



Trabajo Fin de Máster

Máster en Automática, Robótica y Telemática

Interfaz de control basado en lógica difusa y seguimiento de potencia en la obtención de energía en el tratamiento de fangos

Autor: José Ramón Salvador Ortiz

Tutor: Carlos Bordons Alba

I. Glosario

II. Tablas y Figuras

1. Introducción
 - 1.1. Objetivos
2. Descripción de Equipos
 - 2.1. Prototipo de Laboratorio
 - 2.1.1. Bio-reactor
 - 2.1.2. Sedimentador
 - 2.1.3. *MFC*
 - 2.1.4. Potenciostato
 - 2.2. Prototipo en planta depuradora
 - 2.2.1. Subsistema HA-AD
 - 2.2.1.1. Bomba de alimentación (P01)
 - 2.2.1.2. Bomba de agua (P02)
 - 2.2.1.3. Tanque Digestor (T01)
 - 2.2.1.4. Bomba de recirculación de gases (MP01)
 - 2.2.1.5. Unidad de control de temperatura (HE1)
 - 2.2.1.6. Monitor de flujo de gas
 - 2.2.1.7. Sensores de temperatura
 - 2.2.1.8. Sensor de pH
 - 2.2.1.9. Sensores de presión
 - 2.2.1.10. Tanque de Sedimentación
 - 2.2.1.11. Bomba de residuos sólidos (P03)
 - 2.2.2. Subsistema MFC
 - 2.2.2.1. Tanque de Acetato
 - 2.2.2.2. Bomba de alimentación (P04)
 - 2.2.2.3. Bombas de recirculación (P05x)
 - 2.2.2.4. Unidad MFC
 - 2.2.2.5. Cargas activas
 - 2.2.3. PC de control y equipos auxiliares
3. Fundamento Teórico
 - 3.1. Teoría sobre *Fuzzy Logic Control*
 - 3.1.1. *Introducción de control automático*
 - 3.1.2. *Solución: Fuzzy Logic Control*
 - 3.2. Teoría sobre *MFC*
 - 3.2.1. *Partes de la MFC*
 - 3.2.1.1. *Sustrato: Ácidos Grasos Volátiles (VFA)*
 - 3.2.1.2. *Ánodo*
 - 3.2.1.3. *Cátodo*
 - 3.2.1.4. *Membrana de separación*
 - 3.2.2. Métodos de fabricación del cátodo
 - 3.2.3. Caracterización electro-química
 - 3.3. Teoría sobre *Power Tracking*
4. Software de Control LabView
 - 4.1. Interfaz de control del prototipo de laboratorio
 - 4.2. Visualizador de datos del prototipo de laboratorio
 - 4.3. Interfaz de control del prototipo en planta depuradora

- 4.3.1. Panel 'Set Experiment Parameters'
 - 4.3.2. Panel 'Start Experiment'
 - 4.3.3. Panel 'Setpoints'
 - 4.3.4. Panel 'Close LabView'
 - 4.3.5. Panel 'Off-line Measurement and Ports Connections'
 - 4.3.6. Panel 'Data Visualization'
- 4.4. Visualizador de datos del prototipo en planta depuradora
- 5. *Power Tracking* aplicado a la MFC
 - 5.1. Algoritmo MPPT en LabView
 - 5.2. Sub-VIs y Comandos de comunicación
- 6. *Fuzzy Logic Control* aplicado al prototipo
 - 6.1. Definición de parámetros del controlador
 - 6.2. Implementación del bloque de Control "Fuzzy Logic"
 - 6.2.1. MatLab
 - 6.2.2. LabView
- 7. Aspectos económicos/energéticos
 - 7.1. Resultados obtenidos en el control del prototipo
 - 7.2. Resultados de enfoque técnico
 - 7.2.1. Requerimientos técnicos para producir 1W/h
 - 7.2.2. Análisis de posibles escenarios escalados
 - 7.2.3. Análisis económico
 - 7.2.3.1. Resultados
- 8. Guía de uso y Medidas de seguridad
 - 8.1. Manual de procedimientos
 - 8.1.1. Procedimiento de "Start-up"
 - 8.1.2. Procedimiento de operación
 - 8.1.3. Procedimiento de "Shut-down"
 - 8.2. Seguridad durante el uso del prototipo
 - 8.3. Guía de uso de la planta piloto para llevar a cabo un experimento
- 9. Conclusiones
- 10. Apéndice
 - 10.1. Siglas
 - 10.2. Anglicismos
 - 10.3. Referencias

1. Introducción

En la actualidad, la obtención de fuentes de energía renovables se ha vuelto uno de los principales objetivos de los investigadores a nivel mundial. Siguiendo esta línea, la empresa IDENER en consorcio con otras empresas, está llevando a cabo un proyecto denominado *MFC for Sludge (MFC4Sludge o MFC4S)*. Dicho proyecto consiste en la generación de energía eléctrica a partir de ciertos procesos químicos que tienen lugar en un dispositivo denominado *Microbial Fuel Cell (MFC)*.

En la figura 1.1 se esquematizan los elementos que intervienen en el proceso, que comienza con la introducción de fangos, como el que podemos obtener en una planta de depurado de aguas, en un tanque denominado Digestor. En este tanque, el fango se procesa para elevar el contenido de ciertas sustancias (VFA) realizando una semi-digestión. Después, el fango pasa del digestor a otro tanque donde se lleva a cabo un proceso de sedimentación. El sedimentador separa el fango útil (sedimentado) de residuos sólidos que pueden entorpecer etapas posteriores. Una vez que obtenemos el fango sedimentado lo introducimos en la MFC, dispositivo que contiene unas bacterias capaces de alimentarse del fango y producir electricidad y, de esta forma, obtener energía limpia, a través de una carga activa o potencioestado. Todos estos procesos se explicarán en detalle en puntos posteriores.

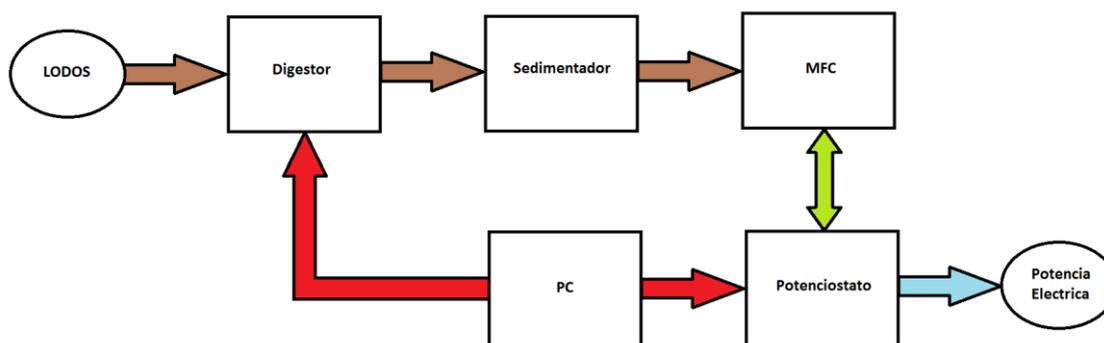


Figura 1.1. Diagrama de bloques del proceso seguido en el proyecto MFC4Sludge

En esta memoria se abarcan nociones del proyecto al completo, aunque se centrará en la parte de control del mismo. Se debe especificar que se ha desarrollado un prototipo de laboratorio con una MFC de un litro de capacidad en una etapa inicial. Posteriormente se ha implementado una MFC compuesta por cuatro subunidades de dos litros y medio (lo que conlleva una capacidad total de diez litros) para integrarla en un prototipo emplazado en una planta depuradora, en la localidad de Aduna, Guipúzcoa.

Como puntos valorables de todo el proyecto nos centraremos en el software de control de ambos prototipos, especialmente en las estrategias de control de lógica borrosa (*Fuzzy Logic Control*) y técnicas de obtención de potencia máxima (*Power Tracking*), así como en la integración de los equipos que conforman el prototipo emplazado en la planta depuradora.

1.1. Objetivos

Para la evaluación del proyecto fin de máster, los objetivos que se han definido durante el desarrollo del proyecto son los siguientes:

- Implementación del software de control del prototipo de laboratorio.
 - Interfaz de usuario
 - Almacenamiento y tratamiento de datos
 - Software de acceso remoto a datos
- Implementación del software de control del prototipo de planta piloto.
 - Interfaz de usuario
 - Almacenamiento y tratamiento de datos
 - Control
 - MPPT
 - 'Fuzzy Logic Control'
 - Software de acceso remoto a datos
 - Establecimiento de red de datos de experimentación compartidos
- Diseño y elaboración del cuadro eléctrico.
- Montaje, experimentación y supervisión del prototipo planta piloto
 - Conexiones entre equipos
 - Conexiones eléctricas
 - Calibrado de sensores y actuadores
 - Experimentación remota
 - Supervisión remota de experimentos

Actualmente, las plantas depuradoras tienen un gasto energético elevado durante el proceso de tratamiento de aguas residuales. Este proyecto consistirá en el desarrollo e implementación del software de control de un prototipo que intenta sustituir y mejorar la sección de tratamiento de fangos de dichas plantas depuradoras. Para ello, utiliza técnicas de digestión anaerobia y de obtención de energía mediante MFC. En consecuencia, se requieren técnicas de control para asegurar que estos procesos se realicen de manera óptima y eficiente.

En cuanto a la producción de energía mediante la MFC, se emplearán técnicas de MPPT para alcanzar la máxima potencia eléctrica de la celda de combustible. Usaremos la lógica difusa para la implementación del controlador, debido a las características de nuestro sistema, ya que tiene una respuesta no lineal con retardo variable. Además, los controladores de lógica difusa ofrecen una respuesta rápida y precisa.

Para profundizar en las técnicas de control explicadas anteriormente, realizaremos una descripción de los prototipos a controlar, así como de los equipos que los componen, además de exponer brevemente el fundamento teórico sobre el que se basa.

Como es de esperar, el grueso del trabajo se centrará en la descripción del software, incluyendo interfaz de usuario, guía de uso, medidas de seguridad, etc. y en las técnicas de control empleadas.

Terminaremos con los resultados obtenidos, un estudio económico y técnico y con las conclusiones de la eficiencia de nuestro proyecto.

2. Descripción de Equipos

En este punto se especificará el diseño de los dos prototipos creados en el proyecto y los equipos auxiliares que los componen, dando detalles de sus modelos, características y funciones dentro del mismo.

2.1. Prototipo de Laboratorio

Como se explicaba en el punto anterior, se han realizado dos prototipos diferentes. En este punto se expondrán los detalles del primero de ellos, el de laboratorio, que trabaja con una MFC de un litro de capacidad. Se desarrolla y se usa para realizar experimentos que establecerán los puntos de trabajo en el prototipo implantado en la planta de tratamiento de aguas (expuesto en el punto 2.2).

En la figura 2.1 podemos observar un esquema del prototipo de laboratorio y los equipos que lo componen. Se encuentra empleado en los laboratorios de LEITAT.

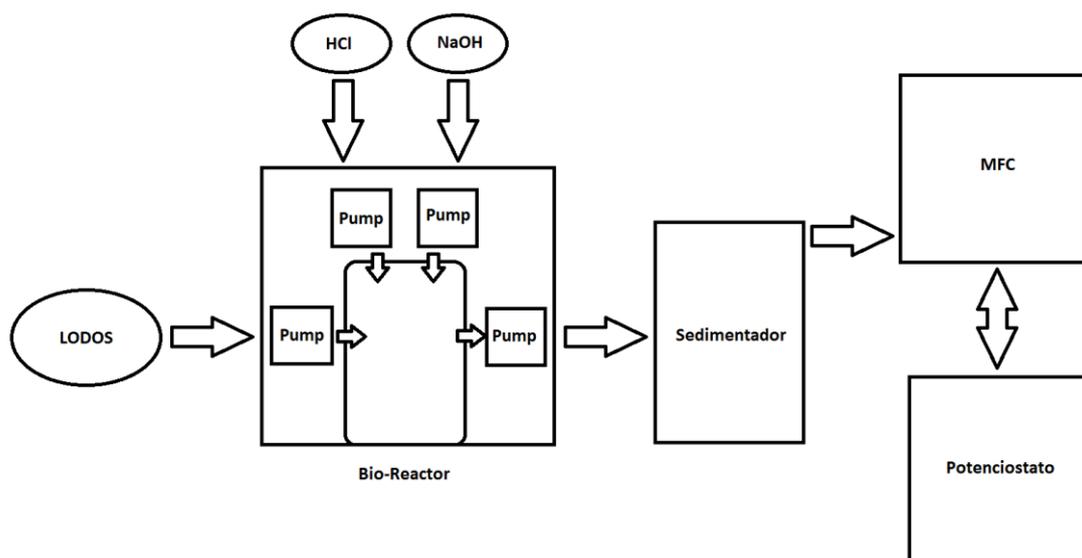


Figura 2.1. Diagrama de bloques del prototipo de Laboratorio (MFC 1 litro)

Aunque en el diagrama no se refleja, el control sobre el prototipo se realiza mediante un PC, que se comunica con el bio-reactor y con el potenciostato, a través de una interfaz en LabView. Además, el PC se conecta a la red con la intención de que se pueda acceder a los datos de los experimentos que se estén realizando.

Los aspectos que se investigarán con este prototipo vienen especificados en la tabla 2.1 y proporcionarán las bases para trabajar con la planta piloto.

| Objetivo | Equipos involucrados | Resultado |
|---|--|--|
| Obtener punto de trabajo (Temperatura) del Digestor | Bio-reactor | Se obtiene que la temperatura de los lodos en el interior del Digestor debe mantenerse en el rango de 25 a 30 °C. |
| Regular punto de trabajo en cuanto al pH del fango | Bio-reactor y reactivos de pH | Tras la experimentación, la mezcla de lodos se mantiene en el rango de pH adecuado sin necesidad de introducir reactivos. |
| Obtener parámetros críticos del proceso | Bio-reactor, Sedimentador, MFC y potencióstato | Los parámetros críticos obtenidos para el control del prototipo, simplificando el sistema, son el pH de los lodos que alimentan la MFC y la cantidad de Ácidos grasos volátiles (VFA) resultantes de la digestión. |
| Análisis de la curva característica I-V de la MFC | MFC y potencióstato | Se obtienen parámetros característicos de la MFC. |
| Prueba de empleo de las técnicas de Power tracking | MFC y potencióstato | Se obtiene el punto óptimo de funcionamiento de la MFC en desarrollo de potencia. |

Tabla 2.1. Objetivos de la experimentación del prototipo de laboratorio

2.1.1. Bio-reactor

El bio-reactor del modelo MS-F1-S-5L de Major Science, se puede observar en el centro de la figura 2.2 y consta de una campana de vidrio externa de cinco litros de capacidad (a su izquierda) que se usa para realizar la digestión anaerobia. También posee cuatro bombas que se usan como se puede apreciar en la figura 2.1. El control de pH y de temperatura se realiza con el mismo dispositivo. En el caso del control de pH se introducen agentes para elevarlo o disminuirlo en la mezcla interna.

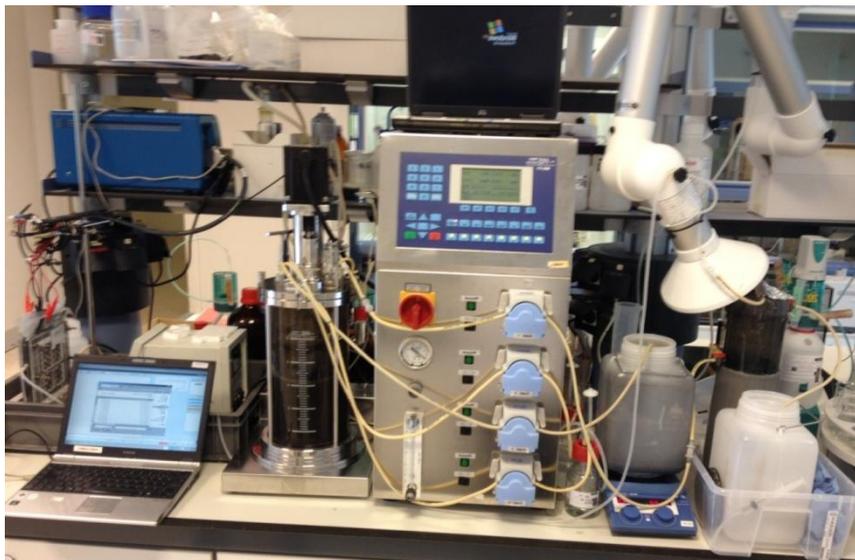


Figura 2.2. Bio-reactor, sedimentador y equipo auxiliar (MFC 1 litro)

El control de este dispositivo se realiza a través de varias VIs de Labview que son proporcionados por el fabricante del equipo (integrados en un software específico). Una de las tareas llevadas a cabo es la extracción de esos VIs básicos y la generación de un VI para la comunicación con el dispositivo, incluyéndolo así en la interfaz de control del prototipo de laboratorio.

2.1.2. Sedimentador

En la figura 2.2 también aparecen otros elementos, que se describirán a continuación. En la parte derecha, se encuentra un recipiente de plástico sobre un peso con una sustancia oscura en su interior. Este contiene los lodos que se introducen en el bio-reactor. Otro recipiente de plástico sin líquido aparece en la figura 2.2 a la derecha, el cual almacena el fango procesado y sedimentado.

Una de las partes importantes del prototipo es el tanque de sedimentación de lodos que se observa en la figura 2.2, en la zona de la derecha detrás de los recipientes de plástico anteriormente descritos. El sedimentador funciona por rebose, es decir, la bomba del bio-reactor que extrae el lodo procesado va llenando el sedimentador periódicamente. Una vez que se llena hasta el punto de rebose, este fango, que contiene menos residuos sólidos, comienza a fluir por la parte más alta del tanque.

2.1.3. MFC

Sin duda el elemento principal del prototipo es la *Microbial Fuel Cell*, diseñada y creada por FRAUNHOFER y LEITAT. En la figura 2.3 se puede observar la MFC del prototipo de laboratorio con capacidad de un litro.

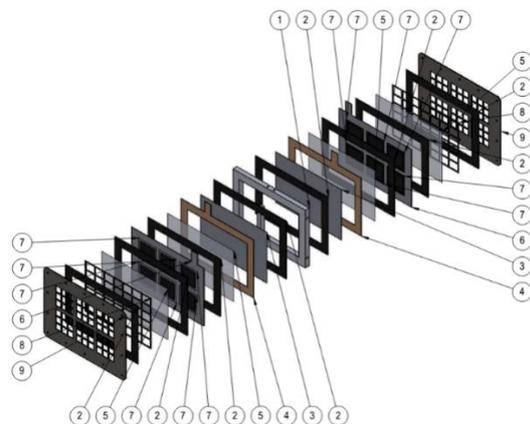
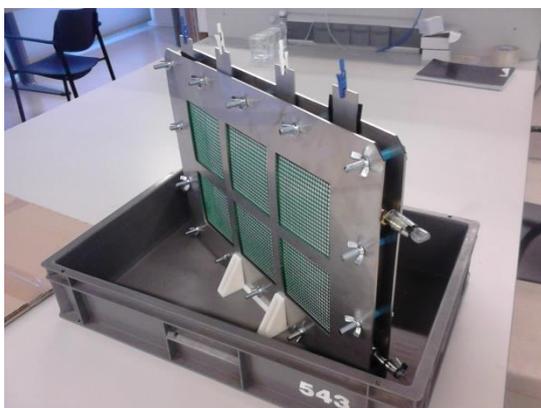


Figura 2.3. MFC del prototipo de Laboratorio (MFC 1 litro)

En la figura anteriormente mencionada, se puede apreciar que la MFC se compone de varias capas de diferentes materiales. El diseño comprende placas gruesas de metal externas e internas para conservar la integridad estructural de la celda y para evitar deformaciones de sus capas internas más delgadas, debido a la presión del agua. Las capas externas funcionan a modo de soporte para mantener la celda vertical durante su funcionamiento. Las dimensiones generales de la célula son: 500x360x70mm.

2.1.4. Potenciostato

Por último, es necesaria una carga activa para medir y calcular la potencia que puede generar la MFC. Con este fin se utiliza el potenciostato de EC-LAB modelo SP-300, que se puede observar en la figura 2.4. Para controlar este equipo desde la interfaz de LabView, se ha utilizado un pack de desarrollo suministrado por el proveedor del equipo.



Figura 2.4. Potenciostato del prototipo de Laboratorio (MFC 1 litro)

2.2. Prototipo en planta depuradora

A lo largo de este punto comentaremos en detalle el prototipo de planta piloto, que se integra en una planta depuradora de aguas perteneciente a GURAK, otra empresa del consorcio. Se encuentra en la localidad de Aduna (Guipúzcoa).

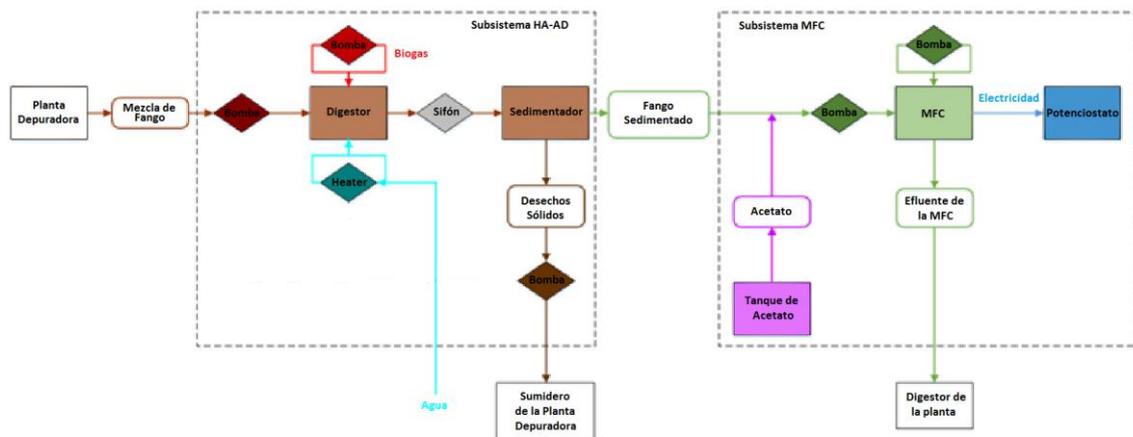


Figura 2.5: Diagrama de bloques para el prototipo de planta piloto de MFC4Sludge

Figura 1.6. Esquema de conexión de equipos para el prototipo de planta piloto de MFC4Sudge

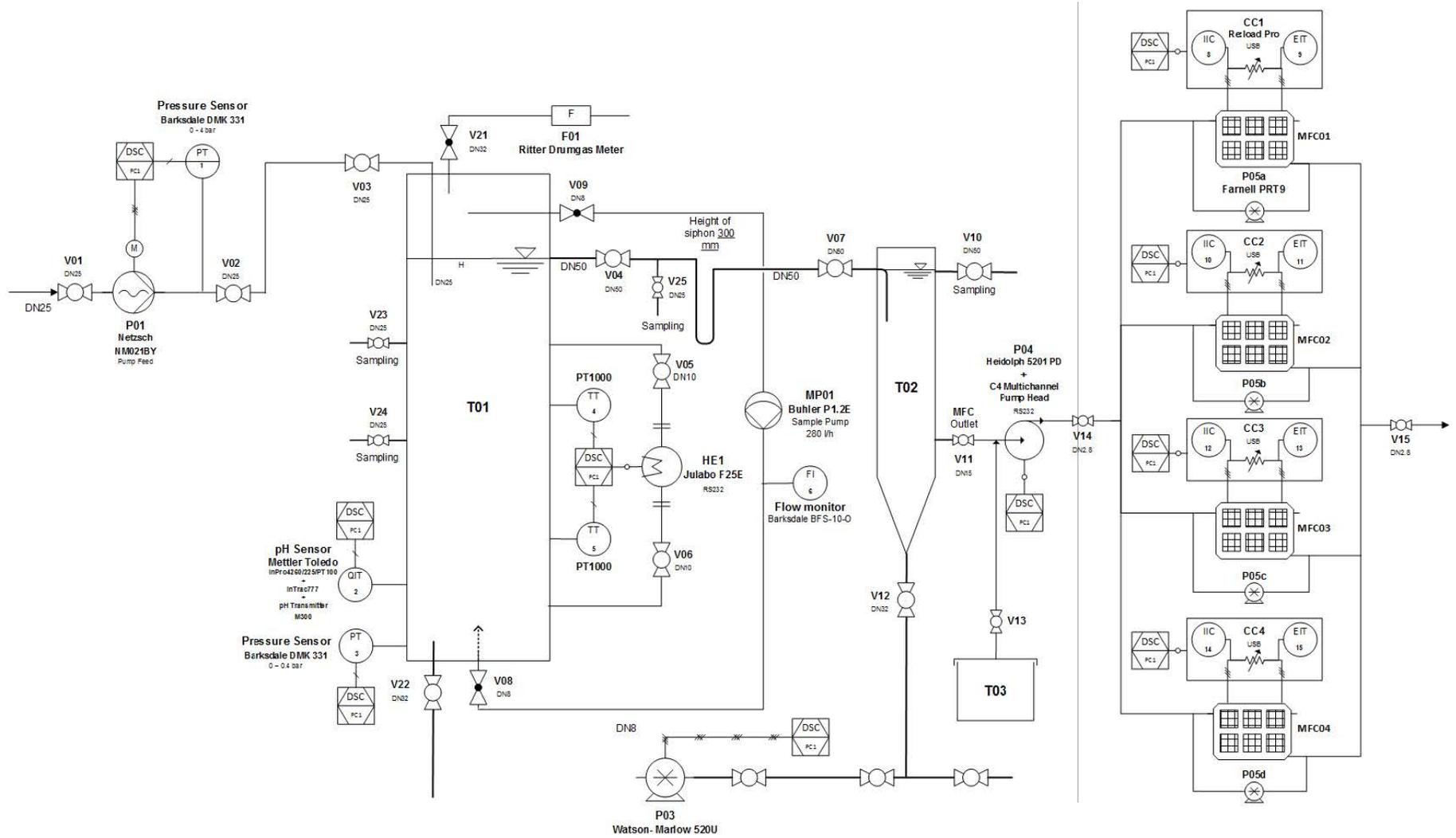
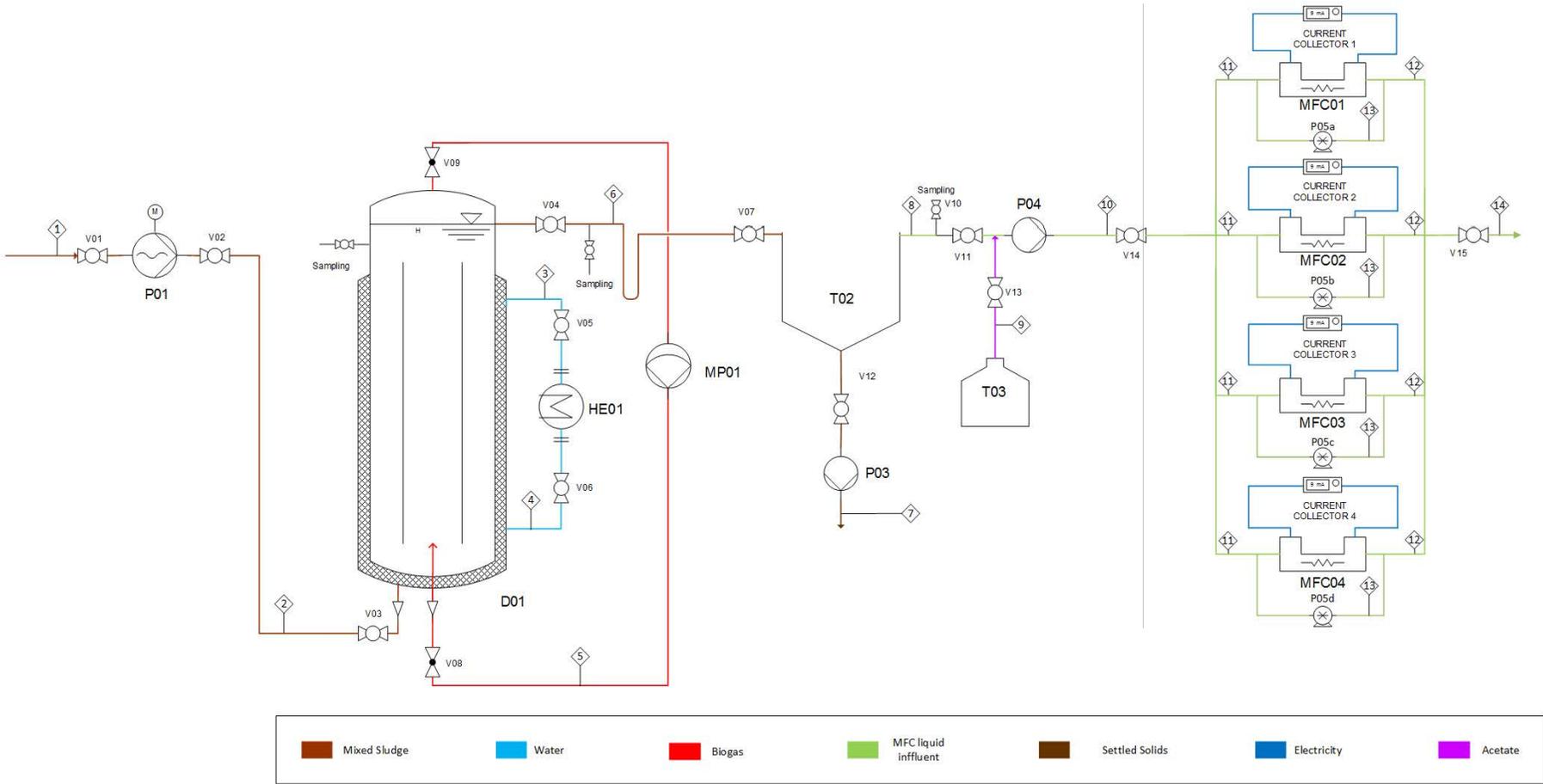


Figura 2.7. Esquema de flujos para el prototipo de planta piloto de MFC4Sludge



El sistema modular integra el digester anaeróbico acidogénico hidrolítico (HA-AD) que produce ácidos grasos volátiles (VFA) utilizando lodos municipales, y la MFC que transforma los fluidos ricos en VFA del sedimentador en energía.

El diagrama observado en la figura 2.5 representa todo el sistema, diferenciando los 2 subsistemas que lo componen. Además se incluyen los elementos de entrada y salida de cada subsistema.

La figura 2.6 es una representación de los equipos que conforman el prototipo (tanques, sensores, bombas, etc.) y las conexiones entre ellos, tanto físicas como eléctricas y a nivel de control. En la figura 2.7 se presenta un esquema en el que se especifican la composición y el sentido de los flujos entre equipos. Por último, en la figura 2.8 podemos apreciar una imagen del prototipo real durante su montaje en la planta depuradora.

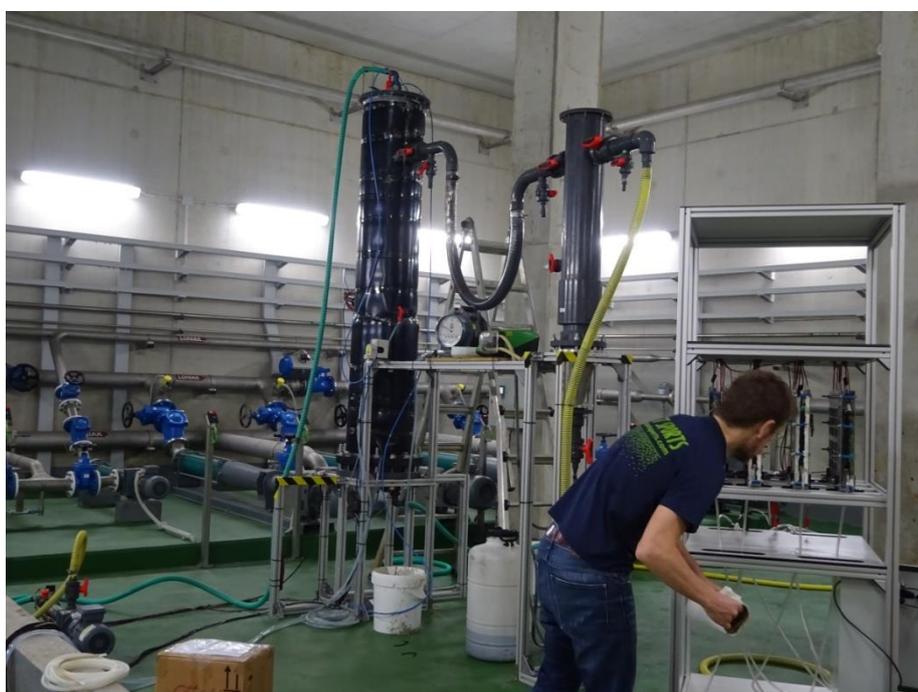


Figura 2.8. Montaje del prototipo de planta piloto de MFC4Sludge

2.2.1. Subsistema HA-AD

El subsistema HA-AD comprende el recipiente digester y todos los equipos auxiliares necesarios para realizar la digestión anaerobia acidogénica hidrolítica (HA-AD). Este módulo está encerrado y soportado por una estructura construida a base de perfiles de aluminio cuyo diseño se puede apreciar en la figura 2.9.

También forma parte de este subsistema el tanque de sedimentación, soportado en una estructura similar de perfiles de aluminio. El sedimentador se usa para la separación de material sólido y líquido del fango antes de la etapa de la MFC. La figura 2.10 y 2.11 muestran una visión del conjunto, tanto a nivel de diseño como en la realidad.

