

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN RESPIRÓMETRO

Francisco J. Carmona¹ Francisco J. Vázquez¹ Antonio Martín² Arturo Chica²

¹Área de Ingeniería de Sistemas y Automática

²Área de Ingeniería Química

Universidad de Córdoba

e-mail: fvazquez@uco.es

Resumen

En el presente trabajo se ha diseñado y construido un respirómetro, instrumento para la medida del consumo biológico de oxígeno por una población microbiana bajo unas determinadas condiciones. La medida de la concentración de oxígeno se realiza de manera directa en fase líquida, el aporte de oxígeno es discontinuo y está dotado de un interfaz que permite al usuario configurar una serie de parámetros para el cálculo automático de la VECO (Velocidad Específica de Consumo de Oxígeno) y el CAO (Consumo Acumulado de Oxígeno).

Palabras Clave: Respirometría; determinación respirométrica; tratamiento digital de la señal.

1 INTRODUCCIÓN

Las técnicas respirométricas están basadas en la medida e interpretación del consumo biológico de oxígeno, debido a la respiración aerobia, de una población microbiana bajo unas condiciones determinadas.

El consumo biológico de oxígeno está directamente relacionado con el crecimiento bacteriano y con el consumo de sustrato para la obtención de energía. En la figura 1 se puede ver una aproximación al comportamiento de los lodos activos, que se conoce como modelo de Muerte-Regeneración. Tal como se puede observar, sólo una parte del sustrato consumido se utiliza para obtener energía, el resto pasa a la formación de nueva biomasa. El parámetro Y_h (rendimiento biomasa / sustrato) representa el tanto por uno de sustrato que pasa a formar parte de la biomasa.

El consumo de oxígeno se considera asociado solamente al consumo de sustrato para obtener energía mediante una reacción de oxidación. La biomasa, durante su proceso de muerte, se divide en materia orgánica inerte (X_p) y materia orgánica lentamente biodegradable (X_s) que después de hidrolizarse puede ser utilizada para mantenimiento e

incluso para el crecimiento. Así se explica que, aún cuando todo el sustrato extracelular se ha consumido, siga existiendo un consumo de oxígeno (llamado **respiración endógena**). La cantidad de biomasa formada por la liberación de sustrato es mucho menor a la cantidad de biomasa perdida en forma inerte debido a la muerte. Por tanto, una población sin sustrato extracelular acabará por desaparecer [2].

X_h = Biomasa heterótrofa
 X_p = Materia orgánica inerte
 X_s = Materia orgánica lentamente biodegradable
 S_s = Sustrato rápidamente biodegradable
 Y_h = Rendimiento biomasa / sustrato
ATP = AdenosinTrifosfato (Molécula acumuladora de energía)

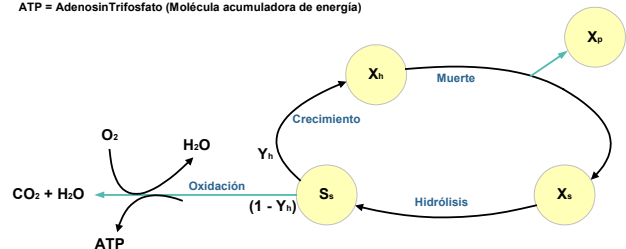


Figura 1. Modelo de Muerte-Regeneración

1.1 RESPIRÓMETROS: DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN

Un respirómetro es un instrumento que consiste en un pequeño reactor biológico que sirve para medir velocidades de respiración aerobia de una población microbiana en unas determinadas condiciones. El respirómetro determina la cantidad de oxígeno consumida por unidad de tiempo y de volumen.

Algunos autores consideran al respirómetro como un sensor, ya que consiste en una unidad física con una entrada de muestra externa y una salida de resultados (OUR u otros parámetros) obtenida después de un procedimiento interno. Por otra parte, y debido a su condición de reactor biológico, los resultados son extremadamente dependientes de las condiciones de trabajo y, por tanto, puede existir una variabilidad en la salida. Esta variabilidad cuestiona el hecho de que se considere sensor al respirómetro y obliga a que los resultados de las respirometrías se acompañen de las condiciones de operación [2] :

- Estado de la biomasa (concentración, pH, T, DQO, Edad, etc)
- Tipo de sustrato utilizado
- Temporalidad de la medida de oxígeno (puntual, continua)

La IWA (International Water Association) propuso una clasificación de los respirómetros en función de tres parámetros básicos designados por sendas letras y que se muestran en la figura 2:

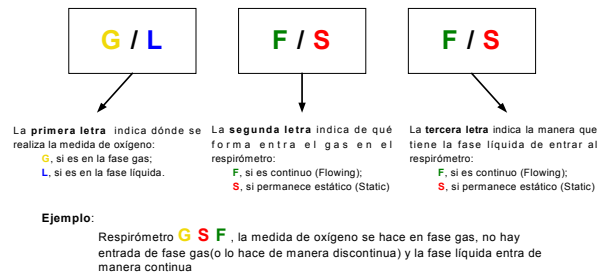


Figura 2. Código IWA para clasificación de los respirómetros

1.2 ANÁLISIS DE DISTINTOS TIPOS DE RESPIRÓMETROS

Tanto en bibliografía cómo en catálogos comerciales se han encontrado distintas configuraciones de respirómetros que han sido analizadas. Las más significativas se muestran a continuación:

- **Respirómetro continuo:** Continuo o discontinuo hace alusión al modo de aporte del gas. En un respirómetro continuo, cómo el que se muestra en la figura 3, el aire circula de manera continua en el recipiente donde se lleva a cabo la determinación. Se mide caudal y concentración de oxígeno en el aire a la entrada y a la salida de forma permanente, para así poder determinar por diferencia el consumo instantáneo de oxígeno. A partir de la curva de consumos instantáneos de oxígeno frente a tiempo se podrán obtener por derivación las velocidades instantáneas de consumo de oxígeno. Se trata claramente de un respirómetro GFS, donde la medida se realiza en fase gas, existe un flujo continuo de gas y el medio líquido permanece estático en el interior del reactor biológico donde se lleva a cabo la determinación respirométrica.

