

## **SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA LA MEDICIÓN DE TIEMPO DE RESIDENCIA EN EL LAZO DE REGENERACIÓN DE UN PROTOTIPO DE REACTOR DE CIRCULACIÓN**

José Arévalo, José Rojas, Carlos Indriago, Yris González, Juan Rodríguez  
Centro de Investigación de Procesos. Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”.  
Barquisimeto, Venezuela.  
[josegregorio3980@gmail.com](mailto:josegregorio3980@gmail.com)

**RESUMEN:** La medición del tiempo de residencia en sistemas de contacto gas – sólido presenta dificultades asociadas con la propia complejidad del flujo gas – sólido. Los datos de tiempo de residencia en este tipo de sistemas, en particular de corto tiempo de contacto, como los de lecho fluidizado circulante, pueden proporcionar información importante para diseñadores y operadores. Se estudiaron y evaluaron diversos métodos de medición de tiempo de residencia, teniendo en cuenta criterios tales como: velocidad de respuesta, perturbaciones en el flujo por el método de inyección o detección del trazador seleccionado, entre otros, a fin de seleccionar el más adecuado para efectuar las mediciones en un prototipo de reactor de circulación de corta escala de tiempo. El método seleccionado fue el de trazador fosforescente, y para su detección se construyó un sistema de detección empleando sensores TEMT6000 y se empleó código de alto y bajo nivel para procesar la señal proveniente de los sensores y mostrarla gráficamente en un computador personal.

---

**Palabras clave:** *tiempo de residencia, sistema gas – sólido, trazador fosforescente.*

## **DATA ACQUISITION SYSTEM FOR MEASURING RESIDENCE TIME IN THE REGENERATION LOOP OF A CIRCULATION REACTOR PROTOTYPE**

**ABSTRACT:** Measurement of residence time in gas-solid contact systems presents difficulties that are associated to the inherent complexity of the gas –solid flow. Data for residence time in these systems, namely short-contact time systems, such as fluidized circulating bed, could provide useful information for designers and operators. Several measurement methods were studied and evaluated, considering criteria such as: response speed, flow disturbances caused by tracer- injection or tracer-detection methods, etc.; in order to select the most appropriate one for measuring residence time in a short-time scale circulation-reactor prototype. The selected method was the phosphorescent-tracer method and for tracer detection, a detection system was built using TEMT6000 sensor and high and low level software for signal processing and display on a personal computer.

---

**Keywords:** *residence time, gas – solid system, phosphorescent tracer.*

## 1. INTRODUCCIÓN

El tiempo de residencia se define como el tiempo necesario para tratar una alimentación equivalente a un volumen de reactor. En los sistemas de corta escala de tiempo, como los de lecho fluidizado circulante, el tiempo de residencia y la distribución de tiempos de residencia caracterizan el grado de mezclado y proporcionan información acerca del flujo de partículas en el reactor. La propia complejidad de la fluidodinámica los procesos catalíticos fluidizados requieren de un buen control de mezclado de sólidos y tiempos de residencia para garantizar la obtención los productos deseados y la fiabilidad de los datos que se recolecten, pues estos son de gran utilidad para la comprensión de la fluidodinámica y un factor vital para el diseño, escalamiento, operaciones de planta y optimización de reactores.

Existen diversas técnicas para los experimentos de tiempo de residencia para partículas en reactores fluidizados, entre ellos se encuentran varios experimentos estímulo – respuesta: trazadores radiactivos, coloreados, ferromagnéticos, químicos, con temperatura o tamaño diferente; y estudios donde se hace seguimiento continuo a una sola partícula [1]. Cualquier método que sea capaz de diferenciar la muestra de las partículas del trazador por medio de una característica que no altere el comportamiento total del flujo es potencialmente adecuado. Las técnicas experimentales se clasifican de acuerdo sean o no perturbadoras de las condiciones de flujo del sistema estudiado, luego según si contaminan permanentemente el inventario de sólidos. Para cualquier programa experimental, se prefiere emplear la segunda opción de los métodos (i. e. no perturbador y no contaminante) ya que esto minimiza las desviaciones experimentales y los costos implicados en el reemplazo del inventario de sólidos.

Además de los pro y contra de los diferentes métodos, también es importante considerar el factor costo, ya que, a pesar de que una de las alternativas pueda considerarse técnicamente adecuada, es posible que no resulte económicamente viable para un determinado sistema en estudio.