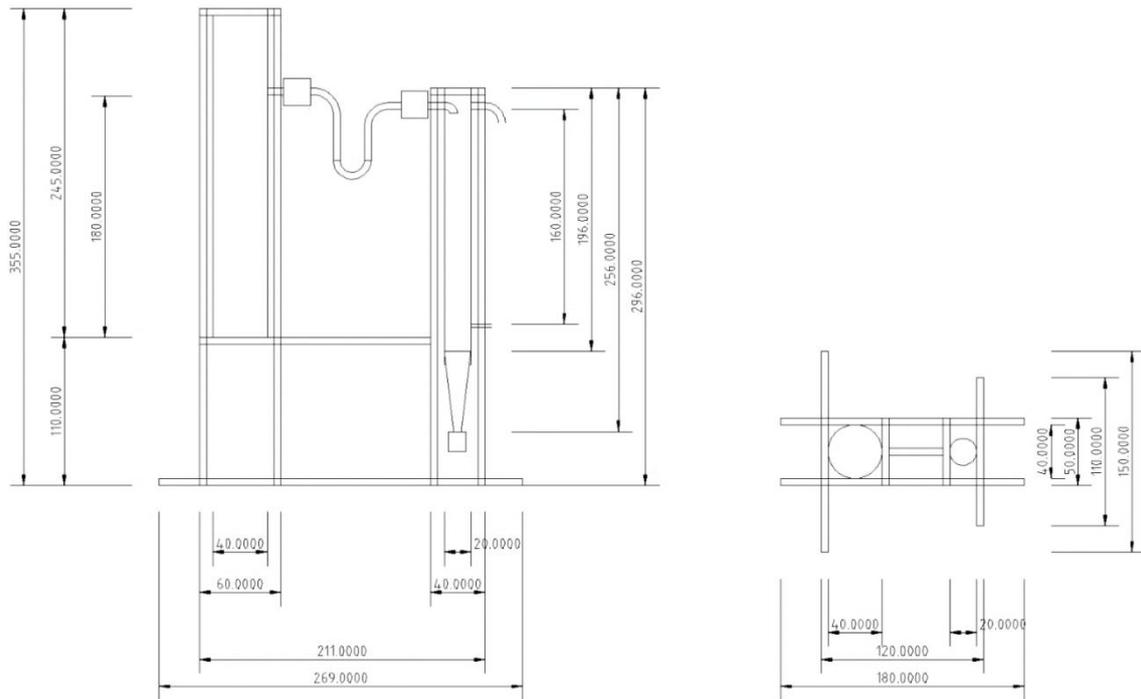


Figura 2.9. Alzado y planta del diseño en perfiles del subsistema HA-AD

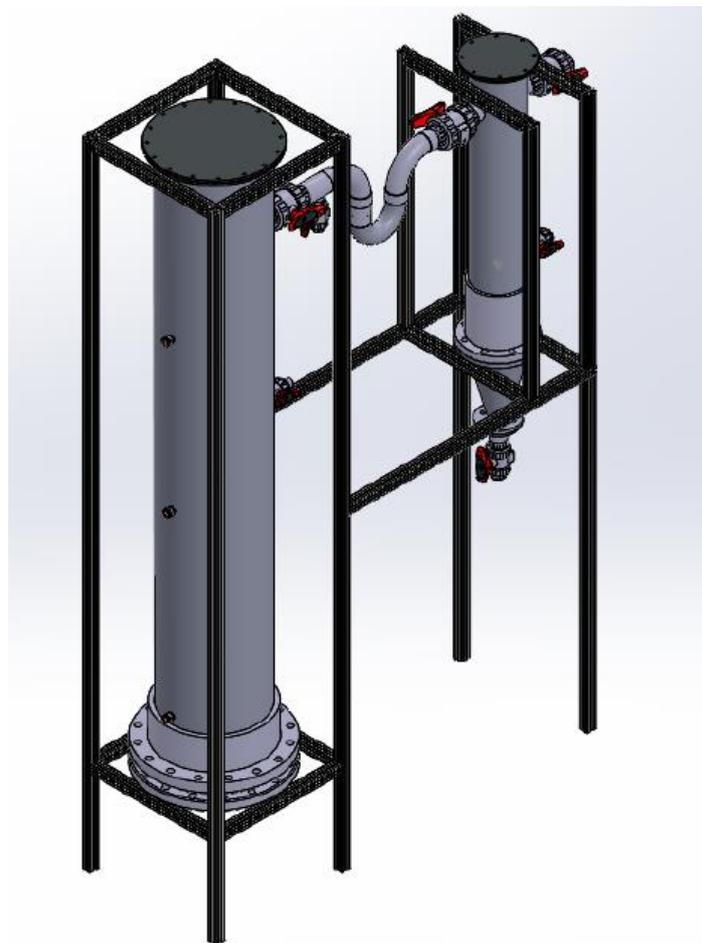


Figura 2.10. Esbozo 3-D del diseño de perfiles del subsistema HA-AD



Figura 2.11. Imagen del montaje del subsistema HA-AD

Las entradas al subsistema de HA-AD son: fango, agua y electricidad (alimentando a las bombas y sensores).

Las salidas del subsistema de HA-AD son: sedimentos sólidos y fango procesado (sedimentado).

2.2.1.1. Bomba de alimentación (P01)

Para introducir el lodo en el digester se utiliza una bomba NEMO® NM021BY (Fig. 12) que es de desplazamiento positivo. El rotor tiene forma de hélice y, por lo general, está hecha de un material metálico. El estator, normalmente un elastómero, tiene forma de una doble hélice, que se ajusta al paso de la hélice del rotor. Durante la compresión, el ajuste entre el rotor y el estator crea una serie de cámaras selladas que denominamos cavidades. Cuando el rotor gira dentro del estator, el medio se mueve continuamente desde la entrada a la salida de las cavidades produciendo la compresión del fluido.

Los principios en los que se basan las bombas NEMO® se exponen a continuación:

- No hay válvulas de aspiración o de presión, pero mantienen un caudal estable en proporción con el número de revoluciones.
- Tienen una succión mantenida hasta 28'. La capacidad de vacío es entre 24' y 25'.
- Pueden transportar todo tipo de sustancias, incluidas las no homogéneas, gaseosas y abrasivas; así como aquellas que no son de una consistencia líquida, o que contengan sólidos y/o materiales fibrosos.
- Son capaces de trabajar con sustancias de alta viscosidad.



Figura 2.12. Bomba de alimentación NEMO NM021BY (P01)

La bomba utiliza un motor Nord 80L/4 TF que mueve el rotor. Este motor trifásico trabaja a 380 V / 50 Hz con un consumo de corriente de 2.1 A, lo que produce un consumo de 0.75 kW de potencia.

2.2.1.2. Bomba de agua (P02)

Aunque esta bomba no aparece en las figuras 2.6 y 2.7 porque se pensó en no incluirla, tras realizar varios experimentos, se decidió mantenerla en el diseño por la excesiva densidad de los lodos que alimentaban el digestor. El modelo de esta bomba es Waston Marlow 503 U. En la figura 2.13 se puede apreciar dicho modelo.



Figura 2.13. Bomba de agua Waston Marlow 503U (P02)

Debido a su posterior inclusión, la bomba funciona en modo continuo a un flujo constante que el operador del prototipo variará en torno 18.33 litros al día, dependiendo del flujo con el que trabaje la bomba de alimentación (P01).

El funcionamiento de estas bombas peristálticas es relativamente simple, ya que utilizan un tubo de goma dispuesto en forma de semicírculo dentro del casete y comprimido entre un rodillo y la pista externa del casete. El rodillo crea una obturación en el punto de contacto, y a medida que el rodillo avanza a lo largo del tubo, este recupera su forma original, generando un vacío parcial que se llena por el fluido aspirado desde el orificio de entrada. Las revoluciones de giro y el tamaño del casete generan el flujo que se obtiene de la bomba.

2.2.1.3. Tanque Digestor (T01)

El tanque digestor consiste en un reactor de vidrio tubular con tubos de PVC unidos y válvulas de mariposa para la carga, descarga y el muestreo (ver figuras 2.9, 2.10 y 2.11). Su volumen es de alrededor de 260 litros (0,26 m³). Está equipado con un bucle para mezclar el contenido del reactor a través de la recirculación de biogás. También está recubierto con un material aislante y se calienta a través de la recirculación de agua caliente. Para todo ello, consta de puertos roscados usados para introducir el sensor de pH, las sondas de temperatura y de presión.

2.2.1.4. Bomba de recirculación de gases (MP01)

El prototipo utiliza una bomba de gas Buhler® P1.2E (ver figura 2.14) para recircular el biogás producido. A pesar de que el objetivo es evitar tanto como sea posible la producción de biogás (que es contraproducente para elevar los VFAs), la introducción diaria de lodo fresco hace que al menos una pequeña cantidad de biogás se genere cada día. A través de un tubo colocado en la parte inferior del tanque, la bomba de recirculación introduce el biogás producido en su interior. De esa manera, las burbujas de biogás mezclan el contenido del digestor, mientras se mueven hasta la parte superior del tanque. El biogás es recogido por otro tubo en la parte superior del tanque que alimenta la bomba. Los tubos de gas están conectados a través de conexiones roscadas (G ¼ "). El motor de la bomba funciona a 230 V / 50 Hz con un consumo de corriente de 0,44 A.

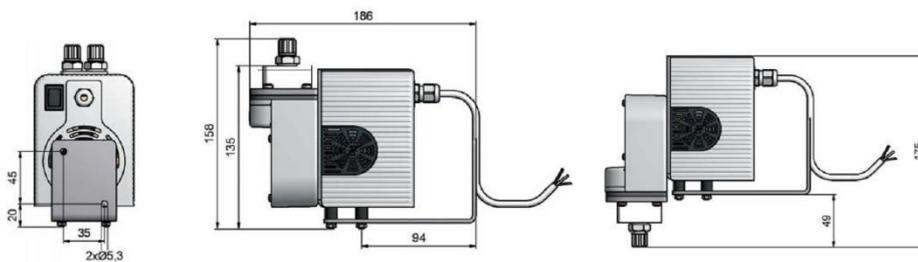


Figura 2.14. Bomba de recirculación de gas Buhler P1.2E (MP01)

2.2.1.5. Unidad de control térmico (HE1)

Para el control de la temperatura del tanque digestor se utiliza un calentador/refrigerador JULABO® F25ED, que se puede apreciar en la figura 2.15. Aunque este equipo se ha diseñado para controlar la temperatura de los fluidos en un tanque interno, también cuentan con una bomba para el control de temperatura de sistemas externos. La capacidad de control de temperatura comprende el rango de temperaturas entre $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una resolución de $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una estabilidad de temperatura de $\pm 0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Además, este equipo puede operar con una temperatura de trabajo fija, seleccionando su valor directamente a través de panel de control del mismo. Utilizando el programador integrado, también es posible aplicar un perfil específico de temperatura para procesos que requieren variaciones de la misma. Su ajuste y lectura también se pueden realizar de forma remota a través de una comunicación serie con un PC, a través de la interfaz RS232. El calentador utiliza refrigerante R134a y tiene un consumo de corriente de 12 A con 230 V / 50 Hz.

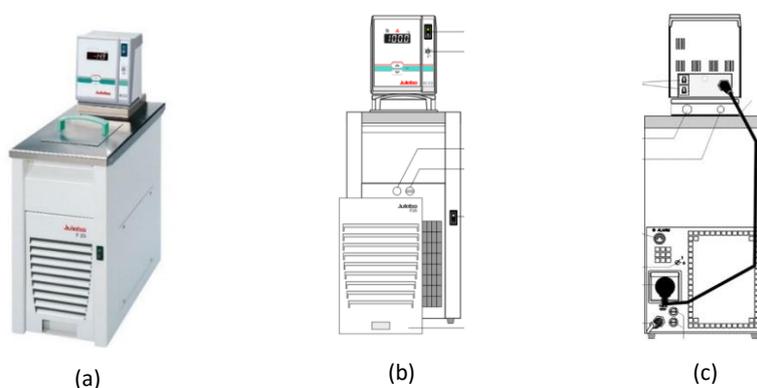


Figura 2.15. Unidad de control térmico Julabo F25ED (a), imagen frontal (b), imagen trasera (c)

2.2.1.6. Monitor de flujo de gas

Para controlar que existe flujo de biogás, se ha introducido en el prototipo un monitor de flujo analógico, que consta de una aguja que rota en una esfera indicando los litros de gas que van atravesándolo a lo largo del tiempo. Se usa para observar que la bomba de recirculación de gas está activa y para estimar el flujo del mismo. Se puede apreciar en el centro de la imagen 2.11, sobre la estantería.

2.2.1.7. Sensores de Temperatura

Se utilizan dos sondas de temperatura del modelo PT-100 para conocer la temperatura del tanque digestor en diferentes niveles del mismo.



Figura 2.16. Sensor de temperatura PT-100 (a) y conversor ST120 (b)

Para obtener la medida en formato 4-20 mA se utilizan conversores del tipo ST120, programados para el rango de temperaturas de 0 a 50 °C. En la figura 2.16 se puede apreciar los sensores y los conversores que se han utilizado en el prototipo.

2.2.1.8. Sensor de pH

La varilla de medida de pH METTLER TOLEDO InPro®4260 es un electrodo de pH casi sin mantenimiento y resistente a altas presiones con un electrolito de polímero sólido (XEROLYT EXTRA) junto con una barrera de iones de plata (ver figura 2.17 a). El diafragma donde se introduce la varilla, es de un tipo de abertura especial, de modo que existe contacto directo entre la sustancia que está siendo medida y el electrolito. El sensor de temperatura integrado detrás de la membrana de vidrio de pH permite una compensación automática precisa del efecto de la temperatura sobre la señal de la sonda. De este modo, obtendremos una medida fiable del pH aunque varíe la temperatura del proceso. Tiene un conector VarioPin™, que es estándar en la industria.



Figura 2.17. Varilla/sensor de pH (a) y equipo transmisor (b)

El cable VP6-ST, que conecta la varilla medidora al equipo transmisor METTLER TOLEDO M300 pH (ver figura 2.17 b) tiene una calificación IP68 resistente al agua y garantiza una conexión sólida. El equipo transmisor ofrece una interfaz de 4-20 mA para la lectura y puede funcionar con una fuente de alimentación de 24 a 230 V DC / AC, siendo su consumo de corriente muy bajo.

2.2.1.9. Sensores de presión

El prototipo utiliza dos sensores de presión industrial Drucksensor® DMK331 (ver figura 2.18). Uno de ellos se usa para medir el nivel de lodo en el interior del digestor por medio de presión diferencial. La tecnología de medición del nivel mediante presión diferencial nos permite calcular la altura que alcanza el líquido mediante la medición de la presión generada por el mismo en el recipiente. Requiere un proceso de calibración antes del montaje del sensor. La configuración típica de 2 cables ofrece una interfaz de 4-20 mA con una tensión de alimentación de 24V DC.

Por otra parte, también se utiliza un sensor de presión del mismo modelo al anteriormente mencionado para sondear la presión que ejerce la bomba de alimentación P01 al introducir lodos en el tanque digestor.



Figura 2.18. Sensor de presión DMK331

2.2.1.10. Sedimentador

El tanque de sedimentación es un cilindro del mismo material que el digestor rematado en una sección cónica, con tubos de PVC unidos y válvulas de mariposa para la carga, la descarga y el muestreo. Su volumen es de alrededor de 100 litros (0,1 m³). Se une al tanque digestor a través de un sifón en forma de 'U' como se podía apreciar en las figuras 2.9, 2.10 y 2.11.

2.2.1.11. Bomba de residuos sólidos (P03)

El modelo de esta bomba es Waston Marlow 520 U, que se puede apreciar en la figura 2.19. Este equipo funciona con un caudal constante y para modificarlo, periódicamente se enciende y se apaga, obteniendo el flujo que se desea. El funcionamiento es idéntico al descrito en el punto 2.2.1.2.



Figura 2.19. Bomba de residuos sólidos Waston Marlow (P03)

2.2.2. Subsistema MFC

El subsistema MFC considera todo el equipamiento necesario para tratar el efluente de la digestión anaerobia parcial después del tanque de sedimentación. Este módulo está enclaustrado en una estructura de perfil de aluminio (figura 2.20 a), que soporta cuatro unidades de MFC de 2,5 litros cada uno, una bomba de la alimentación, cuatro bombas de recirculación integradas en una caja de bombas, un conjunto de cargas activas electrónicamente controlables y todos los elementos auxiliares necesarios (cables, tubos y conectores). La figura 2.21 muestra todos los elementos descritos anteriormente montados en la estructura.

Las entradas al subsistema de MFC son: efluente de la digestión anaerobia parcial, acetato (sólo durante la fase de arranque) y electricidad.

Las salidas del subsistema de reforma son: lodos tratados y electricidad.

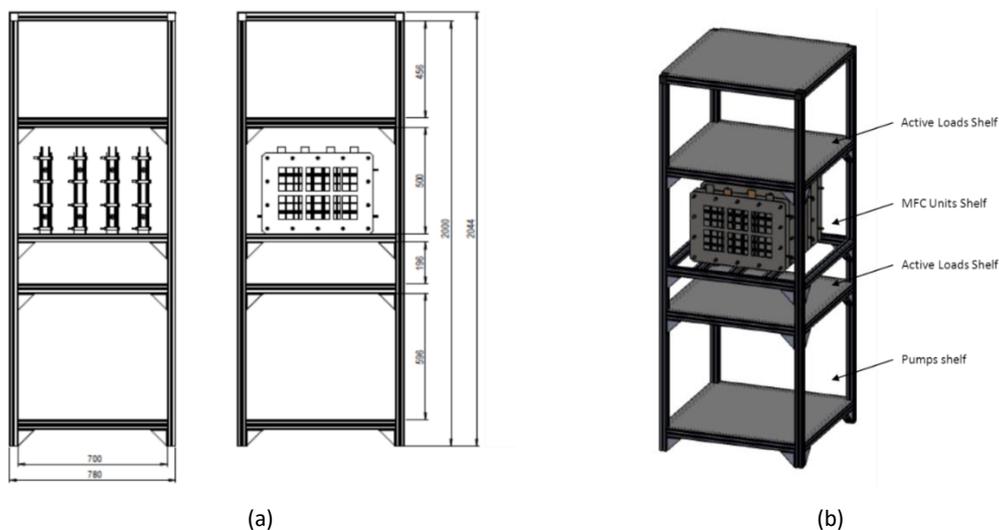


Figura 2.20. Representación gráfica del subsistema MF: representación 2D (a) y 3D (b)



Figura 2.21. Imagen del montaje del subsistema MF

2.2.2.1. *Tanque de Acetato*

En la etapa de inicial de arranque, las unidades de las MFC deben generar una película en los polos de la MFC, que concentrarán las colonias de bacterias y que asegurarán el correcto funcionamiento de la MFC.

Para que este proceso se produzca de manera más rápida y eficiente, conviene introducir acetato diluido en agua en vez de los fangos tratados para alimentar las bacterias. Este procedimiento de arranque puede comprender un periodo entre 10 y 30 días (variando por la temperatura, cantidad de inóculo, concentración de bacterias deseada mínima, etc.). Otra consideración a tener en cuenta es el cambio a alimentación con lodos tratados de forma gradual, que puede beneficiar en cuanto a efectos del cambio en la colonia de bacterias.

2.2.2.2. *Bomba de alimentación (P04)*

Una bomba Heidolph 5201, como la que se aprecia en la figura 2.22 'a' es la que alimenta el set de subunidades de la MFC. Como hay cuatro unidades, se usa un cabezal multicanal con su adaptador correspondiente. En nuestro caso concreto, el cabezal de la bomba es del modelo C4, montado con casetes pequeños y tubo de 2,8 mm de diámetro interno para alcanzar el flujo de alimentación requerida de 8,3 ml/min por célula MFC.



Figura 2.22. Bomba de alimentación MFC (a) y bombas de recirculación (b)

Hay un tubo por casete, cada uno asociado a una unidad de MFC diferente, de modo que cuando la bomba se acciona, los rodillos del cabezal de la bomba giran y todos los tubos se presionan simultáneamente contra la estructura del casete, propulsando el fluido dentro de ellos. La dirección de rotación es conmutable, pero el sentido de rotación sólo se puede cambiar en punto muerto. El accionamiento de la bomba puede ser manual a través de su panel de control, aunque también puede ser controlada remotamente a través de su interfaz serie RS232.

2.2.2.3. Bombas de recirculación (P05x)

En cuanto a la recirculación de los lodos en la MFC, se usa un cuadro que contiene cuatro bombas Farnell® PRT9 (ver figura 2.22 b). Estas bombas tienen un flujo fijo y podría variarse apagándolas periódicamente con un temporizador, pero experimentalmente se ha llegado a la conclusión de que es preferible su uso en continuo. Trabajan a 230 V AC con un consumo de energía de 3,5 W cada una.

2.2.2.4. Unidad MFC

Para construir el prototipo de 10 litros, se ha considerado descomponerlo en 4 subunidades. Como fundamento, el diseño de la MFC se basa en el diseño inicial de 1 litro para el prototipo de laboratorio. La principal diferencia reside en el espesor de la cámara anódica, que será de 30 mm. Los tamaños y otras especificaciones de los MFC se describen en la Tabla 2.2.

Una imagen de la célula desmontada se puede observar en la figura 2.23 a. Las unidades se colocan en un bastidor metálico (ver figura 2.23 b) para confinarlas. El bloque MFC de 10 litros montado se muestra en la figura 2.23 c. Teniendo en cuenta la composición de los materiales y tamaños, el peso del sistema es de alrededor de 90 Kg.

| Número | Cantidad | Nombre | Dimensión | Grosor | Material | Tecnología |
|--------|----------|------------------|--------------|--------|------------------|-----------------|
| 1 | 1 | Cámara 2.5 L | 460 x 320 mm | 25 mm | PMMA | Máquina |
| 2 | 8 | Goma | 460 x 320 mm | 2 mm | Goma | Corte |
| 3 | 2 | Ánodo | 420 x 280 mm | - | Fibra de Carbono | Corte |
| 4 | 2 | Ventana ánodo | 460 x 320 mm | 1 mm | SS 316 | Láser |
| 5 | 4 | Tyvek slim | 420 x 280 mm | - | Tyvek 1560k | Corte |
| 6 | 2 | Ventana Cátodo | 460 x 320 mm | 1 mm | SS 316 | Láser |
| 7 | 12 | Cátodo | 100 x 100 mm | - | Metal doped CNF | Electrospinning |
| 8 | 2 | Maya espaciadora | 420 x 280 mm | 1 mm | Plástico | Estándar |
| 9 | 2 | Cubierta | 520 x 380 mm | 3 mm | SS 316 | Láser |

Tabla 2.2. Materiales de construcción de la MFC

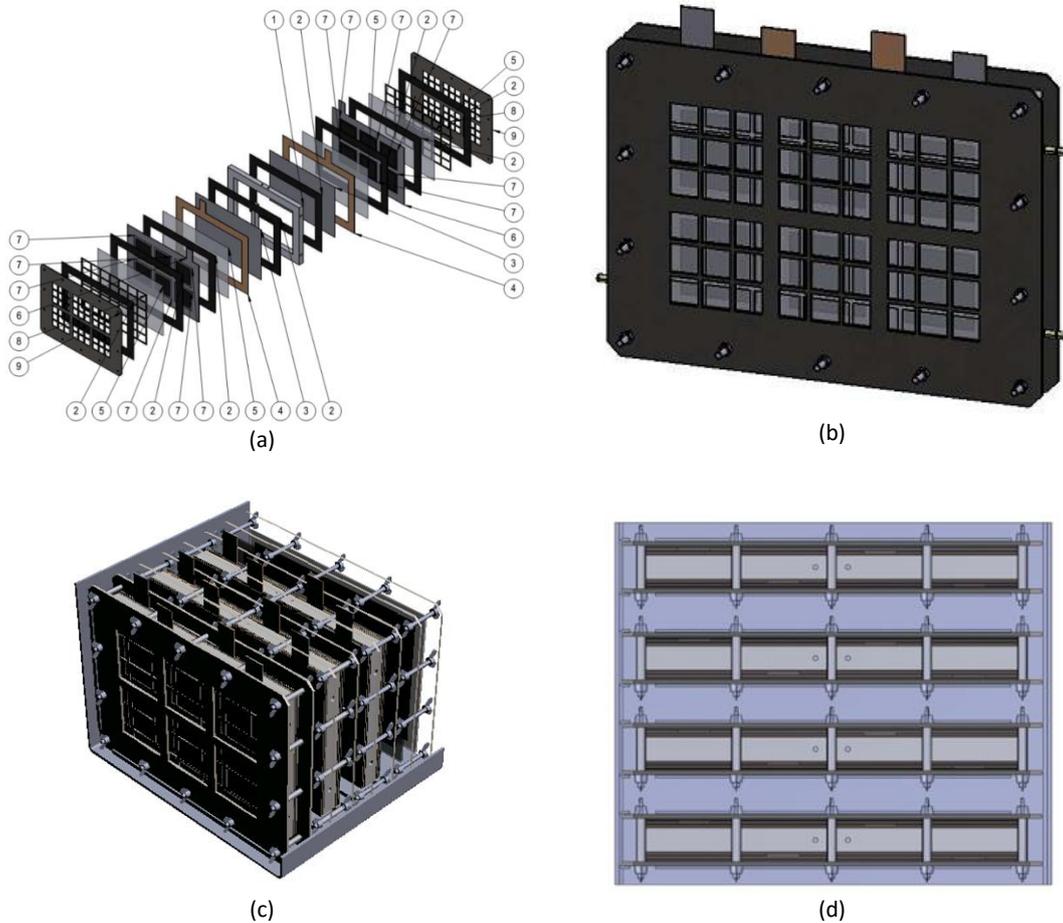


Figura 2.23. Unidad MFC desmontada (a), Unidad MFC montada (b), visión 3-D del bloque MFC (c), planta del bloque MFC (d)

2.2.2.5. Cargas Activas

En este proyecto, se utilizan 4 Re: Load Pro de Arachnid Labs como colectores de corriente (ver figura 2.24). La Re: Load Pro es una carga activa y actúa como un sumidero, siempre solicitando la misma cantidad de corriente con independencia de la tensión entre sus terminales. Ofrece una interfaz USB para la alimentación y el control/monitorización, una pantalla retro-iluminada de buena calidad, y precisión en la medición de tensión y amperaje.

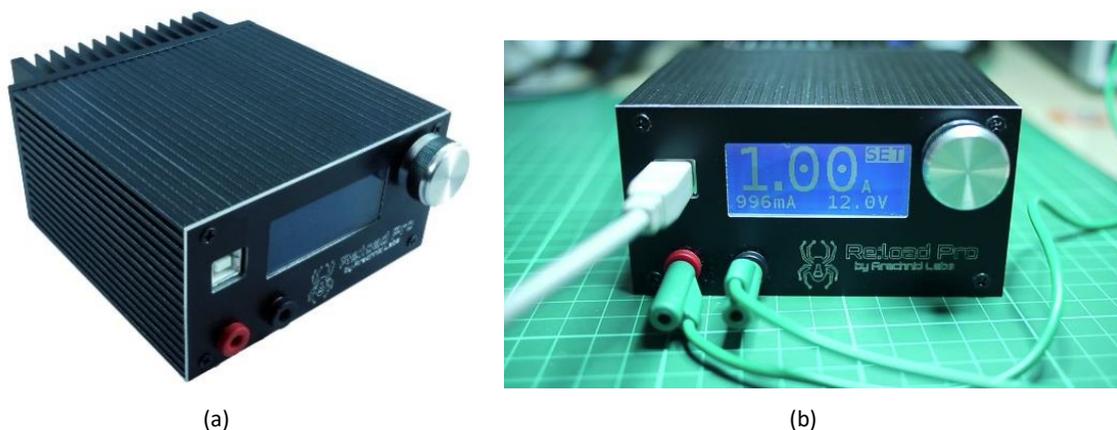


Figura 2.24. Cargas activas

La Re: Load Pro es capaz de disipar 25 vatios continuamente, o más durante períodos cortos. Puede manejar hasta 6 amperios o 60 voltios, funcionando en 0 V, también. Es fácil de utilizar y tiene una interfaz de usuario intuitiva. La corriente es ajustable con precisión de miliamperios en todo el rango. Es totalmente controlable a través de USB, con funcionalidad de supervisión. Además, proporciona protección contra sobre-corriente, sobretensión, sobrecalentamiento, ESD y polaridad inversa; con su interfaz USB, el equipo está totalmente aislado de cualquier interacción directa con voltajes y corrientes peligrosas.

2.2.3. PC de control y equipos auxiliares

Este proyecto consta de un PC donde se ejecutará el software de control, así como diversos equipos auxiliares que se definirán en la tabla 2.3 expuesta a continuación.

En la imagen 2.25 se muestra el PC de control con los equipos de conexión de red (router, hubs, etc.) y el cuadro eléctrico. Se debe puntualizar que el diseño y fabricación de este cuadro es parte del trabajo de un servidor. Un esquema del diseño puede ser observado en la figura 2.26.

Para el control de todo el prototipo, así como de los elementos y equipos de que consta, se han desarrollado diversos software e interfaces que serán expuestos en puntos posteriores.

| ELEMENTOS | FUNCIÓN | SITUACIÓN |
|------------------|---|-------------------|
| 2 Hubs | Alimentar las cargas activas y conectarlas con el PC | Mesa PC |
| Tarjeta PCI NI | Medir las señales de los sensores y transmitir las señales de actuación comunicadas por el PC | Cuadro de control |
| Conmutador | Conectar y desconectar la bomba P01 (trifásica) | Cuadro de control |
| 4 Relés | Conectar y desconectar las bombas bifásicas y el conmutador | Cuadro de control |
| Fuente de 24V DC | Alimentar los sensores de presión y temperatura | Cuadro de control |
| Router | Conectar el prototipo para tele-control y visualización de datos | Mesa PC |

Tabla 2.3. Equipos auxiliares



Figura 2.25. Puesto y PC de control y cuadro eléctrico

3. Fundamento Teórico

A lo largo de este apartado se explicarán los fundamentos teóricos en los que se basan los conocimientos desarrollados en este proyecto. Los controladores son necesarios en todos los procesos que requieren modos de operación automática y, por tanto, el proyecto MFC4Sludge no es una excepción.

En nuestro caso particular comentaremos la teoría de los dos métodos utilizados para control automático: *Power Tracking* y *Fuzzy Logic Control*. Además expondremos las técnicas que usa la MFC para obtener energía a partir de las sustancias que la alimentan.

3.1. Teoría sobre Fuzzy Logic Control

En este apartado nos centraremos en el control del prototipo, visualizándolo como un sistema que se desea controlar. Expondremos los problemas fundamentales de nuestro sistema y la manera más eficiente de abordarlos y solucionarlos.

3.1.1. Introducción de control automático

Definiendo el sistema, podemos distinguir entre señales de actuación que denominaremos de entrada a nuestro sistema 'u', compuestas por una constante 'U' que depende del punto de trabajo y una variación ' Δu ', de modo que:

$$u = U + \Delta u$$

De forma similar, tenemos también las señales del sistema 'y', que serán medidas con sensores y que dependen de las características del sistema. Podemos descomponer la salida del sistema en una constante 'Y' que depende del punto de trabajo y una variación ' Δy ', de modo que:

$$y = Y + \Delta y$$

El bloque de control usa la salida del sistema 'y' y una señal de referencia 'r' para obtener su entrada como se muestra en la figura 3.1. La entrada típica de dicho bloque es la diferencia entre la referencia 'r' y la salida del sistema 'y' que genera la señal de error 'e'. El controlador produce como salida variaciones de la señal de entrada al sistema ' Δu ', que junto a la entrada en el punto de trabajo 'U', conformará la entrada al sistema 'u'.

En esta forma de control, suponiendo que el controlador implementa un efecto integral, existe una tendencia a que el error se haga nulo, es decir, que la salida del sistema se iguale a la referencia. Aunque depende del tipo de controlador, por norma general, si el error no se hace cero, el controlador seguirá ejerciendo influencia en la salida para que se alcance la referencia. Este hecho hace que los controladores del tipo PI o PID no sean efectivos con sistemas con retardo, o se comporten mal cuando no están bien ajustados sus parámetros (produciendo oscilaciones y saturaciones).

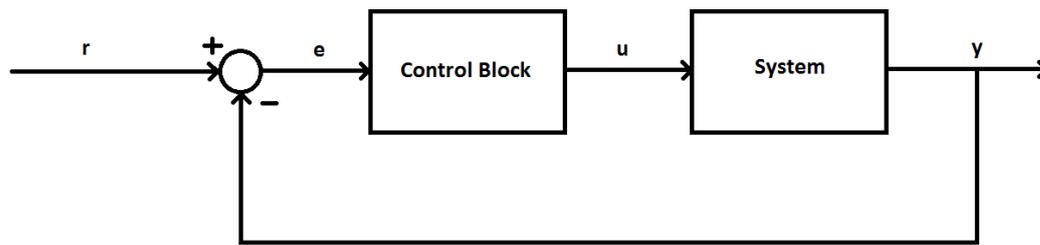


Figura 3.1. Forma de control tradicional con bucle cerrado

En nuestro caso, ciertos parámetros clasificados como salida del sistema, requieren análisis de los lodos en el laboratorio y la posterior introducción del resultado del análisis en el software. Estos parámetros los denominamos off-line y no solo generan un retardo en la respuesta del sistema (ya que requieren que el operador extraiga los lodos, los analice e introduzca los datos obtenidos), sino que además este retardo es variable puesto que los análisis no siempre tardan lo mismo (el laboratorio puede estar ocupado, el operador no siempre tarda lo mismo en extraer las muestras o en introducir los datos, etc.). Por tanto, se puede considerar nuestro sistema como no lineal.

