S se reduce hasta cero. Durante el segundo escalón la concentración aumenta hasta 21 ppm de H₂S y luego se ve reducida hasta cero por las acciones de control.

Evolución temporal de O₂

Tanto para el ensayo sin control como el ensayo con control, se observa que la concentración de O₂ es inferior al setpoint.

También se observa algunas variaciones debido a un posible aumento de oxígeno disuelto en el líquido ya que esta retorna al HRAP para su recirculación por la columna de absorción.

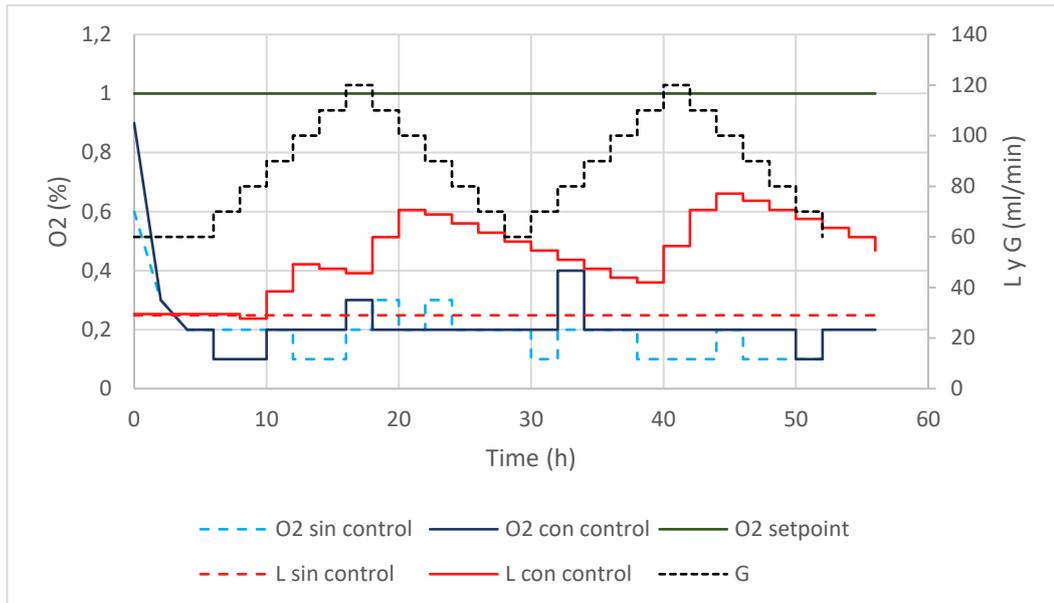


Figura 64: Evolución temporal de O2 sin control vs con control basado en reglas para el ensayo 3

Evolución temporal de CH4

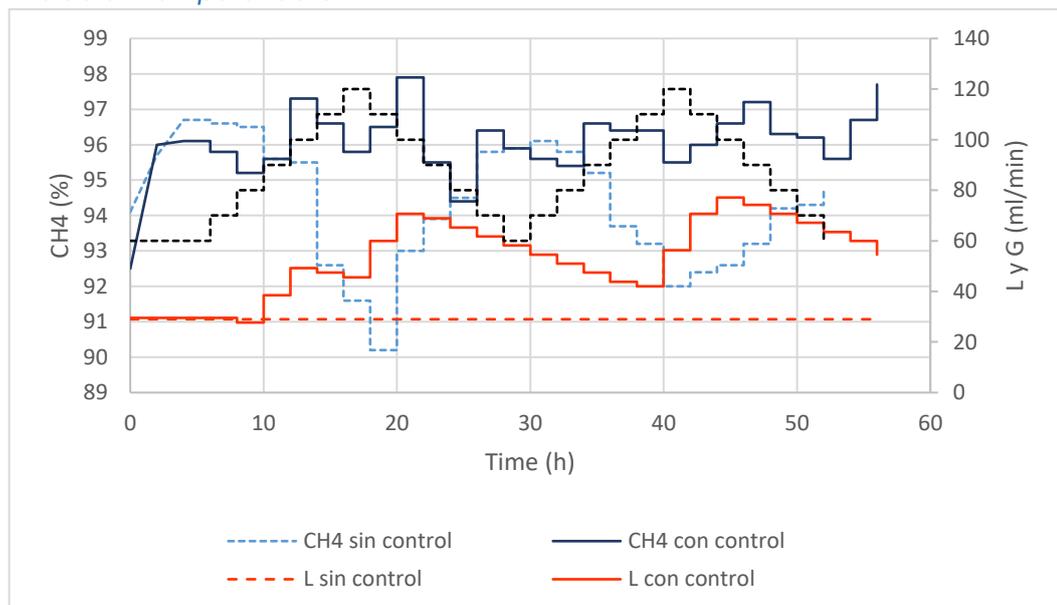


Figura 65: Evolución temporal de CH4 sin control vs con control basado en reglas para el ensayo 3

Para el sistema sin control se puede llegar a conseguir un mínimo de 90,2% de CH4. Solo en algunas etapas se puede llegar a conseguir una concentración mayor de 95%.



Para el sistema con control, se consigue una cantidad mayor de 94% de CH₄ durante todo el periodo del ensayo.

Con este ensayo se demuestra que el sistema tiene buena respuesta ante variaciones de caudal de gas cuyo perfil se aproxima a una producción real de biogás.

4.6. Validación del sistema de control del banco de ensayos frente a variaciones de caudal de biogás bajo diferentes condiciones [13]

El investigador realizará ensayos de validación del sistema de control frente a algunos parámetros clave que influyen o pueden influir en la absorción de CO₂ y H₂S:

- Ensayos de concentraciones de carbón inorgánico (IC) (1500, 500 y 100 mg/L) en el cultivo de microalgas-bacterias.
- Ensayos de concentración de pH (10 y 8,5) en el cultivo de microalgas-bacterias.
- Ensayos de temperatura (15 °C y 35 °C) en la columna de absorción.

Para la validación del sistema, se ha propuesto el uso de la tubería 2 para la bomba peristáltica de tal manera que nos proporciona 2,8 mL/min por cada porcentaje de potencia de la bomba, es decir, más caudal de L que en los ensayos anteriores. Dichos valores se resumen en la siguiente tabla:

Reglas	e_O ₂	e_CO ₂	Potencia de bomba (%)	Caudal de bomba (mL/min)	
Regla 1	<= 1	[-2,5 ; -1]	-2,5	-7,0	
		(-1 ; -0,5]	-2,5	-7,0	
		(-0,5 ; 0]	0,0	0,0	
Regla 3		(0 ; 0,5]	2,5	7,0	
		(0,5 ; 1]	5,0	14,0	
		(1 ; 5]	7,5	20,9	
		(5 ; 10]	10	27,9	
Reglas 2 y 4		>1	> 10	12,5	34,9
			[0 ; 0,5]	-2,5	-7,0
			(0,5 ; 1]	-5	-14,0
	(1 ; 5]		-7,5	-20,9	
		>5	-10	-27,9	

Tabla 13: Valores de caudal del control basado en reglas para la respuesta escalón del sistema de control



Para todos los ensayos de validación, la variación de caudal de gas se realizará como el ensayo 3, es decir, variaciones de caudal gas con incrementos graduales de 10 mL/min cada dos horas de 60 a 120 mL/min en las primeras 12 horas y luego disminuciones graduales a 60 mL/min en las siguientes 12 horas.

4.6.1. Ensayos de validación con distintas concentraciones de carbono inorgánico (IC)

La concentración de carbono inorgánico, o alcalinidad, en el líquido de cultivo es un parámetro clave en la eliminación de CO₂ y H₂S en los sistemas de microalgas bacterias. Una alta alcalinidad da como resultado una alta capacidad tampón, es decir, la capacidad que tiene un medio amortiguar los cambios de pH. Debido a la transferencia de CO₂ y H₂S a medio acuoso, el pH tiende a bajar (más ácido) y con un IC adecuado, podemos amortiguar este efecto.

Aguas residuales provenientes del sector agroindustrial [14] pueden ser usado para alimentar el HRAP y conseguir aumentar el IC, ya que contiene altas concentraciones de carbono industrial próximo s a 1500 mg/L.

Sin embargo, la propia lluvia o la falta de adición de carbono inorgánico a nuestro sistema puede ocasionar una reducción de la concentración de IC a 500 mg/L o incluso hacer uso de aguas residuales urbanas con IC a 100 mg/L que sería la alternativa bastante común. En estos casos, podría ocurrir una disminución en la eficiencia de reducción de CO₂ y H₂S del biometano. Por ello, se realizará la validación bajo distintas condiciones de alcalinidad.

Evolución temporal de CO₂

La evolución temporal de CO₂, para IC 1500, IC 500 y IC 100 con pH 10, se muestra a continuación:

Para el sistema sin control, se observa claramente que la absorción de CO₂ disminuye en cuanto disminuye el carbono inorgánico del líquido de cultivo.

Se ha registrado máximas de concentración de CO₂ de 13,4, 18,8 y 19,6% para IC 1500 (curva “CO₂ sin control para IC 1500” en Figura 66), IC 500 (curva “CO₂ sin control para IC 500” en Figura 66) y IC 100 (curva “CO₂ sin control para IC 100” en Figura 66) respectivamente.