Como resultado del estudio de los diferentes métodos de medición de tiempo de residencia que pueden ser aplicados a una corriente gas-sólido a altas velocidades de flujo se presenta este trabajo, cuyo objetivo principal ha sido proponer una alternativa basada en los métodos existentes, seleccionando el más adecuado al prototipo de reactor de lecho transportado del Laboratorio de Fluidodinámica del Departamento de Ingeniería Química de la UNEXPO, Vicerrectorado Barquisimeto. Mediante el esfuerzo conjunto de investigadores de los Departamentos de Ingeniería Química y Electrónica se construyó un dispositivo que permite medir con exactitud y precisión el tiempo de residencia de una corriente gas-sólido en una sección del prototipo antes mencionado.

## 2. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE MEDICIÓN DE TIEMPO DE RESIDENCIA Y RTD

Para la selección del método de medición de tiempo de residencia y RTD se realizaron las siguientes etapas:

- Revisión bibliográfica acerca de métodos de medición de tiempo de residencia.
- Estudio de cada uno de los métodos de medición. En esta etapa se requirió la colaboración de expertos en el área de electrónica para la comprensión de los equipos y procedimientos concernientes a esta área en algunos métodos en estudio.
- Selección del método más adecuado para obtener de manera precisa, o lo más aproximadamente posible el tiempo de pertenencia de los reactivos en el proceso ultrarrápido de acuerdo con los siguiente criterios:
  1. Método no perturbador de flujo.
  2. Rápida velocidad de respuesta, adecuada a procesos de corta escala de tiempo.
  3. Método no contaminante del lecho de sólidos.
  4. Posibilidad de detección en línea, es decir, que la detección ocurra al instante y sin necesidad de extraer materiales del sistema.
  5. Costo razonable de equipos y facilidad de instalación.
- Plantear la aplicación del método de medición para trabajos futuros.

A continuación se presenta un sumario de los métodos de partículas trazadoras para estudios de fluidización [2].

De estos métodos, cuatro de ellos se consideran aplicables en el prototipo de reactor de lecho transportado objeto de estudio según los criterios considerados (i. e. no perturbador de flujo, no contaminante del lecho, rápida velocidad de respuesta, detección en línea, costo de equipos, entre otros), dichos métodos son: medición con trazadores ferromagnéticos, con trazadores fosforescentes, con trazadores radioisotópicos y la anemometría láser.

TABLA 1. Comparación entre Métodos de Partículas Trazadoras.

Adaptado de Huang et al. [2]

Método	Autores	Sistema	Observaciones
<b>Lecho Químicamente Diferente</b>	Bader et al. (1986)	Riser CFB	Respuesta lenta, baja precisión
<b>Trazador Magnético</b>	Avidan y Yerushalmi (1985)	Lecho Fluidizado de Tope Expandido	Respuesta lenta, baja precisión
<b>Trazador Radiactivo</b>	Patience et al. (1990) Ambler et al. (1990)	Riser CFB Riser CFB	Contaminación del material del lecho por el trazador, riesgos para la salud
<b>Trazador Fosforescente</b>	Harris et al. (2003) Brewster y Seader (1980) Wei y Zhu (1996)	Riser CFB	Respuesta rápida, detección en línea sin contaminación radiactiva
<b>Métodos Ópticos (Anemometría Láser)</b>	Mathiesen et al. (2000)	Riser CFB	Respuesta rápida, detección en línea sin contaminación radiactiva

Los métodos con trazadores ferromagnéticos se encuentran entre los más sencillos en su aplicación, resulta relativamente simple incorporar los equipos de medición necesarios en el lazo de circulación, sin embargo, se ha encontrado [3] que aunque las sondas de detección no ejercen fuerza apreciable sobre las partículas, la detección es más sensible cerca de la pared del reactor y disminuye hacia el centro del mismo, además del alto valor del límite inferior de detección para el trazador introduce incertidumbre en la medición de la RTD, reduciendo la resolución efectiva del método [1], además, la detección con trazadores ferromagnéticos tiene un tiempo de respuesta que no resulta adecuado para sistemas de alta velocidad de circulación. Así pues, el uso de los sensores de proximidad como técnica para medir tiempo de residencia resultó inadecuada para el sistema objeto de estudio.

Las mediciones con trazadores fosforescentes proporcionan tiempos de respuesta rápida, adecuada a sistemas de alta velocidad de circulación, el sólido fosforescente puede emplearse como material de lecho o como trazador en la corriente de sólido según sea el caso, en este último, el inventario de sólidos resulta contaminado por el trazador, aunque el problema de la contaminación puede que no llame la

atención con tanta fuerza como lo haría un radioisótopo. Por otra parte, la incorporación de ventanas de observación en los lazos de circulación restringe en cierta medida el rango de presiones de aplicación de este método, sin embargo, su relativa sencillez y economía resaltan las bondades del método.