Por todo lo anteriormente expuesto, es razonable pensar que los métodos tradicionales de control no son adecuados y efectivos en nuestro caso específico. La solución de este problema pasa por utilizar técnicas de *Fuzzy Logic Control*.

3.1.2. Solución: Fuzzy Logic Control

Detallando más profundamente los conceptos básicos del Fuzzy Logic Control, el controlador produce sus salidas siguiendo un conjunto de reglas lógicas definidas. Evidentemente, el valor asignado a la salida dependerá de dichas reglas y del valor de la entrada. Para describir con propiedad esta forma de control debemos definir una serie de conceptos:

1. Variable: puede ser tanto una entrada como una salida. Debemos determinar su nombre, si es de entrada o de salida y el rango de valores que puede adoptar y las 'membership function' que la describan. Debe existir una por cada variable de entrada y de salida del bloque de control.
2. Membership function: es una función de distribución de probabilidad que determina el valor de la variable a la que pertenece. Las variables suelen contener varias 'membership functions' que describen con que probabilidad tomara un valor concreto. Las 'membership functions' necesitan definirse con un nombre y una distribución (Triangular, Trapezoidal, Gaussiana, etc.)

- Reglas lógicas: Establecen las relaciones entre variables de entrada y de salida. De hecho, relacionan una (o varias) 'membership function' de una (o varias) variable de entrada con una (o varias) 'membership function' de una (o varias) variable de salida. Se pueden definir con diferentes operadores lógicos (AND, OR, XOR, etc.) para relacionar varias entradas o varias salidas a la vez. El formato es el siguiente:

IF (Variable Entrada) is (Membership function) THEN (Variable Salida) is (Membership function)

Los pasos para construir un controlador de este tipo serían los siguientes:

- Definir una tabla con los valores de las variables de entrada ('Fuzzification') y de salida ('Defuzzification').
- Implementar las variables con los valores de la tabla ('Fuzzification / Defuzzification').
- Implementar las 'membership function' de cada variable ('Fuzzification / Defuzzification').
- Definir una tabla con las relaciones lógicas entre los valores de las entradas y salidas ('Fuzzy Rule Base').
- Implementar las reglas lógicas en el controlador ('Fuzzy Rule Base').

Comparando el Fuzzy Logic Control y el control tradicional, la lógica difusa realiza tres procesos que se puede apreciar en la figura 3.2. El primero de ellos, 'Fuzzification' consiste en la adaptación de los valores físicos en señales del proceso (variables) con su rango de uso y definiendo sus 'membership functions'. El segundo proceso, 'Fuzzy Rule Base', define y emplea reglas lógicas para discriminar la salida del controlador a partir de una entrada después del proceso de 'Fuzzification'. Por último, el proceso de 'Defuzzification' revierte el primer proceso transformando variables de salida en valores físicos.

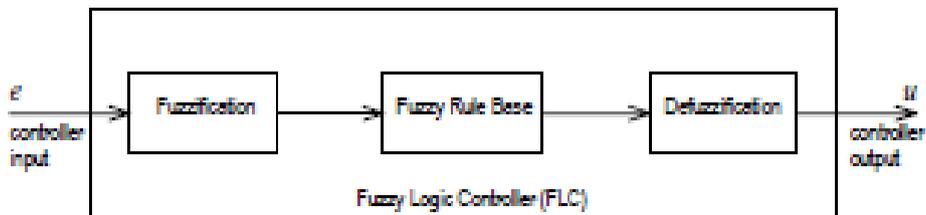


Figura 3.2. Esquema de Fuzzy Logic Control (FLC)

Dependiendo de la naturaleza y las características de las señales de la planta o sistema y de la señal de referencia, el FLC tiene que ser diseñado para adaptarse a las necesidades particulares, a fin de hacer el trabajo en bucle cerrado del sistema de control difuso para una aplicación en particular.

En este sentido, como el retardo de nuestro sistema es variable, podría producir un efecto de saturación en la salida del controlador. El FLC previene dicha saturación y simplifica, mediante los procesos comentados anteriormente, la implementación de un método de control que proporcione salidas estables y convergentes en un valor concreto mientras las entradas lo sean también.

Debido a la naturaleza de nuestro sistema (no lineal de retardo variable) y a las propiedades de los FLC, se ha implementado una forma de control como la que se muestra en la figura 3.3. El FLC implementa internamente el error, relacionando una serie de valores de entrada al sistema 'u' con los valores de salida del sistema 'y'. Debemos percatarnos entonces que las salidas del sistema 'y' serán las entradas del controlador y viceversa.

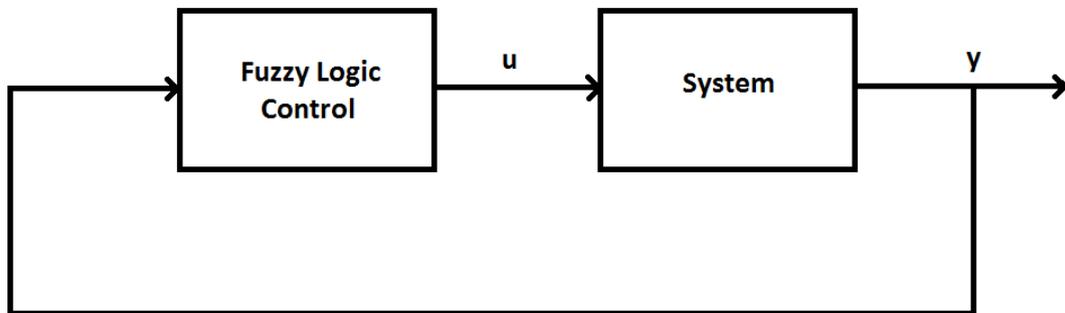


Figura 3.3. Esquema FLC empleado

Para aclarar la manera de implementar un controlador de lógica difusa, expondremos el siguiente ejemplo sencillo. Imaginemos una habitación con un sistema de calefacción. Simplificando el modelo del sistema, solo consideraremos dos variables, una de entrada que será la potencia aplicada al sistema de calefacción y una de salida que será la temperatura de la habitación.

Los posibles valores de las variables quedan especificados en la tabla 3.1. Recordamos que la entrada del sistema (potencia del sistema de calefacción) es la salida de nuestro controlador y viceversa.

| Nombre de la Variable | Tipo de Variable (Controlador) | Nombre del valor | Valor numérico |
|-----------------------|--------------------------------|------------------|----------------|
| Potencia | Salida | Parado | 0 |
| | | Bajo | 5 |
| | | Alto | 10 |
| Temperatura | Entrada | Muy Frío | 5 |
| | | Frío | 15 |
| | | Templado | 20 |

Tabla 3.1. Valores posibles de las variables del sistema ejemplo

Por tanto, en este caso hay dos variables con tres 'membership function' cada una. Para implementar el controlador también será necesario definir las reglas lógicas, que se muestran en la tabla 3.2.

| Variable de entrada (IF...) | Valor (is ...) | Variable de salida (THEN ...) | Valor (is ...) |
|-----------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|
| Temperatura | Templado | Potencia | Parado |
| | Frío | | Bajo |
| | Muy Frío | | Alto |

Tabla 3.2. Reglas lógicas del ejemplo

El valor numérico de la salida del controlador (Potencia) depende de la forma de las 'membership function' tanto de la variable de entrada como de las de salida. Por esta razón es muy importante una definición correcta de las mismas, centrandó la función en el valor numérico correspondiente y adecuando el rango de la función en el lugar adecuado. La figura 3.4 muestra una posible definición de las 'membership functions' para la variable de entrada de este caso ejemplo.

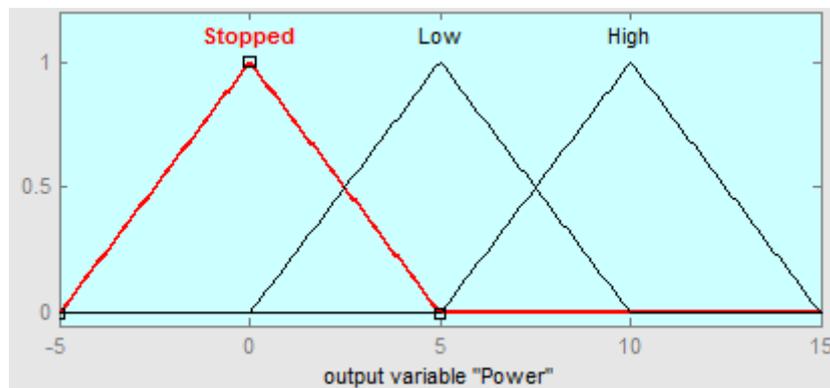


Figura 3.4. Ejemplo de 'Membership functions'.

Después de definir todos los parámetros anteriormente mencionados, el bloque de control producirá salida numérica para todo el rango especificado de la variable de salida cuando variemos el valor de las de entrada.

3.2. Teoría sobre MFC

En este proyecto se han aunado las técnicas de digestión anaeróbica hidrolítica acidogénica (HA-AD) y las que emplean la Microbial Fuel Cell (MFC), demostrando que pueden trabajar en conjunto. También se puede apreciar que se mejoran los límites de ambas tecnologías usadas de manera independiente, ampliando sus aplicaciones potenciales y obteniendo energía a través de procesos de bio-conversión. Dentro de este contexto, el prototipo planteado es capaz de tratar los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

A lo largo de este apartado, se analizarán las bases teóricas y la estructura de uno de los elementos más importantes dentro de este proyecto, la MFC. Además se expondrá las técnicas empleadas en el proceso de fabricación de la misma.

3.2.1. Partes de la MFC

Como se explicó en los apartados 2.1.3 y 2.2.2.4, en la fabricación de las MFCs se utilizan diversas capas de diferentes materiales para conformar dicho dispositivo. Pero si nos centramos en el funcionamiento del mismo, al igual que una batería eléctrica, se pueden distinguir tres partes fundamentales: Ánodo, Cátodo, y Electrolito.

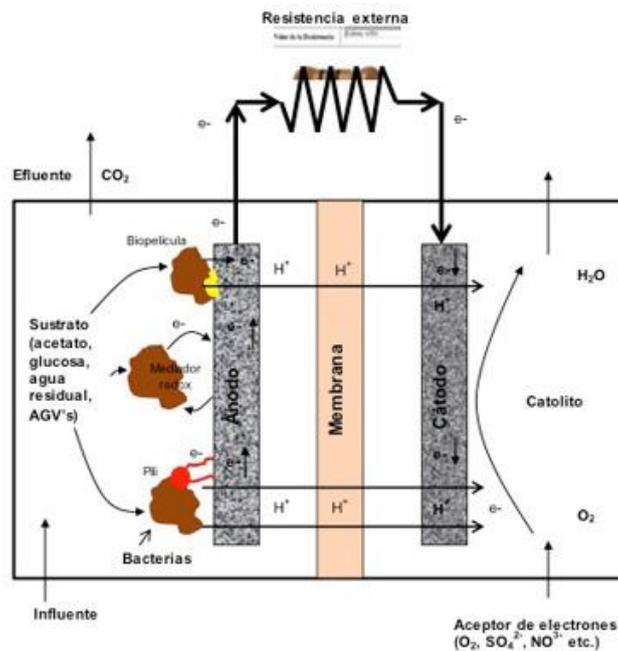


Figura 3.5. Esquema de funcionamiento teórico de las MFCs

La principal diferencia entre las baterías eléctricas y las MFCs es que en estas últimas se sustituye el electrolito por una sustancia denominada sustrato, que alimentará las colonias de bacterias alojadas en el ánodo y una membrana entre el ánodo y el cátodo. Las bacterias serán las encargadas de realizar una tarea similar al electrolito de una batería eléctrica, es decir, alimentándose del sustrato, provocan un proceso de oxidación mediante el cual se producen:

- Protones: que pueden atravesar la membrana situada entre el ánodo y el cátodo.
- Electrones: que producen corriente eléctrica cuando cerramos el circuito (por ejemplo, con una resistencia entre el ánodo y el cátodo).
- CO₂: Resultante del proceso de oxidación.

Todo este proceso se muestra en la figura 3.5. En apartados posteriores se ahondará en los materiales y técnicas utilizadas en nuestro caso particular para la fabricación de las MFCs.

3.2.1.1. Sustrato: Ácidos Grasos Volátiles (VFA)

En el contexto del proyecto MFC4Sludge, tras la digestión anaeróbica hidrolítica acidogénica (HA-AD), se obtiene un efluente con alto contenido de ácidos grasos volátiles (VFA), que es el principal compuesto que contiene la energía del sustrato. Por tanto, dicho sustrato rico en VFAs servirá como materia combustible de las MFCs, mejorando el rendimiento frente a la introducción de lodos sin tratar.

Con el prototipo de laboratorio se han estudiado varios materiales como diferentes VFAs, para establecer que sustancia se empleará como materia combustible óptima para la MFC en el proceso de 'start up' y también para simular las condiciones reales que se obtendrán con el prototipo de la planta depuradora. Tras revisar una extensa lista de sustratos empleados para la generación de energía, y comparando con la literatura, el acetato ha sido considerado como el VFA preferido para la producción de bioenergía. Si observamos la figura 3.6 y 3.7 podemos observar una comparación de los resultados obtenidos durante la experimentación con diferentes materiales.

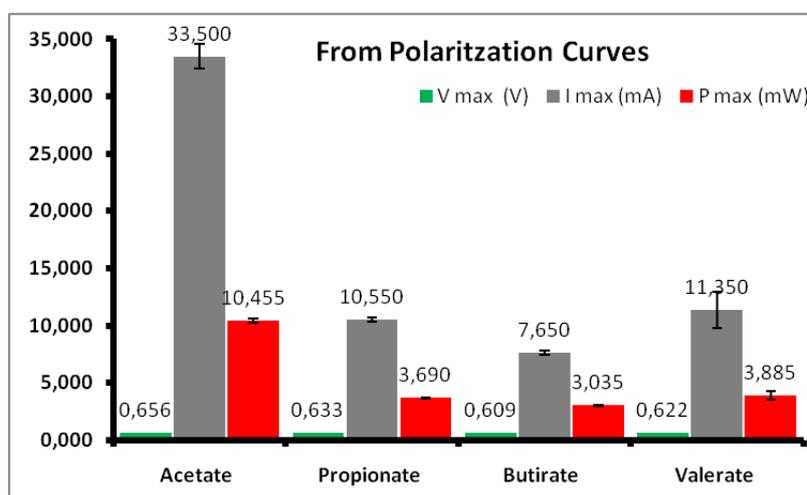


Figura 3.6. Parámetros eléctricos de la curva de polarización para diferentes VFAs

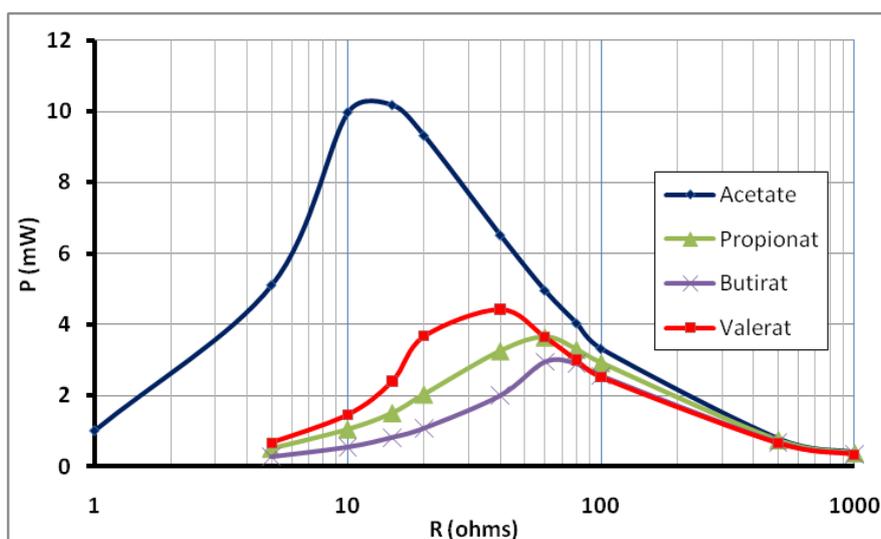


Figura 3.7. Curva característica de potencia para diferentes VFAs

Claramente el acetato proporciona los mejores resultados y es por este motivo que se usa una solución con acetato para el proceso de 'start up' de la MFC, que como ya se especificó anteriormente puede durar entre 10 y 30 días. Este proceso establece la generación del 'biofilm' en el ánodo, donde permanecen las colonias de bacterias.

3.2.1.2. Ánodo

Los sistemas Bio-electroquímicos (BES) son sistemas electroquímicos impulsados por microorganismos como catalizadores¹. MFC es una modalidad de BES y es el sistema más estudiado en la actualidad como tecnología de producción de electricidad y de tratamiento de aguas residuales. En este tipo de BES, los microorganismos en el ánodo realizan la función de catalizadores para la reducción de la materia orgánica.

La comunidad microbiana presente en la cámara anódica tiene una amplia gama de especies que desempeñan muchas funciones diferentes. Estos incluyen varias funciones, que van desde la hidrólisis de materia orgánica, los procesos de fermentación, así como la transferencia de electrones a los electrodos, entre otras.

La mayoría de los microorganismos se encuentran en los biofilms que cubren la cámara anódica, principalmente la superficie del electrodo. Estos biofilms, que se pueden apreciar en la figura 3.8, son también conocidos como biofilms electroactivos (EABEs) ya que contienen microorganismos electroquímicamente activos (EAMs) que son capaces de transferir electrones al electrodo (Schechter et al., 2013). Los EAMs son también conocidos como exoelectrógenos, electrógenos o bacterias de respiración del ánodo según el autor. Sin embargo, todas las nomenclaturas se refieren al mismo grupo de microorganismos. La figura 3.9 muestra dichos microorganismos.

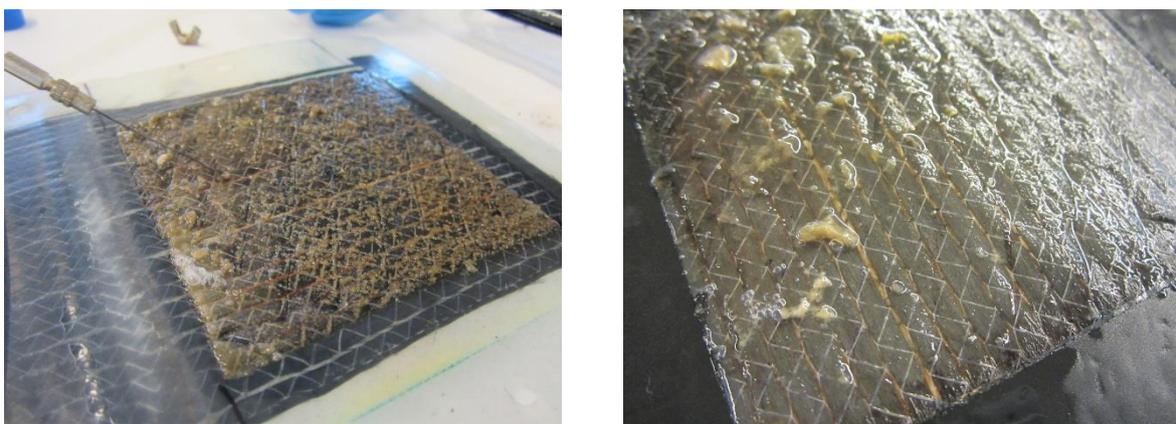


Figura 3.8. Imágenes del 'biofilm' creado en el ánodo de la MFC

Los EAMs juegan un papel crucial para la operación correcta de la MFC. Es primordial operar las MFCs de una manera específica para que la transferencia de electrones en los EABEs no se vea obstaculizada y la densidad de corriente se maximice.

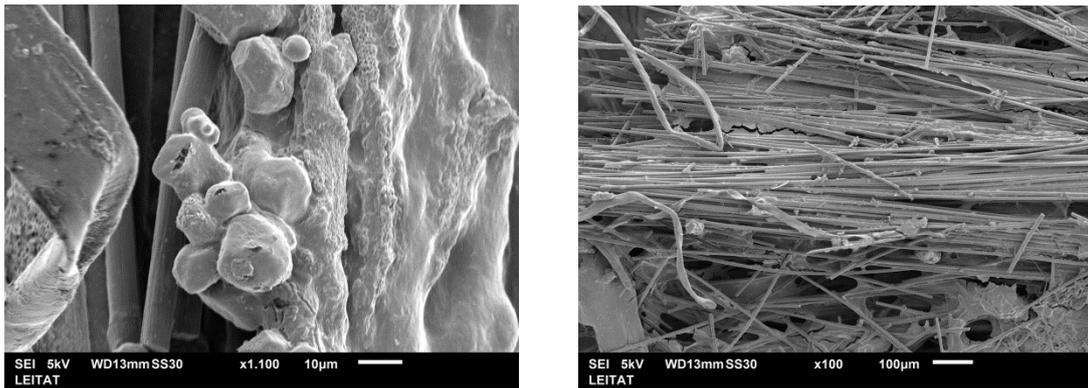


Figura 3.9. Imágenes en microscopio de las bacterias del ánodo de la MFC

Por esta razón, debemos evitar el crecimiento de los microorganismos que no son electroquímicamente activos (no EAMs) tales como metanógenos, nitrato-reductores y aeróbicos facultativos. Así garantiremos una transferencia del electrodo estable y se alcanzará una operación óptima en los EABEs.

Para lograr los objetivos anteriormente expuestos se requiere el estudio y desarrollo de técnicas para el diseño de interfaz de sistemas biológicos y optimización de los mismos.

3.2.1.3. Cátodo

Los cambios más importantes en la aplicación de células microbianas de combustible más recientes están relacionados con el control de la cinética de la reacción de reducción de oxígeno (ORR) que tiene lugar en el cátodo.

Inicialmente se usaba platino (Pt) como catalizador por los resultados que ofrecía en la ORR, pero el alto coste de este elemento puede representar incluso la mitad del precio de fabricación de la MFC. Por tanto, es deseable el desarrollo de catalizadores creados con otros materiales que consigan una elevada actividad de ORR, una mayor durabilidad y un menor coste.

En los últimos años, el rendimiento de las MFC ha sido mejorada mediante el uso de materiales nano-compuesto más baratos tales como carbono nano-estructurado en los electrodos. Entre sus propiedades destaca que son buenos conductores, son mecánicamente estables y una mayor actividad catalítica electroquímica en comparación con el Pt convencional. Además, por su naturaleza, los nano-materiales presentan mayor área superficial y mayor penetración, así como una mejor selectividad química.

El beneficio que conlleva un área mayor es una actividad superficial superior que las estructuras de material tradicional, lo que provoca que las reacciones químicas sean más rápidas conduciendo a un mejor rendimiento del sistema.

Por las razones expuestas, en el proyecto MFC4Sludge se han fabricado MFCs con cátodos creados a partir de nano-estructuras. Su proceso de fabricación será expuesto en apartados posteriores.

3.2.1.4. Membrana de separación de electrodos

De cara a la necesidad de que el cátodo presente impermeabilidad al agua y permeabilidad al oxígeno, debe existir una membrana semipermeable entre los electrodos que evitará fugas de líquido, pero a su vez permitirá la difusión del oxígeno (aire) en la superficie del mismo.

En nuestro caso, la membrana de referencia es el modelo TYVEK textil, aunque como alternativa LEITAT propone Celgard EZL 2090 y una capa anti-permanencia PDMS que se hace mezclando un elastómero de plata y un agente de curado (10: 1), la mezcla se bate y después se elimina el aire de la misma a través de vacío. La solución se coloca en un molde de teflón y se hornea a 150°C durante 10 min para obtener la membrana. Después del proceso de fabricación, se evalúa sus propiedades (resistencia textil a la penetración de agua y permeabilidad al oxígeno).

3.2.2. Método de fabricación del Cátodo

En nuestro caso particular, el material de referencia es el cátodo de EMEFCY, basada en tinta catalizadora de 50 micras depositada sobre una tela de carbono con una carga de 50-80 g/m². La composición de la tinta es una mezcla de un aglutinante PVdF, potenciadores de conductividad (carbono negro, fibras de carbono y nanotubos de carbono) y unos nano-catalizadores basados en carbono dopados con nitrógeno. Esta mezcla se deposita sobre la tela que actúa como el material poroso permitiendo el flujo de oxígeno y reduciendo la reacción catódica sobre-potencial.

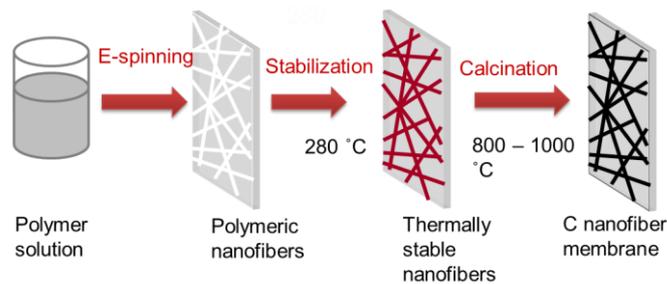


Figura 3.10. Proceso de fabricación de nanofibras de carbono

La propuesta de LEITAT es el uso de nanofibras de carbono dopadas de metal directamente como cátodo para las MFCs. Las nanofibras de carbono (CNFs) y nanofibras de carbono activado (ACNFs) fabricadas por el método físico-químico ya se han utilizado como catalizador del cátodo en MFC y pueden ser sintetizados con una elevada área superficial y una conductividad mejorada. De acuerdo con esto, se ha sintetizado y caracterizado estructuras de CNFs de carbono por un proceso de 'electro-spinning' seguido por un tratamiento térmico. El proceso de

producción de estas CNFs consta de tres pasos principales que se pueden apreciar en la figura 3.10:

- 'Electro-spinning' de la solución del polímero poliacrilonitrilo (PAN).
- Estabilización a 280 °C en aire.
- Carbonización en atmósfera N₂ a 600 a 1000 °C.

Si nos fijamos en la figura 3.11, observaremos una imagen del equipo utilizado para realizar el 'electro-spinning' y un diagrama del funcionamiento de la misma.

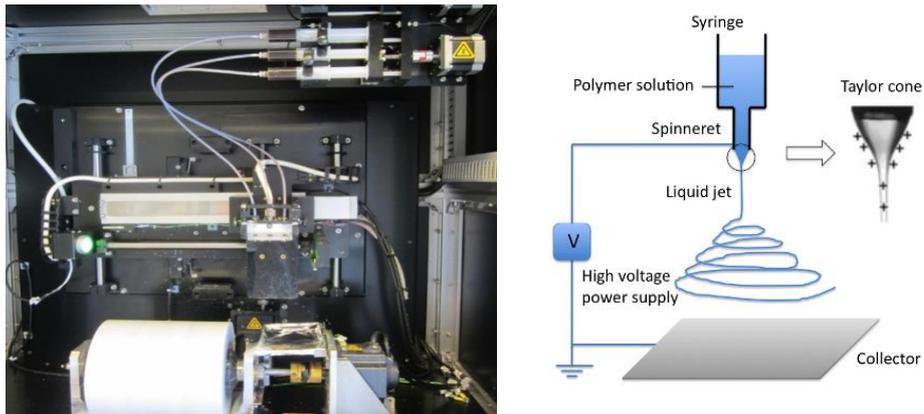


Figura 3.11. Imagen y diagrama de funcionamiento del equipo de 'electro-spinning'

La figura 3.12 podemos apreciar el cambio de la estructura molecular tras los procesos de tratamiento térmico. Por último, en la figura 3.13 se muestra una imagen de microscopio de las CNFs, tras la estabilización y la carbonización.

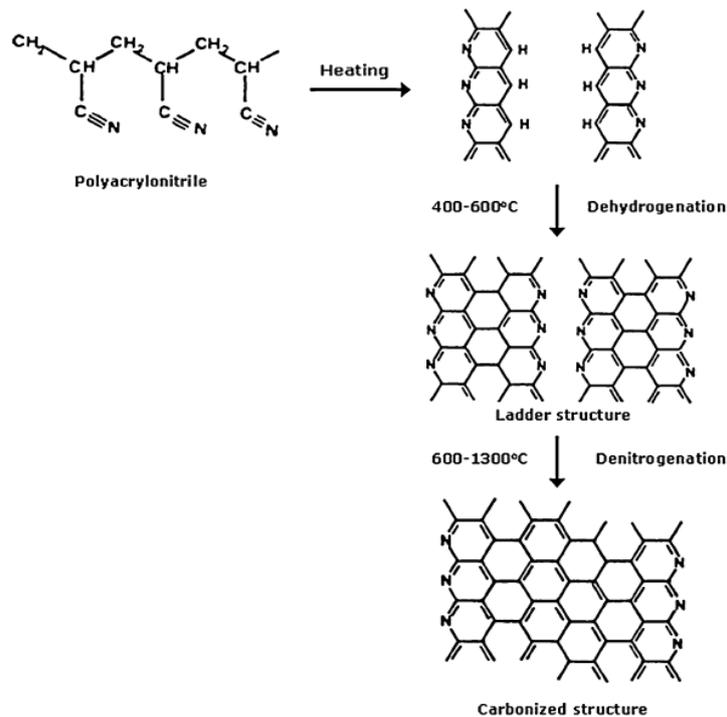


Figura 3.12. Cambios de la estructura molecular para la obtención de CNFs

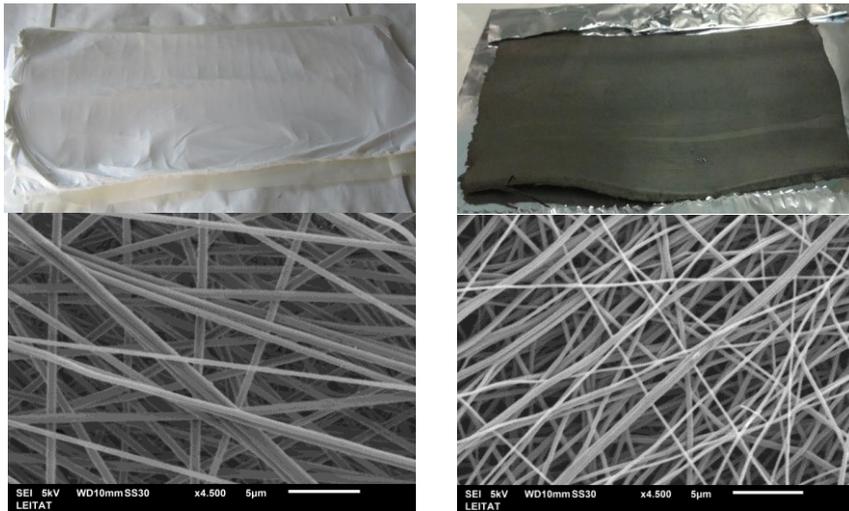


Figura 3.13. CNFs después de la estabilización (izquierda) y de la carbonización (derecha)

3.2.3. Caracterización electro-química

La potencia de salida máxima de la MFC se obtiene del análisis de su curva de polarización del prototipo de laboratorio. Dichas curvas se obtienen cambiando secuencialmente la resistencia externa de la MFC (R), que toma valores desde 1000Ω hasta 1Ω , y midiendo la tensión (V) y la intensidad (I) de la MFC. Cada resistencia se mantiene durante 30 minutos para asegurar las condiciones de estado estacionario.

Para puntualizar la relación de dichas magnitudes, expondremos las siguientes ecuaciones. La relación entre la tensión y la corriente se expresa con la ley de Ohm:

$$R = \frac{V}{I} [\Omega]$$

Debido a esta relación, V aumenta cuando elevamos R e I aumenta cuando reducimos R . Cuando la MFC está en circuito abierto, se cumplen las siguientes ecuaciones:

$$R = \infty [\Omega] \quad V = V_{max} [V] \quad I = 0 [A]$$

En el caso opuesto (cortocircuito) las ecuaciones son las siguientes:

$$R = 0 [\Omega] \quad V = 0 [V] \quad I = I_{max} [A]$$

La magnitud a maximizar es la potencia (P), producto de la tensión y la corriente obtenidas por la MFC:

$$P = V \cdot I [W]$$

Por tanto, existe un valor de la resistencia (R_o) en la que este producto es máximo.

$$P_{max} = V_o \cdot I_o [W]$$

Otra magnitud interesante es la densidad de potencia, que establece la relación de potencia con respecto al volumen de la MFC, y que suele ser la medida comparativa.

$$P = \frac{P}{Vol} [W/m^3]$$

Tras la experimentación con el prototipo de laboratorio se extraen los valores típicos de R_o , V_o e I_o para obtener puntos de operación del sistema. Hay que tener en cuenta que estos valores se modifican con muchos otros parámetros (cantidad de VFAs presentes en el ánodo, cantidad de bacterias, temperatura, pH, etc.), pero nos dan una idea del rango de valores. Además las técnicas de Power tracking se encargaran de encontrar el punto óptimo en la curva característica de potencia de la MFC.

3.3. Teoría sobre Power Tracking

Una cuestión fundamental en cualquier sistema es la optimización de las salidas que produce para maximizar el beneficio que se obtiene del mismo. Con esta filosofía se crean las técnicas de seguimiento del punto máximo de potencia o *Maximun Power Point Tracking* (MPPT).

Inicialmente el MPPT se desarrolló para obtener el rendimiento máximo en sistemas como turbinas de aire y placas solares, pero es perfectamente aplicable a nuestro caso. Observando la característica I-V típica de una MFC (ver figura 3.14), se puede apreciar que la potencia de salida (producto de la corriente y la tensión) alcanza un máximo, P_{max} , para una corriente I_{max} y una tensión V_{max} . Por tanto, MPPT intenta que el sistema funcione en el punto de trabajo que produce una potencia de salida P_{max} .