Existe una variante de este respirómetro en el que la muestra a analizar se encuentra en fase sólida. Se utiliza habitualmente para determinar la estabilidad del compost [1]. Aunque se siga tratando de un respirómetro GFS, ahora la fase líquida no aparece como tal para la determinación del balance de oxígeno. La

ecuación de balance de oxígeno se simplifica bastante y sólo se ha de tener en cuenta la ecuación del balance de oxígeno para la fase gas.

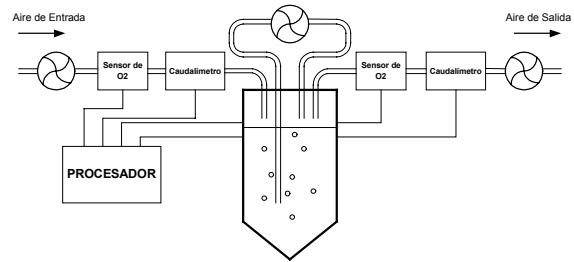


Figura 3. Esquema de un respirómetro con aporte continuo de aire

- **Respirómetro discontinuo (Batch):** El aporte de oxígeno depende de dos valores de consigna, un máximo y un mínimo de concentración de oxígeno dentro del recipiente donde se lleva a cabo la respirometría. Se inyecta aire hasta alcanzar el valor máximo de concentración de oxígeno establecido. Una vez alcanzado se deja de inyectar oxígeno y se espera a que los microorganismos lo consuman, hasta llegar, esta vez, a la consigna mínima y se volvería a airear. Se mide el tiempo que emplean los microorganismos en consumir el oxígeno, con lo que se obtiene la velocidad instantánea de consumo de oxígeno. Este proceso se repite cíclicamente [3]. En cada ciclo este respirómetro funciona como un GSS, si la medida de la concentración de oxígeno se hace en el gas, o un LSS, si la concentración de oxígeno se realiza en el medio líquido.
- **Respirómetro manométrico o de Warburg:** El oxígeno utilizado se mide con respecto al tiempo anotando la disminución de presión en el recipiente donde se está realizando la respirometría, que tiene volumen constante, es hermético y se ha de mantener a una temperatura constante. En el recipiente se introduce la muestra a analizar dejando una cámara de aire y, además, se ha de colocar un vaso con una solución de hidróxido potásico para que absorba el anhídrido carbónico producido (figura 4) de tal forma que la disminución de la presión sea una medida del oxígeno consumido [6]. Este es otro ejemplo de respirómetro GSS, en el que la medida de la concentración de oxígeno se realiza de manera indirecta y tanto la muestra líquida como el gas permanecen de manera estática en el interior del recipiente, sin que exista renovación alguna de ambos durante la determinación respirométrica.

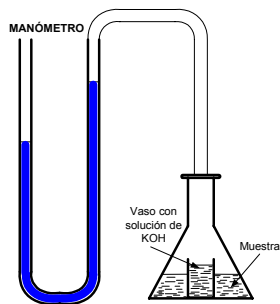


Figura 4. Esquema del respirómetro de Warburg

- **Respirómetro volumétrico:** De forma análoga al respirómetro de Warburg, el oxígeno consumido se mide en función de la disminución de volumen que se produzca en el recipiente adecuado que mantenga la presión y temperatura constantes. También se trata, al igual que el de Warburg, de un respirómetro GSS en que sólo cambia la tecnología empleada para medir la concentración de oxígeno.
- **Respirómetro electrolítico:** Está formado por el recipiente donde se lleva a cabo la respiración dotado en su interior de un “absorbedor de CO₂” (recipiente con sosa), una célula electrolítica y un manómetro, todos interconectados (figura 5). A medida que los microorganismos consumen el oxígeno para la oxidación de la materia orgánica, se produce una disminución de presión en el sistema, que es registrada por el manómetro. Éste, a su vez, a través de un sistema de control, activará la célula electrolítica en función de dicha disminución de presión, tratando así de mantener la presión constante. La cantidad de oxígeno liberado en la electrolisis es proporcional a la cantidad de energía eléctrica que ha sido necesaria suministrar. Registrando esta energía se puede inferir directamente el consumo de oxígeno [7]. En este caso no se puede decir que se esté ante un ejemplo claro de respirómetro GFS. Aunque aparentemente pueda parecer que el aporte de gas se realiza de manera continua, no es así exactamente ya que el gas se suministra a medida que se consume el oxígeno, de manera que se pueden producir discontinuidades en dicho aporte.

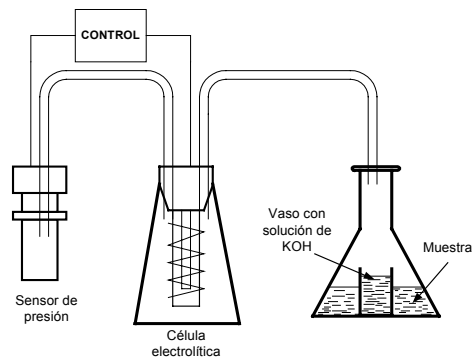


Figura 5. Esquema de un respirómetro electrolítico

Tras el análisis de estos respirómetros se observa que o bien resultan demasiado complejos y se necesita demasiada instrumentación (electrolítico o continuo), o bien, por su fundamento son muy complicados o imposible de automatizar (Warburg). Por este motivo se ha optado por el diseño que se propone en este trabajo.