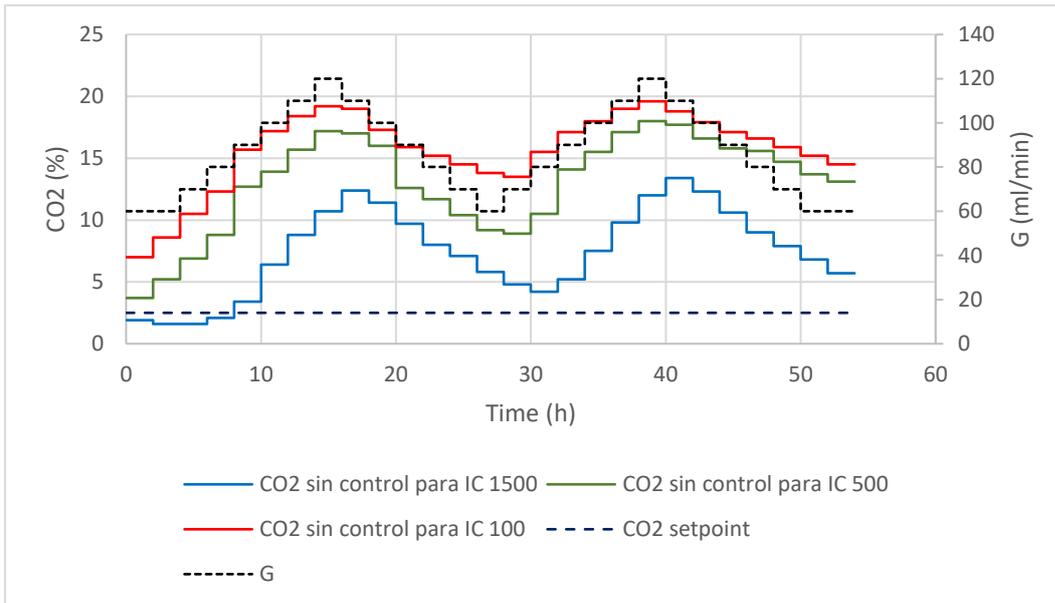


Figura 66: Evolución temporal de CO2 para ensayos de validación con distintas concentraciones de carbono inorgánico para el sistema sin control

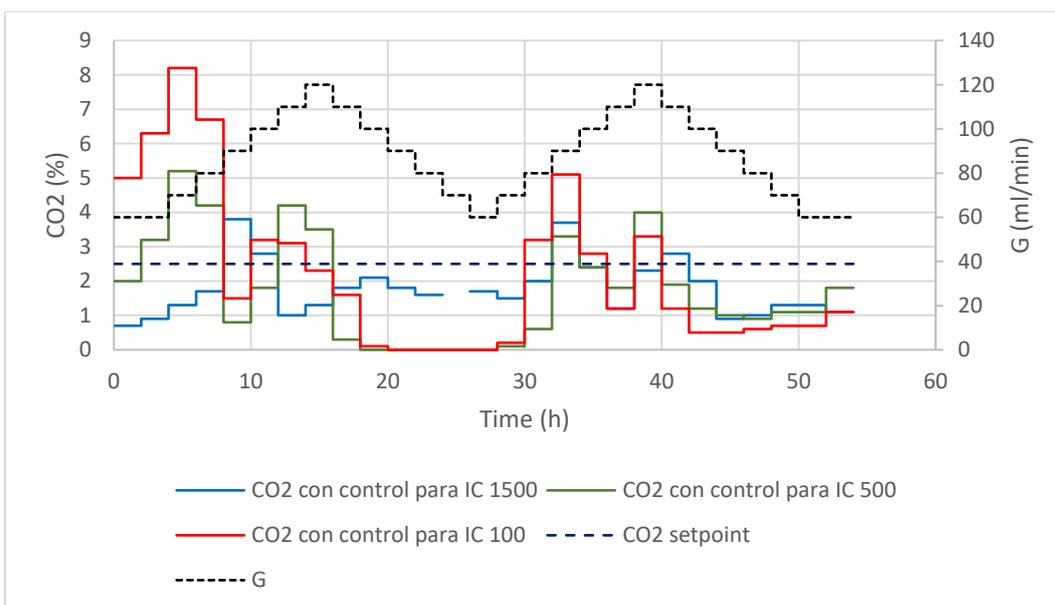


Figura 67: Evolución temporal de CO2 para ensayos de validación con distintas concentraciones de carbono inorgánico para el sistema con control

En el sistema controlado, el ensayo para IC 1500 muestra que existen tres picos de concentración de CO2 (curva “CO2 con control para IC 1500” en Figura 67), una de 3,8, 3,7 y 2,8. Las concentraciones se reducen por debajo del setpoint después de una o dos acciones de control.



Sin embargo, los picos de concentración son mayores para el ensayo de IC 500 (curva “CO₂ con control para IC 500” en Figura 67) con valores 5,2; 4,2; 3,3 y 4,0%. Las concentraciones se reducen por debajo del setpoint después de una o dos acciones de control.

Para el ensayo de IC 100, se registran los picos máximos de concentraciones de CO₂ (curva “CO₂ con control para IC 100” en Figura 67), con valores 8,2; 3,1; 5,1 y 3,3%. Las concentraciones se reducen después de dos o tres acciones de control.

Evolución temporal de H₂S

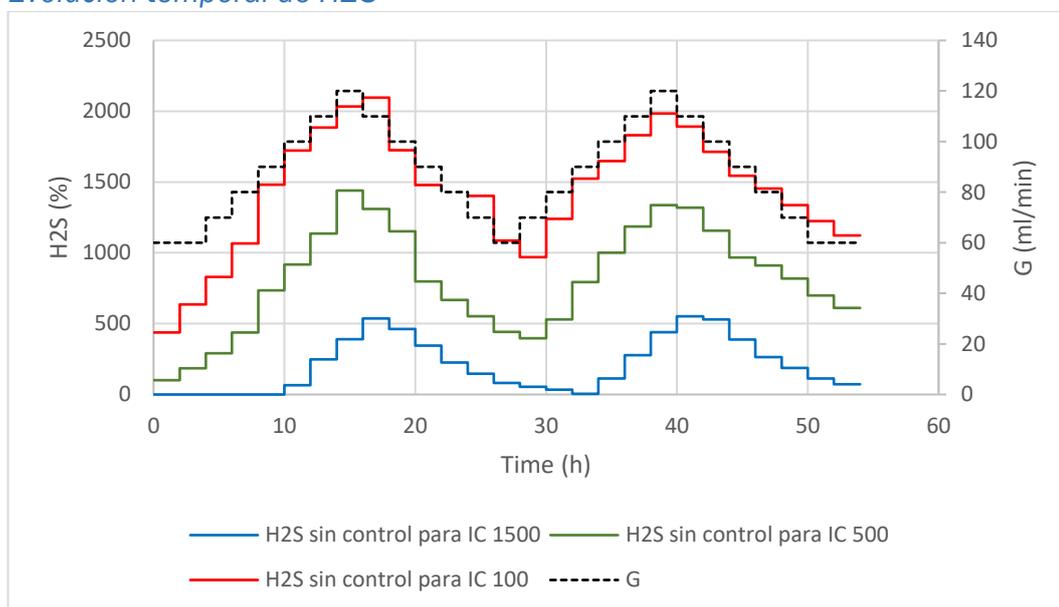


Figura 68: Evolución temporal de H₂S para ensayos de validación con distintas concentraciones de carbono inorgánico para el sistema sin control

Para el sistema sin control, se observa el mismo perfil que para el CO₂. Para el ensayo de IC 1500, la concentración de H₂S (curva “H₂S sin control para IC 1500” en Figura 68) lleva a valores máximos de 536 y 530 ppm.

Para el ensayo de IC 500, la concentración de H₂S (curva “H₂S sin control para IC 500” en Figura 68) lleva a valores máximos de 1440 y 1318 ppm.

Finalmente, para el ensayo de IC 100, la concentración de H₂S (curva “H₂S sin control para IC 100” en Figura 68) lleva a valores máximos de 2096 y 1984 ppm.

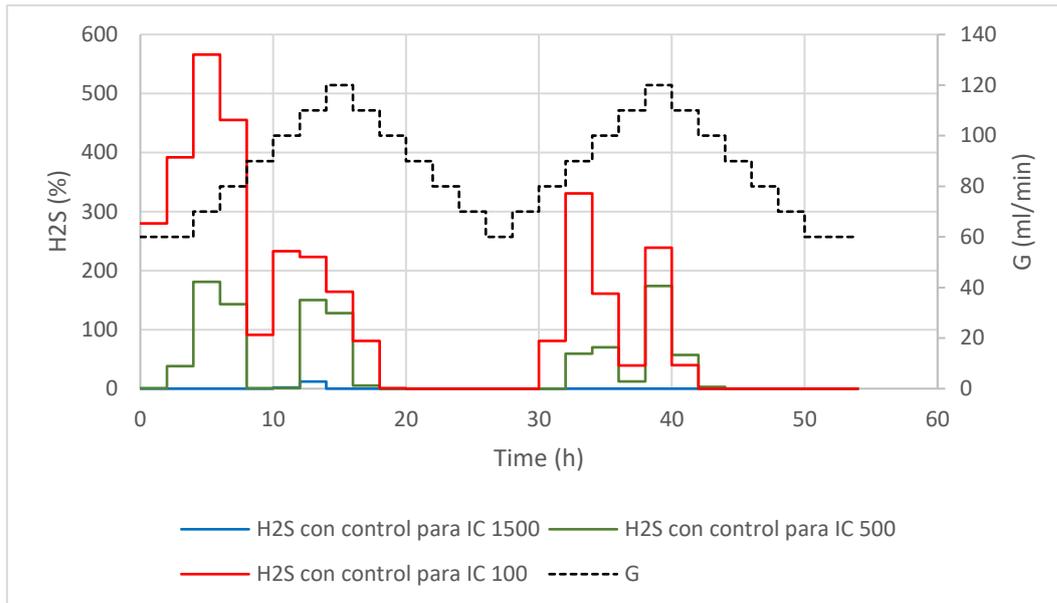


Figura 69: Evolución temporal de H₂S para ensayos de validación con distintas concentraciones de carbono inorgánico para el sistema con control

Para el sistema con control, se observa una mejora sustancial en la absorción de H₂S. Para el ensayo de IC 1500, la concentración de H₂S (curva “H₂S con control para IC 1500” en Figura 69) prácticamente se ve reducida en su totalidad.

Para el ensayo de IC 500, la concentración de H₂S (curva “H₂S con control para IC 500” en Figura 69) lleva a valores máximos de 181, 150 y 174 ppm.

Finalmente, para el ensayo de IC 100, la concentración de H₂S (curva “H₂S con control para IC 100” en Figura 69) lleva a valores máximos de 2096 y 1984 ppm.

Evolución temporal de O₂

Tanto para el sistema sin control como para el sistema con control se registran concentraciones de CO₂ por debajo del setpoint.

La tendencia en la concentración de O₂ para el caso de IC 1500 es más baja que en los ensayos de IC 500 e IC 100 en el caso de los sistemas controlados.