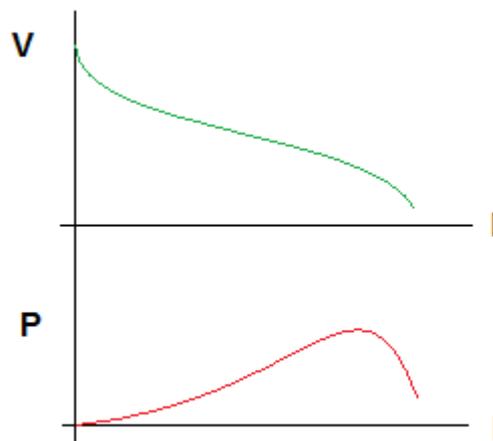


Figura 3.14. Curva característica I-V y de potencia de la MFC

Trabajar en ese punto de potencia máxima sería trivial si la curva característica fuese constante en el tiempo. Pero en el caso de las MFCs, como la mayoría de sistemas, no es de este modo, ya que la cantidad de bacterias, la composición de la sustancia con la que se alimentan y la generación de energía son algunos de los parámetros principales que modifican dicha curva

característica y, por tanto, en instantes de tiempo posteriores al actual es probable que se cumpla:

$$P_{max}^t \neq P_{max}^{t+c}$$

Por este motivo, se requiere un método que calcule el punto de potencia máximo de manera dinámica. En nuestro caso específico utilizaremos un algoritmo sencillo que provocará que nuestro sistema, la MFC, trabaje en torno al punto de máxima potencia. Los pasos de este algoritmo se pueden observar en la tabla 3.3.

| PASO | OPERACIÓN | I | ΔI | V | P |
|------|---|------------------------|-------------------------|-------------|--|
| 1 | Medimos la tensión y la corriente inicial | I_a | - | V_a | - |
| 2 | Calculamos la potencia inicial | I_a | - | V_a | $P_a = I_a * V_a$ |
| 3 | Establecemos un incremento de corriente | I_a | ΔI | V_a | P_a |
| 4 | Calculamos la nueva corriente | $I_n = I_a + \Delta I$ | ΔI | V_a | P_a |
| 5 | Solicitamos a la MFC la nueva corriente y obtenemos la nueva tensión. | I_n | ΔI | V_n | P_a |
| 6 | Calculamos la nueva potencia y la comparamos con la anterior | I_n | ΔI | V_n | $P_n = I_n * V_n$ $\text{¿}P_a > P_n\text{?}$ |
| 7 | Si $P_a < P_n$ volvemos al paso 4. Si $P_a > P_n$ vamos al paso 8 | $I_a = I_n$ | ΔI | $V_a = V_n$ | $P_a = P_n$ |
| 8 | Invertimos el incremento y volvemos al paso 4 | I_a | $\Delta I = - \Delta I$ | V_a | P_a |

Tabla 3.3. Algoritmo de MPPT aplicado al proyecto MFC4S

4. Software de Control LabView

La principal aportación personal al proyecto, es el software de control, tanto del prototipo de laboratorio como la planta piloto instalada en la depuradora de agua. Este software contiene lo podemos dividir en:

- Interfaz gráfica.
- Gestión de puertos para la comunicación con equipos.
- Gestión de variables compartidas en la red local.
- Control de potencia obtenida con algoritmo MPPT.
- Control del sistema con técnicas de Fuzzy Logic Control.

Centrándonos en el software de control de la planta piloto, se pueden distinguir cuatro hebras independientes que se programan como cuatro bucles diferentes (como se aprecia en el diagrama de la figura 4.1). Cada uno de ellos se encarga de una serie de tareas específicas aisladamente de las demás.

- Bucle principal: este bucle se está ejecutando siempre, puesto que contiene la hebra de la interfaz gráfica. El resto de hebras y funciones, necesitan que un experimento esté en marcha para ser ejecutadas. Las funciones que contiene este bucle son:
 - Interfaz gráfica: Hace funcionar todos los elementos de la interfaz, tanto los activos (botones, campos de escritura, casilleros, etc.) como los pasivos (gráficas, campos de valores, diodos, etc.). Es la tarea encargada de habilitar el resto de hebras al empezar un nuevo experimento.
 - Reglas de seguridad: Funciones que regulan que el prototipo trabaje de manera correcta, comprobando que valores de los sensores se encuentren dentro de los límites establecidos. También alberga las funciones de comprobación de puertos activos.
 - Controlador: Aquí englobamos las tareas de control (manual, por ciclos y automático) y la máquina de estados que discierne el estado actual. También engloba el Fuzzy Logic Control.
 - Temporización: Se encarga de marcar el tiempo transcurrido en un experimento activo así como de finalizarlo cuando se cumpla el tiempo de experimentación. También designa el instante de captura de datos siguiendo el tiempo de muestreo.
- Bucle tarjeta PCI: se encarga de la comunicación con los sensores y los equipos de actuación. Utiliza VIs específicos para la conexión con este tipo de tarjetas en LabView.
- Bucle Power Tracking: maneja las técnicas de Power Tracking y la comunicación con las cargas activas.
- Bucle Guardado de datos: esta hebra contiene todas las funciones de relacionadas con el tratamiento y almacenamiento de datos.
 - Guardado: Almacenamiento en un documento con extensión '.lvm' de los datos del experimento.
 - Autoguardado: función similar al guardado pero de manera automática para evitar pérdidas de información.
 - Variables Compartidas: tarea de escritura de los valores de las variables compartidas para habilitar la lectura de las mismas.

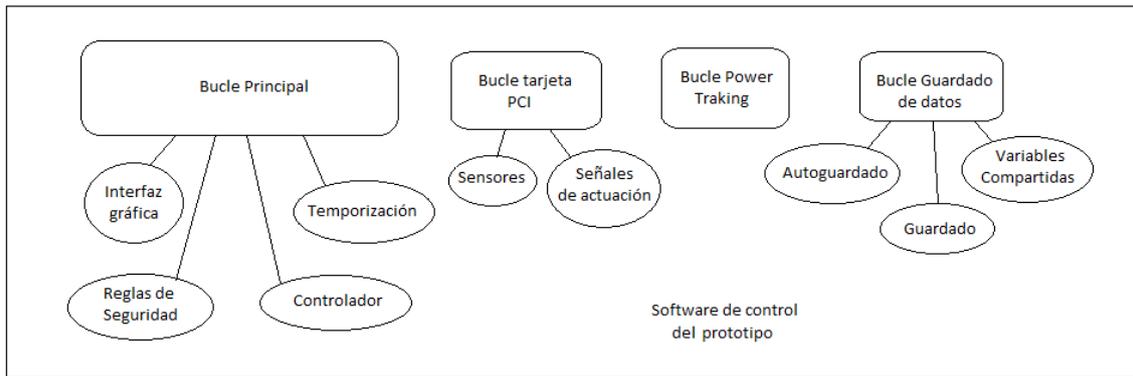


Figura 4.1. Diagrama de la estructura del software

En este apartado nos centraremos en los tres primeros puntos, mientras que los dos últimos puntos serán desarrollados en apartados posteriores. Como ya se ha comentado, el software empleado para la programación ha sido LabView.

4.1. Interfaz de control del prototipo de laboratorio

La interfaz principal en LabView se ejecuta en el ordenador dedicado al prototipo de laboratorio y se puede apreciar en la figura 4.2.

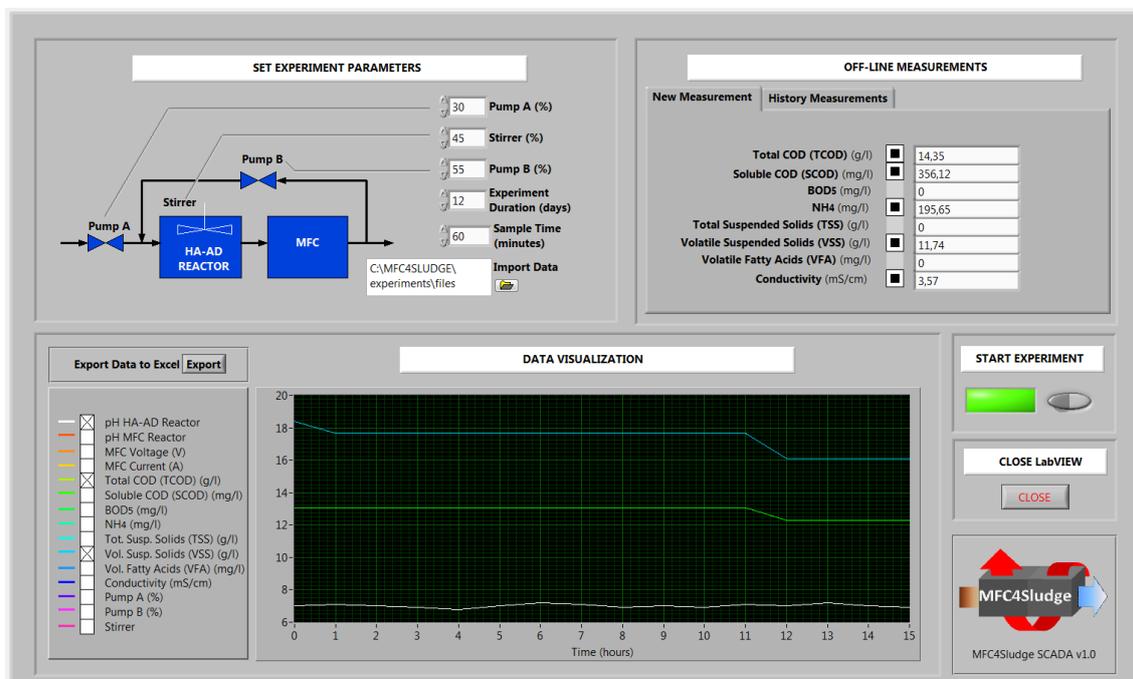


Figura 4.2. Interfaz de la SCADA de MFC4Sludge para el prototipo de laboratorio

Como se puede observar, la interfaz ha sido dividida en cuatro áreas diferentes:

- **Área A:** Introducción de parámetros del experimento (ver figura 4.3). Esta zona ofrece una representación de la implementación prototipo, incluyendo: bombas, agitador, reactor HA-AD y bloque de la MFC, mediciones de pH y mediciones de potencia de la MFC. Los controles incluidos en esta área permiten al usuario:
 - Ajustar el porcentaje de trabajo de "bomba A". Mínimo 0%, máximo 100%, incremento de 5%.
 - Ajustar el porcentaje de trabajo de "la bomba B". Mínimo 0%, máximo 100%, incremento de 5%.
 - Ajustar el porcentaje de trabajo de "agitador". Mínimo 0%, máximo 100%, incremento de 5%.
 - Ajustar la duración del experimento. Mínimo 1 día, máximo de 50 días, se incrementan 0,5 días.
 - Ajustar el tiempo de muestreo, que define la cadencia a la que los datos se almacenan en un archivo de Excel y, por tanto, los datos que se representan en la zona C. Mínimo 1, máximo 60 minutos, con incrementos de 1 minuto.
 - Definir la ruta y el nombre del archivo de Excel que se generen al final del experimento. Tanto la ruta y el nombre del archivo de Excel pueden ser modificados durante la ejecución de un experimento.

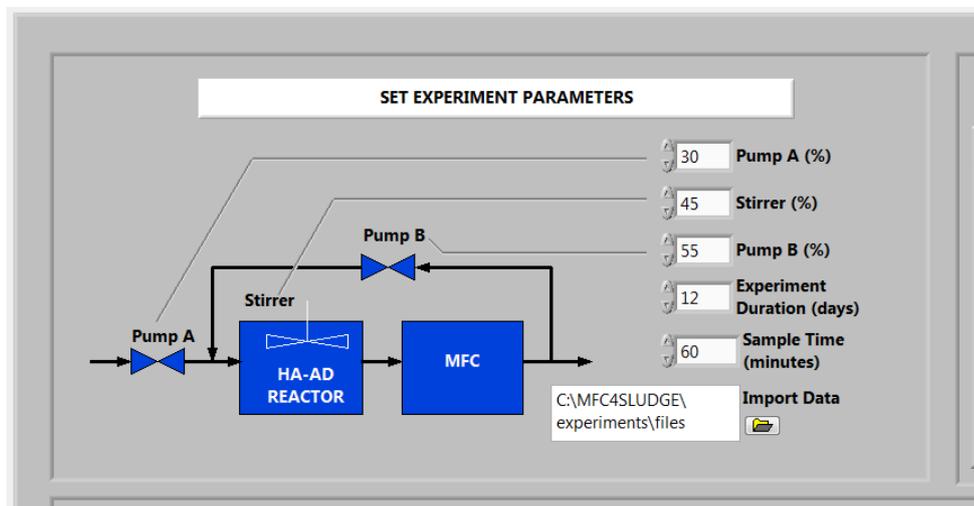


Figura 4.3. Zona de introducción de parámetros del experimento

- **Área B:** Anotación y almacenamiento de medidas off-line. Esta zona está subdividida en dos secciones. En la primera, se puede realizar la introducción de medidas off-line durante el transcurso de un experimento. Para anotar las diferentes medidas off-line, el operador debe marcar el cuadro que selecciona el parámetro concreto (ver figura 4.4). Una vez seleccionado, se introduce el valor del parámetro con una resolución de 0,01. El sistema automáticamente reconoce la fecha y genera un registro con todos los parámetros modificados.

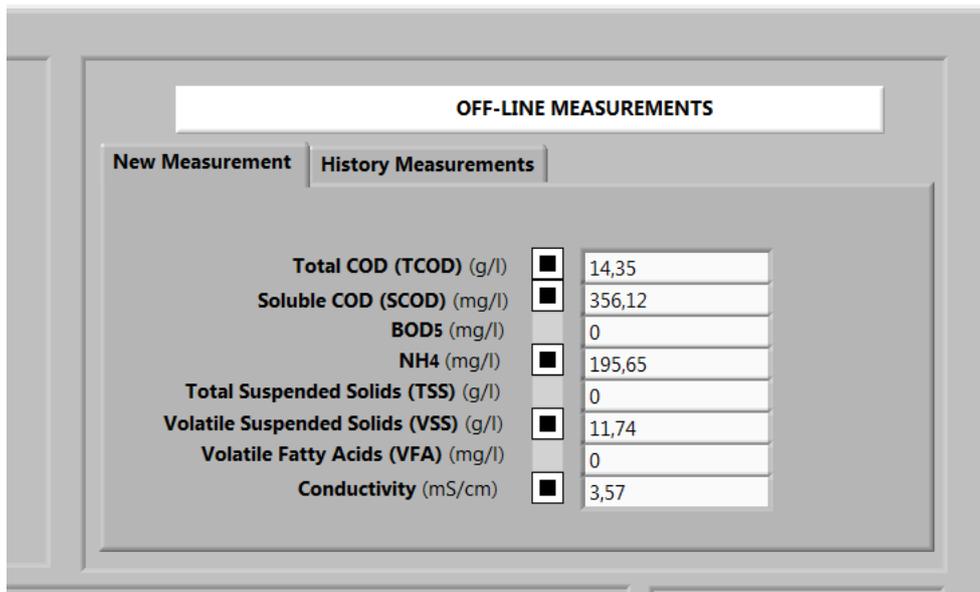


Figura 4.4. Zona de Anotación de parámetros off-line: Nueva medida

Por otra parte, hay otra sección para consultar anotaciones previas de parámetros, como se muestra en la figura 4.5. El operador puede seleccionar, a través de la fecha, cada uno de los registros anteriormente introducidos y los valores correspondientes a cada parámetro modificado. Si un parámetro no fue modificado en un registro, el parámetro aparecerá con el símbolo "-".

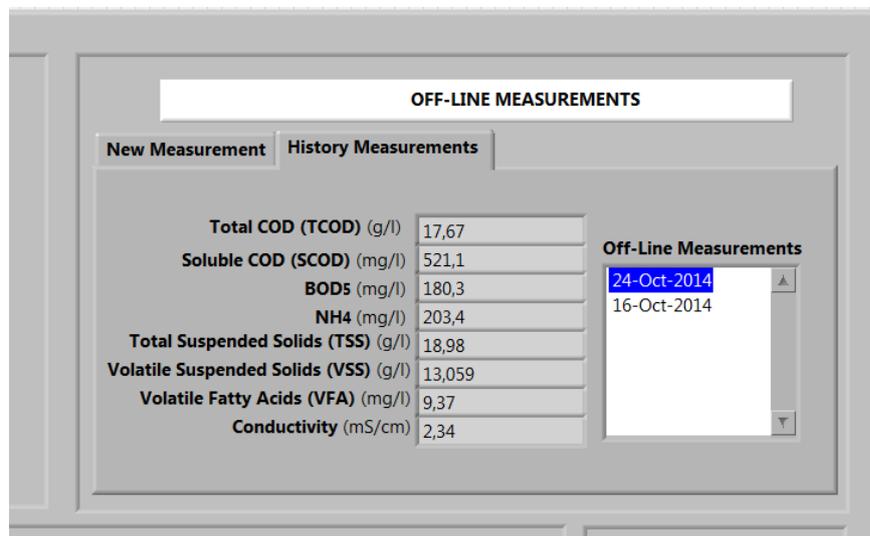


Figura 4.5. Zona de Anotación de parámetros off-line: Histórico de medidas

- **Área C:** Visualización gráfica de los datos del experimento. Esta zona está dividida en tres secciones como se puede apreciar en la figura 4.6. Hay una sección dedicada a la selección de las variables que se visualizarán. Algunas (o todas) de las variables pueden ser visualizadas al mismo tiempo, aunque es recomendable mostrar solo aquellas que tienen un rango similar. Otras de las secciones ofrecen una gráfica en la que se mostrarán las variables seleccionadas. Por último, la tercera sección contiene un botón

que permite exportar los datos del experimento en un archivo compatible con Excel, que será almacenado en la ruta especificada en el área A. Este archivo puede ser generado en cualquier momento durante el experimento.

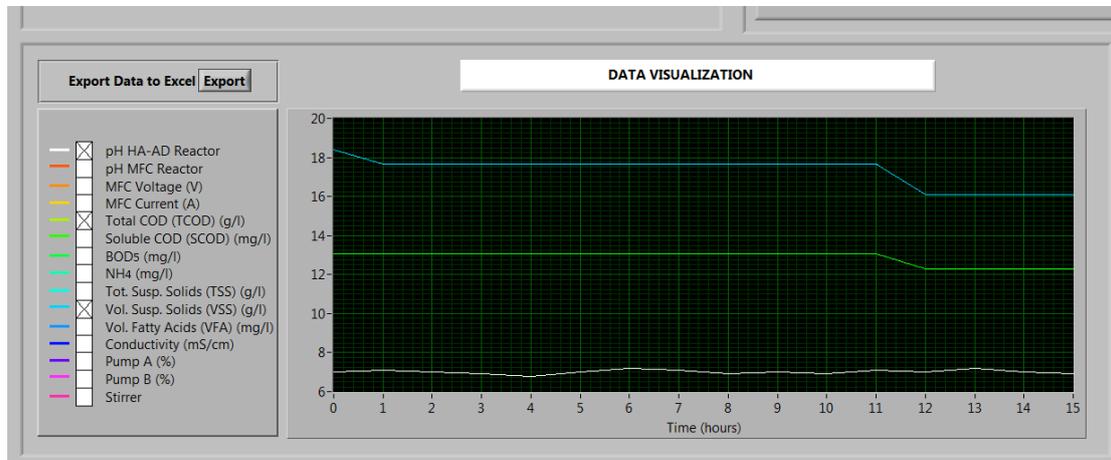


Figura 4.6. Zona de visualización de datos

- Área D:** Inicialización del experimento y el cierre de la interfaz. El experimento se inicializa una vez que el operador pulsa el botón "start experiment". Por defecto, el experimento terminará en el tiempo especificado en el campo apropiado de la zona A, sin embargo, el operador puede finalizarlo antes de ese tiempo pulsando el botón "start experiment" de nuevo. Esto acabará con el experimento en curso, entonces podremos modificar algunos parámetros que antes no podíamos, como reducir el tiempo de experimento y variar el tiempo de muestreo. Para cerrar la interfaz y el experimento, si hubiese alguno en curso, el operador puede pulsar el botón "close". Realizando esta acción, no se almacenará ningún archivo. Para impedir que se cierre el software sin almacenar los datos, un cuadro de diálogo se muestra para comprobar que el usuario desea cerrarlo verdaderamente.

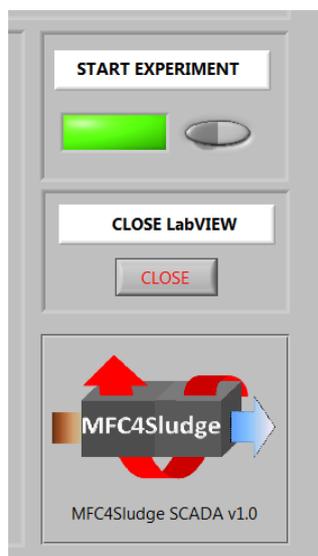


Figura 4.7. Zona de inicio de experimento y cierre de la interfaz

En cuanto a la gestión de puertos de comunicación, el software implementa diversos VIs que realizan las funciones de comunicación entre el PC y el bio-reactor y entre el PC y el potencióstato. Estos bloques contienen, a su vez, bloques básicos para la realización de funciones simples tales como:

- Lectura de parámetros del equipo. En el caso del bio-reactor, por ejemplo, pH de la mezcla, temperatura, etc., mientras que en el potencióstato, tensión, corriente y potencia de la MFC.
- Establecimiento de parámetros. En el caso del bio-reactor, activación de bombas, activación del agitador, etc. En cambio, en el potencióstato, corriente solicitada a la MFC.
- Comprobación de establecimiento de comunicación correcto.

También contiene bloques enfocados al control de la potencia con algoritmo MPPT, pero como se comentó al inicio del apartado, se desarrollará en puntos posteriores. En este caso no se introduce un controlador, debido a que el prototipo de laboratorio se controla con ciclos y se emplea para el estudio de la influencia de los diversos parámetros, por lo que no interesa dejarlo funcionando de manera automática (de manera diferente a la planta piloto).

4.2. Visualizador de datos del prototipo de laboratorio

Para la visualización de datos se crea una interfaz parecida a la expuesta anteriormente, que sólo contiene un panel similar al de la zona C de la interfaz principal (ver figuras 4.6). No hay posibilidad de introducir valores de variables ni modificar los parámetros del experimento. Tan solo se pueden visualizar los datos del experimento que se encuentre en proceso. Si no hubiese ninguno, la interfaz de visualización nos avisa mostrando un cuadro de diálogo.

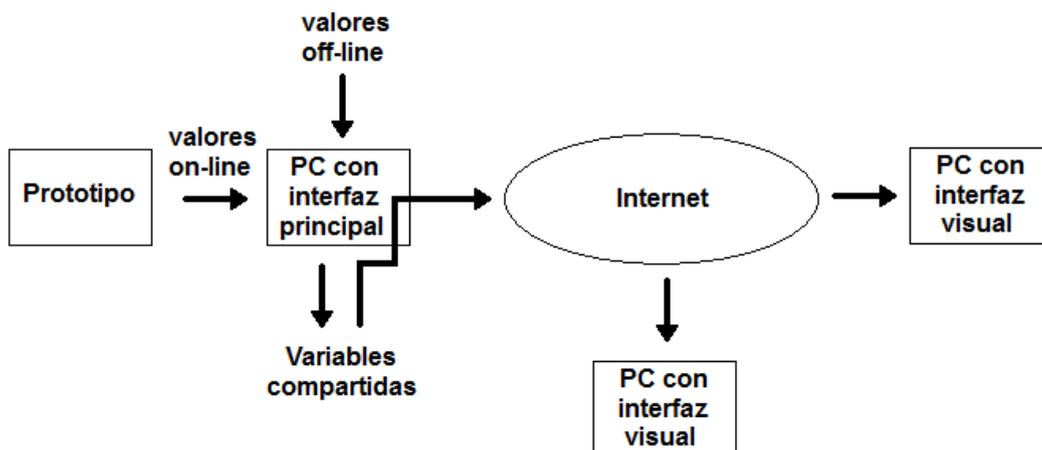


Figura 4.8. Esquema de escritura y lectura de variables compartidas

Para poder visualizar los datos de las variables, la interfaces utilizan bloques de variables compartidas (Shared Variable VIs) y se debe establecer una red local virtual, debido a que los equipos no están físicamente en un lugar cercano (el PC de control del prototipo se encuentra en LEITAT, Barcelona y los de visualización en PCs de diferentes sitios, FRAUNHOFER en Alemania e IDENER en Sevilla).

Debemos distinguir que la interfaz principal es la que crea y modifica las variables compartidas con los datos que obtiene del experimento en curso y los visualizadores leen dichas variables compartidas. Un esquema del uso de variables compartidas puede ser observado en la figura 4.8.

4.3. Interfaz de control del prototipo en planta depuradora

Del mismo modo que el prototipo de laboratorio, la planta piloto utiliza una interfaz principal que se ejecuta el PC de control. Esta puede ser observada en la figura 4.9. Existe cierta similitud en el aspecto de las interfaces principales de los dos prototipos pero, tanto en apariencia como en fondo, tienen diferencias que se explicarán a lo largo de este apartado.

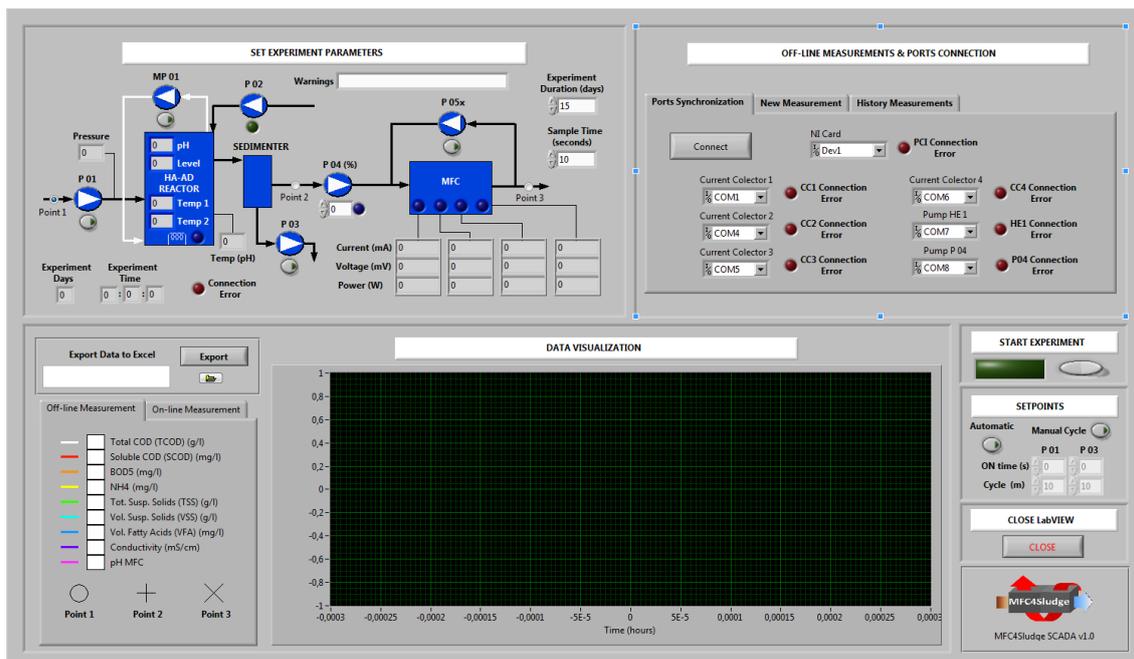


Figura 4.9. Interfaz principal del prototipo de la planta piloto

4.3.1. Panel "Set Experiment Parameters"

La figura 4.10 representa el panel de 'Set experiment parameters' de la interfaz principal. En él hay un diagrama con varios controles e indicadores para que el operador pueda trabajar con el prototipo.

Los principales elementos de este panel son:

- Control de duración del experimento: está en la parte alta derecha. El valor puede variarse entre 1 y 50, en pasos de 0.5, expresado en días.
- Control de tiempo de muestreo: está en la parte alta derecha también. El valor puede variarse entre 10 y 600 en pasos de 1, expresado en segundos.
- Indicador de tiempo transcurrido del experimento: cuando un experimento está en proceso, en la esquina inferior izquierda se puede observar el tiempo transcurrido.
- Indicador de error de conexión de puertos: hay un indicador de LED rojo en la parte baja del panel que muestra si hay algún problema con las conexiones de los equipos existentes.
- Campo de avisos: en la parte alta del panel un campo de avisos notifica si hay problemas de operación con el prototipo y si se quebranta alguna regla de seguridad.
- Diagrama completo del prototipo: en la parte central del panel se puede apreciar un diagrama que representa los diferentes tanques del prototipo (Digestor y tanque de Sedimentación), subsistema de la MFC y equipos de actuación y medición. Se pueden observar también tres puntos (Punto 1, antes del Digestor; Punto 2, entre el subsistema HA-AD y el subsistema de la MFC; Punto 3, después de la MFC). Estos puntos permiten al operador definir la procedencia de los lodos analizados para obtener la medida off-line.

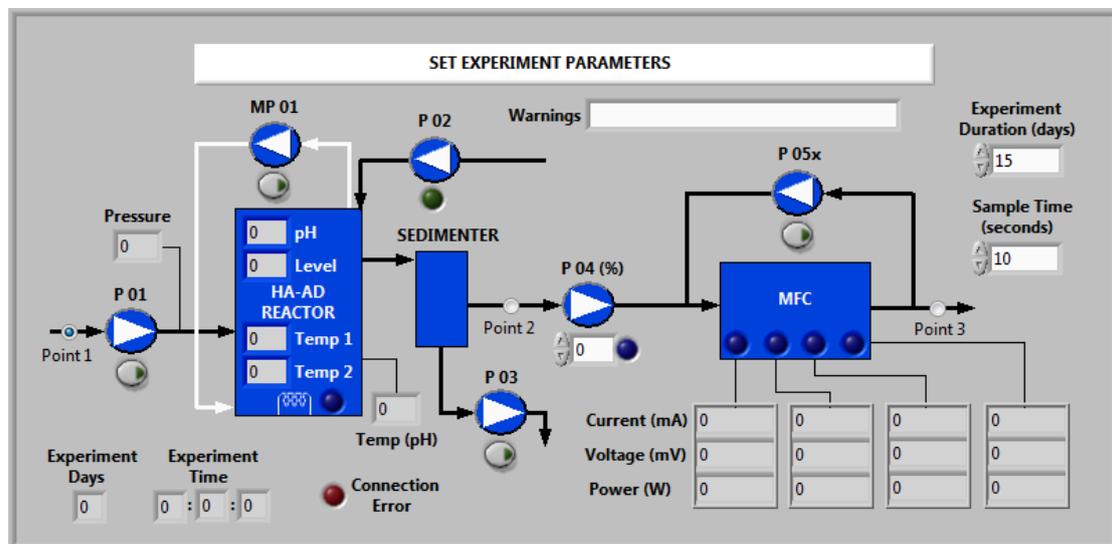


Figura 4.10. Panel de 'Set Experiment Parameters'

En el diagrama se puede distinguir entre equipos de medición y de actuación. Los primeros consisten en los diferentes sensores que provén algunas de las señales on-line y la tabla 4.1 muestra sus características. En la tabla 4.2 podemos observar los equipos que son controlados, básicamente bombas. También estas señales son consideradas medidas on-line.

| Sensor | Descripción | Rango de medida | Rango de trabajo | Avisos | Paradas de emergencia |
|--------------|--|-------------------------|-----------------------------|--|--|
| Presión | Este sensor indica la el valor de presión entre la bomba P01 y la entrada del tanque Digestor | [0 - 4] bares | [0.25 – 0.45] bares | El campo de avisos muestra un mensaje de alerta si el valor de presión está fuera del rango de trabajo | Si el valor de presión es superior a 0.55 bares o inferior a 0.1 bares, el software de control no deja que se activen las bombas P01, P03 y P04 y el campo de aviso muestra un mensaje de emergencia |
| pH | Este sensor indica el pH de la mezcla de lodos en el interior del tanque Digestor | [0 - 14] | [4.5 – 5.5] | Si el valor de pH es superior a 6.5 o inferior a 3.5, el campo de avisos muestra un mensaje de alerta | --- |
| Nivel | Este sensor indica la presión asociada al nivel de lodos dentro del tanque Digestor | [0 – 0.4] bares | [0.17 – 0.22] bares | El campo de avisos muestra un mensaje de alerta si el valor de la presión está fuera del rango de trabajo | Si el valor de la presión es superior a 0.25 bares o inferior a 0.15 bares, el software de control no deja que se activen las bombas P01, P03 y P04 y el campo de aviso muestra un mensaje de emergencia |
| Temp 1 | Este sensor indica la temperatura de la mezcla de lodos dentro del tanque Digestor y está en la parte alta del tanque | [-20 - 200] °C | [25 - 30] °C | Si el valor de la temperatura es superior a 35 °C o inferior a 20 °C, el campo de aviso muestra un mensaje de alerta | --- |
| Temp 2 | Este sensor indica la temperatura de la mezcla de lodos dentro del tanque Digestor y está en la parte baja del tanque | [-20 - 200] °C | [25 - 30] °C | Si el valor de la temperatura es superior a 35 °C o inferior a 20 °C, el campo de aviso muestra un mensaje de alerta | --- |
| Temp (pH) | Este sensor indica la temperatura de la mezcla de lodos dentro del tanque Digestor y está en la parte media del tanque | [-20 - 200] °C | [25 - 30] °C | Si el valor de la temperatura es superior a 35 °C o inferior a 20 °C, el campo de aviso muestra un mensaje de alerta | --- |
| Carga activa | La carga activa mide el voltaje y la corriente que se produce en la subunidad de la MFC a la que está conectada | [0 – 60] V [0 - 6] A | [0 – 0.5] V [0 - 150] mA | Si el valor es igual a 0 V, el campo de aviso muestra un mensaje de alerta | --- |

Tabla 4.1. Equipos de medida

| Bomba | Descripción | Consideraciones |
|-------|--|---|
| P01 | Es la bomba que alimenta el tanque Digestor con lodos. El botón debajo del símbolo de la bomba en el diagrama muestra si la bomba está encendida o apagada. | En el modo manual, la bomba puede ser activada o desactivada presionando el botón. El flujo objetivo es de alrededor de 16,14 litros/día de lodo que se alcanza con varios ciclos de encendido. |
| MP01 | Es la bomba que mezcla el lodo dentro del tanque Digestor con gas. El botón debajo del símbolo de la bomba en el diagrama muestra si la bomba está encendida o apagada. | En el modo manual, la bomba puede ser activada o desactivada presionando el botón, pero debería estar encendida durante el experimento completo para evitar una mezcla ineficiente de los lodos y que se solidifique y atore los tubos. |
| P02 | Es la bomba que alimenta el tanque Digestor con agua para diluir el lodo. El indicador LED verde debajo del símbolo de la bomba muestra si está encendida o apagada. | El flujo objetivo es de alrededor de 40.36 litros/día de agua. La bomba debería estar encendida durante el experimento completo para asegurar una disolución correcta de los lodos y evitar problemas de obstrucción en la MFCs. |
| P03 | Es la bomba que retira los residuos sólidos del tanque Sedimentador. El botón debajo del símbolo de la bomba en el diagrama muestra si la bomba está encendida o apagada. | En el modo manual, la bomba puede ser activada o desactivada presionando el botón. El flujo objetivo es de alrededor de 8,5 litros/día de lodo que se alcanza con varios ciclos de encendido. |
| P04 | Es la bomba que alimenta el bloque MFC con lodos sedimentados. El campo de control bajo el símbolo de esta bomba muestra si está encendida (valores diferentes a 0) o apagada (valor 0). | En el modo manual, la bomba puede ser activada y desactivada modificando el valor del control. |
| P05x | Es un grupo de bombas que recircula el lodo sedimentado en el bloque MFC. El botón debajo del símbolo del grupo de bombas en el diagrama muestra si están encendidas o apagadas. | En el modo manual, la bomba puede ser activada o desactivada presionando el botón, aunque debería estar encendida durante el experimento completo mientras operan las subunidades de la MFC. |

Tabla 4.2. Equipo de actuación

Aunque las cargas activas aparecen como equipo de medida (en la tabla 4.1), realmente también son equipos de actuación. Para maximizar la potencia obtenida por el bloque MFC, se utilizan algoritmos de MPPT implementados en el software de control. Por esta razón, los algoritmos establecen la corriente solicitada por las cargas activas al bloque MFC. Hay cuatro cargas activas, una por cada subunidad MFC, con parámetros independientes de corriente y tensión, y junto a su potencia (producto entre tensión y corriente), se muestran en el panel (figura 4.10). De este modo, la corriente de cada subunidad de la MFC puede ser incrementada y decrementada de manera independiente para obtener la potencia máxima posible. Si el valor de tensión de la subunidad es inferior o cercano a cero voltios, el campo de avisos muestra un mensaje de alerta.