1.3 IMPORTANCIA PRÁCTICA DE LA RESPIROMETRÍA

La respirometría tiene un extenso campo de aplicación en biotecnología. Seguidamente se enumeran algunas de las más frecuentes:

- Proceso de eliminación de materia orgánica en aguas residuales
- Determinación de la actividad de bacterias nitrificantes
- Medida de la actividad respiratoria del compost
- Determinación de tóxicos en aguas residuales

2 DISEÑO DEL RESPIRÓMETRO

2.1 FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

El respirómetro construido, según la clasificación IWA, es del tipo LSS: la medida de la concentración de oxígeno se realiza en fase líquida (L), a través de un sensor de oxígeno disuelto y no se produce alimentación ni de gas (S) ni de líquido (S) durante la medida. Dicho sensor es elemento principal del sistema, se trata de un sensor polarográfico que se basa en la medida de la reducción electroquímica del oxígeno en una celda amperimétrica produciendo peróxido. Consta de dos o tres electrodos en una solución electrolítica interna separada de la fase líquida mediante una membrana semipermeable. El oxígeno disuelto se difunde a través de la membrana desde la fase líquida hasta la solución interna y se reduce en el cátodo generando una corriente eléctrica que es proporcional a la velocidad de difusión y, por tanto, a la concentración de OD en la fase líquida.

Debido a los múltiples procesos fisicoquímicos implicados, sólo en algunos casos la dinámica del sensor es un parámetro despreciable [2]. Para los otros casos, se han realizado varios estudios para compensar esta dinámica que se acostumbra a ajustar a sistemas de primer y segundo orden [5].

En la figura 6 se muestra el diagrama de flujo del funcionamiento básico del respirómetro, atendiendo sobre todo a la parte física, sin tener en cuenta el procesamiento de los datos para el cálculo de los diferentes parámetros e índices respirométricos. Se trata de la presentación del funcionamiento básico de un respirómetro discontinuo o batch. Cómo se apuntó en un epígrafe anterior, el funcionamiento de un respirómetro discontinuo gira en torno a dos valores de consigna: concentración máxima de oxígeno disuelto y concentración mínima de oxígeno disuelto.

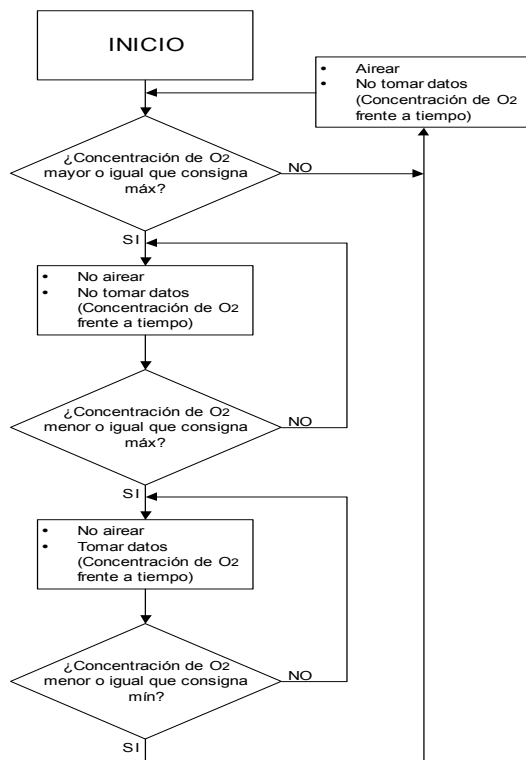


Figura 6. Diagrama de flujo básico del funcionamiento del respirómetro

Se parte de una concentración de oxígeno disuelto superior a la consigna máxima (en caso contrario se debe airear hasta llegar a esta situación). Se espera sin tomar datos a que este se vaya consumiendo y llegue a tal valor. A partir de aquí se toman datos hasta llegar al valor de consigna mínima donde se detiene esta toma de datos. En este punto se vuelve a airear hasta alcanzar la consigna máxima. Por inercia (difusión del oxígeno contenido en las burbujas de aire) la concentración de oxígeno, una vez detenida la aireación, superará el valor de concentración

máxima, llegándose de nuevo a la situación de inicio. Para evitar datos erróneos, provocados por dicha inercia, no se registran datos durante esta fase de inicio. Todo el proceso de determinación se llevará a cabo a una misma temperatura y a una misma velocidad de agitación.

Al final de cada ciclo (finalización de la toma de datos) se calcula el valor de la pendiente de la curva concentración de oxígeno-tiempo en la zona de consumo de oxígeno (zona de toma de datos) correspondiente a dicho ciclo, quedando registrada en un archivo de pendientes. Este valor es fundamental para el cálculo de todos los demás parámetros. Son la VECO y el CAO, los parámetros que este respirómetro calcula, muestra y almacena de manera automática, pero se pueden calcular muchos otros parámetros partiendo del archivo de pendientes utilizando hojas de cálculo o herramientas de análisis estadístico.

2.2 DESCRIPCIÓN DEL RESPIRÓMETRO

A simple vista, como se muestra en la figura 7, en el respirómetro se pueden distinguir tres partes claramente diferenciadas:

- **Respirómetro propiamente dicho (A):** es la parte física o planta, donde se llevan a cabo las reacciones biológicas.
- **Módulo de acondicionamiento de señales (B):** se encuentra entre la planta y el ordenador. Actúa a modo de transductor, adapta tanto las señales que se miden en la planta para que puedan ser introducidas en la tarjeta de adquisición de datos, como las señales de salida de la tarjeta de adquisición de datos de manera que puedan atacar a los actuadores de la planta.
- **PC (C):** en él se encuentra instalada una tarjeta de adquisición de datos a través de la cual se reciben y se envían señales a la planta. Es el cerebro del respirómetro, es el que hace que funcione de manera automática mediante la aplicación software que se encuentra en él instalada. También hace la función de interfaz hombre-máquina.