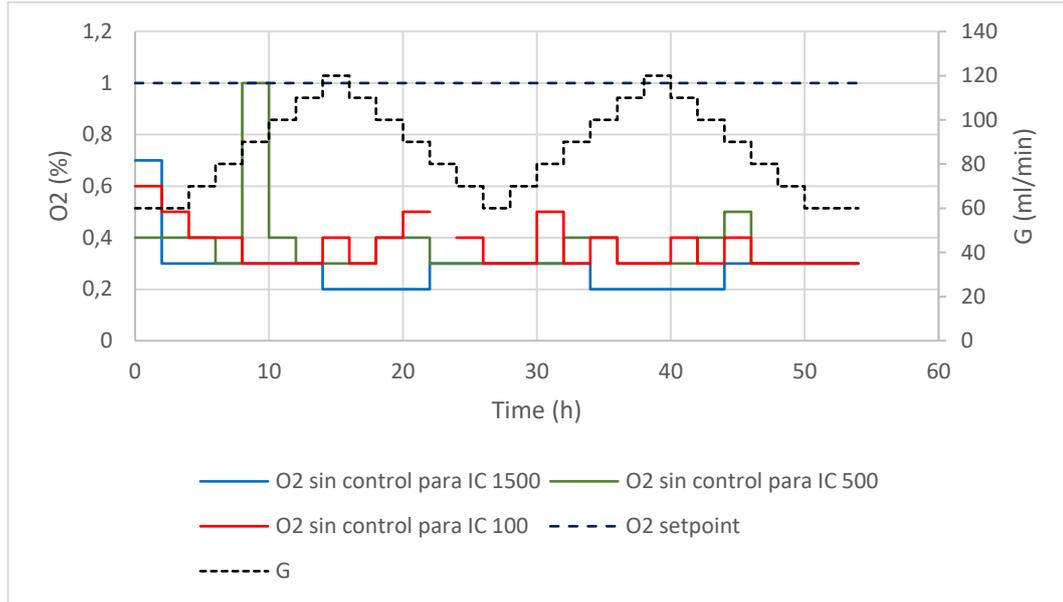


Figura 70: Evolución temporal de O₂ para ensayos de validación con distintas concentraciones de carbono inorgánico para el sistema sin control

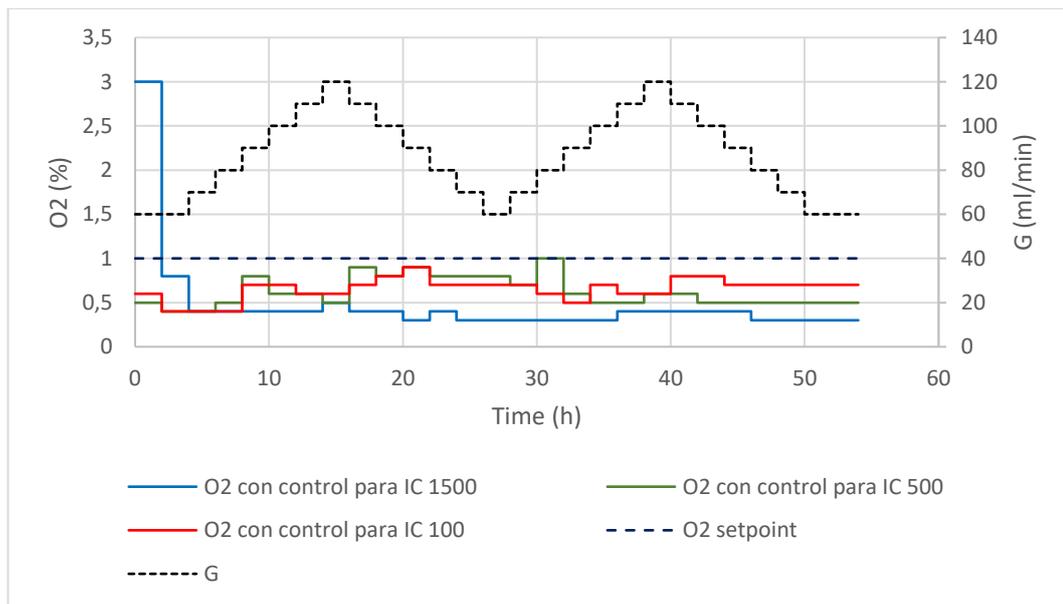


Figura 71: Evolución temporal de O₂ para ensayos de validación con distintas concentraciones de carbono inorgánico para el sistema con control

4.6.2. Ensayos de validación con distintos valores de pH

El pH tiene una gran influencia en la eliminación de CO₂ y H₂S debido al impacto en la solubilidad de los gases con valores de pH altos.

Las condiciones más óptimas de absorción de CO₂ y H₂S se realiza para para una alcalinidad de 1500 mg/L en la que se espera un pH alto (aproximadamente 10 pH). Se ha visto en ensayos anteriores que largos periodos de absorción de CO₂ y H₂S lleva a una acidificación del medio líquido, aunque se tenga una alcalinidad inicial óptima.

Para investigar los efectos del pH se ha propuesto la validación del sistema con pH 10 y pH 8,6.

Evolución temporal de CO₂

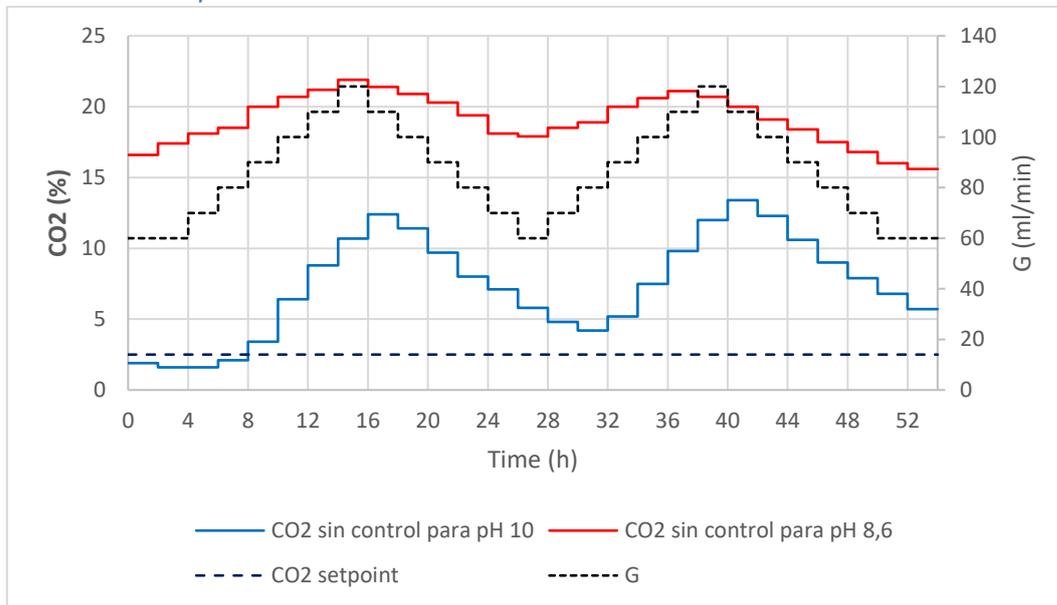


Figura 72: Evolución temporal de CO₂ para ensayos de con distintas concentraciones de carbono inorgánico para el sistema con control

Para el ensayo sin control se observa que la absorción de CO₂ es mucho más baja para pH 10 que para pH 8,6. Para pH 10 se registra máximas concentraciones de 21,9 y 20,6% de CO₂ mientras que para pH 8,6, máximas de 12,4 y 13,4 % de CO₂.

Sin embargo, en ninguno de los dos casos se consigue bajar del setpoint, después de iniciarse la variación de caudal de gas.

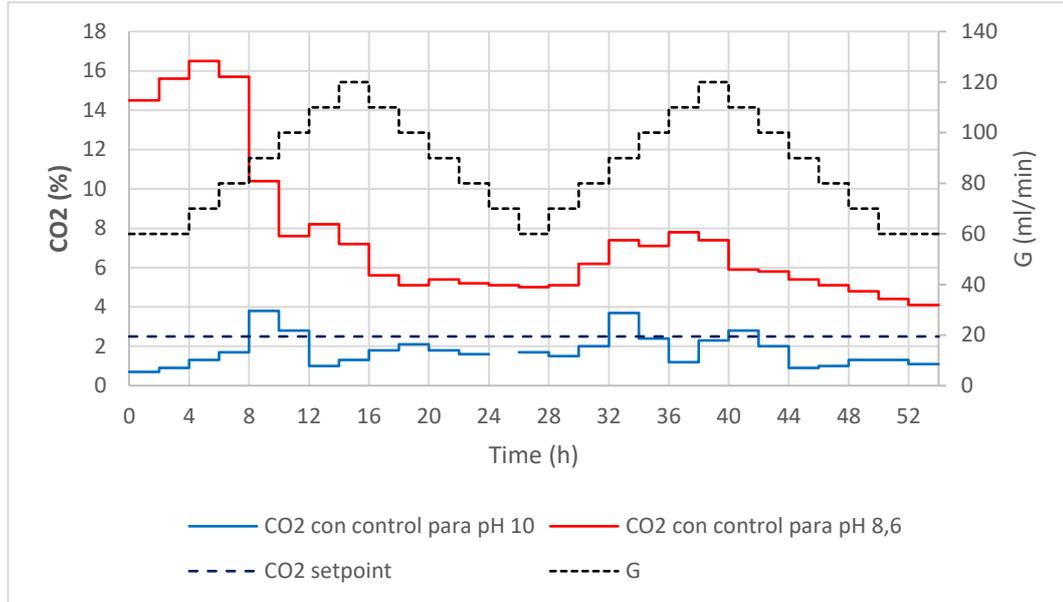


Figura 73: Evolución temporal de CO2 para ensayos de con distintos valores de pH para el sistema sin control

Para los ensayos con control, para pH 10 se consigue reducir la concentración de CO2 por debajo del setpoint. Se observan 3 picos característicos de ensayos anteriores.

Sin embargo, para los ensayos a pH 8,6, pese a los esfuerzos de control, no se consigue reducir la cantidad de CO2 por debajo del setpoint.

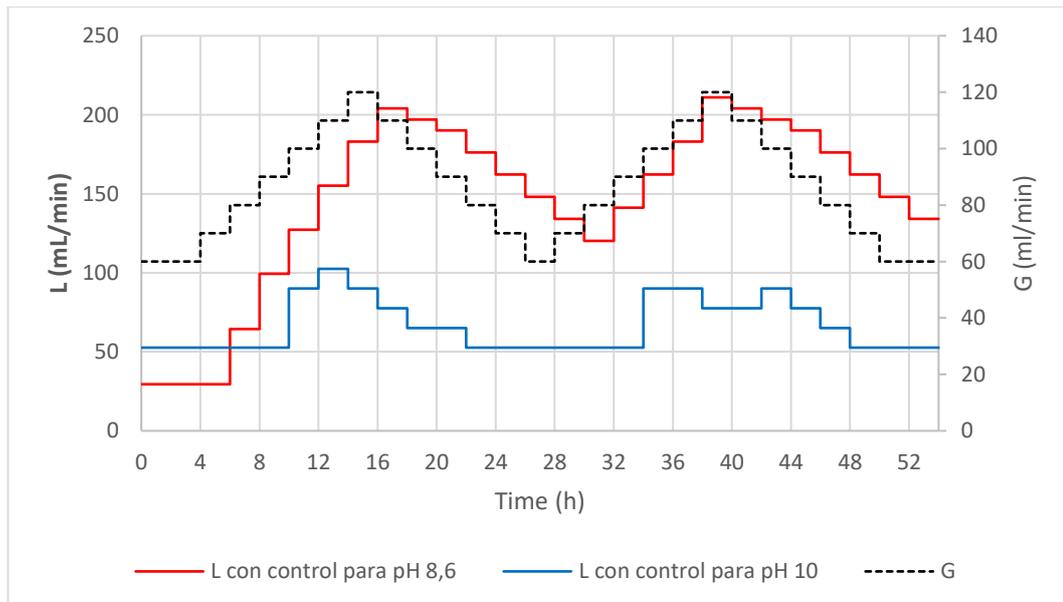


Figura 74: Esfuerzos de control para pH 10 y pH 8,6



Para pH 10, se observa que el esfuerzo de control hace que aumente el caudal con el fin de disminuir el pH por debajo del setpoint (regla 3) cuando esto se ha conseguido, se mantiene el valor del caudal según la regla 1 de la Tabla 13 (Si $e_{CO_2} > -0,5$ y $e_{CO_2} < 0$ entonces caudal es igual a cero).