4.3.2. Panel “Start Experiment”

Este panel permite al operador empezar un nuevo experimento pulsando el botón (ver figura 4.11). Un experimento en proceso puede ser detenido pulsando el botón de nuevo. Cuando el indicador LED verde cuadrado está encendido, significa que hay un experimento en marcha.



Figura 4.11. Panel 'Start Experiment'

4.3.3. Panel "Setpoints"

El prototipo puede ser operado en tres modos: modo manual, modo automático (cíclico) y modo cíclico manual.

Por un lado, el modo manual permite al operador alterar las señales de actuación (bombas), pulsando los botones adecuados. Para trabajar en este modo, los botones 'Automatic' y 'Manual Cycle' deben estar apagados (ver figura 4.12). Este modo de operación se usa para el llenado de los tanques en el proceso de start-up, realizar pruebas o parar alguna bomba si hay algún problema.

Por otro lado, el modo de funcionamiento automático implica que los valores de las señales de actuación se asignan de automáticamente. Por tanto, el flujo de las diferentes bombas es fijado por las técnicas de Fuzzy Logic Control. La salida del controlador depende de algunos parámetros off-line, así que es recomendable introducir tantos valores off-line como sea posible para que el control sea más eficiente. La corriente y la tensión suministrada por el bloque MFC dependen del algoritmo de MPPT, por tanto, es regulado de manera automática. Para operar en este modo el botón 'Automatic' debe estar pulsado (ver figura 4.12).

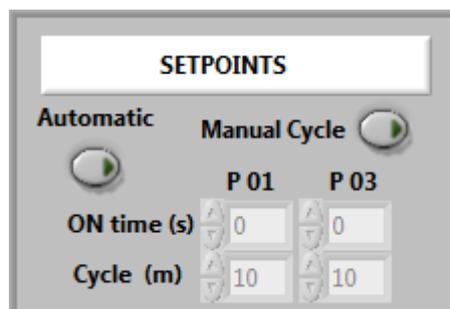


Figura 4.12. Panel 'Setpoints'

Finalmente, el modo de ciclos manual permite establecer diferentes flujos para las bombas P01 y P03, consiguiendo condiciones diferentes para la digestión anaerobia de los lodos (cambio de propiedades, concentraciones de sustancias, densidad del lodo, etc.) y también puede ser usado para el calibrado del flujo de las bombas.

Este modo de operación trabaja en ciclos (como el modo automático), estableciendo el tiempo activo de la bomba (en segundos) y el tiempo del ciclo (en minutos). Para trabajar en este modo el botón 'Automatic' debe estar apagado y el botón 'Manual Cycle' debe estar encendido (ver figura 4.12).

Para resumir, las diferencias entre los distintos modos de operación se muestran en la tabla 4.3.

| Modo de operación | Botón 'Automatic' | Botón 'Manual Cycle' | Uso |
|-------------------|-------------------|----------------------|---|
| Manual | No | No | <ul style="list-style-type: none"> - Llenar los tanques en el proceso de start-up <ul style="list-style-type: none"> - Realizar pruebas - Parar alguna bomba si hay algún problema <ul style="list-style-type: none"> - Calibrar el flujo de las bombas |
| Ciclos Manuales | No | Sí | <ul style="list-style-type: none"> - Calibrar el flujo de las bombas - Llevar a cabo experimentos sin control automático - Cambiar flujos y condiciones de los experimentos (en referencia a las pautas establecidas con el control automático) |
| Automático | Sí | - | <ul style="list-style-type: none"> - Llevar a cabo experimentos con Fuzzy Logic Control |

Tabla 4.3 Modos de operación posibles del prototipo con la UI

4.3.4. Panel "Close LabView"

Este panel permite al operador cerrar la interfaz de Labview gracias al botón 'Close' (ver figura 4.13). Cuando este botón se pulsa, el software lanza una ventana (ver figura 4.14) que pregunta antes de cerrar la interfaz. El operador puede no haber guardado los datos del experimento en curso y si se cerrase, los datos del experimento se perderían. Sin embargo el software tiene una función de auto guardado en caso de que se caiga la red eléctrica, donde se podrían recuperar los datos.



Figura 4.13. Panel 'Close LabView'

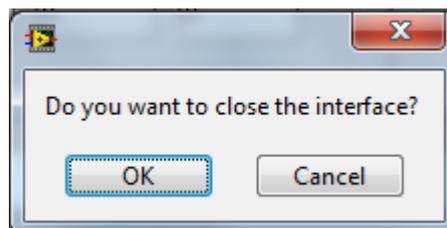


Figura 4.14. Mensaje de cerrar LabView

4.3.5. Panel “Off-line Measurement and Ports Connections”

Para empezar un nuevo experimento, es necesario que el software reconozca la conexión de los diferentes equipos. En el panel de ‘Off-line Measurement and Port Connection’, se puede seleccionar el puerto para cada equipo (ver figura 4.15). Seleccionando la pestaña ‘Ports Synchronization’, se pueden apreciar varios controles donde se asigna el puerto de la tarjeta PCI NI y los puertos serie de las cargas activas, del sistema calefactor (HE01) y de la bomba P04. También hay un botón ‘Connect’ para intentar establecer la conexión a través de los puertos asignados. Si hubiera un problema con alguna conexión (o varias), el indicador LED rojo se encenderá. Si no hay problemas de conexión, el indicador LED azul en el panel ‘Set Parameters’ se encenderá (ver figura 4.10).

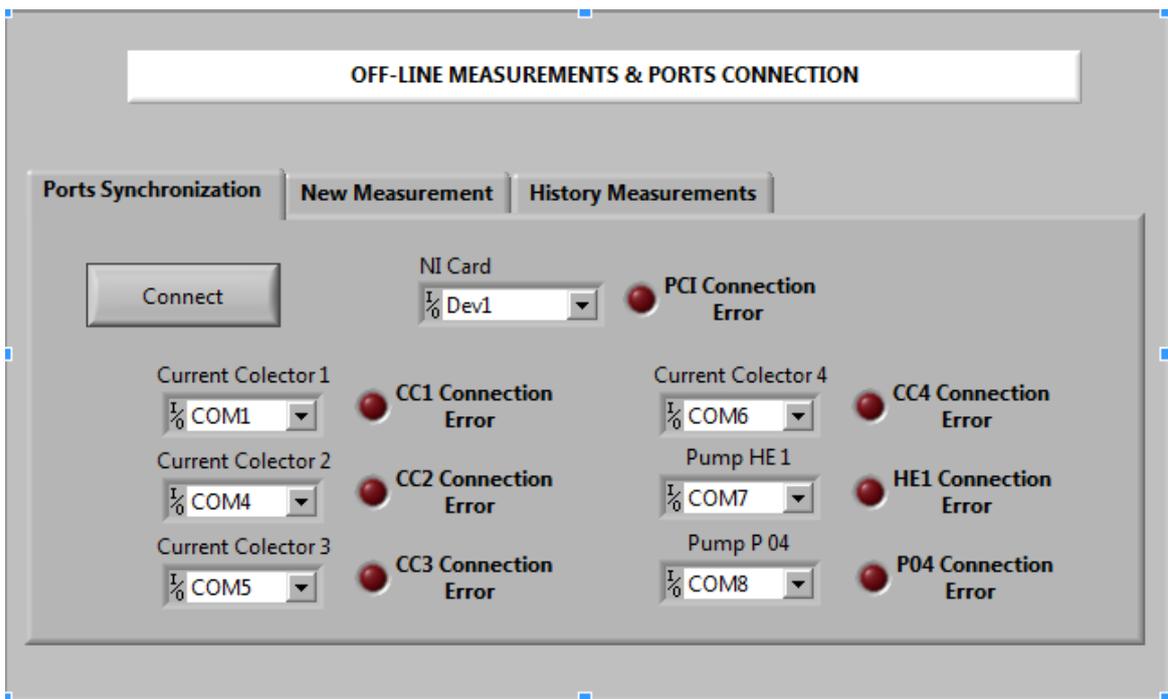


Figura 4.15. Off-line Measurements & Ports Connection (Pestaña de sincronización de puertos)

El operador puede introducir nuevas medidas off-line seleccionando la pestaña ‘New Measurement’ (ver figura 4.16). Hay varios cuadrados seleccionables, cada uno a la derecha de cada parámetro de medida off-line que pueden ser pulsados. Estos deben marcarse para introducir un nuevo valor del correspondiente parámetro. Junto a ellos hay unos campos de escritura para introducir dicho valor. Finalmente hay un botón ‘Create’ para crear nuevos registros con todos los parámetros off-line alterados.

Si el operador comete un error al introducir alguna medida off-line, se podrá arreglar con una nueva entrada, ya que el software toma el último valor introducido del parámetro en cada tiempo de muestreo. Si en un registro no se introduce valor para alguno de los parámetros, este parámetro permanecerá con el valor del último registro en el que se introdujo valor para él. Todos los parámetros off-line comenzarán con el valor cero por defecto.

El resultado obtenido después de la introducción de un registro puede ser observado en la pestaña ‘History Measurements’ con la fecha y la hora en la que fue introducido (ver figura 4.17).

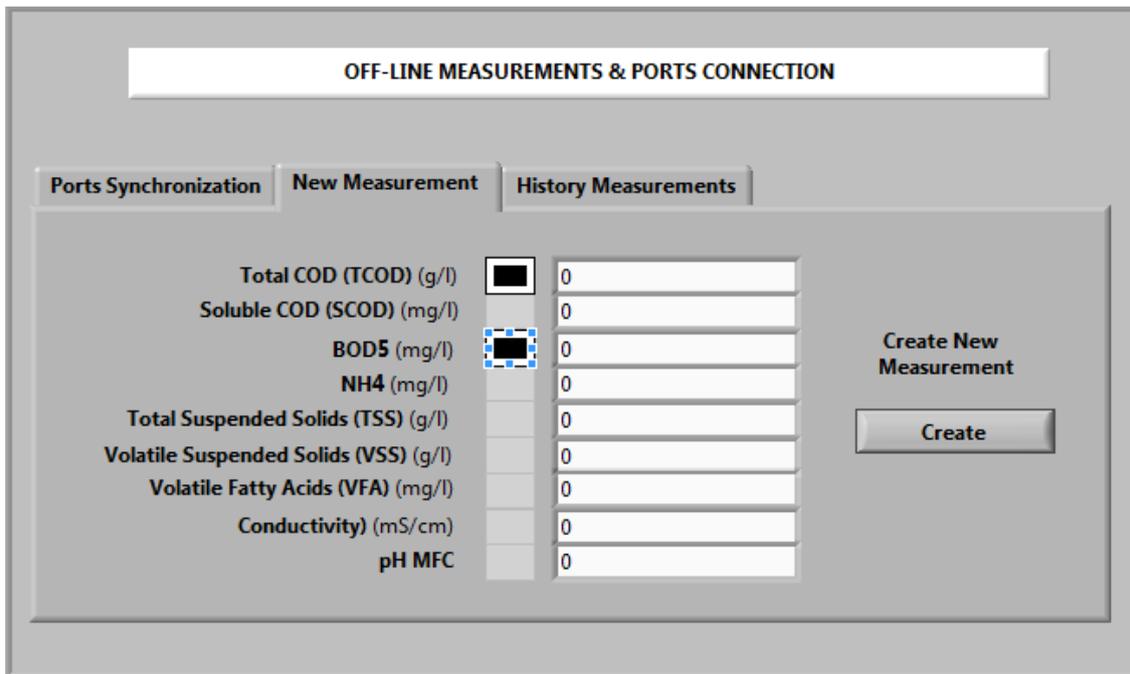


Figura 4.16. Off-line Measurements & Ports Connection (Pestaña de nueva medida)

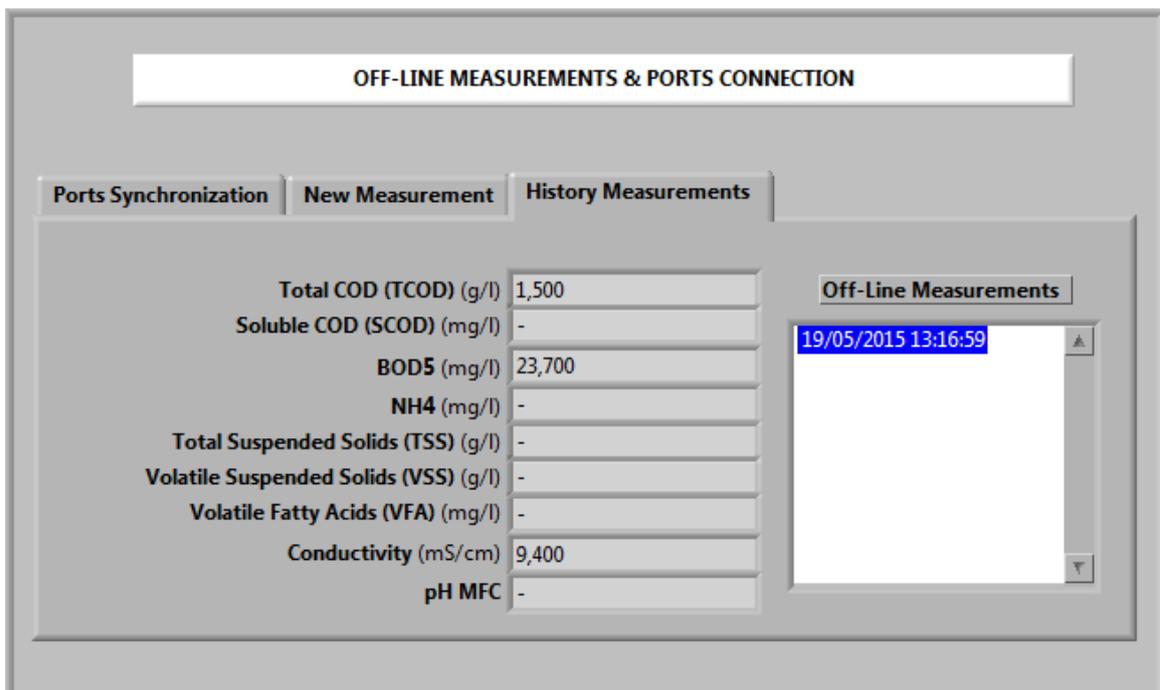


Figura 4.17. Off-line Measurements & Ports Connection (Pestaña de historico de medidas)

4.3.6. Panel "Data Visualization"

La gráfica en el panel 'Data Visualization' (ver figura 4.18) permite al operador analizar en tiempo real todas las medidas registradas por el software. Ambos tipos de parámetros (on-line and off-

line) pueden ser observados seleccionando el parámetro en concreto en la pestaña adecuada del lado izquierdo del panel.

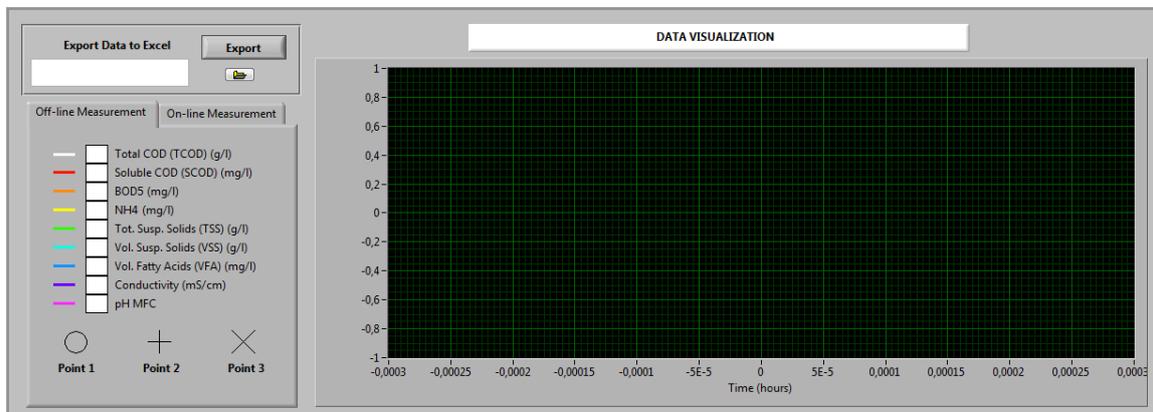


Figura 4.18. Panel 'Data Visualization'

La mayoría de los parámetros off-line pueden ser medidos en tres puntos diferentes. Para distinguir el punto en el que se han medido, la interfaz usa formas diferentes en las muestras del parámetro. De este modo, los parámetros off-line del primer punto (Point 1) tienen forma de círculo en cada muestra; los del segundo punto (Point 2) tienen forma de cruz en cada muestra; mientras que los del tercer punto (Point 3) tienen forma de equis en cada muestra.

En un caso específico de una medida on-line, la temperatura del tanque digestor, contiene en realidad dos señales ('HA-AD Temperature 1' y 'HA-AD Temperature 2'), y ambas se muestran con el mismo selector. Por esta razón, la señal 'HA-AD Temperature 2' se presenta con línea discontinua.

Guardar los datos es necesario para obtener y analizar la información obtenida de los experimentos con el prototipo. Para almacenar los datos, el operador puede usar el cuadro de salvar en archive, en la parte alta del lado izquierdo del panel 'Data Visualization', donde la ruta y el nombre del archivo pueden ser asignados.

El software tiene una función de auto guardado. Además, si el operador intenta cerrar el experimento en proceso sin haber guardado los datos, la interfaz lanzará una ventana con un mensaje de aviso para no cerrar sin guardar los datos del experimento (ver figura 4.19).

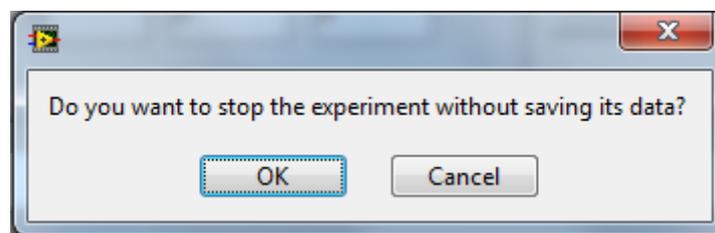


Figura 4.19. Mensaje de cerrar sin salvar

4.4. Visualizador de datos del prototipo en planta depuradora

Como en el apartado 4.2, es necesario el uso de variables compartidas para enviar los datos a través de la red y que el software de visualización de datos pueda mostrar gráficamente los resultados. Como ya se explicó, la interfaz principal se ejecuta en el PC que controla el prototipo y utiliza una librería de variables compartidas donde carga el valor de los parámetros. Después de eso, el visualizador de datos (ver figura 4.20), ejecutado en otro PC remoto, carga los valores de las variables compartidas y los muestra en tiempo real.

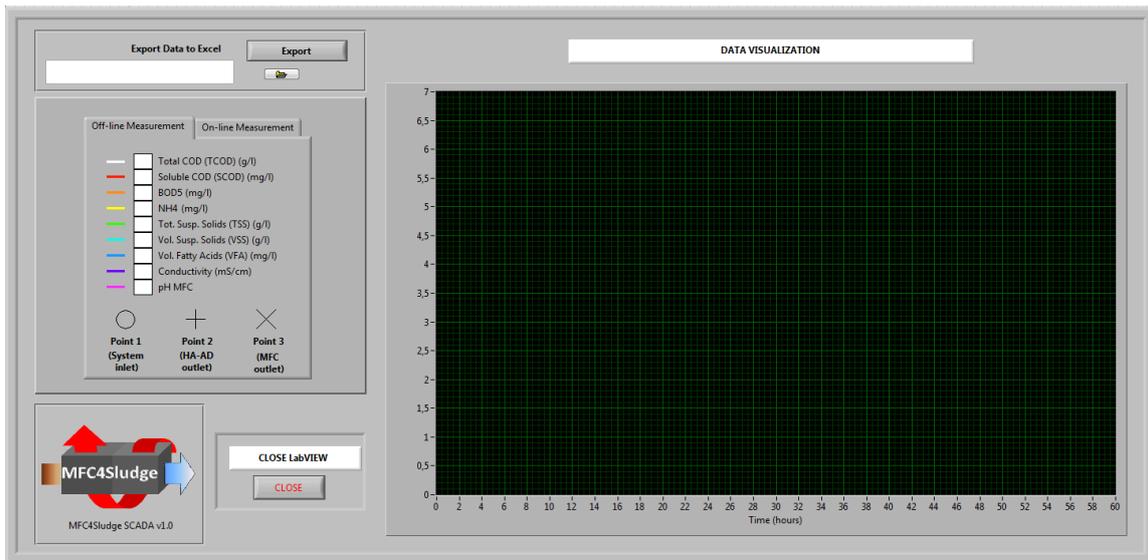


Figura 4.20. Software de visualización remota para planta piloto

La apariencia de la interfaz de visualización remota es similar al panel 'Data Visualization' de la interfaz principal (compare figuras 4.18 y 4.20). La principal diferencia es que la interfaz de visualización remota tiene un botón 'close' para cerrarla. El visualizador remoto no puede ser usado para comenzar un experimento, cambiar parámetros del experimento ni introducir nuevas medidas off-line. Si el operador intenta ejecutar el software de visualización remota sin que haya un experimento en marcha, la interfaz lanzará una ventana con un mensaje de 'No hay experimento en marcha' (ver figura 4.21) y se cerrará.

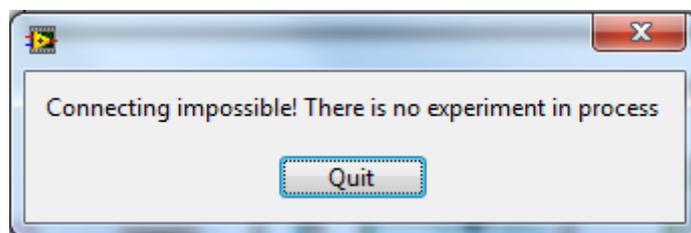


Figura 4.21. Mensaje de alerta 'No hay experimento en marcha'

5. Power Tracking aplicado a la MFC

Después de exponer en el apartado 3.3 los fundamentos teóricos del Power Tracking, en este apartado analizaremos dicha técnica aplicada al proyecto MFC4Sludge. Como se explicaba en el apartado 4, el software consta de una hebra independiente que se encarga de las tareas relacionadas con el seguimiento en potencia de la MFC. La programación en LabView de esta hebra, toma forma de bucle y se puede apreciar en la figura 5.1. En ella podemos apreciar que el tiempo mínimo entre iteraciones es de 300 milisegundos (en la parte central superior) y que se ejecuta si el botón 'Power' (que activa el experimento) está pulsado.

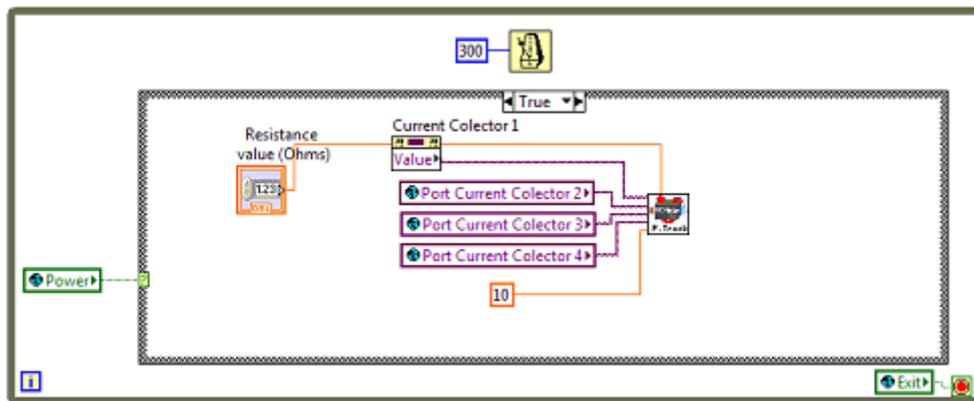


Figura 5.1. Bucle de LabView que contiene las funciones de 'Power Tracking'

5.1. Algoritmo MPPT en LabView

Dentro del bucle, se encuentra un sub-VI nombrado 'P. Track' que alberga el algoritmo presentado en la tabla 3.1 programado en LabView. Con las sucesivas figuras, se expondrán los diez pasos de los que consta la secuencia del algoritmo. Es necesario aclarar que aunque se muestre para una sola carga activa, debemos tener en cuenta que se realiza el proceso para las cuatro.

- Paso 0 (figura 5.2): Configuramos el puerto para poder establecer la comunicación con la carga activa. Se usa un VI estándar de configuración de puertos en LabView: VISA Serial. Especificamos un 'Baud Rate' de 115200, que es el necesario para la comunicación con la carga activa Re: Load Pro de Arachnid Labs.

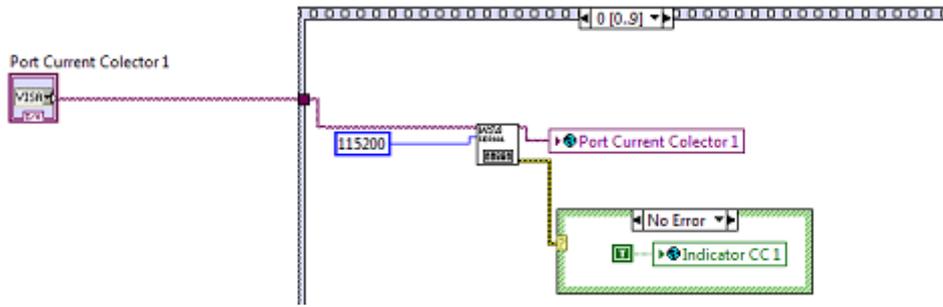


Figura 5.2. Paso 0 de la secuencia MPPT en LabView

- Paso 1 (figura 5.3): El sub-VI denominado 'CC Read' se comunica con la carga activa y procede a la lectura de la corriente y tensión de la MFC (en mA y mV respectivamente). En el siguiente apartado 5.2 se profundizará en el contenido de este sub-VI.

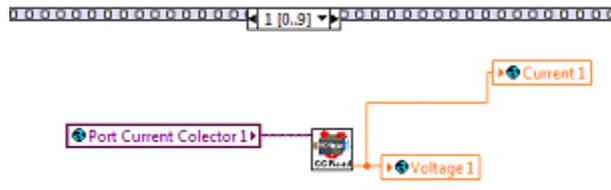


Figura 5.3. Paso 1 de la secuencia MPPT en LabView

- Paso 2 (figura 5.4): Se obtiene el valor de la potencia que genera la MFC (medido en mW).

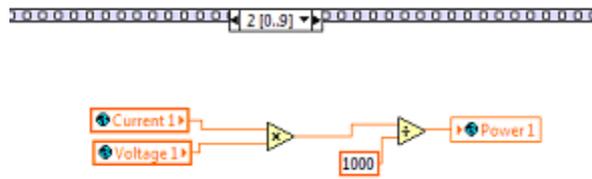


Figura 5.4. Paso 2 de la secuencia MPPT en LabView

- Paso 3 (figura 5.5): Se compara el valor anterior de potencia con el obtenido en el paso 2. Si es mayor la nueva potencia, el incremento de corriente permanece con el mismo signo, en cambio, si es mayor la potencia anterior, se invierte el signo del incremento.

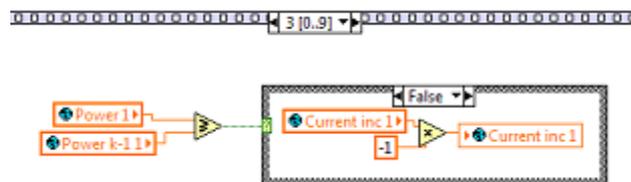


Figura 5.5. Paso 3 de la secuencia MPPT en LabView

- Paso 4 (figura 5.6): Se asigna el valor de potencia nueva a la variable de potencia antigua para la siguiente iteración.

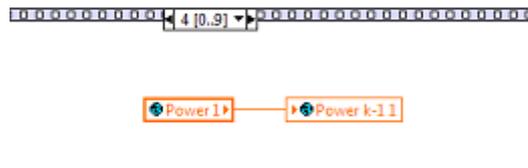


Figura 5.6. Paso 4 de la secuencia MPPT en LabVlew

- Paso 5 (figura 5.7): Se suma el incremento de corriente, al valor de corriente. Se limita el resultado posible al rango 0 – 5 A (valores de seguridad).

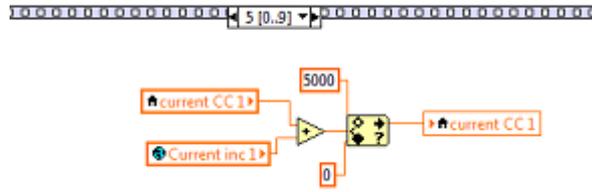


Figura 5.7. Paso 5 de la secuencia MPPT en LabVlew

- Paso 6 (figura 5.8): Se esperan 500 milisegundos y se activa un indicador para saber cuándo se encuentra en el periodo de espera. El sentido de la espera es evitar saturar el puerto.

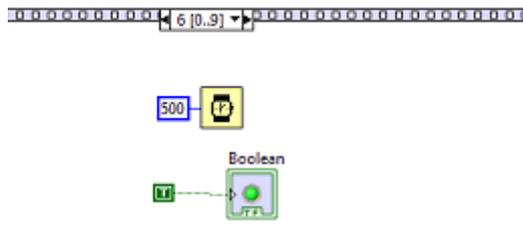


Figura 5.8. Paso 6 de la secuencia MPPT en LabVlew

- Paso 7 (figura 5.9): Se establece el nuevo valor de corriente que se envía a la carga activa utilizando otro sub-VI denominado 'CC Set'. Este sub-VI se explicará en el apartado 5.2.

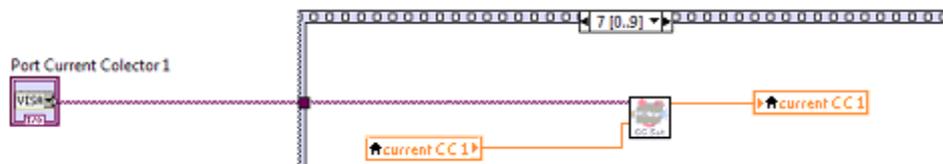


Figura 5.9. Paso 7 de la secuencia MPPT en LabVlew

- Paso 8 (figura 5.10): Se actualizan los valores de corriente, tensión y potencia para que sean mostrados en la interfaz y se produce otra pausa de 500 milisegundos, apagando el indicador en este periodo.