Figura 7. Vista general del respirómetro completo

En este epígrafe sólo se abordará la descripción del primer punto de los enunciados anteriormente. El PC y el acondicionamiento de señales se expondrán con más detalle en epígrafes posteriores en los que se tratarán los elementos de la automatización. Hay que decir también que muchos de los elementos que se describan serán dobles, ya que se construye un respirómetro que tendrá dos dispositivos de experimentación en paralelo para, por comparación, aumentar la fiabilidad de los análisis.

Se ha considerado respirómetro por tanto a todas aquellas partes necesarias para llevar a cabo una determinación respirométrica de forma manual, (figura 8) es decir partes que pudiesen hacer que el respirómetro funcionara bajo la atención de un operario en el caso de no existir la automatización.



Figura 8. Respirómetro sin automatización

2.2.1 Principales elementos del respirómetro

Los principales elementos de lo que se ha considerado planta son los siguientes:

- **Matraces de reacción:** Son los recipientes donde tienen lugar las reacciones biológicas. Se han utilizado dos matraces Kitasato (matraz de pared gruesa con una tubuladura lateral) de vidrio de 1L de capacidad. Para mantenerlos “herméticos”, en la boca, se les ha acoplado un tapón de goma al que se le han practicado orificios para la entrada de aire, para el electrodo de oxígeno y una salida para rebose en el transcurso de la aireación. La tubuladura lateral se ha empleado para conectarla a un ensanchamiento de vidrio (depósito auxiliar de rebose) que sirve como recirculación al reactor durante el rebose del mismo.
- **Depósito de rebose:** Para el sistema de rebose se han utilizado dos cámaras de expansión de vidrio, de diseño propio, de forma cilíndrica con un volumen aproximado de 0,50 L, con una entrada en la parte superior y una salida en la parte

inferior (con doble oliva). Además en la parte superior disponen de un pequeño orificio que se encuentra abierto a la atmósfera.

- **Baño:** Dado que la actividad microbiana depende de la temperatura, se dispone de un baño formado por un termostato de inmersión y un depósito para el baño construido en metacrilato de 8 mm de grosor con una capacidad de 35 L y las siguientes dimensiones en cm: 52x21x32.
- **Agitadores magnéticos:** Para homogeneizar la disolución y favorecer la transferencia de oxígeno en el medio se han utilizado dos agitadores magnéticos, uno para cada matraz de reacción.
- **Aireadores:** Para la inyección de aire en el interior de los matraces de reacción, estos disponen en su tapón de un canal de entrada que consta de una válvula anti-retorno y, conectados a su extremo, dos difusores de un material poroso (difusores tipo pecera), ya que para favorecer la disolución del oxígeno es necesario aumentar la superficie disponible para la transferencia lo que se consigue reduciendo el tamaño de la burbuja de aire. La fuente de aire podría ser una bomba soplante o un compresor. En el caso que nos ocupa se ha optado por utilizar la red de aire comprimido de los laboratorios y será controlada por el accionamiento de dos electroválvulas, que serán descritas cuando se trate la automatización.
- **Sensores:** La concentración de oxígeno disuelto se mide con un electrodo para medida de oxígeno disuelto en agua conectado a un oxímetro o transductor compatible, entendiéndose como tal un dispositivo que realiza las siguientes funciones: descifrar la señal que proviene de la sonda (transductor); procesar las señales ya adaptadas y traducidas para mostrarlas por display y proporcionar esta misma información en forma de señal estándar industrial; procesar todas las acciones de calibración, ajuste y corrección en función de las condiciones de presión y temperatura y/o otros factores. Se han colocado dos, uno para cada matraz de reacción.

3 AUTOMATIZACIÓN DEL RESPIRÓMETRO

El principal objetivo que se desea alcanzar con la automatización es coordinar las distintas acciones que tienen lugar en una determinación respirométrica completa, de manera que éstas se realicen periódicamente de manera secuencial sin la necesidad de la presencia de un operador. Con esto se garantizará que todos los experimentos se desarrollen de una misma manera, de modo que aumenta la

calidad de los experimentos y la veracidad de los datos obtenidos de manera que pueden ser comparados.

3.1 ELEMENTOS DE LA AUTOMATIZACIÓN

En la figura 9 se muestra un esquema general normalizado de la automatización completa:

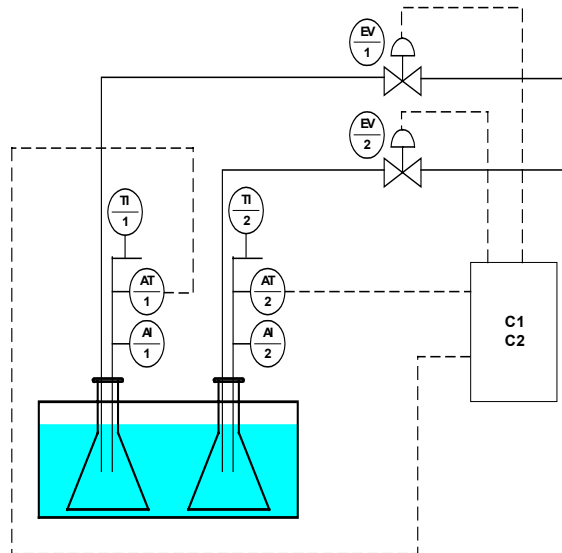


Figura 9. Esquema normalizado de la automatización

Los sistemas automatizados comprenden dos partes:

- **Parte Operativa:** cuyos accionadores actúan sobre el proceso automatizado.
- **Parte de Mando:** que coordina las acciones de la parte Operativa.

3.1.1 Parte Operativa

Es la parte que opera sobre la máquina y el producto, en este caso sobre el respirómetro propiamente dicho. La componen los actuadores: accionadores (motores, cilindros neumáticos, bombas, etc.) y preaccionadores (relés, contactores, convertidores, etc.).