En el caso de pH 8,6, el esfuerzo de control hace que el aumente el nivel de caudal de líquido para intentar disminuir la concentración de CO₂ por debajo del setpoint. Sin embargo, aunque la concentración de CO₂ no disminuye, el esfuerzo de control hace que el caudal de la bomba empiece a disminuir. Esto se debe a que la concentración de O₂ empieza a subir por encima del setpoint, según la regla.2 y 4. Esto es bastante crítico porque es necesario disminuir dicha concentración para evitar explosiones por el exceso de O₂.

Evolución temporal de H₂S

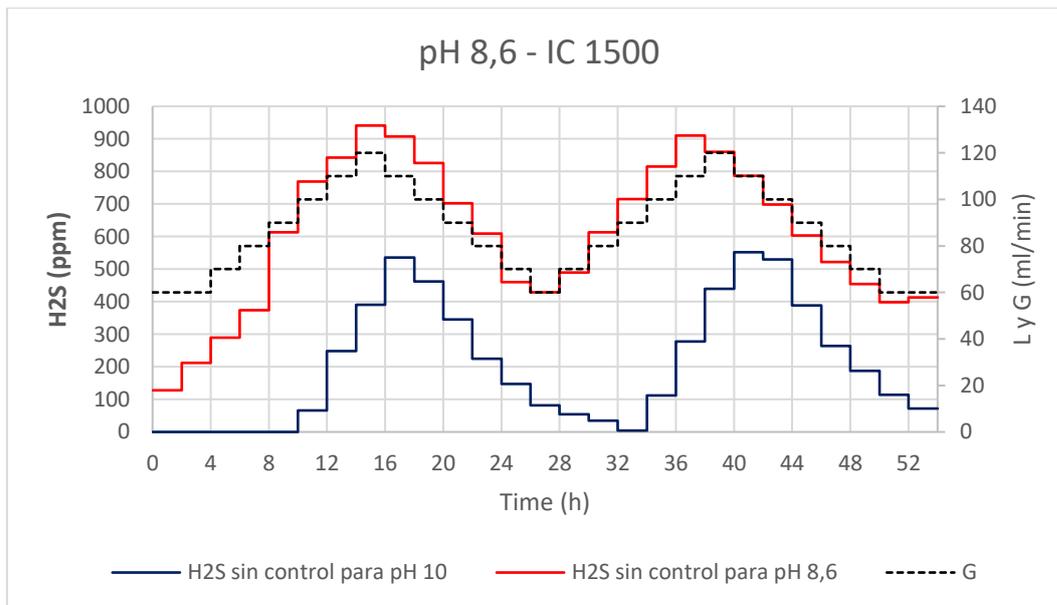


Figura 75: Evolución temporal de H₂S para ensayos de con distintos valores de pH para el sistema sin control

La evolución del H₂S para el sistema sin control como el sistema controlado, tienen el mismo comportamiento que la evolución del CO₂.

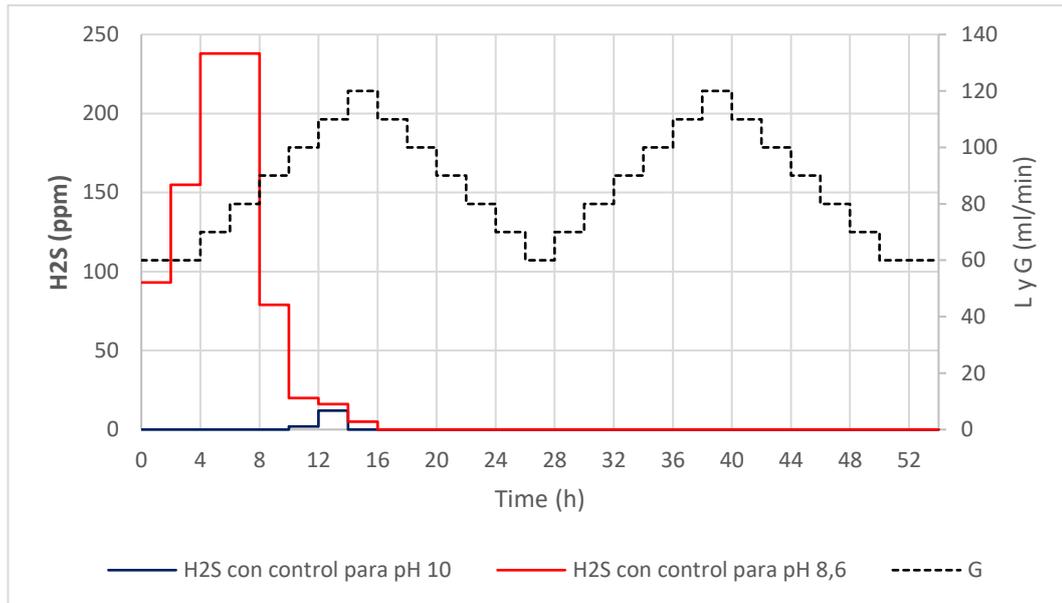


Figura 76 Evolución temporal de H₂S para ensayos de con distintos valores de pH para el sistema con control

En el caso de pH 10 se observa que el esfuerzo de control logra reducir bastante la concentración de H₂S en comparación del ensayo a pH 8,6.

En ambos casos, la concentración se reduce a prácticamente cero transcurrido un cierto tiempo después de haber empezado los esfuerzos de control.

Evolución temporal de O₂

Para el sistema sin control, se observa que la cantidad O₂ tanto para el sistema sin control como el sistema controlado están por debajo del setpoint.

Cabe destacar que la concentración de O₂ en pH 10 es más baja que en pH 8,6.

Para el sistema controlado, en el caso de pH 10, se observa que la cantidad de O₂ se mantiene por debajo del setpoint.

Sin embargo, para el caso pH 8,6, la concentración de O₂ aumenta por encima del setpoint cuando se llega al 120 mL/min de caudal de gas. Como se vio, los esfuerzos de control obligan a disminuir la cantidad caudal de O₂ para intentar que su concentración disminuya hasta quedar por debajo del setpoint. Este proceso se repite por segunda vez.

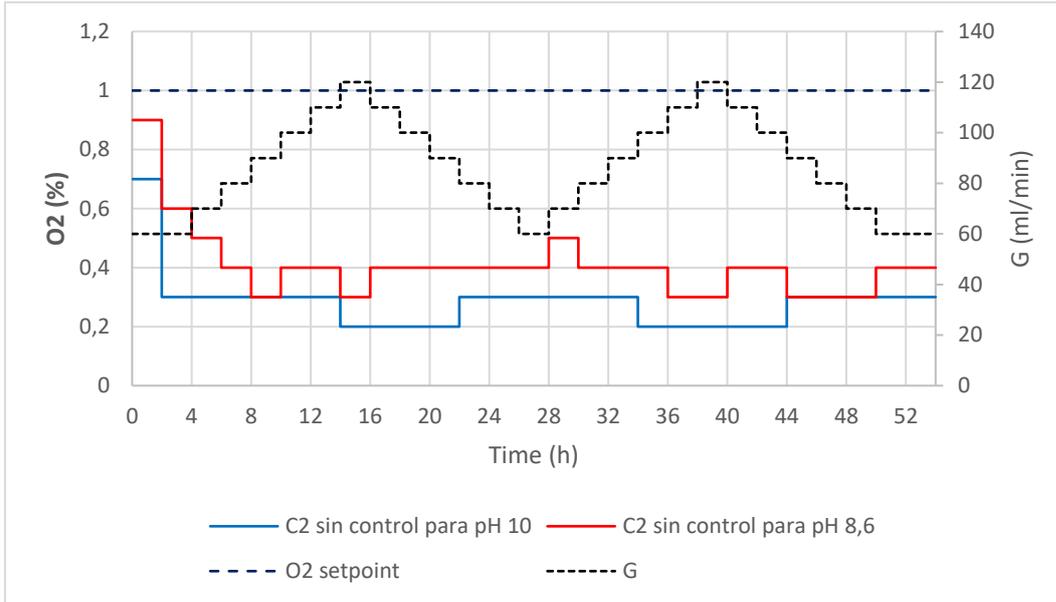


Figura 77: Evolución temporal de O₂ para ensayos de con distintos valores de pH para el sistema sin control

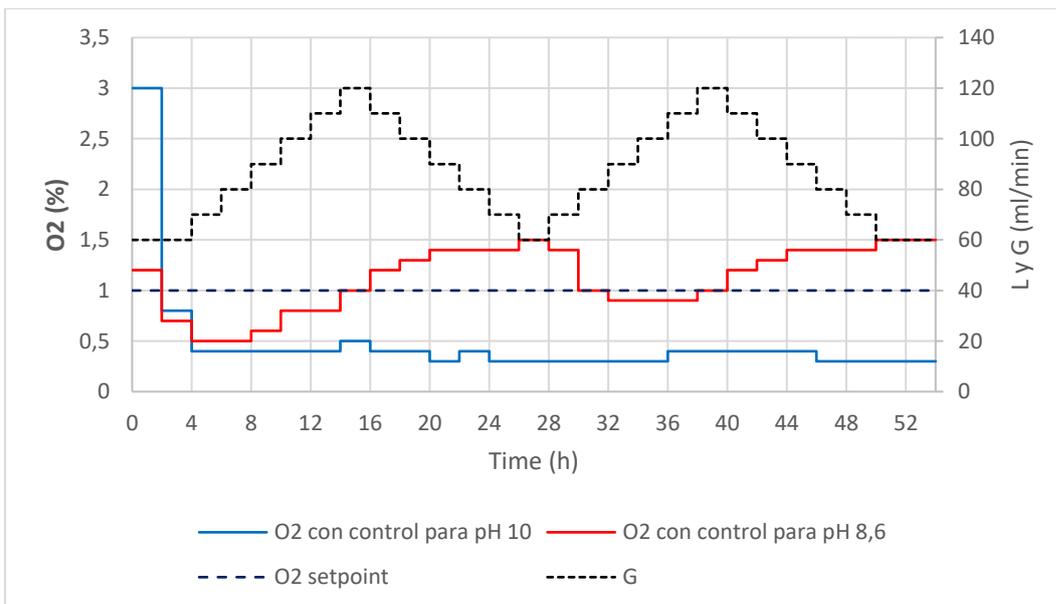


Figura 78: Evolución temporal de O₂ para ensayos de con distintos valores de pH para el sistema con control

Bajo las condiciones de pH 10 con concentración de carbono inorgánico óptimas, es decir 1500 mg/L, no se ha cumplido el objetivo de reducir la concentración por debajo del setpoint del CO₂ y del O₂.