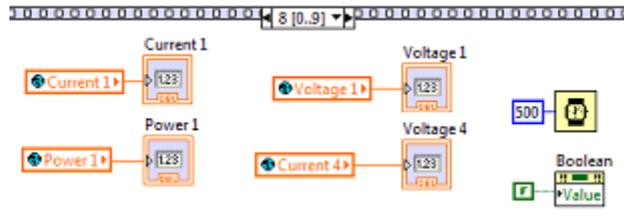


Figura 5.10. Paso 8 de la secuencia MPPT en LabView

- Paso 9 (figura 5.11): Se cierra el puerto serie hasta la siguiente iteración.

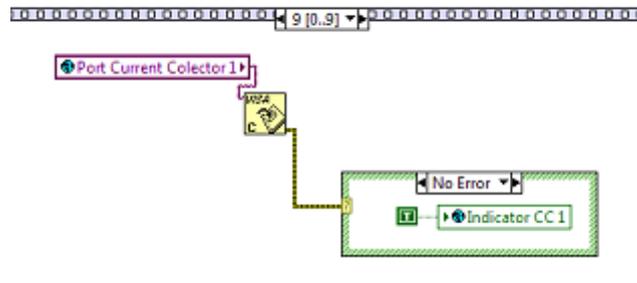


Figura 5.11. Paso 9 de la secuencia MPPT en LabView

5.2. Sub-VIs y Comandos de comunicación

En este apartado analizaremos los sub-VIs 'CC Read' y 'CC Set' que aparecían en la secuencia MPPT en el apartado anterior. En el caso del sub-VI de lectura, si nos fijamos en la figura 5.12, observamos que aparecen una serie de secuencias internas y otro sub-VI interno denominado 'Read'. Las primeras presentan los ajustes necesarios para enviar el comando deseado para interactuar con la carga activa, que en este caso es leer la corriente y la tensión que mide el dispositivo. El segundo, el sub-VI 'Read', contiene la lectura de la respuesta del comando enviado y obtención de los valores numéricos de las variables (ver figura 5.13).

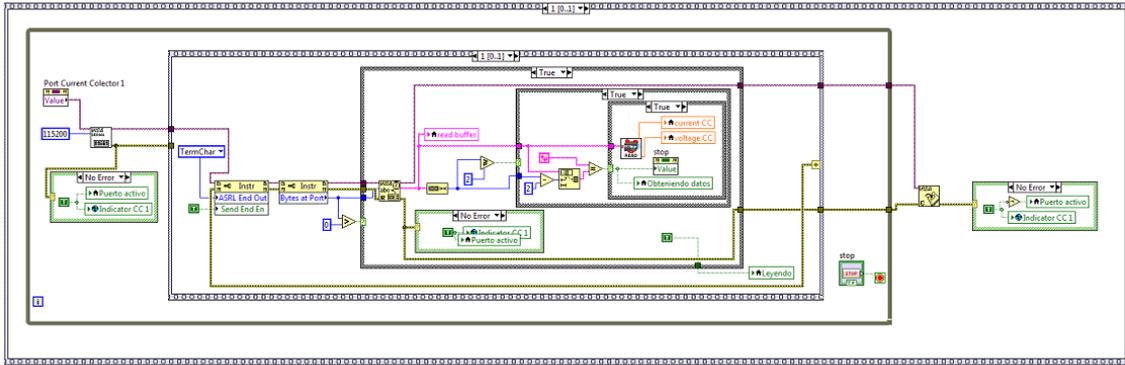


Figura 5.12. Interior del sub-VI 'CC Read'

La estructura del comando de lectura es la siguiente:

>> read

La respuesta al comando 'read' es la siguiente:

>> read [I] [V]

Donde [I] es la intensidad de corriente en mA y [V] es la tensión en mV.

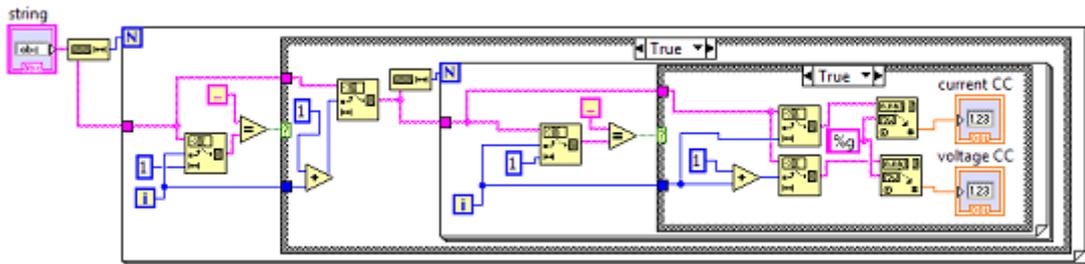


Figura 5.13. Interior del sub-VI 'Read'

De una forma similar, en el caso del sub-VI de establecimiento del valor de corrientes 'CC Set', si nos fijamos en la figura 5.14, observamos que aparecen una serie de secuencias internas y otro sub-VI interno denominado 'Set'. Las primeras presentan los ajustes necesarios para enviar el comando que establece el nuevo valor de corriente que debe solicitar la carga activa a la MFC. El segundo, el sub-VI 'Set', contiene la lectura de la respuesta del comando enviado (ver figura 5.15).

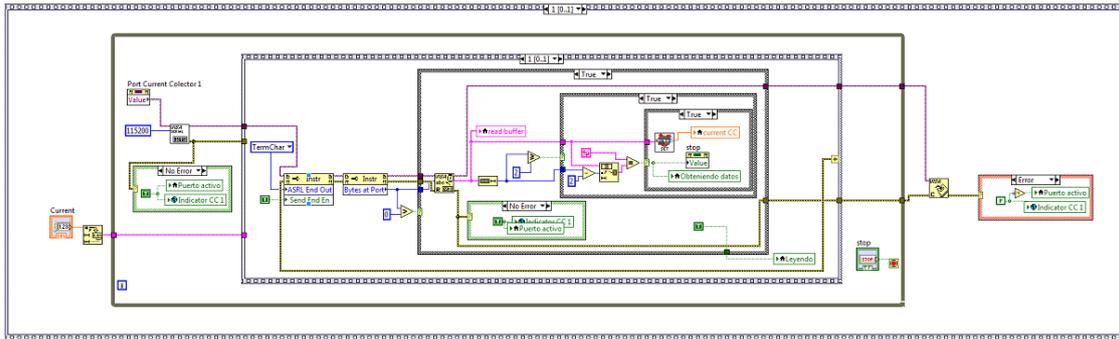


Figura 5.12. Interior del sub-VI 'CC Set'

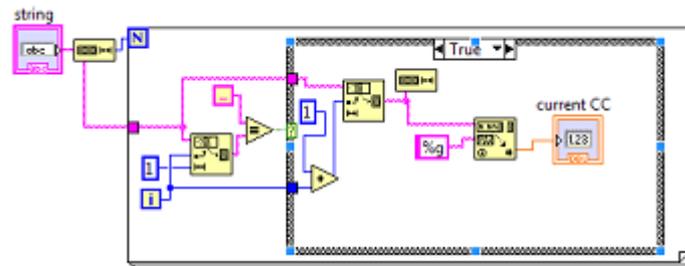


Figura 5.13. Interior del sub-VI 'Set'

La estructura del comando de establecimiento de una corriente es la siguiente:

>> set [I]

La respuesta al comando 'set' es la siguiente:

>> set [I]

Donde [I] es la intensidad de corriente en mA.

6. Fuzzy Logic Control aplicado al prototipo

En este punto expondremos las especificaciones usadas en el controlador para trabajar con el prototipo de la planta piloto en modo automático. Estudiaremos los pasos que se han seguido para llevar a cabo su diseño e implementación.

6.1. Definición de parámetros del controlador

El primer paso es definir las variables de entrada y salida del controlador, como se puede apreciar en la tabla 6.1. Las de salida son los flujos de las bombas P01, P02, P03 y P04, así que hay cuatro. Las de entrada son el pH de la MFC y la cantidad de VFA que contiene el lodo sedimentado, por tanto hay dos. Hay que tener en cuenta que ambas variables de entrada son parámetros off-line. Internamente, el controlador utiliza otro parámetro para adaptar los valores de la entrada VFA. Este se denomina tiempo de residencia en el digestor o HRT y se relaciona mejor con las variables de salida.

| Nombre de Variable | Tipo Variable (Controlador) | Valor (palabra) | Valor (numérico) |
|-----------------------|-----------------------------|---------------------|------------------|
| HRT | Entrada / Salida | Lento | > 4.5 (días) |
| | | Deseado (Set-point) | 4.5 – 3.5 (días) |
| | | Rápido | < 3.5 (días) |
| VFA | Entrada | Bajo lo deseado | 1.0 (g/L) |
| | | Deseado (Set-point) | 3.5 (g/L) |
| | | Elevado | - |
| MFC pH | Entrada | Bajo lo deseado | < 6 |
| | | Deseado (Set-point) | 7 -8 |
| | | Elevado | > 9 |
| Flujo de la bomba P01 | Salida | Bajo | 14.35 (l/d) |
| | | Medio | 16.14 (l/d) |
| | | Alto | 18.45 (l/d) |
| Flujo de la bomba P02 | Salida | Bajo | 35.87 (l/d) |
| | | Medio | 40.35 (l/d) |
| | | Alto | 46.12 (l/d) |
| Flujo de la bomba P03 | Salida | Bajo | 2.22 (l/d) |
| | | Medio | 8.5 (l/d) |
| | | Alto | 16.57 (l/d) |
| Flujo de la bomba P04 | Salida | Bajo | 1 (l/h) |
| | | Medio | 2 (l/h) |
| | | Alto | 2.5 (l/h) |

Tabla 6.1. Variables y 'Membership function' de MFC for Sludge

En la figura 6.1, se puede apreciar un diagrama del comportamiento interno del bloque de Control 'Fuzzy Logic' empleado en el MFC4S. Como se puede observar, realmente existen dos controladores de lógica difusa. Es destacable que las salidas del controlador se deben adaptar a

las unidades apropiadas. Los valores que aparecen en las tablas son los puntos de operación (obtenidos con experimentación del prototipo de laboratorio y rectificados para el prototipo de la planta piloto).

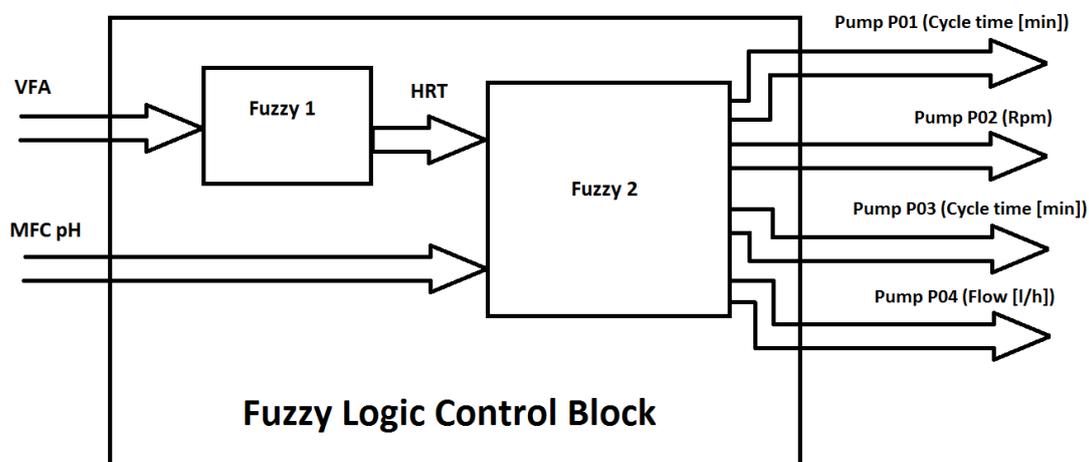


Figura 6.1. Diagrama del bloque de control Fuzzy Logic.

| | | HRT | | |
|--|--------------|----------------|----------------|----------------|
| | | 4.50 | 4.00 | 3.50 |
| Flujo objetivo para HRT [l/día] | Bomba | [l/día] | [l/día] | [l/día] |
| | P01 | 14.35 | 16.14 | 18.45 |
| | P02 | 35.87 | 40.36 | 46.12 |
| | P03 | 2.22 | 8.50 | 16.57 |
| Tiempo encendido [s/día] | | [s/día] | [s/día] | [s/día] |
| | P01 | 404.20 | 454.73 | 519.69 |
| | P03 | 86.02 | 329.03 | 641.47 |
| Tiempo de ciclo [s/ciclo] | | [s/C] | [s/C] | [s/C] |
| | P01 | 10.00 | 10.00 | 10.00 |
| | P03 | 20.00 | 20.00 | 20.00 |
| Ciclo [por día] | | [C/día] | [C/día] | [C/día] |
| | P01 | 40.42 | 45.47 | 51.97 |
| | P03 | 4.30 | 16.45 | 32.07 |
| Tiempo de Ciclo [minutos] | | [min] | [min] | [min] |
| | P01 | 35.63 | 31.67 | 27.71 |
| | P03 | 334.88 | 87.54 | 44.90 |
| Flujo [rpm] | | [rpm] | [rpm] | [rpm] |
| | P02 | 2.93 | 3.30 | 3.77 |

Tabla 6.2. Adaptación de variables de salida

La tabla 6.2 muestra la adaptación de los valores de las variables de salida a las unidades apropiadas. Se debe tener en cuenta que las bombas P01 y P03 trabajan en ciclos, así que es necesario obtener tanto los tiempos en los que se encuentran activas como los tiempos del ciclo

completo. En nuestro caso, el tiempo en que se encuentran activas se ha fijado para ambas bombas y el controlador varía el tiempo de ciclo completo.

El siguiente paso es establecer las reglas lógicas, que son mostradas en la tabla 6.3, relacionando cada valor de una variable de entrada con el valor correspondiente de la variable de salida.

| Nombre de variable de entrada (IF...) | Valor (is ...) | Nombre de variable de salida (THEN ...) | Valor (is ...) |
|---------------------------------------|---------------------|---|-----------------------|
| VFA | Bajo | HRT | Lento |
| | Elevado | | Rápido |
| HRT | Lento | P01 | Bajo (Tiempo elevado) |
| | Deseado | | Medio |
| | Rápido | | Alto (Tiempo corto) |
| HRT | Lento | P02 | Bajo (Bajas rpm) |
| | Deseado | | Medio |
| | Rápido | | Alto (Altas rpm) |
| HRT | Lento | P03 | Bajo (Tiempo elevado) |
| | Deseado | | Flujo Medio |
| | Rápido | | Alto (Tiempo corto) |
| MFC pH | Bajo lo deseado | P04 | Bajo Flujo |
| | Deseado (Set-point) | | Medio Flujo |
| | Elevado | | Alto Flujo |

Tabla 6.3. Reglas Lógicas del Control Fuzzy Logic para MFC4S

6.2. Implementación del bloque de Control 'Fuzzy Logic'

Una vez definidos todos los parámetros necesarios, podemos implementar el bloque de control de Lógica Difusa con el lenguaje de programación escogido. En el Proyecto MFC4Sludge, primero se programó con MatLab y más tarde se adaptó a LabView.

En una primera fase, se trabaja con Matlab, ya que es más versátil y con gran capacidad de cálculo y puede simular resultados del controlador de lógica difusa, de manera que se puede probar ajustando parámetros y experimentar con los resultados obtenidos.

Una vez obtenido el controlador en MatLab, en la segunda fase, se implementa en LabView ya que es el lenguaje de la interfaz que trabajará con los prototipos.

6.2.1. MatLab

MatLab consta de un software específico para diseñar y crear controladores de lógica difusa. Este software es lanzado escribiendo en la línea de comandos de MatLab la palabra 'Fuzzy'. La figura 6.2 muestra la apariencia del software. En la parte izquierda de la imagen aparece la ventana donde se puede definir las variables de entrada y de salida (nombres, rangos, etc.). En la parte central, el usuario puede definir las 'membership functions' para cada variable (nombre, forma, valores, rango, etc.). Por último, en el lado derecho aparece la ventana para implementar las reglas lógicas.



Figure 6.2. Software de MatLab para diseño y creación de controladores 'fuzzy logic'

Si observamos la figura 6.3, apreciamos las ventanas que definen las variables de entrada y salida de los dos controladores de lógica difusa internos que aparecían en la figura 6.1. El primero consta de una única salida y una entrada, cada una de ellas con dos 'membership functions' (como se especificó en la tabla 6.3). El segundo consta de dos variables de entrada y cuatro de salida, cada una de ellas con tres 'membership functions'.

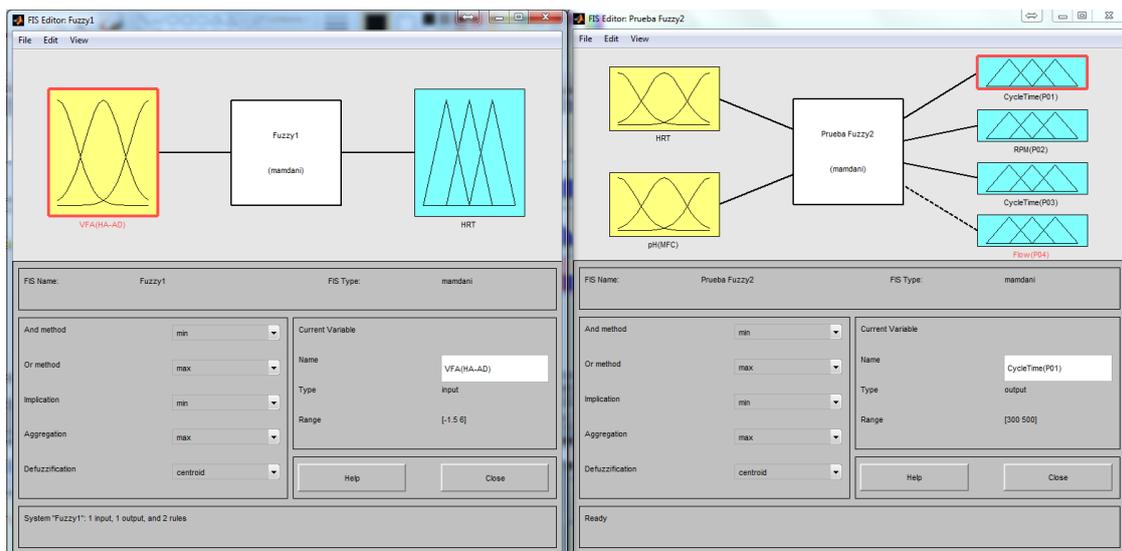


Figure 6.3. Controladores 'Fuzzy Logic' en MatLab para MFC for Sludge (Variables)

Analizando el primer sub-controlador, la figura 6.4 muestra la definición de sus 'membership functions'. En ella se pueden observar los nombres y la distribución de probabilidad que la define

(tanto en forma de la distribución como en rango de valores que abarca). Se han escogido formas de función triangular porque producen transiciones entre valores menos abruptas y más adecuadas al resultado deseado. Observando la figura 6.5, obtenemos las reglas lógicas necesarias en este sub-controlador.

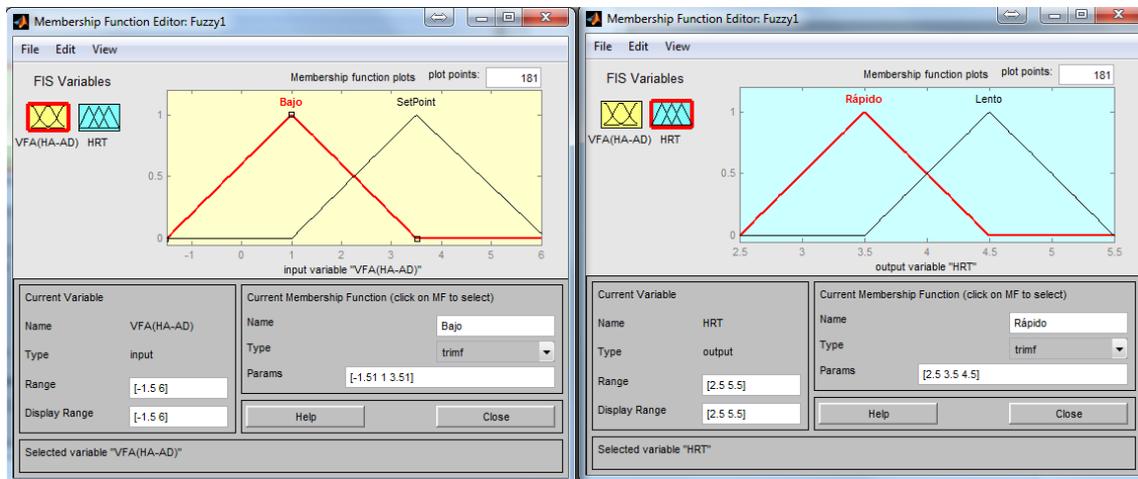


Figure 6.4. 'Membership functions' del primer sub-controlador de lógica difusa

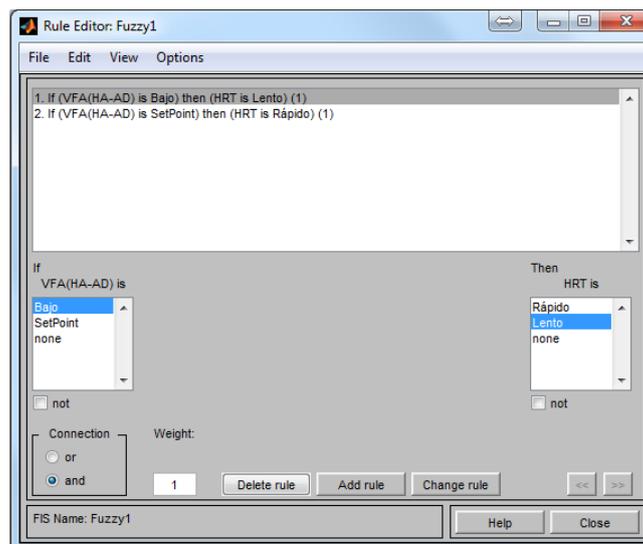


Figure 6.5. Reglas lógicas del primer sub-controlador de lógica difusa

Matlab habilita la posibilidad de simular los resultados del controlador y la figura 6.6 muestra algunas de las posibles simulaciones de resultados.

La ventana de la izquierda muestra valores de entrada cercanos a 1 (concretamente 1.27) y el resultado probabilístico asociado a la salida cercano a 4.5 (concretamente 4.36). En la ventana central, se simula un valor en la mitad del intervalo de entrada (2.27) y se obtiene un resultado intermedio del rango de salida (3.99). Cuando simulamos valores cercanos a 3.5 para la entrada (concretamente 3.46) obtenemos una salida cercana a 3.5 (concretamente 3.53). Estos resultados coinciden con lo especificado en la tabla 6.1 y 6.3.

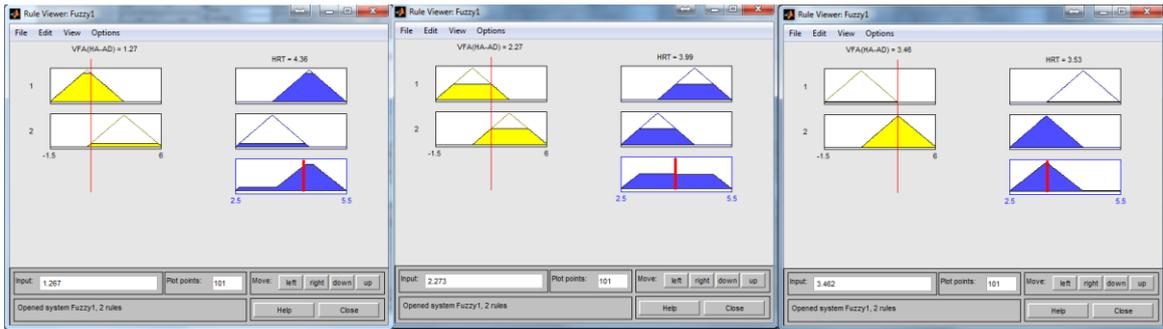


Figure 6.6. Salidas simuladas del primer sub-controlador de lógica difusa

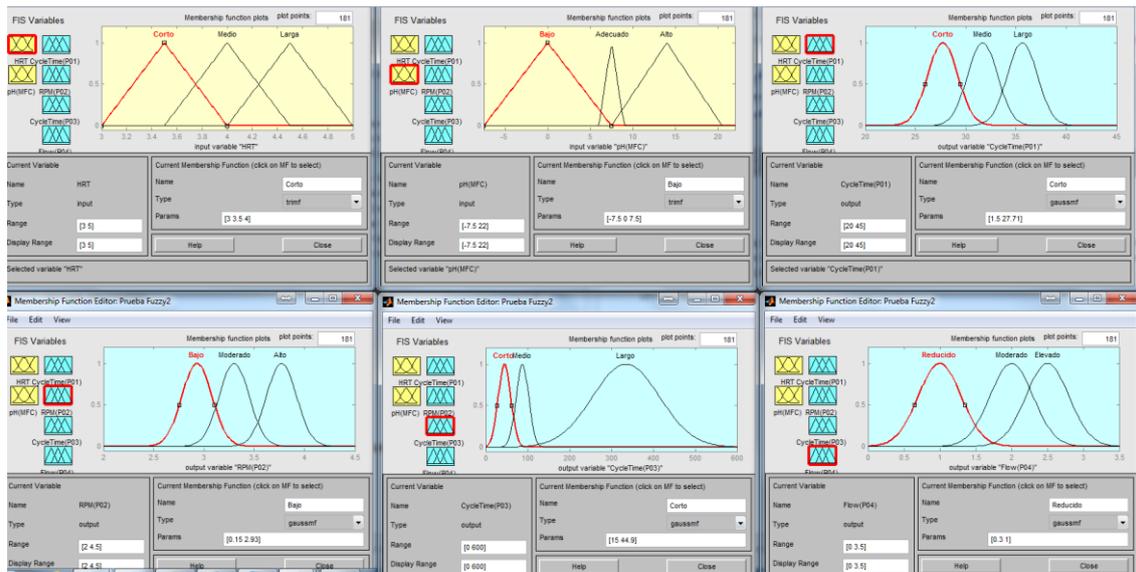


Figura 6.7. 'Membership functions' del segundo sub-controlador de lógica difusa

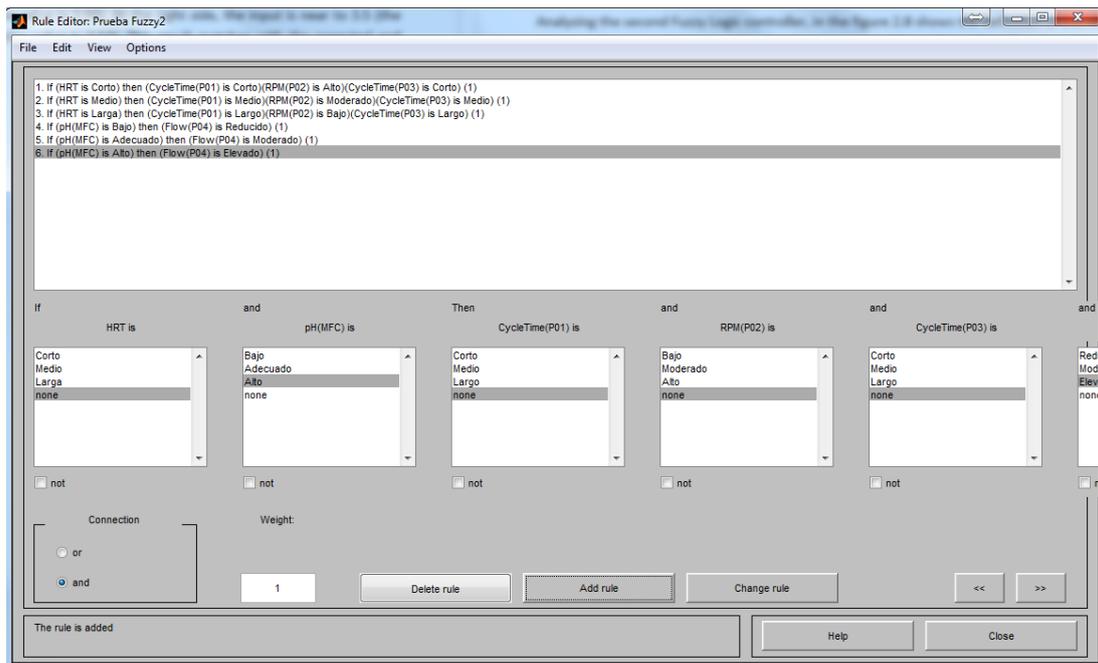


Figura 6.8. Reglas lógicas del segundo sub-controlador de lógica difusa

Analizando el segundo controlador de lógica difusa, la figura 6.7 muestra la definición de las 'membership function'. En este caso hay dieciocho funciones de este tipo, tres por cada variable. El controlador necesita seis reglas lógicas que pueden observarse en la figura 6.8. La figura 6.9 muestra los resultados de simular un par de valores de entrada.

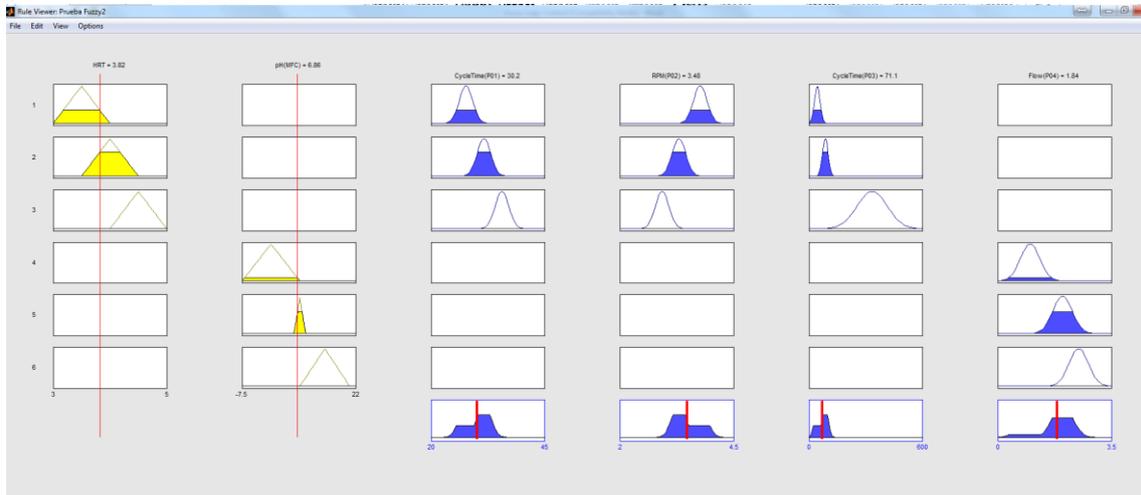


Figura 6.9. Simulación del segundo sub-controlador de lógica difusa

6.2.2. LabView

Después de implementar y probar los sub-controladores en MatLab, se implementan en LabView usando los mismos parámetros que en el software anterior con la intención de integrarlo en la interfaz de control.

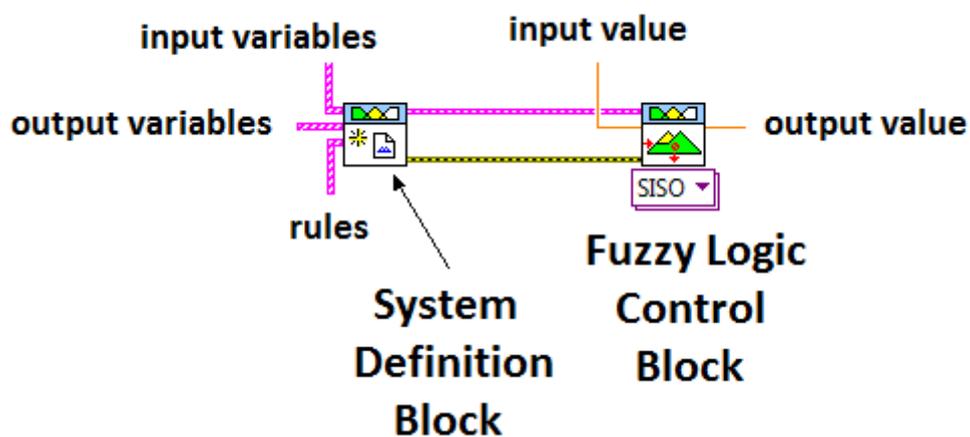


Figure 6.10. Bloques de Control 'Fuzzy Logic' de LabView

Para llevar a cabo la tarea, se necesita una librería especial de lógica difusa en LabView y construir VIs que se pueden apreciar en las sucesivas figuras. En la figura 6.10 se aprecia el 'Fuzzy

Logic Control Block' que define entradas y salidas simples o múltiples (sistemas SISO, MISO, SIMO y MIMO). En la figura se muestra el bloque que refleja el primer sub-controlador y, por tanto, es un sistema SISO, pero el segundo sub-controlador es un sistema MIMO, como el controlador global. A la izquierda de la imagen, el bloque 'New Fuzzy System' recoge la definición de las variables (tanto de entrada como de salida), las 'membership functions' de cada variable y las reglas lógicas.

En la figura 6.11 se puede observar la forma apropiada de definir las variables, en concreto, la variable de salida del primer sub-controlador (pero las variables de entrada se definen de forma similar).