La mayor parte de estos actuadores han sido descritos en el epígrafe referido a los elementos del respirómetro. Sólo queda, por tanto, por incluir en este apartado las electroválvulas asociadas al sistema de aireación y el módulo de acondicionamiento de señal.

3.1.1.1 Electroválvulas

Están colocadas en la toma de aire comprimido de la red y gobiernan la entrada de aire a los matraces de reacción.

3.1.1.2 Módulo de acondicionamiento de señales

Se trata de una caja de diseño propio donde se han integrado todos los dispositivos necesarios para el acondicionamiento de señales en ambas direcciones, esto es, desde la planta (sensores de oxígeno disuelto) hacia las entradas de la tarjeta de adquisición de datos, instalada en el PC, y desde las salidas de la tarjeta a los actuadores, en este caso las electroválvulas. Se ha intentado hacerlo de la manera más compacta y robusta posible de forma que se convirtiese en un equipo portátil. Para ello se le ha dotado en su parte posterior de una serie de puertos y clavijas para que se pueda conectar y desconectar de manera cómoda tanto a la tarjeta como a los demás elementos que necesita la automatización del respirómetro. Un aspecto general del módulo se muestra en la figura 10.



Figura 10. Aspecto general del módulo de acondicionamiento de señal

Este módulo de acondicionamiento es necesario debido a dos motivos: por un lado las salidas de la tarjeta de adquisición de datos son salidas todo-nada a 5 VCC de muy baja potencia por lo que no pueden atacar a ningún actuador directamente sino que lo harán, en este caso, a través de una tarjeta que convertirá esas salidas digitales (TTL) en salidas a relé; por el otro lado las entradas analógicas (en el caso de este trabajo son las únicas a utilizar) de la tarjeta de adquisición de datos son en tensión (0-5 ó 0-10 VCC, mientras que las señales que proporciona el sensor son en corriente).

Los principales elementos que quedan integrados en el interior de este módulo (figura 11) se enumeran a continuación:

- Base de conexiones
- Módulos de acondicionamiento de señal analógica
- Tarjeta de relés
- Fuentes de alimentación
- Oxímetros

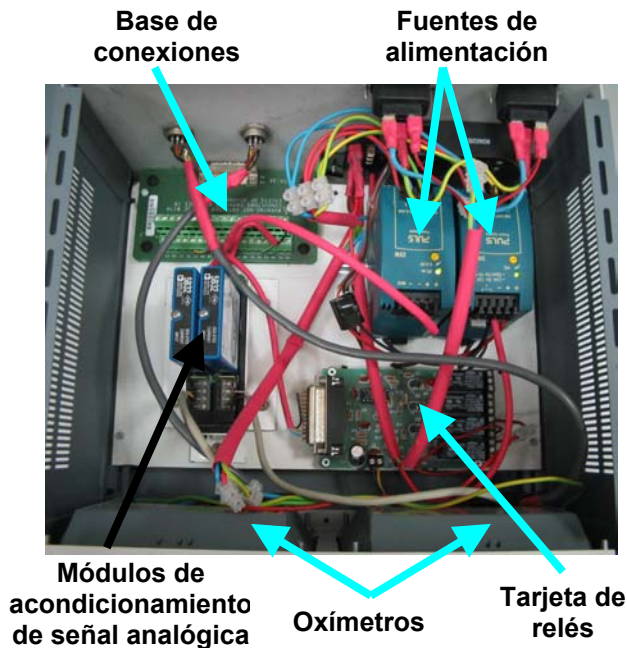


Figura 11. Vista superior de la situación de los componentes en el interior de la caja

3.1.2 Parte de Mando

Emite las órdenes hacia la parte Operativa y coordina sus acciones en función de una información acerca del sistema captada a través de los sensores.

En la parte de mando se han de distinguir dos aspectos:

- Parte lógica, que incluye el programa de la automatización en sí
- Parte física, que estará constituida por todo el hardware que soporta el software a través del cual se desarrolla y diseña el programa de la automatización.

Como en este epígrafe se habla de elementos, sólo se describirá aquí la parte física y la parte lógica se hará cuando se describa el programa.

La parte física la componen:

- **Tarjeta de adquisición de datos:** realiza la función de interfaz entre el PC y la planta.
- **PC:** en él están instalados la tarjeta de adquisición de datos y el programa ejecutable que se encarga del control del respirómetro así como del interfaz hombre-máquina. Es por tanto el cerebro de todo el sistema, el encargado de procesar la información que le llega de los sensores a través de la tarjeta de adquisición de datos y actuar (mandar señales) sobre el

respirómetro, a través de la misma, en función de dichos datos y de las consignas que el usuario ha introducido a través del interfaz hombre-máquina.

- **Sensores:** los únicos sensores que forman parte del respirómetro son los de medición de concentración de oxígeno disuelto. Proporcionan las señales de retorno de la concentración de oxígeno en los matraces de reacción.

3.2 DISEÑO Y DESARROLLO DEL PROGRAMA

Para el diseño y desarrollo de la aplicación software que se ha realizado, se ha utilizado la herramienta de programación LabView (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) de National Instrument, que a su vez ha condicionado la elección de un PC+Tarjeta de adquisición de datos para el control de la automatización en lugar de un autómeta.

La opción elegida permite desarrollar de forma sencilla en un mismo programa tanto la parte del control y el procesamiento de las señales, como el interfaz hombre-máquina, ya que LabView parte de un lenguaje de programación natural y unas características de programación gráfica que involucran todas las herramientas que se necesitan para la adquisición de datos, análisis y presentación.