4.6.3. Ensayos de validación con distintos valores de temperatura

La temperatura es un parámetro medioambiental importante ya que existen muchos sistemas de absorción por microalgas-bacterias de este tipo que están al aire libre y la temperatura afecta en función de la época del año.

La temperatura tiene una influencia en la solubilidad de los gases (cuanta mayor temperatura, menor solubilidad) y en el pH (debido al equilibrio iónico). La temperatura también afecta a las microalgas y bacterias. La temperatura óptima para la actividad orgánica se encuentra entre 15 y 35°C.

Para nuestro sistema de control, se propone realizar los ensayos a 15°C y 35°C para observar sus efectos. El ensayo de temperatura se realizará mediante aplicación de temperatura a la columna de absorción mediante un intercambiado de calor de la casa Fisherbrand™ Polystat™ Immersion Circulator.

Evolución temporal de CO₂

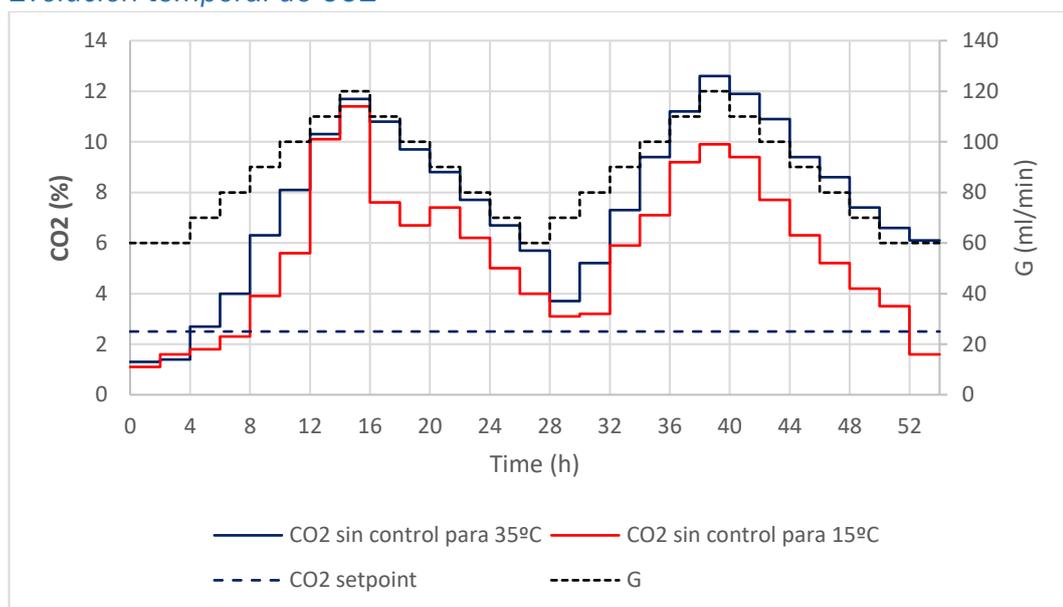


Figura 79: Evolución temporal de CO₂ para ensayos de con distintos valores de temperatura para el sistema sin control

En cuanto el sistema sin control, para el ensayo a 35°C se registran picos de 11,7 y 12,6 % de concentración de CO₂. Para el ensayo a 15°C, se registran máximas de 11,4 y 9,4 % de CO₂.

En ambos casos no se consigue bajar del setpoint del CO₂.

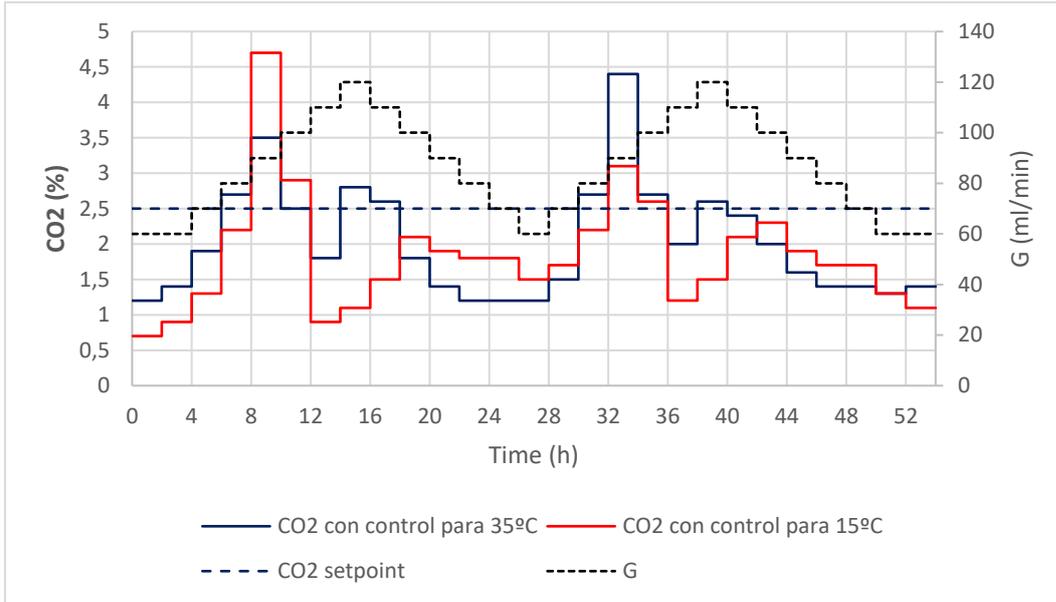


Figura 80: Evolución temporal de CO2 para ensayos de con distintos valores de temperatura para el sistema con control

Cuando se activa el sistema de control se registran máximas de 3,5 y 4,4 % de CO2 para 35°C y 4,7 y 3,1 % de CO2 para 15°C.

Se consigue reducir la concentración de CO2 por debajo del setpoint en ambos ensayos.

Evolución temporal de H2S

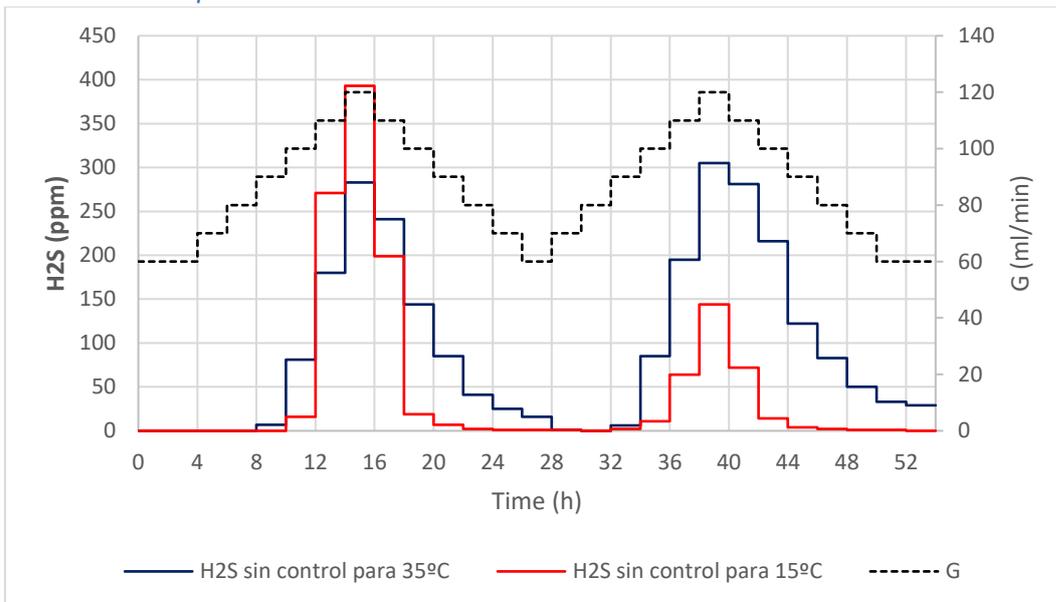


Figura 81: Evolución temporal de H2S para ensayos de con distintos valores de temperatura para el sistema sin control

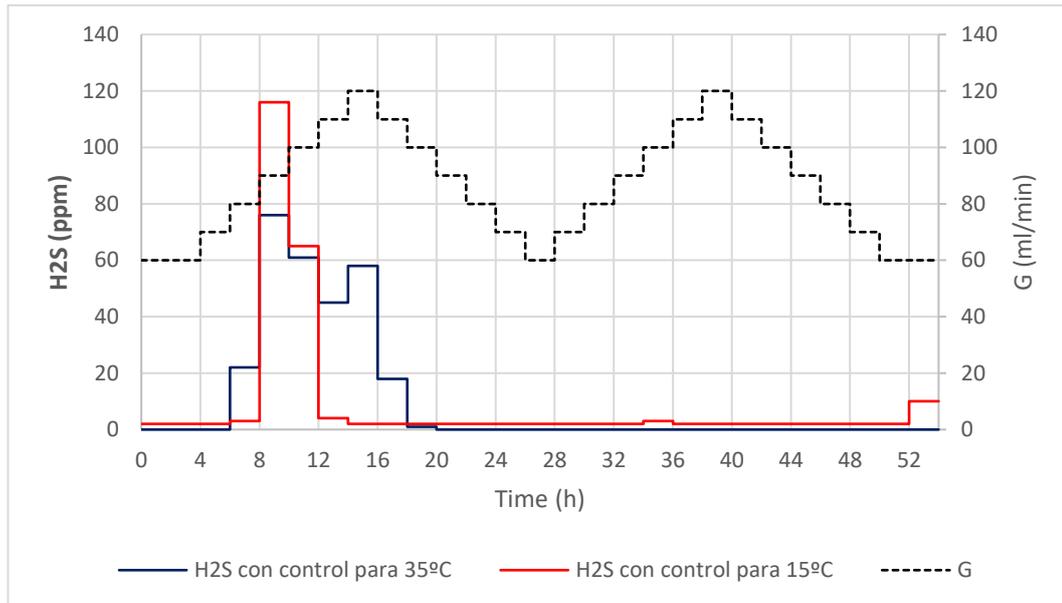


Figura 82: Evolución temporal de H2S para ensayos de con distintos valores de temperatura para el sistema con control

Para el sistema sin control, el perfil de absorción del H₂S, tanto para los ensayos de 15°C como para 35°C, es muy parecido al perfil de absorción de CO₂.