Inicialmente, con el bloque 'Create Membership function' definimos el nombre, la forma y parámetros de cada 'membership function' que compone la variable. Cuando hemos creado todas las funciones, las agrupamos y las introducimos en el bloque 'Create Variable' como argumento. Además debemos asignar el nombre de la variable y el rango de valores considerado. Por último, agrupamos las variables (diferenciando entre las de entrada y las de salida) y las introducimos en el parámetro adecuado del bloque 'New Fuzzy System' (en la figura 6.10)

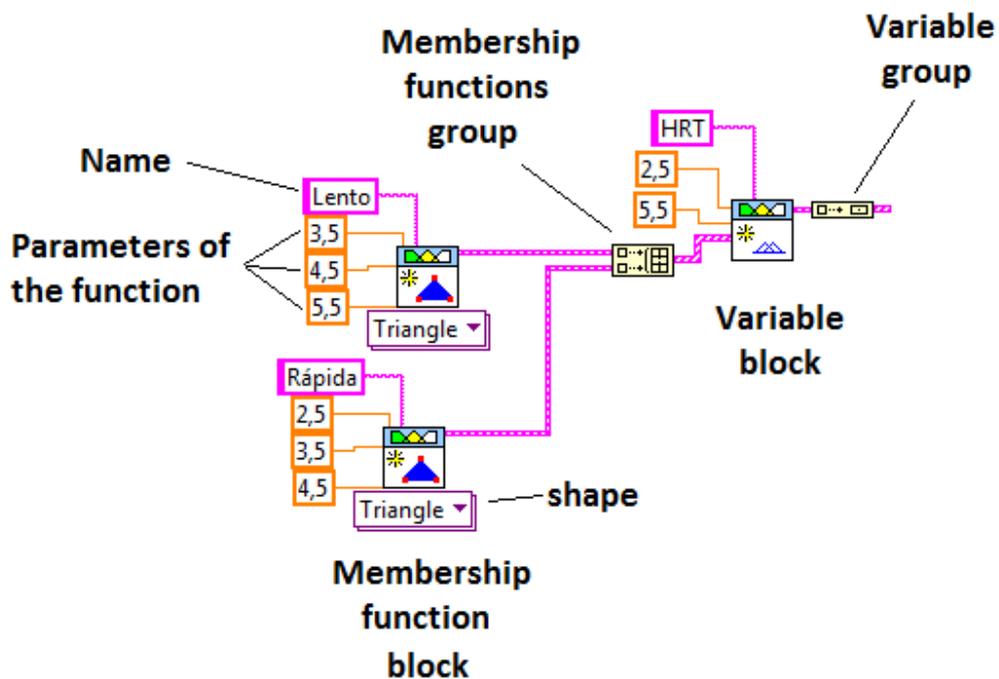


Figura 6.11. Bloques de LabView de definición de Variables y 'Membership functions' en 'Fuzzy Logic'

En la figura 6.12 apreciamos el método para definir las reglas lógicas del controlador. El bloque 'Create Antecedent' define (junto a los índices de posición de agrupación de las variables y sus 'membership functions') la primera parte de las reglas lógicas, es decir, la condición a cumplir (representa la parte IF...). Del mismo modo, el bloque 'Create Consequent' define la segunda parte de la regla o consecuencia (representa la parte THEN...). El bloque 'Create Rule' genera una regla lógica usando agrupaciones de los bloques anteriores (ya que una misma regla puede

tener varios condicionantes y/o varias consecuencias) y algún tipo de operador lógico (OR, AND, etc.). Por último, las reglas lógicas se agrupan y establecen como otra de los parámetros del bloque 'New Fuzzy System' (ver figura 6.10).

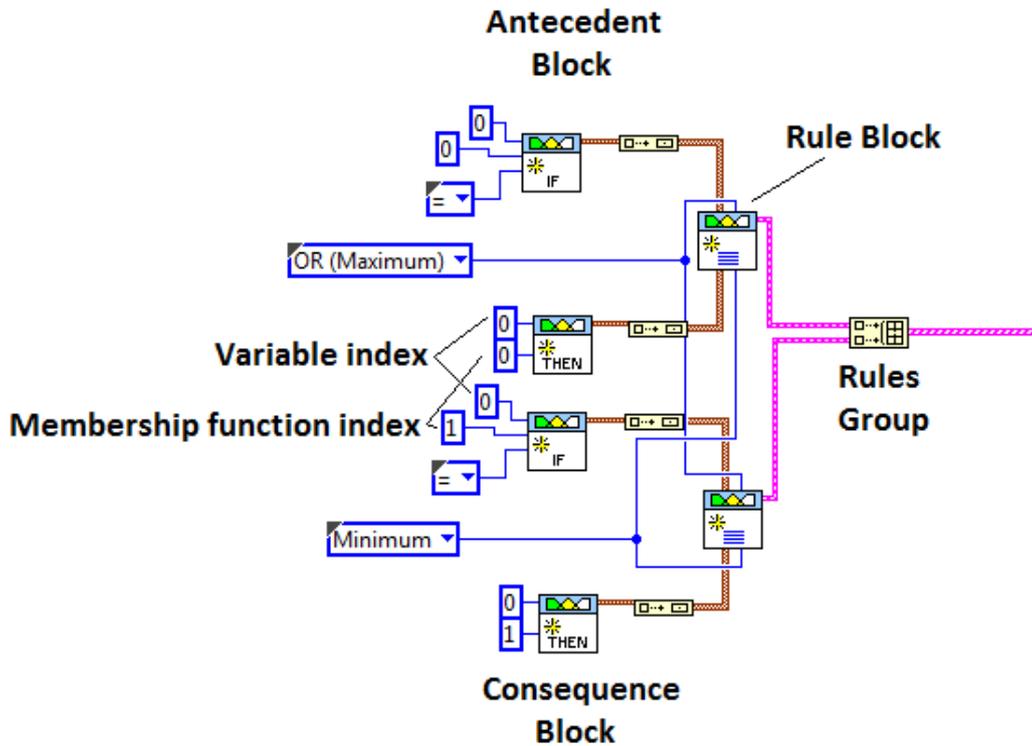


Figura 6.12. Bloques que definen las reglas lógicas de Fuzzy Logic en LabView

La figura 6.13, muestra el esquema interno del VI que conforma el Controlador de Lógica Difusa. Este contiene dos sub-VIs internos que representan a cada sub-controlador.

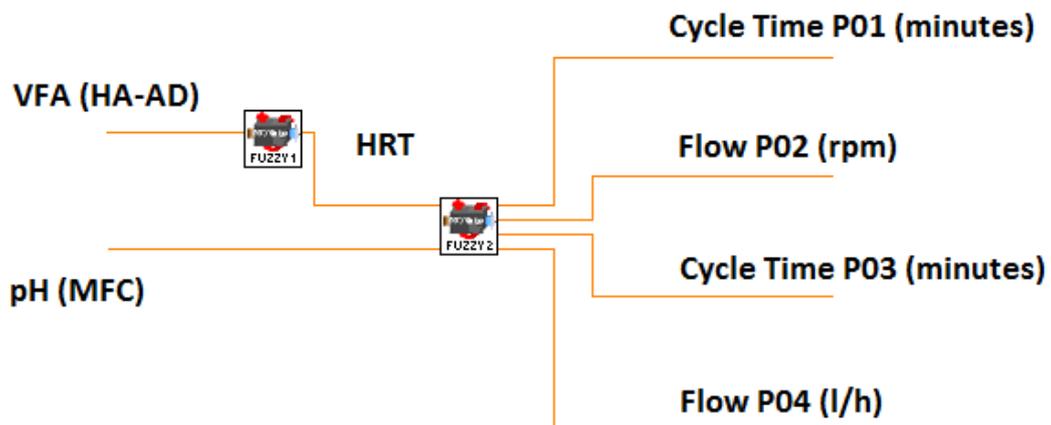


Figura 6.13. Controlador 'Fuzzy Logic' en LabView

Analizando las propiedades de nuestro sistema anteriormente descritas, comprobamos que las referencias se marcan de manera estable como indica la tabla 6.4. Esto quiere decir que nuestro controlador intentará que el sistema alcance dicha referencia a pesar de las perturbaciones.

| Variable | Valor de referencia |
|-----------|---------------------|
| HRT (VFA) | 4 días (3,5 g/l) |
| MFC pH | 7,5 |

Tabla 6.4. Referencias del FLC

En la figura 6.14.a, 6.14.b y 6.14.c exponemos datos de las señales del sistema durante la experimentación con el prototipo.

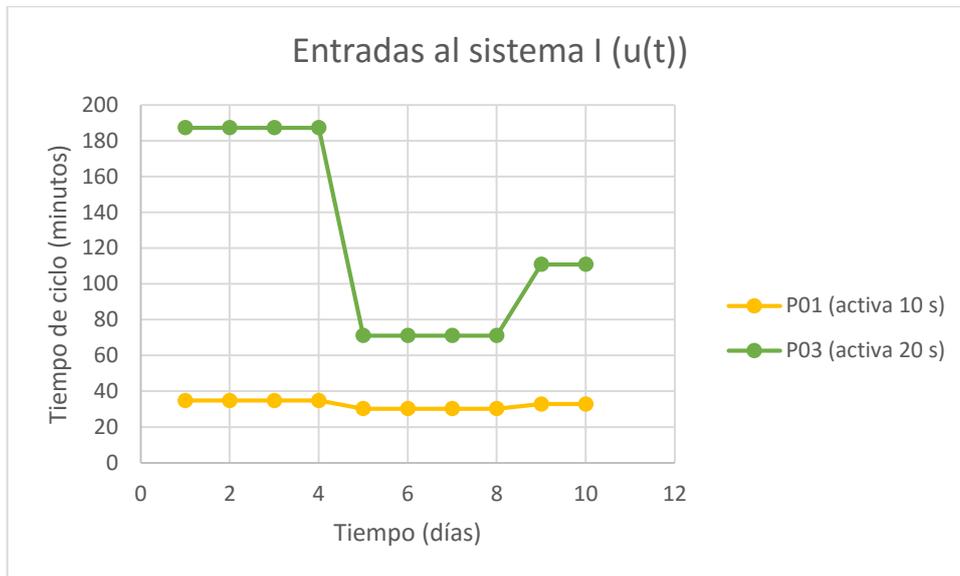


Figura 6.14.a Resultados de simulación P01 y P03

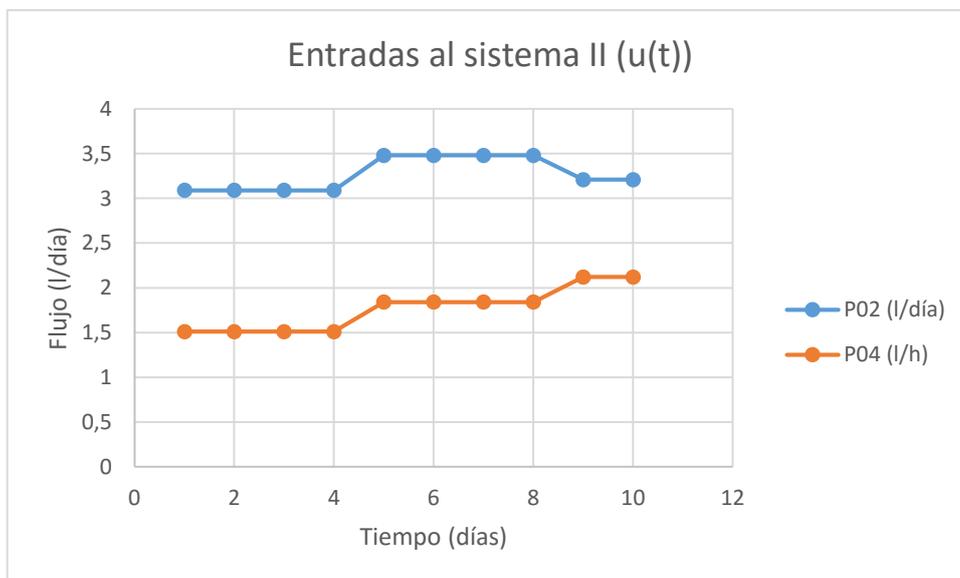


Figura 6.14.b Resultados de simulación P02 y P04

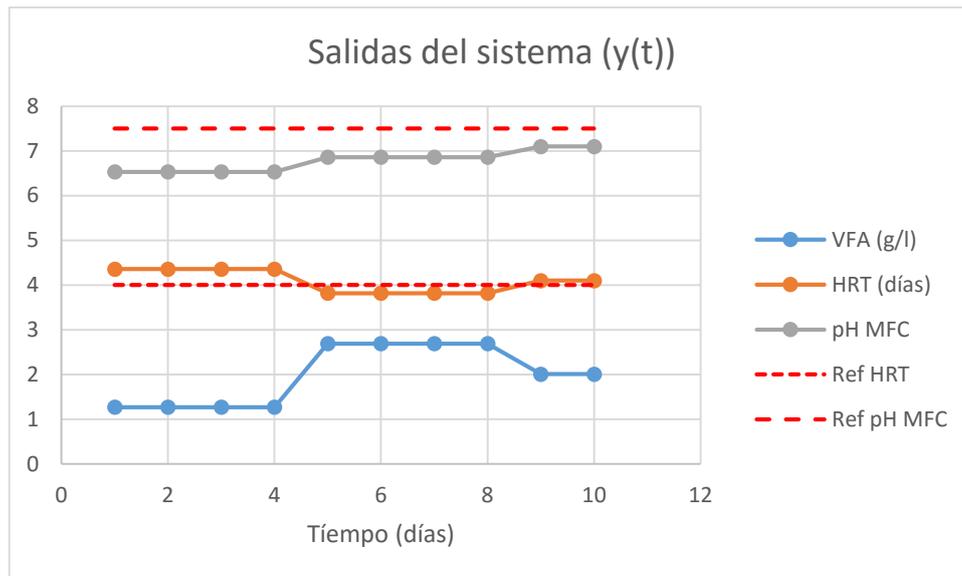


Figura 6.14.c Resultados de simulación Salidas

Como se aprecia, el controlador provoca que la salida del sistema tienda a los valores de referencia establecidos. Debemos considerar el retardo de días entre la actualización de la salida del sistema ya que, como se ha comentado previamente, dichas variables se miden de manera off-line (requieren de análisis de muestras en el laboratorios).

7. Aspectos económicos y energéticos

En este apartado mostraremos la eficiencia del control sobre el prototipo de la planta piloto en los dos aspectos fundamentales expuestos, 'MPPT' y 'Fuzzy Logic Control' a través de resultados experimentales. También enfocaremos la situación desde un punto de vista económico para contemplar el balance de sustituir la sección de tratamiento de una planta depuradora de aguas por la tecnología desarrollada en este proyecto.

7.1. Resultados obtenidos en el control del prototipo.

Si se analiza la figura 7.1, se apreciarán los resultados obtenidos en voltaje, corriente y potencia para una de las celdas del bloque MFC. Claramente la potencia oscila en torno a 200 o 250 mW. Sumando las 4 celdas que componen la MFC obtenemos una producción de 1 Wh. Las técnicas MPPT nos aseguran que la potencia será la máxima que se pueda alcanzar.

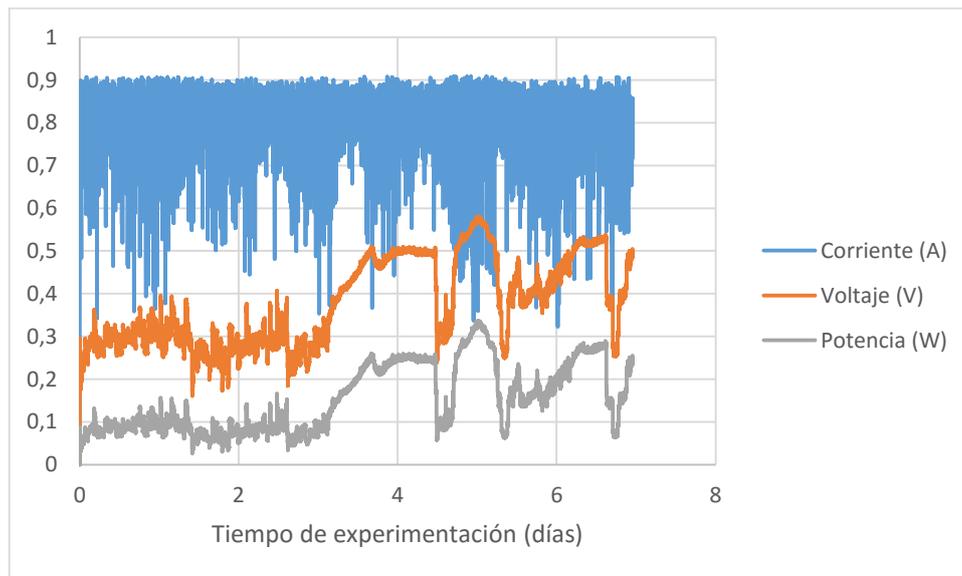


Figura 7.1. Voltaje, Corriente y Potencia en una celda de la MFC.

7.2. Resultados de enfoque técnico

7.2.1. Requerimientos técnicos para producir 1 Wh.

Con la MFC de 10 litros integrada en el prototipo de planta piloto se obtiene una producción de 1 Wh. Para la obtención de dicha energía, ciertos equipos con consumo energético trabajan de manera continua. A continuación se documentará el consumo de dicho equipamiento:

- Introducción del fango en el tanque digestor con una bomba trifásica de 0.75 KW que funciona en periodos de encendido y apagado. El consumo medio estimado de la bomba es de 3.9 Wh.
- Para la introducción de agua en el tanque digestor (dilución del fango), se usa una bomba de 100 W. La media de uso es de 0.37 Wh.
- Para el mezclado del fango en el interior del tanque de digestión se utiliza una bomba de gas de 75 W, que tiene un consumo medio de 5 Wh.
- Mantener la temperatura en torno a los 35 °C necesarios es tarea del sistema de calentamiento/enfriamiento que consume una media de 100 Wh.
- Para eliminar los residuos sólidos del tanque de sedimentación se utiliza una bomba de 100 W con un consumo medio de 0.37 Wh.
- El bloque MFC es alimentado por una bomba de 75 W con un consumo medio de 4.5 Wh.
- Las 4 bombas de recirculación en el bloque MFC conllevan un consumo de 3.5 Wh cada una.
- Se estima un consumo de 40 W adicionales de consumo eléctrico en el resto de equipos auxiliares (Cargas activas, fuente de alimentación, PC, tarjetas de control, etc.).
- En la fase de “start-up”, el acetato se diluye en un tanque utilizando un mezclador.

Inicialmente, el prototipo produce sólo 1 Wh y consume sobre 170 Wh, lo que es altamente ineficiente. La ventaja es que el prototipo puede ser escalable con un incremento mínimo de consumo debido a que los equipos están sobre dimensionados para un prototipo tan pequeño. Las técnicas para el escalado y sus resultados estimados serán expuestos en apartados posteriores.

7.2.2. Análisis de posibles escenarios escalados.

Los posibles beneficios del proyecto son resaltados cuando escalamos el prototipo para una capacidad mayor de procesamiento de lodos que el de la planta piloto. Por este motivo, mostraremos diferentes escenarios como el de una capacidad de generación de 250 W, 500 W y 750 W.

Para ello, extrapolaremos los datos obtenidos en el prototipo, obteniendo los posibles escenarios. La cantidad de lodos introducidos en el digestor a diario (procesado por el prototipo) se encuentra en una media de 55 litros/día.

Asumiendo el régimen estacionario alcanzado, la tabla 7.1 muestra el consumo de lodos diario para cada uno de los escenarios estudiados.

| | 250 W | 500 W | 700 W |
|----------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Renovación diaria de lodos | 13,75 m ³ /día | 27,5 m ³ /día | 38,5 m ³ /día |

Tabla 7.2. Consumo diario de lodos con la aproximación MFC para cada escenario

La cantidad media de aguas residuales (fangos) procesada por una planta de tratado se encuentra entre 10.000 y 200.000 m³ por día (depende del tamaño de la planta). En nuestro caso, la planta de tratamiento de aguas residuales GURAK recibe 14.540 m³ de aguas residuales por día. Después de ciertos procesos, se obtienen 38,18 m³ de fangos por día. La tabla 7.2 muestra el consumo anual de los fangos producidos por GURAK anualmente para cada uno de los escenarios.

| | 250 W | 500 W | 700 W |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Lodos consumidos anualmente (% del total procesado en GURAK anualmente) | 5018.75 m ³ (36.02 %) | 10037.5 m ³ (72.31 %) | 14052.5 m ³ (100.84 %) |

Tabla 7.3: Lodo procesado anualmente con MFC4S para cada escenario y relación con el procesado en GURAK

Como se puede apreciar en la tabla 7.2, el escenario de 250 W usa una parte de los lodos producidos por GURAK, el escenario ideal es el de 700 W que utiliza en torno al 100 % de los lodos producidos.

Para realizar los cálculos, asumimos un tamaño de tanque digestor de 7 veces el volumen consumido de lodos por día y un tamaño de tanque de sedimentación de una vez el volumen consumido por día. En la tabla 3 se muestran los volúmenes de los tanques para cada escenario. Para dar una estimación de la superficie necesaria, se estima una altura de 7 m de digestor y de 4 metros de tanque de sedimentación.

| | 250 W | 500 W | 700 W |
|-------------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| Volumen del Digestor | 95 m ³ | 190 m ³ | 266 m ³ |
| Volumen del tanque de Sedimentación | 14,3 m ³ | 28,6 m ³ | 40 m ³ |
| Superficie necesaria | 17,1 m ² | 34,3 m ² | 48 m ² |

Tabla 7.4: Volumen requerido para el tanque digestor y de sedimentación y superficie necesaria en cada escenario

Considerando la ocupación del subsistema MFC en 0,2 m², y la posibilidad de apilar varios bloques sobre otros, por ejemplo 10 bloques MFC, el espacio necesario para emplazar toda la sección de bloques MFCs para los diferentes escenarios se han calculado en la tabla 7.4. Actualmente la extensión de la planta depuradora GURAK es aproximadamente de 45000 m². En la figura 7.2 se puede observar una fotografía (en planta) de la misma.



Figura 7.2. Planta depuradora de agua GURAK en Aduna, Guipúzcoa.

| | 250 W | 500 W | 700 W |
|--|--------------------|--------------------|-------------------|
| Superficie del subsistema MFC | 2.9 m ² | 5.7 m ² | 8 m ² |
| Superficie total (Tanques + MFC) | 20 m ² | 40 m ² | 56 m ² |
| Espacio necesario con respecto al uso actual | 0.044 % | 0.089% | 0.124% |

Tabla 7.5: Superficie necesaria debido a la implantación del MFC4Sludge para cada escenario.

Como podemos observar, la superficie necesaria para la implantación de la planta piloto para todos los escenarios es ínfima si la comparamos con la superficie en uso de la depuradora GURAK. Por este motivo no se ha considerado necesario adquirir nuevos terrenos para la implantación del prototipo en el análisis económico.

7.2.3. Análisis económico

Una vez expuestas los posibles escenarios de escalado, analizaremos la inversión económica para desarrollarlos, teniendo en cuenta la inversión inicial, los costes de operación y las ventas de productos. Para evaluar dichos aspectos, se realizan las siguientes puntualizaciones:

Respecto a la inversión inicial:

- Para la construcción de edificios (tanques de digestión y sedimentación, unidad industrial donde situar las MFC, etc.) e infraestructuras (conductos para los fangos y agua, etc.) se ha tomado un coste de 300 € por m³ de volumen de tanque, añadiéndole un 20% para instrumentación y equipos auxiliares.
- Como se considera que la planta depuradora tiene espacio libre disponible para establecer la planta piloto MFC4Sludge (en cualquiera de sus escenarios), no se han considerado costes adicionales en adquisición de terrenos.
- De acuerdo con las investigaciones de LEITAT y siguiendo las recomendaciones del EMEFCY sobre cálculo de coste de electrodos, se aproxima un coste de 200 € por W para las unidades MFC.
- La vida de operación de las unidades MFC y de otros equipos auxiliares se estima en 12 años. Por ello, el año décimo primero y vigésimo quinto se incluye un coste de reemplazamiento de equipos igual a la mitad de la inversión inicial en equipos.
- El coste del resto de equipos necesarios para agitación, mezclado, producción de calor, bombeo y control, se han calculado como el 10% del coste de los tanques y las unidades MFC.
- El estudio de viabilidad y costes similares se han considerado como el 10% de los costes de inversión inicial en edificios infraestructuras y equipamiento.

Respecto a costes de operación:

- Como la planta piloto intenta reemplazar la sección actual de tratamiento de fangos, el fango obtenido por la planta será bombeado al tanque digestor. El proceso es totalmente automático, por tanto sólo se considera parcialmente un 0.5 trabajador capacitado (36000 €/año) y un 0.2 no capacitado (21600 €/año).
- La producción energética de la MFC es de 500 W/m³ de fangos procesado. El consumo estimado de la MFC es de 750 W/m³.
- La sección de tratamiento de fangos de la planta depuradora (que se desea reemplazar) consume actualmente 0.31 kW/m³ de lodo, lo que supondrá un ahorro energético considerable.
- Los costes de materiales de desecho son nulos, puesto que la generación de residuos sólido de la planta piloto es similar a la generación actual de residuos sólidos con la sección de tratamiento de fangos.
- Los servicios intermedios incluyen el coste de inóculo de bacterias en las unidades MFC, productos de limpieza, etc.

Respecto a las ventas:

- El producto de la planta piloto es la electricidad producida por la MFC. Actualmente la planta depuradora tiene un consumo, por lo que se tendrá en cuenta el ahorro energético.
- El precio de la electricidad se ha aproximado con el precio medio de tarifas industriales, 0.07 €/kWh.
- La planta opera 365 días al año debido a que opera de forma automática y que la llegada de aguas con residuos es constante.
- La tasa de incremento anual se considera del 3%.
- El crecimiento anual de otros elementos, considerando la evolución del pasado año en los mercados españoles, es:
 - Precio de coste / venta eléctrico: 4%
 - Coste de salarios: 1%

7.2.3.1. Resultados

Las tablas que se muestran a continuación contienen información para los distintos escenarios. Además se incluyen el Valor Actual Neto Financiero de la inversión (FNPV) y el Porcentaje de Retorno Financiero (FRR) para horizontes de 10, 15 y 30 años para cada escenario.

Como se puede apreciar en el caso del escenario de 250 W no se llega a recuperar la inversión inicial en el horizonte de 30 años (en uno superior la tendencia es a la recuperación). Por esta razón el FRR no se puede calcular en dicho escenario.

En cambio, en el caso de los escenarios de 500 W y 700 W se llega a recuperar la inversión en los años undécimo y noveno, respectivamente.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Electricidad producida | 0 | 175,656 | 182,683 | 189,990 | 197,589 | 205,493 | 213,713 | 222,261 | 231,152 | 240,398 | 250,014 | 260,014 | 270,415 | 281,231 | 292,481 |
| Energía ahorrada (respecto GURAK) | 0 | 108,907 | 113,263 | 117,794 | 122,505 | 127,406 | 132,502 | 137,802 | 143,314 | 149,047 | 155,008 | 161,209 | 167,657 | 174,363 | 181,338 |
| VENTAS | | 284,563 | 295,946 | 307,783 | 320,095 | 332,899 | 346,215 | 360,063 | 374,466 | 389,444 | 405,022 | 421,223 | 438,072 | 455,595 | 473,819 |
| Coste Salarial | 0 | 22,320 | 22,543 | 22,769 | 22,996 | 23,226 | 23,459 | 23,693 | 23,930 | 24,169 | 24,411 | 24,655 | 24,902 | 25,151 | 25,402 |
| Coste Energético | 0 | 263,484 | 274,024 | 284,985 | 296,384 | 308,239 | 320,569 | 333,392 | 346,727 | 360,597 | 375,020 | 390,021 | 405,622 | 421,847 | 438,721 |
| Servicio de Agua | 0 | 5,000 | 5,100 | 5,202 | 5,306 | 5,412 | 5,520 | 5,631 | 5,743 | 5,858 | 5,975 | 6,095 | 6,217 | 6,341 | 6,468 |
| Residuos Sólidos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Servicios Intermedios y Bienes | 0 | 0,100 | 0,102 | 0,104 | 0,106 | 0,108 | 0,110 | 0,113 | 0,115 | 0,117 | 0,120 | 0,122 | 0,124 | 0,127 | 0,129 |
| TOTAL COSTES OPERACIÓN | 0 | 290,904 | 301,769 | 313,059 | 324,793 | 336,986 | 349,658 | 362,828 | 376,516 | 390,741 | 405,526 | 420,893 | 436,865 | 453,466 | 470,720 |
| Estudio de viabilidad, coste de tendencias, etc. | 3,279 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Adquisición de terrenos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Edificación e Infraestructuras | 32,79 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Equipamiento | 53,279 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Costes Inversión Inicial | 89,348 | 0 |
| Costes de reemplazamiento | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8,935 | 0 | 0 |
| Coste de Descontaminación | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Valor Residual | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Otros elementos | 0 | 8,935 | 0 | 0 |
| TOTAL COSTES INVERSIÓN | 89,348 | 0 | 8,935 | 0 | 0 |
| TOTAL COSTES | 89,348 | 290,904 | 301,769 | 313,059 | 324,793 | 336,986 | 349,658 | 362,828 | 376,516 | 390,741 | 405,526 | 420,893 | 445,800 | 453,466 | 470,720 |
| BALANCE DE CAJA NETO | -89,348 | -6,341 | -5,823 | -5,276 | -4,698 | -4,088 | -3,444 | -2,765 | -2,050 | -1,297 | -0,504 | 0,330 | -7,728 | 2,129 | 3,098 |

Tabla 7.5.a. Balance de Caja Neto en miles de € para escenario 250 W (Parte I)

| | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Electricidad Producida | 304,180 | 316,347 | 329,001 | 342,161 | 355,847 | 370,081 | 384,884 | 400,280 | 416,291 | 432,943 | 450,260 | 468,271 | 487,002 | 506,482 | 526,741 |
| Energía ahorrada (respecto GURAK) | 188,591 | 196,135 | 203,981 | 212,140 | 220,625 | 229,450 | 238,628 | 248,174 | 258,100 | 268,424 | 279,161 | 290,328 | 301,941 | 314,019 | 326,579 |
| VENTAS | 492,771 | 512,482 | 532,981 | 554,301 | 576,473 | 599,532 | 623,513 | 648,453 | 674,391 | 701,367 | 729,422 | 758,599 | 788,943 | 820,500 | 853,320 |
| Coste Salarial | 25,656 | 25,913 | 26,172 | 26,434 | 26,698 | 26,965 | 27,235 | 27,507 | 27,782 | 28,060 | 28,340 | 28,624 | 28,910 | 29,199 | 29,491 |
| Coste Energético | 456,270 | 474,520 | 493,501 | 513,241 | 533,771 | 555,122 | 577,327 | 600,420 | 624,437 | 649,414 | 675,391 | 702,406 | 730,502 | 759,723 | 790,111 |
| Servicio de Agua | 6,597 | 6,729 | 6,864 | 7,001 | 7,141 | 7,284 | 7,430 | 7,578 | 7,730 | 7,884 | 8,042 | 8,203 | 8,367 | 8,534 | 8,705 |
| Residuos Sólidos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Servicios Intermedios y Bienes | 0,132 | 0,135 | 0,137 | 0,140 | 0,143 | 0,146 | 0,149 | 0,152 | 0,155 | 0,158 | 0,161 | 0,164 | 0,167 | 0,171 | 0,174 |
| TOTAL COSTES OPERACIÓN | 488,655 | 507,297 | 526,674 | 546,816 | 567,753 | 589,517 | 612,140 | 635,657 | 660,103 | 685,516 | 711,934 | 739,397 | 767,947 | 797,627 | 828,482 |
| Estudio de viabilidad, coste de tendencias, etc. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Adquisición de terrenos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Edificación e Infraestructuras | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Equipamiento | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Costes Inversión Inicial | 0 |
| Costes de reemplazamiento | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8,935 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Coste de Descontaminación | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5,328 |
| Valor Residual | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -2,664 |
| Otros elementos | 0 | 8,935 | 0 | 0 | 0 | 2,664 |
| TOTAL COSTES INVERSIÓN | 0 | 8,935 | 0 | 0 | 0 | 2,664 |
| TOTAL COSTES | 488,655 | 507,297 | 526,674 | 546,816 | 567,753 | 589,517 | 612,140 | 635,657 | 660,103 | 685,516 | 720,869 | 739,397 | 767,947 | 797,627 | 831,146 |
| BALANCE DE CAJA NETO | 4,116 | 5,185 | 6,307 | 7,484 | 8,720 | 10,015 | 11,373 | 12,797 | 14,288 | 15,851 | 17,485 | 19,202 | 20,996 | 22,873 | 22,175 |

Tabla 7.5.b. Balance de Caja Neto en miles de € para escenario 250 W (Parte II)

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|--|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Electricidad Producida | 0 | 351,313 | 365,365 | 379,980 | 395,179 | 410,986 | 427,425 | 444,522 | 462,303 | 480,795 | 500,027 | 520,028 | 540,829 | 562,463 | 584,961 |
| Energía ahorrada (respecto GURAK) | 0 | 217,814 | 226,526 | 235,587 | 245,011 | 254,811 | 265,004 | 275,604 | 286,628 | 298,093 | 310,017 | 322,418 | 335,314 | 348,727 | 362,676 |
| VENTAS | | 569,126 | 591,891 | 615,567 | 640,190 | 665,797 | 692,429 | 720,126 | 748,931 | 778,889 | 810,044 | 842,446 | 876,144 | 911,189 | 947,637 |
| Coste Salarial | 0 | 22,320 | 22,543 | 22,769 | 22,996 | 23,226 | 23,459 | 23,693 | 23,930 | 24,169 | 24,411 | 24,655 | 24,902 | 25,151 | 25,402 |
| Coste Energético | 0 | 526,969 | 548,048 | 569,969 | 592,768 | 616,479 | 641,138 | 666,784 | 693,455 | 721,193 | 750,041 | 780,042 | 811,244 | 843,694 | 877,442 |
| Servicio de Agua | 0 | 5,000 | 5,100 | 5,202 | 5,306 | 5,412 | 5,520 | 5,631 | 5,743 | 5,858 | 5,975 | 6,095 | 6,217 | 6,341 | 6,468 |
| Residuos Sólidos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Servicios Intermedios y Bienes | 0 | 0,100 | 0,102 | 0,104 | 0,106 | 0,108 | 0,110 | 0,113 | 0,115 | 0,117 | 0,120 | 0,122 | 0,124 | 0,127 | 0,129 |
| TOTAL COSTES OPERACIÓN | 0 | 554,389 | 575,793 | 598,044 | 621,177 | 645,226 | 670,227 | 696,220 | 723,243 | 751,338 | 780,547 | 810,915 | 842,487 | 875,313 | 909,441 |
| Estudio de viabilidad, coste de tendencias, etc. | 6,558 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Adquisición de terrenos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Edificación e Infraestructuras | 65,58 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Equipamiento | 106,558 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Costes Inversión Inicial | 178,696 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Costes de reemplazamiento | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17,870 | 0 | 0 |
| Coste de Descontaminación | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Valor Residual | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Otros elementos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17,870 | 0 | 0 |
| TOTAL COSTES INVERSIÓN | 178,696 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17,870 | 0 | 0 |
| TOTAL COSTES | 178,696 | 554,389 | 575,793 | 598,044 | 621,177 | 645,226 | 670,227 | 696,220 | 723,243 | 751,338 | 780,547 | 810,915 | 860,357 | 875,313 | 909,441 |
| BALANCE DE CAJA NETO | -178,696 | 14,737 | 16,099 | 17,523 | 19,013 | 20,572 | 22,202 | 23,906 | 25,688 | 27,551 | 29,497 | 31,531 | 15,787 | 35,877 | 38,196 |