El programa debe hacer principalmente que el respirómetro funcione correctamente según lo especificado en la descripción del funcionamiento del equipo y además calcular los parámetros VECO y CAO al final de cada ciclo de toma de datos, almacenarlos y mostrarlos.

Los datos a almacenar son los siguientes (figura 13):

- Concentración de oxígeno frente a tiempo, durante la fase de consumo de oxígeno de cada ciclo
- Pendiente de la curva concentración de oxígeno frente a tiempo, calculada al final de la fase de consumo de oxígeno de cada ciclo
- VECO frente a tiempo, calculada al final de la fase de consumo de oxígeno de cada ciclo
- CAO frente a tiempo, calculada al final de la fase de consumo de oxígeno de cada ciclo.

El siguiente diagrama de flujo (figura 8) completa el diagrama básico mostrado en la figura 6, añadiendo todas las acciones adicionales que realiza el programa:

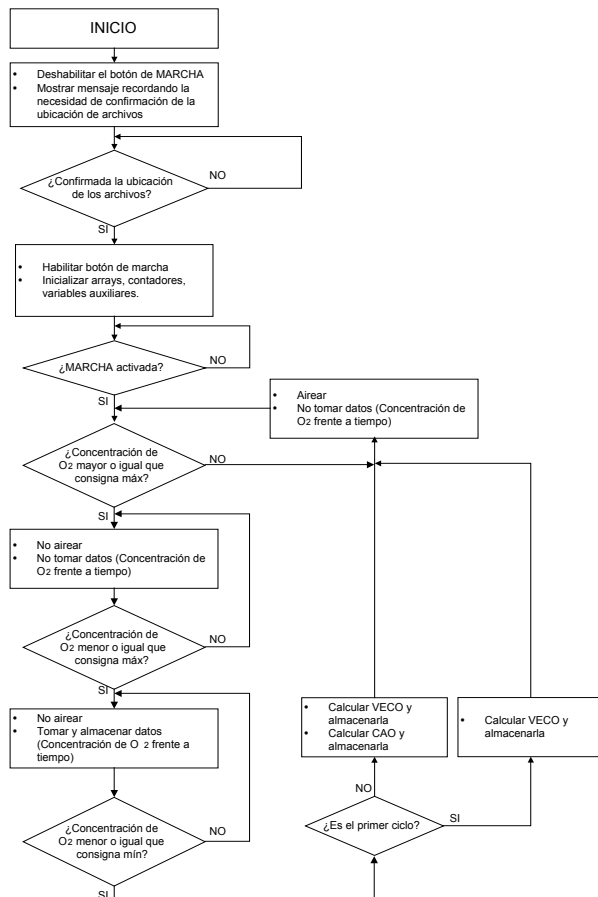
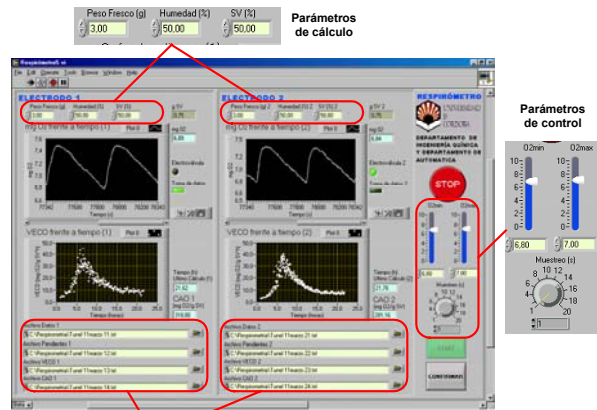


Figura 12. Diagrama de flujo del funcionamiento del programa

En todos los puntos del diagrama de flujo anterior pertenecientes al funcionamiento cíclico se debería preguntar si el botón de STOP ha sido activado, y en caso afirmativo desactivar todas las señales de salida y salirse del programa concluyéndose la determinación respirométrica. En el caso negativo continuar el funcionamiento normal.

Existen varios parámetros que el usuario ha de introducir en sus campos correspondientes antes de pulsar MARCHA:

- Parámetros de cálculo (figura 13):
 - ✓ Peso fresco de la muestra (gramos)
 - ✓ Humedad de la muestra (%)
 - ✓ Sólidos volátiles (%)
- Parámetros de cálculo (figura 13):
 - ✓ Periodo de muestreo (variable entre 1 y 20 segundos)
 - ✓ Concentración mínima de oxígeno, será el valor mínimo que activará el sistema de aireación y detendrá la toma de datos
 - ✓ Concentración máxima de oxígeno, valor que detendrá el sistema de aireación y activará la toma de datos



Rutas para la ubicación de los archivos de almacenamiento de los datos

Figura 13. Vista general de la pantalla del interfaz destacando algunos campos

En el respirómetro se llevan a cabo dos determinaciones respirométricas en paralelo, una en cada matraz de reacción, ambas controladas por el mismo programa pero de manera independiente. Por tanto el código desarrollado tendrá una parte común y otra parte realizada por duplicado, en la que no existe interacción entre las dos copias. Hasta ahora todo lo expuesto acerca del programa desarrollado se ha hecho como si se tuviese un solo proceso de determinación, ya que el otro es idéntico. De aquí en adelante se continuará con la explicación tomándose este mismo supuesto, pero en este momento se aclarará cual es la parte común y cual la duplicada e independiente. La parte común se corresponde con: la espera de la confirmación de que los archivos seleccionados son los correctos; una vez confirmados, la espera de la activación del botón de marcha; y el paro y salida del programa por el botón de STOP. También son comunes los parámetros de control (consigna máxima, consigna mínima, tiempo o periodo de muestreo). Por consiguiente la parte independiente y duplicada es el funcionamiento cíclico o normal durante el proceso de la respirometría. Se generarán por tanto ocho archivos de datos, cuatro por cada matraz de reacción.