Para el sistema controlado, existen un pico de 76 ppm de H₂S para 35°C y 116 ppm de H₂S para 15°C.

Después de los esfuerzos de control, la cantidad de H₂S se reduce prácticamente por completo para los ensayos de 35°C y 15°C

Evolución temporal de O₂

Tanto para el sistema controlado como para el sistema sin control, la concentración de O₂ se encuentra por debajo del setpoint.

Se observa que para el ensayo de 35°C, la concentración de O₂ es menor que para el ensayo de 15°C.

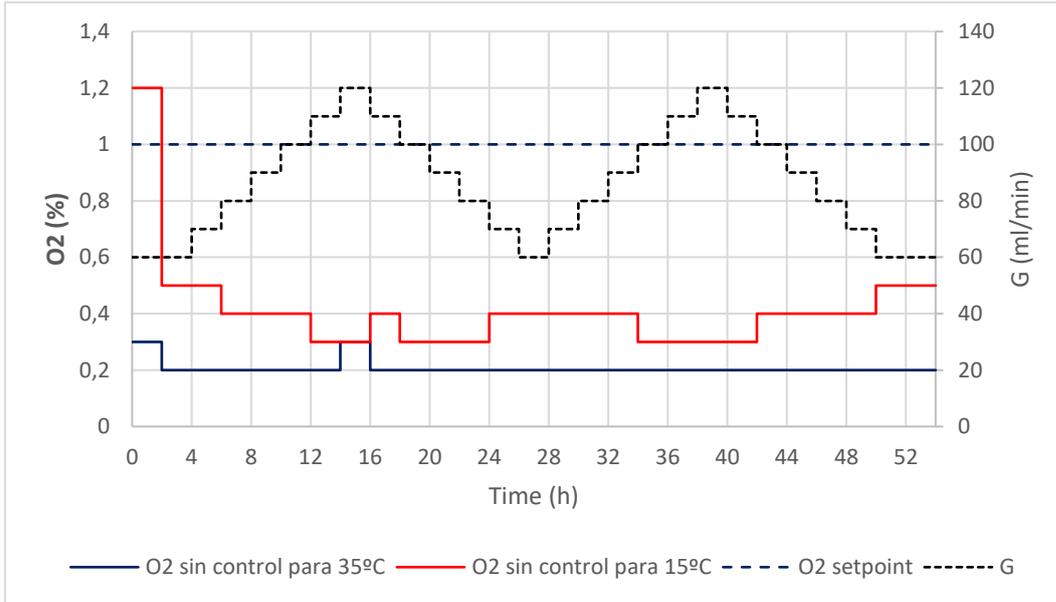


Figura 83: Evolución temporal de O₂ para ensayos de con distintos valores de temperatura para el sistema sin control

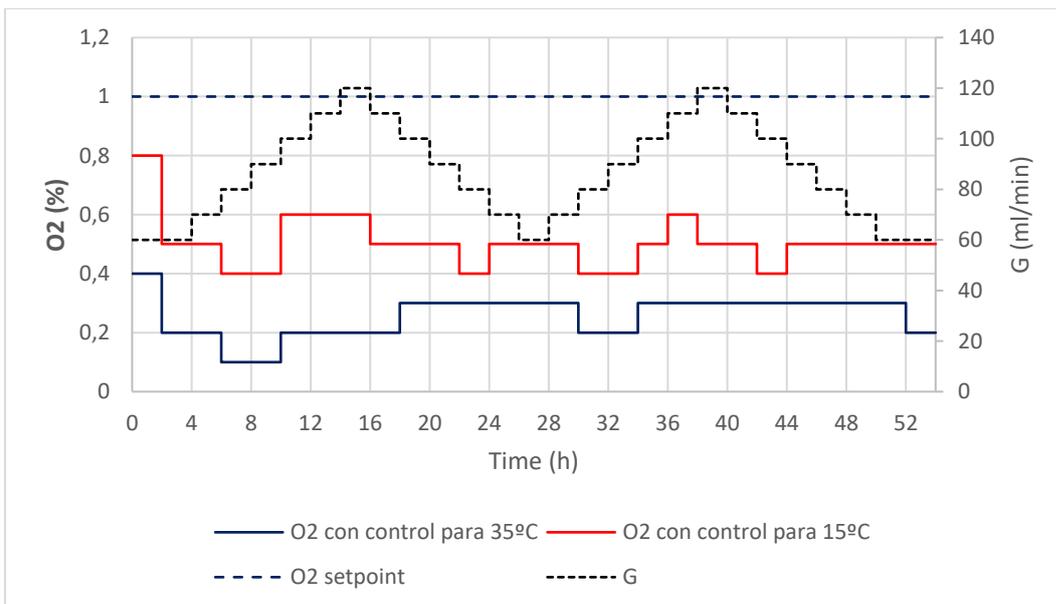


Figura 84: Evolución temporal de O₂ para ensayos de con distintos valores de temperatura para el sistema con control

Aunque la solubilidad es mayor para 35°C que para 15°C, se observa que la influencia de la temperatura tiene un impacto menor.



5. Resultados y conclusiones

Mediante el banco de ensayos, se ha podido dar un buen soporte al investigador para el estudio de los principales parámetros que influyen en la purificación de biogás mediante la eliminación de CO₂, H₂S y manteniendo la cantidad de O₂ en niveles de seguridad.

Se ha conseguido automatizar completamente el registro de los principales parámetros del sistema como cantidades de la composición del biogás (CO₂, H₂S y O₂), caudal de líquido de cultivo (L) y caudal de gas (G) a la entrada de la columna de biogás. De esta manera, el investigador solo necesita analizar los datos y ahorrar tiempo y esfuerzo en otras tareas importantes.

#	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	
1	Date	Time (h)	Elapsed Time (h)	CO2 (%)	CH4 (%)	H2S (ppm)	O2 (%)	G (mL/h)	Bomba (%)	L (mL/min)	L/G	variación CO2	Comentarios										
2	14/06/2016	23:09	0:00	2	92.5	0	0.3	60	32.5	23.4328	0.43	-0.5											
3	15/06/2016	1:16	2:12	2.1	96	0	0.3	60	32.5	23.4328	0.43	-0.4	Sin control										
4	15/06/2016	3:33	4:40	2.2	96.1	1	0.2	60	32.5	23.4328	0.43	-0.3	Sin control. Se enciende el control										
5	15/06/2016	5:33	6:50	2.2	95.9	6	0.1	70	32.5	23.4328	0.42	-0.3	Se disminuye un 2.5% la potencia de la bomba										
6	15/06/2016	7:46	8:62	2.6	95.2	21	0.1	80	30	27.7025	0.35	0.1	Se incrementa un 15% la potencia de la bomba										
7	15/06/2016	10:01	10:87	2.7	95.6	32	0.2	90	45	38.444	0.43	0.2	Se incrementa un 15% la potencia de la bomba										
8	15/06/2016	12:08	12:38	2.2	97.3	15	0.2	100	60	43.1855	0.43	-0.3	Se disminuye un 2.5% la potencia de la bomba										
9	15/06/2016	14:15	15:10	2.2	96.6	17	0.2	110	57.5	47.3953	0.43	-0.3	Se disminuye un 2.5% la potencia de la bomba										
10	15/06/2016	16:31	17:37	3	95.8	31	0.3	120	55	45.605	0.38	0.5	Se incrementa un 20% la potencia de la bomba										
11	15/06/2016	18:38	19:48	2.9	96.5	20	0.2	110	75	53.327	0.54	0.3	Se incrementa un 15% la potencia de la bomba										
12	15/06/2016	20:45	21:60	2.2	97.9	2	0.2	100	90	70.6685	0.71	-0.3	Se disminuye un 2.5% la potencia de la bomba										
13	15/06/2016	23:02	23:88	1.9	95.5	0	0.2	90	87.5	68.8783	0.77	-0.6	Se disminuye un 5% la potencia de la bomba										
14	16/06/2016	1:08	2:38	1.7	94.4	0	0.2	80	82.5	65.2378	0.82	-0.8	Se disminuye un 5% la potencia de la bomba										
15	16/06/2016	3:25	28:27	1.6	96.4	0	0.2	70	77.5	61.7173	0.88	-0.9	Se disminuye un 5% la potencia de la bomba										
16	16/06/2016	5:32	30:38	1.6	95.9	0	0.2	60	72.5	58.3368	0.97	-0.9	Se disminuye un 5% la potencia de la bomba										
17	16/06/2016	7:39	32:48	1.6	95.6	0	0.2	70	67.5	54.5563	0.78	-0.9	Se disminuye un 5% la potencia de la bomba										
18	16/06/2016	9:55	34:77	1.7	95.4	0	0.4	80	62.5	50.3758	0.64	-0.8	Se disminuye un 5% la potencia de la bomba										
19	16/06/2016	12:01	36:87	2	96.6	0	0.2	90	57.5	47.3953	0.53	-0.5	Se disminuye un 5% la potencia de la bomba										
20	16/06/2016	14:08	38:98	2.4	96.4	1	0.2	100	52.5	43.8148	0.44	-0.1	Se disminuye un 2.5% la potencia de la bomba										
21	16/06/2016	16:24	41:25	3.1	96.4	19	0.2	110	50	42.0245	0.38	0.6	Se incrementa un 20% la potencia de la bomba										
22	16/06/2016	18:31	43:37	3.1	95.5	21	0.2	120	70	56.3465	0.47	0.6	Se incrementa un 20% la potencia de la bomba										
23	16/06/2016	20:38	45:48	2.5	96	3	0.2	110	30	70.6685	0.64	0	Se incrementa un 15% la potencia de la bomba. Como 95% es la máxima potencia se queda ahí										
24	16/06/2016	22:55	47:77	1.9	96.6	0	0.2	100	99	77.1134	0.77	-0.6	Se disminuye un 5% la potencia de la bomba										
25	17/06/2016	1:01	49:87	1.9	97.2	0	0.2	90	95	74.249	0.82	-0.6	Se disminuye un 5% la potencia de la bomba										
26	17/06/2016	3:21	52:20	1.8	96.3	0	0.2	80	90	70.6685	0.88	-0.7	Se disminuye un 5% la potencia de la bomba										
27	17/06/2016	5:28	54:32	1.8	96.2	0	0.1	70	85	67.098	0.96	-0.7	Se disminuye un 5% la potencia de la bomba										
28	17/06/2016	7:35	56:43	1.8	95.6	0	0.2	60	80	63.5075	1.06	-0.7	Se disminuye un 5% la potencia de la bomba										
29	17/06/2016	9:51	59:70	1.5	96.7	0	0.2	60	75	53.327	1.00	-1	Se disminuye un 7.5% la potencia de la bomba										
30	17/06/2016	11:58	60:82	1.5	97.7	0	0.2	60	67.5	54.5563	0.91	-1											
31																							
32																							
33	Date	Time (h)	Elapsed Time (h)	CO2 (%)	CH4 (%)	H2S (ppm)	O2 (%)	G (mL/h)	Bomba (%)	L (mL/min)	L/G												
34	14/06/2016	23:09	0:00	2	92.5	0	0.3	60	32.5	23.4328	0.43												
35	15/06/2016	1:16	2:00	2.1	96	0	0.3	60	32.5	23.4328	0.43												
36	15/06/2016	3:33	4:00	2.2	96.1	1	0.2	60	32.5	23.4328	0.43												
37	15/06/2016	5:33	6:00	2.2	96.1	1	0.2	60	32.5	23.4328	0.43												
38	15/06/2016	5:33	6:00	2.2	95.8	6	0.1	70	32.5	23.4328	0.42												
39	15/06/2016	7:46	8:00	2.2	95.8	6	0.1	70	32.5	23.4328	0.42												
40	15/06/2016	7:46	8:00	2.6	95.2	21	0.1	80	30	27.7025	0.35												
41	15/06/2016	10:01	10:00	2.6	95.2	21	0.1	80	30	27.7025	0.35												
42	15/06/2016	10:01	10:00	2.7	95.6	32	0.2	90	45	38.444	0.43												
43	15/06/2016	12:08	12:00	2.7	95.6	32	0.2	90	45	38.444	0.43												
44	15/06/2016	12:08	12:00	2.2	97.3	15	0.2	100	60	43.1855	0.43												
45	15/06/2016	14:15	14:00	2.2	97.3	15	0.2	100	60	43.1855	0.43												
46	15/06/2016	14:15	14:00	2.2	96.8	17	0.2	110	57.5	47.3953	0.43												
47	15/06/2016	16:31	16:00	2.2	96.6	17	0.2	110	57.5	47.3953	0.43												
48	15/06/2016	16:31	16:00	3	95.8	31	0.3	120	55	45.605	0.38												
49	15/06/2016	18:38	18:00	3	95.8	31	0.3	120	55	45.605	0.38												
50	15/06/2016	18:38	18:00	2.8	96.5	20	0.2	110	75	53.327	0.54												
51	15/06/2016	20:45	20:00	2.8	96.5	20	0.2	110	75	53.327	0.54												
52	15/06/2016	20:45	20:00	2.2	97.9	2	0.2	100	90	70.6685	0.71												