Tabla 7.6.a. Balance de Caja Neto en miles de € para escenario 500 W (Parte I)

| | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
|--|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Electricidad Producida | 608,360 | 632,694 | 658,002 | 684,322 | 711,695 | 740,162 | 769,769 | 800,560 | 832,582 | 865,885 | 900,521 | 936,542 | 974,003 | 1012,968 | 1053,482 |
| Energía ahorrada (respecto GURAK) | 377,183 | 392,270 | 407,961 | 424,280 | 441,251 | 458,901 | 477,257 | 496,347 | 516,201 | 536,849 | 558,323 | 580,656 | 603,882 | 628,037 | 653,159 |
| VENTAS | 985,543 | 1024,964 | 1065,963 | 1108,601 | 1152,945 | 1199,063 | 1247,026 | 1296,907 | 1348,783 | 1402,734 | 1458,844 | 1517,197 | 1577,885 | 1641,001 | 1706,641 |
| Coste Salarial | 25,656 | 25,913 | 26,172 | 26,434 | 26,698 | 26,965 | 27,235 | 27,507 | 27,782 | 28,060 | 28,340 | 28,624 | 28,910 | 29,199 | 29,491 |
| Coste Energético | 912,539 | 949,041 | 987,003 | 1026,483 | 1067,542 | 1110,244 | 1154,653 | 1200,840 | 1248,873 | 1298,828 | 1350,781 | 1404,812 | 1461,005 | 1519,445 | 1580,223 |
| Servicio de Agua | 6,597 | 6,729 | 6,864 | 7,001 | 7,141 | 7,284 | 7,430 | 7,578 | 7,730 | 7,884 | 8,042 | 8,203 | 8,367 | 8,534 | 8,705 |
| Residuos Sólidos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Servicios Intermedios y Bienes | 0,132 | 0,135 | 0,137 | 0,140 | 0,143 | 0,146 | 0,149 | 0,152 | 0,155 | 0,158 | 0,161 | 0,164 | 0,167 | 0,171 | 0,174 |
| TOTAL COSTES OPERACIÓN | 944,925 | 981,818 | 1020,176 | 1060,058 | 1101,524 | 1144,638 | 1189,466 | 1236,076 | 1284,540 | 1334,930 | 1387,325 | 1441,803 | 1498,449 | 1557,349 | 1618,593 |
| Estudio de viabilidad, coste de tendencias, etc. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Adquisición de terrenos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Edificación e Infraestructuras | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Equipamiento | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Costes Inversión Inicial | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Costes de reemplazamiento | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17,870 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Coste de Descontaminación | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10,656 |
| Valor Residual | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -5,328 |
| Otros elementos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17,870 | 0 | 0 | 0 | 5,328 |
| TOTAL COSTES INVERSIÓN | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17,870 | 0 | 0 | 0 | 5,328 |
| TOTAL COSTES | 944,925 | 981,818 | 1020,176 | 1060,058 | 1101,524 | 1144,638 | 1189,466 | 1236,076 | 1284,540 | 1334,930 | 1405,194 | 1441,803 | 1498,449 | 1557,349 | 1623,921 |
| BALANCE DE CAJA NETO | 40,618 | 43,147 | 45,787 | 48,544 | 51,421 | 54,425 | 57,559 | 60,830 | 64,243 | 67,804 | 75,394 | 79,436 | 83,651 | 88,719 | 94,000 |

Tabla 7.6.b. Balance de Caja Neto en miles de € para escenario 500 W (Parte II)

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|--|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Electricidad Producida | 0 | 491,838 | 511,511 | 531,971 | 553,250 | 575,380 | 598,396 | 622,331 | 647,225 | 673,114 | 700,038 | 728,040 | 757,161 | 787,448 | 818,946 |
| Energía ahorrada (respecto GURAK) | 0 | 304,939 | 317,137 | 329,822 | 343,015 | 356,736 | 371,005 | 385,845 | 401,279 | 417,330 | 434,024 | 451,385 | 469,440 | 488,218 | 507,746 |
| VENTAS | | 796,777 | 828,648 | 861,794 | 896,265 | 932,116 | 969,401 | 1008,177 | 1048,504 | 1090,444 | 1134,062 | 1179,424 | 1226,601 | 1275,665 | 1326,692 |
| Coste Salarial | 0 | 22,320 | 22,543 | 22,769 | 22,996 | 23,226 | 23,459 | 23,693 | 23,930 | 24,169 | 24,411 | 24,655 | 24,902 | 25,151 | 25,402 |
| Coste Energético | 0 | 737,756 | 767,267 | 797,957 | 829,875 | 863,070 | 897,593 | 933,497 | 970,837 | 1009,670 | 1050,057 | 1092,059 | 1135,742 | 1181,172 | 1228,418 |
| Servicio de Agua | 0 | 5,000 | 5,100 | 5,202 | 5,306 | 5,412 | 5,520 | 5,631 | 5,743 | 5,858 | 5,975 | 6,095 | 6,217 | 6,341 | 6,468 |
| Residuos Sólidos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Servicios Intermedios y Bienes | 0 | 0,100 | 0,102 | 0,104 | 0,106 | 0,108 | 0,110 | 0,113 | 0,115 | 0,117 | 0,120 | 0,122 | 0,124 | 0,127 | 0,129 |
| TOTAL COSTES OPERACIÓN | 0 | 765,176 | 795,012 | 826,032 | 858,284 | 891,817 | 926,683 | 962,934 | 1000,625 | 1039,815 | 1080,563 | 1122,932 | 1166,985 | 1212,790 | 1260,418 |
| Estudio de viabilidad, coste de tendencias, etc. | 9,18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Adquisición de terrenos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Edificación e Infraestructuras | 91,8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Equipamiento | 149,18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Costes Inversión Inicial | 250,16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Costes de reemplazamiento | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 25,016 | 0 | 0 |
| Coste de Descontaminación | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Valor Residual | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Otros elementos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 25,016 | 0 | 0 |
| TOTAL COSTES INVERSIÓN | 250,16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 25,016 | 0 | 0 |
| TOTAL COSTES | 250,160 | 765,176 | 795,012 | 826,032 | 858,284 | 891,817 | 926,683 | 962,934 | 1000,625 | 1039,815 | 1080,563 | 1122,932 | 1192,001 | 1212,790 | 1260,418 |
| BALANCE DE CAJA NETO | -250,160 | 31,601 | 33,636 | 35,762 | 37,982 | 40,299 | 42,718 | 45,243 | 47,879 | 50,629 | 53,499 | 56,493 | 34,600 | 62,875 | 66,274 |

Tabla 7.7.a. Balance de Caja Neto en miles de € para escenario 700 W (Parte I)

| | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Electricidad Producida | 851,703 | 885,772 | 921,202 | 958,051 | 996,373 | 1036,227 | 1077,677 | 1120,784 | 1165,615 | 1212,240 | 1260,729 | 1311,158 | 1363,605 | 1418,149 | 1474,875 |
| Energía ahorrada (respecto GURAK) | 528,056 | 549,178 | 571,145 | 593,991 | 617,751 | 642,461 | 668,159 | 694,886 | 722,681 | 751,589 | 781,652 | 812,918 | 845,435 | 879,252 | 914,422 |
| VENTAS | 1379,760 | 1434,950 | 1492,348 | 1552,042 | 1614,123 | 1678,688 | 1745,836 | 1815,669 | 1888,296 | 1963,828 | 2042,381 | 2124,076 | 2209,039 | 2297,401 | 2389,297 |
| Coste Salarial | 25,656 | 25,913 | 26,172 | 26,434 | 26,698 | 26,965 | 27,235 | 27,507 | 27,782 | 28,060 | 28,340 | 28,624 | 28,910 | 29,199 | 29,491 |
| Coste Energético | 1277,555 | 1328,657 | 1381,804 | 1437,076 | 1494,559 | 1554,341 | 1616,515 | 1681,175 | 1748,422 | 1818,359 | 1891,094 | 1966,737 | 2045,407 | 2127,223 | 2212,312 |
| Servicio de Agua | 6,597 | 6,729 | 6,864 | 7,001 | 7,141 | 7,284 | 7,430 | 7,578 | 7,730 | 7,884 | 8,042 | 8,203 | 8,367 | 8,534 | 8,705 |
| Residuos Sólidos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Servicios Intermedios y Bienes | 0,132 | 0,135 | 0,137 | 0,140 | 0,143 | 0,146 | 0,149 | 0,152 | 0,155 | 0,158 | 0,161 | 0,164 | 0,167 | 0,171 | 0,174 |
| TOTAL COSTES OPERACIÓN | 1309,941 | 1361,434 | 1414,977 | 1470,651 | 1528,541 | 1588,736 | 1651,328 | 1716,412 | 1784,089 | 1854,461 | 1927,637 | 2003,728 | 2082,851 | 2165,128 | 2250,683 |
| Estudio de viabilidad, coste de tendencias, etc. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Adquisición de terrenos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Edificación e Infraestructuras | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Equipamiento | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Costes Inversión Inicial | 0 |
| Costes de reemplazamiento | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 25,016 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Coste de Descontaminación | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14,918 |
| Valor Residual | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -7,459 |
| Otros elementos | 0 | 25,016 | 0 | 0 | 0 | 7,459 |
| TOTAL COSTES INVERSIÓN | 0 | 25,016 | 0 | 0 | 0 | 7,459 |
| TOTAL COSTES | 1309,941 | 1361,434 | 1414,977 | 1470,651 | 1528,541 | 1588,736 | 1651,328 | 1716,412 | 1784,089 | 1854,461 | 1952,653 | 2003,728 | 2082,851 | 2165,128 | 2258,142 |
| BALANCE DE CAJA NETO | 69,819 | 73,516 | 77,371 | 81,391 | 85,583 | 89,953 | 94,508 | 99,257 | 104,207 | 109,367 | 89,728 | 120,348 | 126,188 | 132,274 | 131,156 |

Tabla 7.7.b. Balance de Caja Neto en miles de € para escenario 700 W (Parte II)

| | 10 Años | 15 Años | 30 Años |
|-----------------------|-------------|-----------|----------|
| Tasa de descuento (%) | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| FNPV (C) | -117,73 € | -119,73 € | -28,20 € |
| FRR (C) (%) | - | - | 1,772% |
| Razón de Financiación | 1,317708519 | | |

Tabla 7.8. Parámetros económicos para el escenario de 250 W.

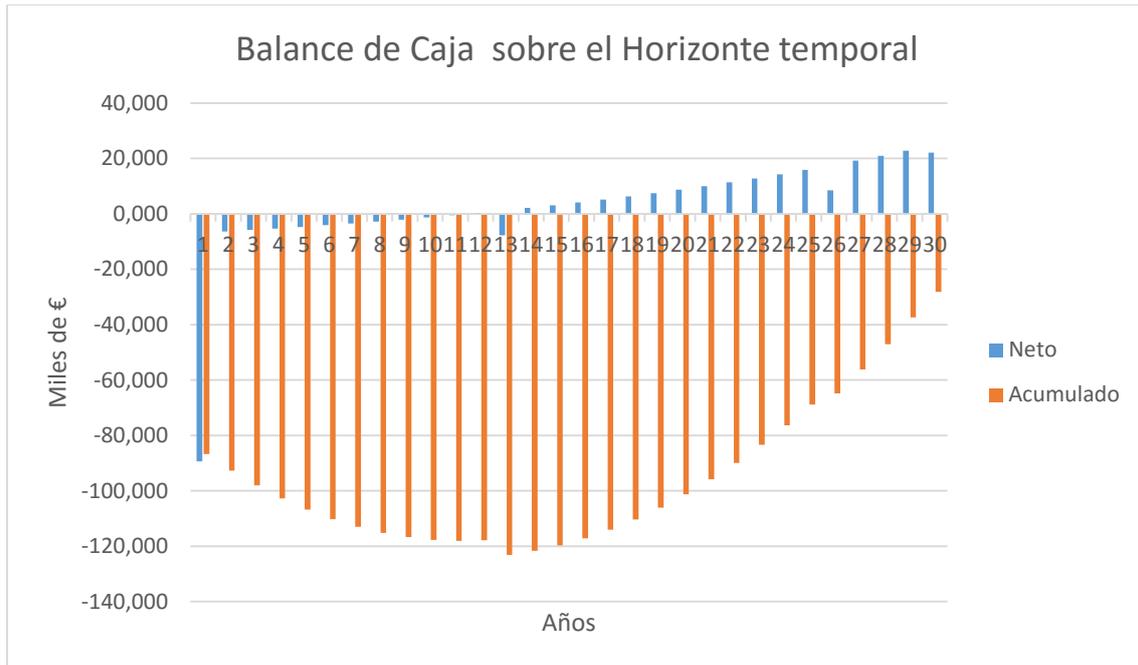


Figura 7.3. Balance de caja (acumulado y neto) para el escenario de 250 W.

| | 10 Años | 15 Años | 30 Años |
|-----------------------|-------------|---------|----------|
| Tasa de descuento (%) | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| FNPV (C) | -18,56 € | 83,85 € | 535,54 € |
| FRR (C) (%) | 1% | 8% | 14,095% |
| Razón de Financiación | 0,103849637 | | |

Tabla 7.9. Parámetros económicos para el escenario de 500 W.

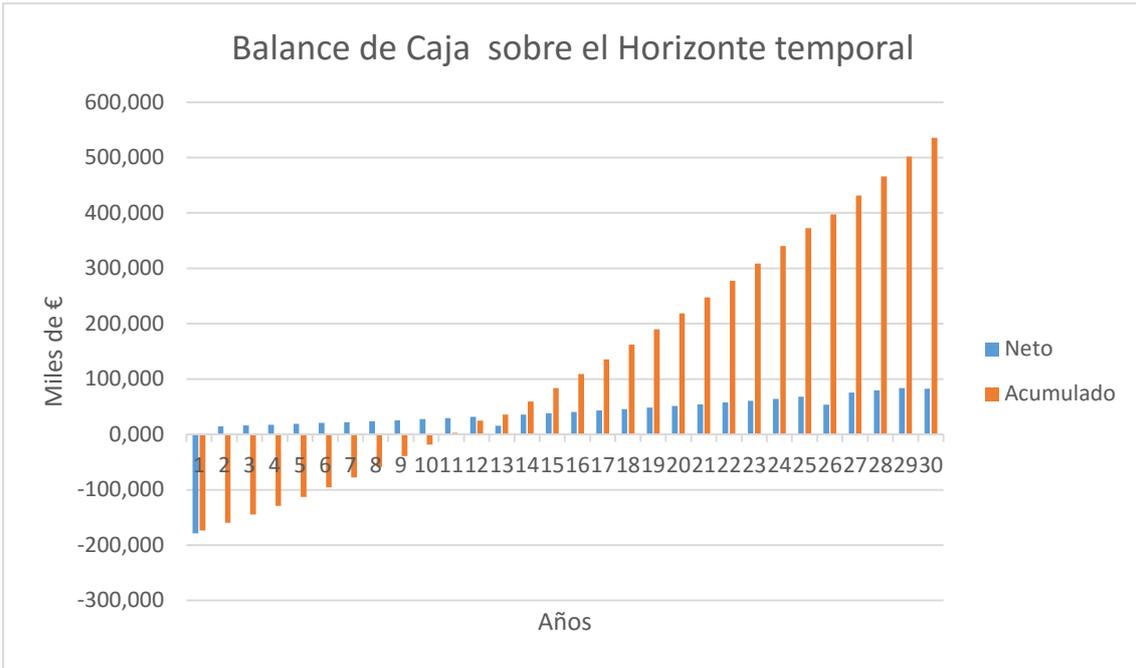


Figura 7.4. Balance de caja (acumulado y neto) para el escenario de 500 W.

| | 10 Años | 15 Años | 30 Años |
|-----------------------|--------------|----------|----------|
| Tasa de descuento (%) | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| FNPV (C) | 60,80 € | 246,74 € | 986,54 € |
| FRR (C) (%) | 8% | 14% | 17,738% |
| Razón de Financiación | -0,243037059 | | |

Tabla 7.10. Parámetros económicos para el escenario de 700 W.

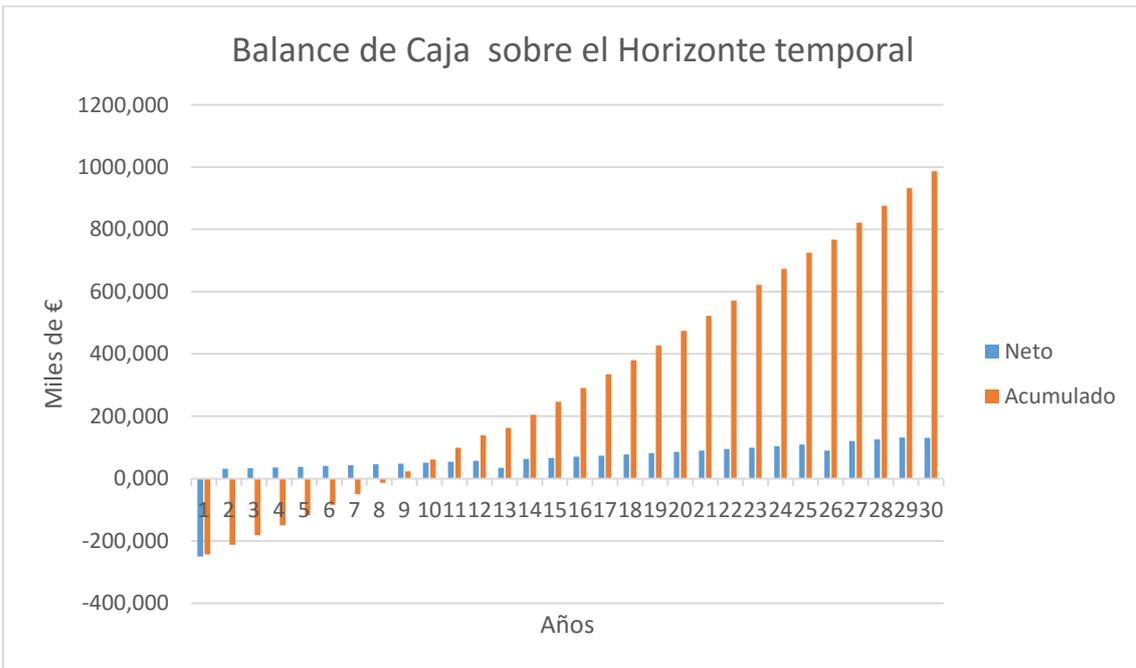


Figura 7.5. Balance de caja (acumulado y neto) para el escenario de 700 W.

8. Guía de uso y medidas de seguridad

A lo largo de este apartado comentaremos los procedimientos para la utilización de la planta piloto, así como las medidas de seguridad que se deben seguir para un correcto funcionamiento de la planta piloto.

8.1. Manual de procedimientos

En este apartado se especifican los procedimientos de 'Start-up' (puesta a punto) y de 'Shut-down' (apagado) así como diferentes normas de mantenimiento durante el funcionamiento del prototipo.

8.1.1. Procedimiento de 'Start-up'

Como el prototipo se compone de diferentes equipos integrados, cada uno de ellos tiene sus propias reglas de puesta a punto. Intentando aunarlas y ofrecer coherencia considerando los equipos como uno solo integrado, se exponen las siguientes instrucciones que se deben seguir cuidadosamente:

1. Comprobar que todas las conexiones son seguras antes de operar con el prototipo. El Sistema trabaja con fangos y materiales nocivos por lo que el lugar de instalación del mismo debe poseer los medios apropiados de seguridad (ducha de ojos, sistemas de ventilación, sumideros adecuados) para prevenir daños personales. Adicionalmente, los operadores deben vestir ropa adecuada y guantes y gafas de protección.
2. El subsistema del digester debe llevar a cabo su proceso de 'start-up' durante unos días, que consiste en ponerlo en funcionamiento hasta que en los tanques se obtenga fango con las características adecuadas. Mientras esto sucede, la salida del tanque de sedimentación debe estar desconectada de la entrada del subsistema de la MFC para prevenir daños y mal funcionamiento en el mismo. Dicha salida debe ser redirigida a un sumidero.
3. Una vez que comience el proceso de 'start-up', la bomba MP01 no debe ser apagada durante un largo periodo de tiempo. El fango que se encuentra dentro del tanque de digestión podría solidificarse y obstruir los orificios de entrada o salida y los tubos conectados a ellos.
4. El subsistema MFC debe seguir su propio proceso de 'start-up' durante unos días, que consiste en ser alimentado con acetato diluido en agua. Mientras esto sucede, los polos de la MFC (ánodos y cátodos) deben conectarse mediante una resistencia.
5. Una vez que comience el proceso de 'start-up', el conjunto de bombas P05x no deben ser apagadas durante un largo periodo de tiempo. El fango que se encuentra dentro de la MFC podría solidificarse y obstruir los orificios de entrada o salida y los tubos conectados a ellos.

8.1.2. Procedimiento de operación

El procedimiento de operación contiene algunas normas de mantenimiento que se deben llevar a cabo durante el periodo de funcionamiento del prototipo. El operador debe realizar las siguientes tareas con una frecuencia semanal:

1. Comprobar el nivel de solidificación del fango en el sifón y limpiarlo para prevenir atoramientos si es necesario.
2. Para limpiar el sifón, se debe conectar una manguera con agua a presión a una de las válvulas V25 o V07' (utilizando la otra como desagüe). Cerrar previamente las válvulas V04 y V07 (ver la figura 8.1). Incrementar la presión de agua lentamente hasta que el sifón se encuentre lleno de agua limpia (visible al ser de material transparente).
3. Comprobar que la válvula V12 del tanque de sedimentación no se encuentra obstruida. En caso afirmativo, vaciar por completo dicho tanque y limpiarlo con agua. No realizar esta tarea con la bomba P03, ya que podría atorarse o dañarse.

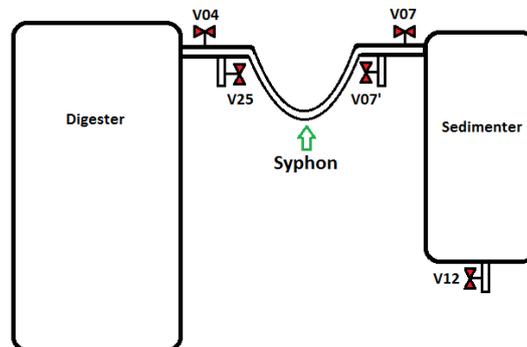


Figura 8.1. Esquema del sifón y válvulas.

8.1.3. Procedimiento de 'Shut-down'

Se puede diferenciar entre varios tipos de procesos de 'shut-down' de acuerdo con las necesidades del operador:

- *Procedimiento de 'Shut-down' A:* Si el operador termina un experimento pero desea continuar experimentando sin alterar el fango procesado (en cuanto a sus propiedades), entonces el procedimiento es simplemente una comprobación como la especificada en el apartado 8.1.2.
- *Procedimiento de 'Shut-down' B:* En el caso de que se desee cambiar las propiedades de los fangos, los pasos a seguir son los siguientes:
 1. Cerrar la interfaz de control y asegurarnos de que todas las bombas se encuentren desconectadas.
 2. Desconectar los potenciómetros de la MFC.
 3. Vaciar el tanque de sedimentación y limpiarlo.

4. Vaciar los tubos de la MFC de fango y rellenarlos con acetato.
- *Procedimiento de 'Shut-down' C:* Para dejar apagado el prototipo durante un periodo largo de tiempo. Los pasos a seguir son los siguientes:
 1. Cerrar la interfaz de control y asegurarnos de que todas las bombas se encuentren desconectadas.
 2. Apagar el PC de control.
 3. Desconectar el cuadro eléctrico.
 4. Desconectar los potenciómetros.
 5. Desconectar la entrada de lodos de la bomba P01.
 6. Vaciar todos los tanques, la MFC y los tubos de conexión y limpiarlos con agua.

8.2. Seguridad durante el uso del prototipo

Para un uso seguro y correcto del prototipo se deben seguir las siguientes instrucciones:

1. Cuando se opera en modo manual, no es recomendable mantener encendida la bomba P01 durante un periodo largo de tiempo. Debido a la presión generada por dicha bomba, el tubo de entrada al digester podría no trabajar de manera apropiada.
2. Cuando se opera en modo manual, no se recomienda incrementar el flujo de la bomba P04 a valores elevados ya que el lodo en el tanque de sedimentación podría descender excesivamente y causar que partículas sólidas atorasen los tubos del subsistema MFC o la misma bomba.
3. Cuando el prototipo se encuentre en funcionamiento, se debe tener cuidado al manejar los cables del cuadro eléctrico. Peligro de electrocución.
4. El Prototipo consta de equipos que trabajan con líquidos conductores (tanques, tubos, bombas, MFC, etc.) y otros equipos que necesitan corriente eléctrica (PC, cargas activas, bombas, etc.). Se debe tener cuidado de que se humedezcan equipos alimentados por electricidad, esto podría dañar dichos equipos.
5. Una vez que el software se esté ejecutando, las medidas de los sensores del prototipo deben ser revisadas para comprobar que están dentro de los rangos razonables de valores. Trabajar con el prototipo cuando el PC no recibe alguna o ninguna de las señales no es recomendable.
6. El tanque digester debe permanecer cerrado todo el tiempo de operación, no sólo para mantener las condiciones anaerobias sino también por las posibles emisiones de gases inflamables y olores desagradables.
7. Los polos de la MFC no deben ser cortocircuitados en ningún momento. Este hecho podría provocar daños en el equipo.

8.3. Guía de uso de la planta piloto para llevar a cabo un experimento.

Los pasos a seguir para realizar un experimento se describirán a continuación. Inicialmente el prototipo debe haber completado el procedimiento de 'start-up' (que viene definido en el apartado 8.1.1). Después de completar este proceso, el operador debería seguir las siguientes instrucciones:

1. Arrancar la interfaz principal en el PC de control conectado al prototipo.
2. Ajustar la duración del experimento y el tiempo de muestreo deseado. Es importante tener en cuenta que un tiempo de experimentación largo y un tiempo de muestreo corto implica una cantidad de datos muy elevada que podría colapsar la memoria del PC. Por esta razón se recomienda realizar experimentos cortos (inferiores a una semana) o combinaciones de experimentos largos con tiempos de muestreo elevados. Se debe tener en cuenta que el tiempo de experimentación sólo se puede incrementar durante el curso de un experimento y el tiempo de muestreo no se puede modificar. Para poder hacerlo se debe parar el experimento en curso y empezar otro experimento con los nuevos valores.
3. Establecer las conexiones de los puertos. Primero se debe seleccionar el panel de sincronización de puertos (figura 4.15). Después debemos asignar el puerto correspondiente a cada dispositivo (puerto PCI para la tarjeta NI y puertos series para las cargas activas, bomba P04 y sistema de control de temperatura). Cuando todos estén asignados, pulsamos el botón 'Connect'.
4. Una vez que los puertos han sido establecidos correctamente, el operador puede empezar el experimento pulsando el botón del panel 'start experiment' (ver figura 4.11).
5. En este punto, el experimento está en marcha. El operador debería asegurarse que las bombas MP01, P02 y P05x están activas y que los sensores están midiendo dentro del rango de valores razonable. En este punto, se debe seleccionar un modo de operación (el modo manual es iniciado por defecto). Si se elige el modo de operación de ciclos manuales, el operador debe asignar también valores de tiempos de ciclo y de tiempo activo de las bombas (ver figura 4.12).
6. Si el modo automático es seleccionado, el operador deberá introducir valores de los parámetros off-line para mejorar las decisiones del controlador. Para hacer esto, se debe seleccionar el panel de 'New Measurement' (ver figura 4.16). Después se debe marcar el punto del que procede dicha medida off-line, ya sea de antes del digestor, de después del tanque de sedimentación o del bloque MFC (ver figura 4.10). Marcamos los cuadrados de los parámetros off-line que se vayan a introducir en el panel 'New Measurement'. Por último, introducimos el valor para cada parámetro en el campo correspondiente (ver figura 4.16) y pulsamos el botón 'Create'.
7. Para ver los resultados, el operador puede usar el panel de visualización (ver figura 4.18) o el software remoto de visualización (ver figura 4.20) ejecutándolo en un PC remoto.
8. Para almacenar los datos del experimento, el operador puede utilizar el cuadro de guardado de datos en los paneles mencionados anteriormente.
9. Una vez expirado el tiempo de experimentación, el operador puede guardar los datos y cerrar el software o reiniciar otro experimento.

9. Conclusiones

Las conclusiones que se pueden extraer de este proyecto fin de máster son:

- Los diferentes software de control expuestos en este trabajo fin de máster, son útiles y se han probado experimentalmente, siendo su uso apto y eficiente para el control y la obtención de energía y reducción del consumo en el tratamiento de fangos generados en una planta depuradora.
- LabVIEW es un lenguaje de programación de alto nivel que ofrece buenos resultados en el ámbito de software para control de prototipos. Además implementa una gran variedad de formas de control, entre ellas la usada principalmente en este trabajo fin de máster: Fuzzy Logic Control.
- Utilizar las técnicas de control de lógica difusa (FLC) ofrece buenos resultados cuando tratamos con plantas de tipo no lineal con retardo variable. Además este tipo de controladores evitan problemas de desconocimiento de funciones matemáticas que modelan el sistema ofreciendo respuestas rápidas y precisas.
- Utilizar algoritmos MPPT en sistemas que poseen curvas características I-V tipo FC optimiza el resultado de la potencia proporcionada, ofreciendo la máxima posible.
- El software de control implementa diversas alarmas y límites de seguridad durante la ejecución de experimentos con los prototipos. Estos límites dependen de la señal de diferentes sensores (presión, nivel, temperatura, etc.). Además de estos límites de operación, se deben seguir la guía de experimentación y las normas de seguridad especificadas en este trabajo, operando con los prototipos.
- Aunque el resultado obtenido es prometedor, es necesario escalar el proyecto para maximizar los resultados y beneficios económicos.

10. Apéndice

10.1. Siglas

FC – Fuel Cell

MFC – Microbial Fuel Cell

MFC4Sludge - Microbial Fuel Cell for Sludge

HA-AD - Digestor Anaeróbico Acidogénico Hidrolítico

MPPT – Maximum Power Point Tracking

BES – Bio-electroquimic system

VI – Virtual Interface

EAM – Electroquimic Active Microorganism

10.2. Anglicismos

Microbial Fuel Cell – Celda de Combustible Microbiana

MFC for Sludge - Celda de Combustible Microbiana para Lodos

Power Tracking – Seguimiento de Potencia

Fuzzy Logic Control – Control de Lógica Difusa

Maximum Power Point Tracking – Seguimiento del punto de Máxima Potencia

Start-up – (Proceso de) arranque

Shut-down – (Proceso de) apagado

Biofilm – Bio-película

Membership function – Función de variable (de lógica difusa)

Fuzzification – Adaptación a lógica difusa

Fuzzy Rule Base – Regla Básica de lógica difusa

Defuzzification – Reconversión de lógica difusa

10.3. Referencias

1. Jairo Espinosa, Joos Vandewalle, Vincent Wertz. **Fuzzy Logic, Identification and PredictiveControl**. London: Springer, 2005.
2. Guanrong Chen, Trung Tat Pham. **Introduction to fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy control systems**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2001.
3. Cornelius T. Leondes. **Fuzzy Theory System: Techniques and Applications**. San Diego, CA: Academic Press, 1999.
4. Nicola Fermia, Giovanni Petrone, Giovanni Spagnuolo and Massimo Vitelli. **Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems**. CRC Press, 2012.
5. *Abhijeet P. Borole, Gemma Reguera, Bradley Ringeisen, Zhi-Wu Wang, Yujie Fengd and Byung Hong Kim. **Electroactive biofilms: Current status and future research needs**. Energy Environ. Sci., 2011.*
6. Ian Fairweather and Anne Brumfield. **LabVIEW: a developer's guide to real world integration**. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 2011.
7. *National Instrument. **LabView. User Manual**. April 2003 Edition.*
8. José Rafael Lajara Vizcaíno, José Pelegrí Sebastiá. **LabVIEW: entorno gráfico de programación**. Barcelona: Marcombo, cop. 2011.
9. *Attaway Stormy. **MATLAB: a practical introduction to programming and problema solving**. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2013.*
10. *Amos Giliat. **Matlab: una introducción con ejemplos**. Barcelona : Reverté, 2006*