Una vez pulsado el botón de MARCHA, comenzará el funcionamiento normal y se mostrará de forma continua la concentración de oxígeno disuelto gráfica y numéricamente a intervalos marcados por el periodo de muestreo seleccionado. La VECO también será mostrada de manera gráfica, pero la actualización de su valor, al igual que el CAO, mostrado sólo numéricamente, se hará al final de la toma de datos de cada ciclo, este instante de tiempo también se muestra en su campo correspondiente (figura 14).

Dos indicadores mostrarán el estado de la aireación y de la toma de datos (figura 14), pudiéndose conocer

por tanto en qué fase del ciclo se está (aireación, zona de inercia o consumo de oxígeno y toma de datos).

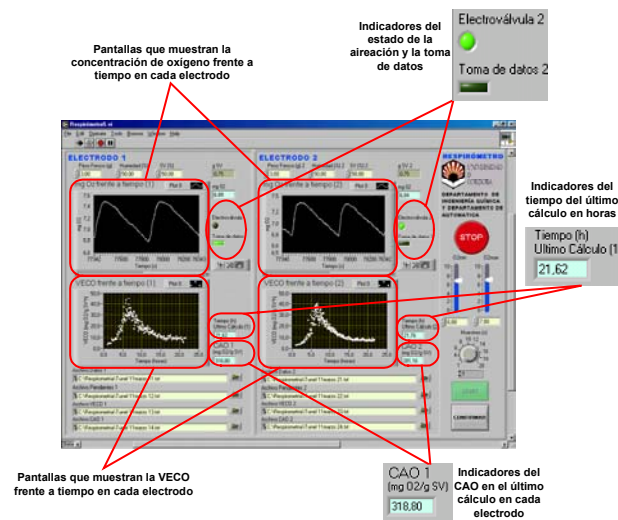


Figura 14. Vista general de la pantalla del interfaz destacando algunos campos

3 APLICACIONES PRÁCTICAS DEL RESPIRÓMETRO CONSTRUIDO

Durante los seis meses que el respirómetro lleva funcionando, se han realizado de manera satisfactoria numerosas determinaciones en los distintos campos de aplicación que a lo largo de este documento se han descrito. De entre todas estas aplicaciones se expondrá a continuación seguimiento de la estabilidad en un proceso de compostaje.

3.1 SEGUIMIENTO DE LA ESTABILIDAD EN UN PROCESO DE COMPOSTAJE

Las gráficas de Velocidad de Consumo de Oxígeno que genera este respirómetro son muy similares a las que encontramos en bibliografía [4] y con valores similares a los publicados entre la comunidad científica para cada uno de los sustratos para los que se utiliza. La forma de la curva se repite para todas las pruebas. En las primeras dos o tres horas existe una adaptación de la comunidad microbiana al medio, una vez que ocurre esto se exalta la actividad microbiana lo que provoca los mayores consumos de oxígeno hasta que se llega al máximo de consumo a un tiempo dado (VECO max). Pasado este momento, el alimento de las bacterias heterótrofas (que utilizan como fuente de energía el carbono) empieza a escasear y es entonces cuando la velocidad de consumo de oxígeno decae hasta valores basales del metabolismo endógeno que se trata de la tasa de respiración en la que la biomasa lleva a cabo la

oxidación sustrato intracelular en ausencia de sustrato extracelular (Ver Figura 15).

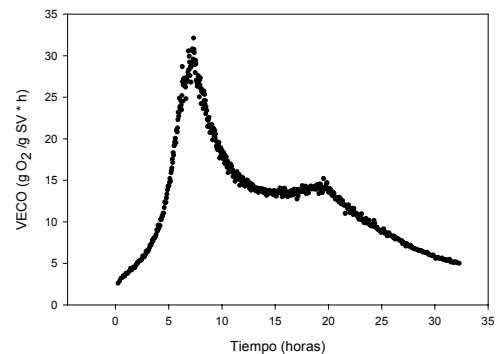


Figura 15. Evolución de la VECO en un compost de RSU con una semana de fermentación. Planta de compostaje de SADECO (Córdoba)

A continuación se muestra una gráfica (figura 16) generada por el mismo tipo de residuo (Compost) pero esta vez fermentado durante diez semanas lo que hace que la VECO máxima sea considerablemente menor. Respecto a la forma de la curva se observa que es análoga a la anterior y responde a los ciclos de multiplicación y lisis celular de la biomasa por agotamiento del sustrato. Conforme avanza el tiempo de compostaje la biomasa va degradando la materia orgánica y mineralizando los nutrientes que contiene de ahí que la contaminación orgánica disminuya en este sentido.

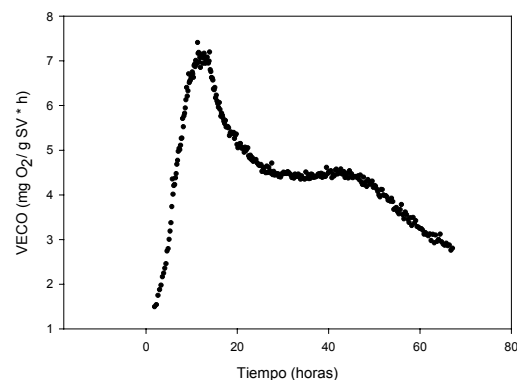


Figura 16. Evolución de la VECO en un compost de RSU con diez semanas de fermentación. Planta de compostaje de SADECO (Córdoba)

Si se representa la VECO max con respecto al tiempo de compostaje tendremos una curva ajustada con la siguiente forma (figura 17):