Figura 85: Fichero de guardado de datos producido por el controlador de planta.

Mediante el IHM del sistema, el investigador ha podido configurar los ensayos que va a realizar, mediante el control directo sobre el caudal de gas a purificar, y dejar que el controlador se ocupe de los procesos que antes se realizaban de forma manual.

Con la introducción del sistema de control basado en reglas, el banco de ensayos ha permitido al investigador configurar los rangos de valores del dicho control para demostrar la gran influencia del caudal del líquido. De este modo,



se ha podido cumplir con los objetivos de reducir las impurezas por debajo de las consignas internacionales, es decir, una concentración por debajo de 2,5% de CO₂ y por debajo de 1,0% de O₂ además de una reducción completa del H₂S. De esta manera, obtenemos un biogás de buena calidad cumpliendo los parámetros de seguridad. Debido a estos buenos resultados, es posible evolucionar este método basado en reglas donde se pueda implementar métodos más avanzados, como los métodos de Feed-forward, Sistemas predictivos o un sistema basado en modelos.

Además, se ha permitido estudiar otros parámetros importantes que tienen influencia en la absorción de impurezas del biogás como se observó en el apartado 4.6. Del estudio realizado, la alcalinidad, mediante el carbono inorgánico ha demostrado ser un parámetro esencial ya que permite amortiguar los efectos de la acidez por la transferencia de CO₂ y H₂S al líquido disuelto que traduce una disminución de pH. En un futuro desarrollo, se puede estudiar la introducción de estos parámetros como variable de control.

Con este estudio se demuestra que es posible implementar un control multivariable: Mediante la medida y control de la alcalinidad y del pH del líquido de cultivo de microalgas-bacterias podemos llevar al sistema a condiciones óptimas para la completa disminución de CO₂ y H₂S además de mantener siempre niveles seguros de O₂.

Con la experiencia del investigador, es posible realizar una evolución del método de control hacia métodos avanzados de control como controles predictivos multivariables ya que los sistemas biológicos tienen una dinámica difícil además de ser altamente sensibles a las perturbaciones.

Finalmente, tras analizar los resultados de este estudio realizado en el laboratorio es posible trasladar e implementar este tipo de sistemas de control en plantas donde se puede aplicar mejores equipamientos. De este modo, podemos contribuir a una mejor producción de biogás con la automatización de la producción.



6. Estudio económico

En este capítulo se estudiarán los costes que supone la implementación del banco de ensayos para una columna de purificación de biogás.

Para el banco de ensayos se ha adquirido equipamiento necesario para implementar su implementación. Este equipamiento se ha descrito en el apartado 3.2 y hay que tener en cuenta que algunos de estos elementos ya estaban presentes en el momento de iniciar el proyecto.

Oferta* de Analizador de Gases INCA

Descripción	Precio unidad	Cantidad	Precio final
Analizador de biogás INCA 4001 T100-02	13323,21 €	1	13323,21 €
Transporte			340 €

Tabla 14. Oferta de Analizador de Gases

(*) Oferta de PSA Ingenieros

Oferta* de Controlador de Flujo Másico

Descripción	Precio unidad	Cantidad	Precio final
GFM57A-BDL6-A0	1.054,25 €	1	1.054,25 €
Transporte			15 €

Tabla 15. Oferta de Controlador de Flujo Másico

(*) Oferta de ANAME Instrumentación Científica

Oferta* de Bomba Peristáltica

Descripción	Precio unidad	Cantidad	Precio final
Bomba Peristáltica CF-3r,270rpm. D-25Vplus	1205,16 €	1	1205,16 €
Transporte			0 €

Tabla 16. Oferta de Bomba peristáltica

(*) Oferta de DINTER S.A.



Oferta* de Controlador de planta

Descripción	Precio unidad	Cantidad	Precio final
myRIO-1900	628,56 €	1	628,56 €
Transporte			0 €

Tabla 17. Oferta de Controlador de planta

(*) Oferta de National Instruments

Oferta de Circuito de Acondicionamiento de señales

Descripción	Precio unidad	Cantidad	Precio final
Current to Voltage Converter Module Amp to Volt Transmitter 4-20mA to 0-3.3V/5V/10V Signal Conversion Board Module	2,66 €	4	10,64 €
Transporte			4,45 €

Tabla 18. Oferta de Circuito de Acondicionamiento de señales

(*) Oferta de IC Station

Teniendo en cuenta las ofertas anteriores, la siguiente tabla resume el costo de banco del ensayo.

Item	Precio (€)
Analizador de Gases INCA	13663,21
Controlador de Flujo Másico	1069,25
Bomba Peristáltica	1205,16
Controlador de planta	628,56
Circuito de acondicionamiento	15,09
Total	16581,27

Tabla 19. Coste de dispositivos del banco de ensayos



7. Bibliografía y referencias

- [1] [Las reservas de combustibles fósiles a nivel mundial](#)
- [2] [Evolución de la emisión de gases de efecto invernadero](#)
- [3] Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts – Toledo-Cervantes et al. 2017
- [4] [Biogas upgrading technologies - developments and innovations](#)
- [5] [Fotobiorreactores para el cultivo masivo de microalgas](#)
- [6] A comparative analysis of biogas upgrading technologies Photosynthetic vs physicalchemical processes - Toledo-Cervantes et al. 2017b
- [7] [Biogas upgrading using algal-bacterial processes](#)
- [8] [Producción de biogás a partir de aguas residuales y residuos agrícolas](#)
- [9] [Trabajo fin de grado: valorización de fangos de EDAR vía digestión y cogeneración del biogás](#)
- [10] Influence of Biogas Flow Rate on Biomass Composition During the Optimization of Biogas Upgrading in Microalgal-Bacterial Processes - Serejo et al. 2015
- [11] [Obtención de biogás a partir de Residuos Sólidos Urbanos para su inyección a Red](#)
- [12] [Optimization of biogas production from algal biomass](#)



- [13] Development of a control strategy to cope with biogas flowrate variations during photosynthetic biogas upgrading

- [14] [Algal-bacterial processes for the treatment of agroindustrial wastewaters](#)



8. Anexos

8.1. Protocolo H-Bus

El protocolo H-Bus está especificado por UNION Instruments GmbH y permite una comunicación entre una estación remota y el analizador de gases de proceso INCA.

Importante: Los comandos que se describen a continuación siempre se representan en formato de número hexadecimal como palabras (2 bytes). El "0x" precedente marca una representación en formato de número hexadecimal.

Ejemplo: El número decimal 17 es equivalente a 0x11 (representación de bytes) respectivamente a 0x0011 (representación de palabras, 2 bytes)

8.1.1. Especificación de protocolo

Recuento de bytes

El protocolo está orientado a palabras. 1 palabra consta de una serie de 2 bytes. De esto se deduce que siempre se envía un número par de bytes en un comando.

Orden de bytes

La codificación de una palabra es little-endian (coll. Formato Intel), es decir, se envía el byte menos significativo primero.

Importante: Según sea necesario, las palabras de datos deben intercambiarse en la estación remota; consulte ejemplo.

Ejemplo de valor decimal 17 (comando H-Bus 0x0011):

Representación de palabras del número 17 (hexadecimal): 0x0011 (byte más significativo: 0x00 menos byte significativo 0x11).

Al transmitir esta palabra, el byte menos significativo (0x11) se envía primero y después de esto, se envía el byte más significativo (0x00).



Estructura de datos



Figura 86: Estructura de datos del protocolo H-Bus

La estructura de datos de un comando consiste en:

- la longitud del bloque N, que indica cuántas palabras de datos seguirán (sin contar el comprobar suma).
- número de N palabras de datos (1. palabra es siempre el número de comando y, si corresponde, seguido de bytes de datos).
- CRC16-checksum, se calcula sobre las N palabras de datos en "bloque de datos".

Max. número de N: 256

Configuración RS-232: 9600 o 115200 bit/s, 8 bits de datos, 1 bit de parada, sin paridad.

El bloque de datos comprende el número de comando y, si corresponde, información adicional.

El CRC16 se calcula sobre el bloque de datos. La longitud del bloque anterior no está integrada en el cálculo CRC16.