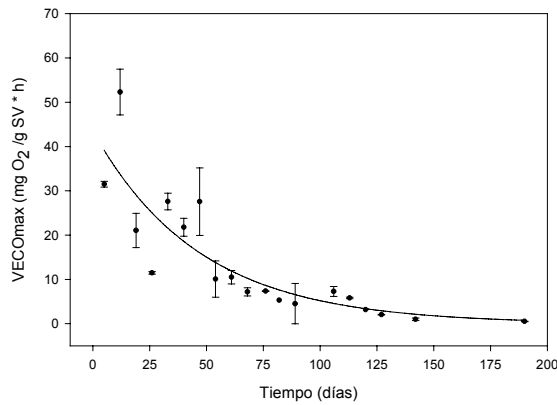


Figura 17. Evolución de la VECO máxima frente al tiempo de compostaje

En la figura 17 se han representado las VECO máximas, con sus desviaciones estándar, obtenidas en cada una de las determinaciones, frente al tiempo de compostaje. Efectivamente se observa como se produce una disminución creciente en la VECOmax a medida que transcurre el tiempo de compostaje; por otra parte esta disminución es muy acentuada ya que se pasan de valores iniciales de 50 mg O₂/g SV·h a otros casi nulos a partir de los 120 días de compostaje. Este resultado es alentador para el propósito de encontrar una magnitud que sirva para medir la evolución del proceso de compostaje.

Dicho parámetro puede tener distintas utilidades:

- A través de la VECO_{max}, seguir la estabilización durante el compostaje y decidir el mejor momento para dar por finalizado el proceso.
- Establecido el método de compostaje y para un mismo residuo, previamente analizada su curva VECO_{max} vs Tiempo, tomar una muestra desconocida y con el resultado de la VECO_{max} estimar su tiempo de compostaje.
- Comparar dos formas de trabajar distintas sobre un residuo para elegir aquella más eficiente.

De igual manera que se ha estudiado la evolución de la VECO máxima con respecto al tiempo de compostaje, puede utilizarse como índice de estabilidad otro parámetro que determina este respirómetro, el Consumo Acumulado de Oxígeno a las 20 horas (figura 18).

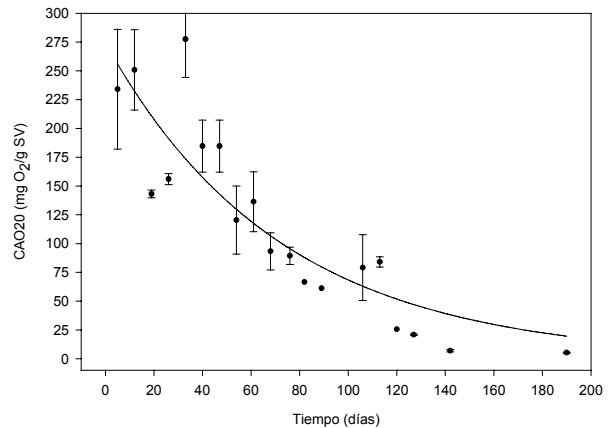


Figura 18. Evolución del CAO₂₀ frente al tiempo de compostaje

Se elige este tiempo porque hasta las 20 horas las curvas tienen comportamientos similares y por tanto los resultados de la integral a este tiempo son comparables.

4 CONCLUSIONES

Como resumen final se pueden destacar las siguientes conclusiones:

- Se ha diseñado, construido y puesto en funcionamiento un respirómetro muy versátil que permite alcanzar, con una menor inversión en instrumentación, las mismas prestaciones de otros más complejos.
- El equipo construido integra en un único módulo diversos dispositivos de acondicionamiento, transformación y visualización de señales, que lo hace cómodo, robusto, portátil, y fácil de instalar.
- El sistema de control se ha realizado mediante LabView lo que ha permitido, mediante una única aplicación informática, por un lado automatizar el equipo y por otro obtener un entorno de usuario amigable.
- Con el equipo construido se han realizado tres tipos de determinaciones:
 - a) Seguimiento de un proceso de compostaje
 - b) Comprobación de la eficacia en la eliminación de carbono de una planta de tratamiento de aguas residuales
 - c) Medida de la actividad de bacterias nitrificantes

Los resultados experimentales obtenidos confirman la aplicabilidad del equipo ya que permiten conseguir de forma inequívoca los tres objetivos ensayados; por otra parte los

respirogramas registrados muestran la misma forma de los descritos en bibliografía.

Agradecimientos

Se agradece al Ministerio de Ciencia y Tecnología, Dirección General de Investigación (Proyectos: 1FD 1997-1037 y REN 2002-02602) la financiación que ha permitido construir el equipo que se describe en este documento.

Referencias

- [1] Adani F., Genevini P.L. and Lozzi P., 2001 "Determination of Biological Stability by Oxygen Uptake on Municipal Solid Waste and Derived Products". *Compost Science and Utilization*. Vol 9,nº2,163-178.
- [2] Baeza J.A., Gabriel D.,La-Fuente F.J. 2002 "In-line fast OUR measurement for monitoring and control of WWTP". *Water Science and Technology* 45(4-5) 19-28.
- [3] Lasaridi K.E. and Stentiford E.I., 1998 "A simple respirometric technique for assessing compost stability". *Water Research*. Vol 32, nº12, 3717-3723.
- [4] Lasaridi KE, Stentiford EI, Evans T., 2000 "Windrow composting of wastewater biosolids: process performance and product stability assessment". *Water Science & Technology* Vol 42 No 9 pp 217-226.
- [5] Lindberg C.F., Carlsson B., 1996 "Estimation of the respiration rate and oxygen transfer utilizing a slow DO sensor". *Water Science and Technology* 33(1) 325-333.
- [6] Ramalho R. S., "Tratamiento de Aguas Residuales" Editorial Reverté S.A. Barcelona (España) 1991.
- [7] Reuschenbach P., Pagga U., 2002 "A critical comparison of respirometric biodegradation tests based on OECD 301 and related test methods". *Water Research*, Volume 37, Issue 7, April 2003, Pages 1571-1582.