Repetición de comandos

En caso de que el sistema solicite un comando no respondido (tiempo de espera de 2500 milisegundos), el comando debe repetirse. Después de 3 comandos fallidos solicita la estación remota debe realizar un manejo de errores o generar un error. El manejo de errores debe ser especificado por la estación remota.

Al comunicarse a través de una puerta de enlace de bus de campo, se debe enviar un comando "Flush" entre dos solicitudes de comando consecutivas para preparar la memoria de comunicación del bus de campo para la nueva solicitud.

Intervalo de solicitud de comando

Se debe mantener un tiempo de espera de un mínimo de 500 milisegundos entre dos comandos.

Secuencia de comunicación

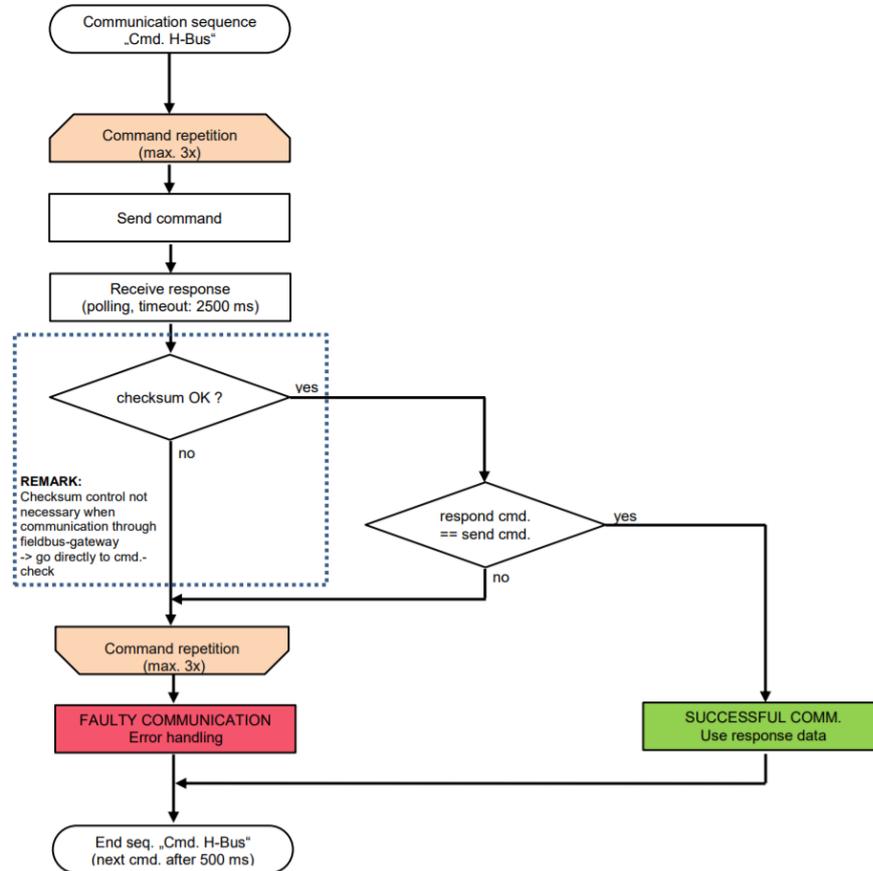


Figura 87: Diagrama de flujo de la secuencia de comunicación

8.1.2. Resumen de los comandos más importantes del protocolo H-Bus

A continuación, se muestra una tabla con los comandos más usados.

H-Bus-command	
Command	Function and description
0x0000	Flush Must always be sent before a new command is written to the output buffer of the fieldbus-gateway <i>Anybus Communicator</i> . The command is needed to flush the output buffer. Works as 2-words-, 3-words- and 9-words-command e. g. before sending a 3-words-command a 3-words-flush must be sent Important remark: <i>„Flush“ is only needed, when communicating using a fieldbus-gateway (Anybus Communicator) -> menu-settings are important – see above description!</i>
0x0009	Send measurement- and process data (16 sensors, current channel) Send status information (state, times, online-data available, etc.) and send measurement results (max. of 16 sensor readings of currently measuring channel)
0x0010	Send measurement data (10 sensors, 10 channels) Send measurement results (max. 10 channels with 10 sensor readings per channel)



H-Bus-command	
Command	Function and description
0x0011	Send measurement data (4 sensors, 10 channels) Send measurement results (max. 10 channels with 4 sensor readings per channel)
0x0012	Send measurement data (6 sensors, 10 channels) Send measurement results (max. 10 channels with 6 sensor readings per channel)
0x0016	Send age of measurement data (10 channels) Send the age of each measurement for every channel in minutes
0x0017	Send messages and errors Read the last 10 messages and errors from the event list.
0x0019	Send process data Send status information (state, times, online-Data available, etc.)
0x0031	Start measurement Command to start a measurement on a specific channel
0x0035	Start measurement II Request measurement on a specific channel (sample point) Optional parameters: stop measurement after measurement, skip EC-sensor, etc.
0x0036	Stop measurement Set analyzer to stop state When this command is sent, the analyzer goes into a stop mode after five minutes of purging air through the systems. Pumps and valves are turned off. No gas consumption by analyzer while ins stop-mode.
0x0051	Start calibration gas 1 Start calibration with calibration gas 1 Calibration gas must be connected to the "Input calibration gas 1" and must be set up using PC-program <i>INCACtrl</i> .
0x0052	Start calibration gas 2⁹ Start calibration with calibration gas 2 Calibration gas must be connected to the "Input calibration gas 2" and must be set up using PC-program <i>INCACtrl</i> .
0x0053	Start calibration purge gas Start calibration with purge gas (in general ambient air)

Tabla 20: Lista de comandos más usados en el protocolo H-Bus

8.2. Circuito de acondicionamiento de señales

8.2.1. Descripción

Este circuito está diseñado para convertir señales de corriente a señales de tensión. Este dispositivo cuenta con una protección frente a la inversión de polaridad, es decir, que tiene una protección cuando introducimos mal la polaridad de entrada. Cuando se ha introducido correctamente todo el cableado, se encenderá un LED que indica que el dispositivo funciona correctamente. En caso de no encender dicho LED, será necesario una comprobación de las polaridades tanto de entrada como de salida.

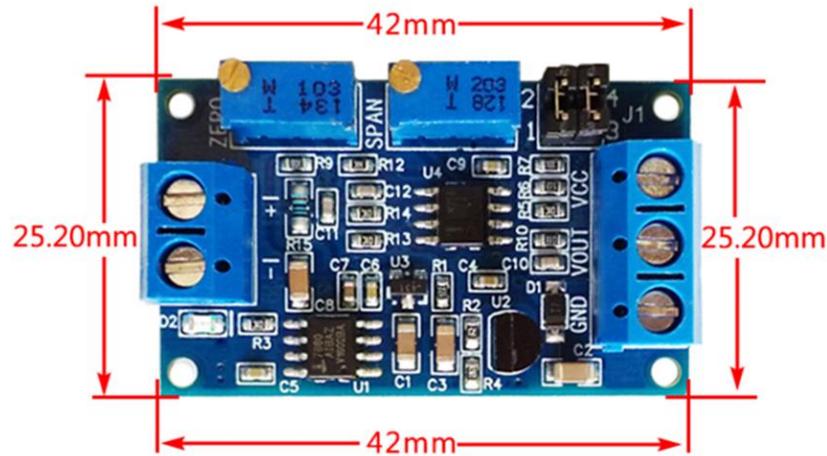


Figura 88: Dimensiones del módulo

Como se muestra en la Figura 88, tiene unas dimensiones adecuadas para poder encapsularlo dentro de una caja para protegerlo del exterior sin ocupar mucho espacio. Además,

El dispositivo contiene un potenciómetro que ayuda a ajustar el zero y otro, que ayuda a ajustar el spam.

A su vez, presenta dos jump (J1 y J2) de selección de rango que permite elegir los rangos de salida en función de la entrada como se verá más adelante.

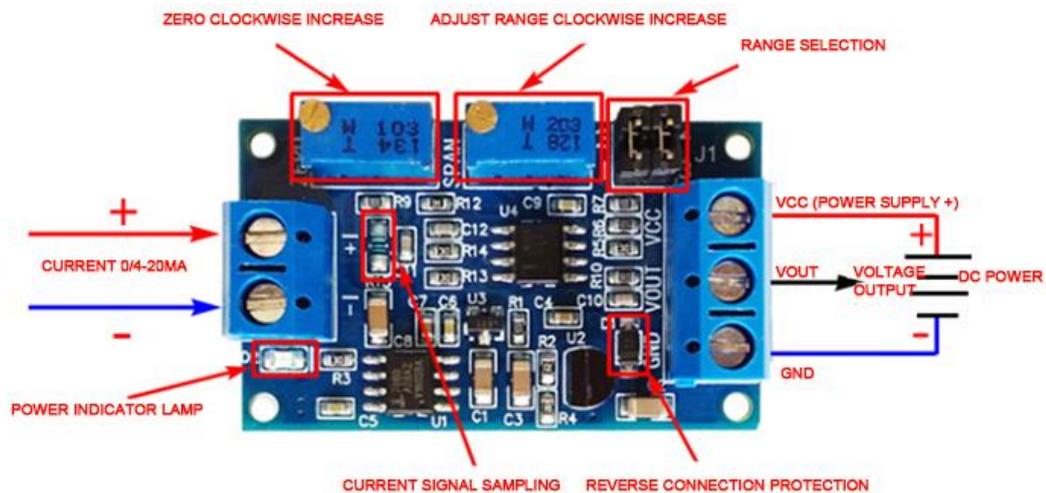


Figura 89: Partes del circuito de acondicionamiento

8.2.2. Características

Tensión de alimentación: 7~36V

Corriente de entrada: 4~20mA ó 0~20 mA

Tensión de salida: 0~3,3V; 0~5V ó 0~10V

Presenta buena estabilidad y linealidad en la señal de salida



8.2.3. Rangos de ajuste

En la siguiente tabla se presenta la combinación de ajustes, en función de los pines de selección de rango, para elegir la configuración deseada.

Entrada	J1 (pines 1 y 2)	J2 (pines 3 y 4)	Salida
4~20 mA	Cortocircuito	Cortocircuito	0~2,5 V
	Circuito abierto	Circuito abierto	0~3,3 V
	Cortocircuito	Cortocircuito	0~5 V
	Cortocircuito	Circuito abierto	0~10 V
0~20 mA	Cortocircuito	Cortocircuito	0~3,3V
	Cortocircuito	Cortocircuito	0~5 V
	Cortocircuito	Circuito abierto	0~10V

Tabla 21: Combinación de pines para elegir la configuración deseada en el circuito de acondicionamiento

8.3. Código de programa

El código del programa se encuentra disponible en el anejo adjunto en formato comprimido (.zip).