Las mediciones con trazadores radioisotópicos son las que proporcionan mejor tiempo de respuesta en sistemas de fluidización de partículas de alta velocidad, como ya se ha mencionado, ya que proporcionan una mejor comprensión de la distribución de tiempos de residencia en lechos fluidizados circulantes, además que pueden "capturar" características claves de la RTD. En virtud de lo expuesto al principio sin embargo, al seleccionar un método, se prefiere evitar la contaminación del lecho y la interferencia con los patrones de flujo. Es lo primero en donde el trazador radioisotópico empleado al tamaño del lecho objeto de investigación puede emplearse con atención a este punto, pero cuando se combina el trazador radioisotópico con material del lecho, la contaminación se hace presente, además de los graves riesgos que se presentan al manipular isótopos radiactivos. Sin embargo, con las precauciones adecuadas, es posible obtener resultados fiables de RTD en las condiciones fluidodinámicas más parecidas al flujo gas – sólido en estudio.

Finalmente, la anemometría láser se encuentra entre las técnicas de mayor desarrollo y aplicación en el campo de la fluidodinámica en el pasado reciente, incorpora tiempos de respuesta rápidos en diversas condiciones de flujo; como método óptico, guarda cierta similitud con los trazadores fluorescentes y fosforescentes, ya que en el caso del flujo gas – sólido es necesario un trazador que sea capaz de reflejar la radiación láser, además que el sitio de medición debe ser transparente a la radiación emitida. Su principal ventaja es que no interfiere con los patrones de flujo, proporcionando valores de RTD de gran fiabilidad. Por otra parte, los equipos empleados son comparativamente costosos y requieren un montaje más laborioso que los otros métodos estudiados. En la Tabla 2 a continuación se muestran los equipos principales de cada método estudiado, y el costo aproximado de cada uno de ellos.

**TABLA 2.** Costo de los equipos principales para Medición de Tiempo de Residencia. Los costos de los equipos principales se muestran en Dólares EE.UU. al 23/09/2007 [4]

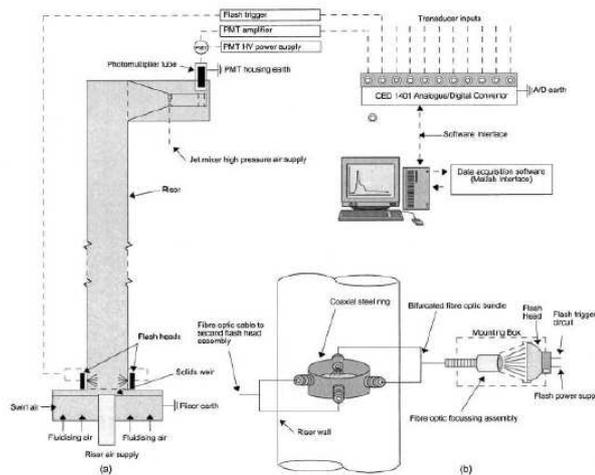
<b>Método</b>	<b>Equipos Principales</b>	<b>Observaciones Técnicas</b>	<b>Costo (USD)</b>
<b>Lecho Químicamente Diferente</b>	Sondas de Recolección	Respuesta lenta, baja precisión	2750
<b>Trazador Magnético</b>	Detector de Proximidad	Respuesta lenta, baja precisión	515
<b>Trazador Radiactivo</b>	Detector de Radiación	Contaminación del material del lecho por el trazador, riesgos para la salud	2078
<b>Trazador Fosforescente</b>	Tubo Fotomultiplicador	Respuesta rápida, detección en línea sin contaminación radiactiva	3946
<b>Métodos Ópticos</b>	Cámara de Alta Velocidad	Respuesta rápida, detección en línea sin contaminación radiactiva	72.000
	Anemómetro Láser		44.800

Puede observarse que el Método del Trazador Magnético es el que lleva asociado un menor costo de equipo, sin embargo, como ya se ha dicho, este método resulta inadecuado para el sistema en estudio, junto con el Método del Lecho Químicamente Diferente. Los Métodos del Trazador Fosforescente, Radiactivo y los Ópticos son los más costosos, sin embargo son los que pueden dar resultados mejores y más fiables. Así pues, se considera que la medición con los trazadores fosforescentes es el método que proporciona mayores ventajas para el prototipo de reactor en estudio, con relación a los demás métodos considerados, ya que evita los riesgos asociados al manejo de isótopos radiactivos, el sistema de detección es robusto y fiable, con respuesta rápida de acuerdo con las condiciones de trabajo del prototipo de reactor en estudio, esta propuesta estará basada en el método empleado por Harris et al. [5]. La medición con láser o con cámaras de alta velocidad podrían considerarse como opciones alternativas, sin embargo, estos métodos están orientados básicamente al estudio y caracterización de las propiedades fluidodinámicas de la corriente en estudio (mezclado, turbulencia, entre otras) por lo que se justificaría su preferencia en caso de proyectar un estudio a futuro de las características del flujo en el prototipo de reactor.

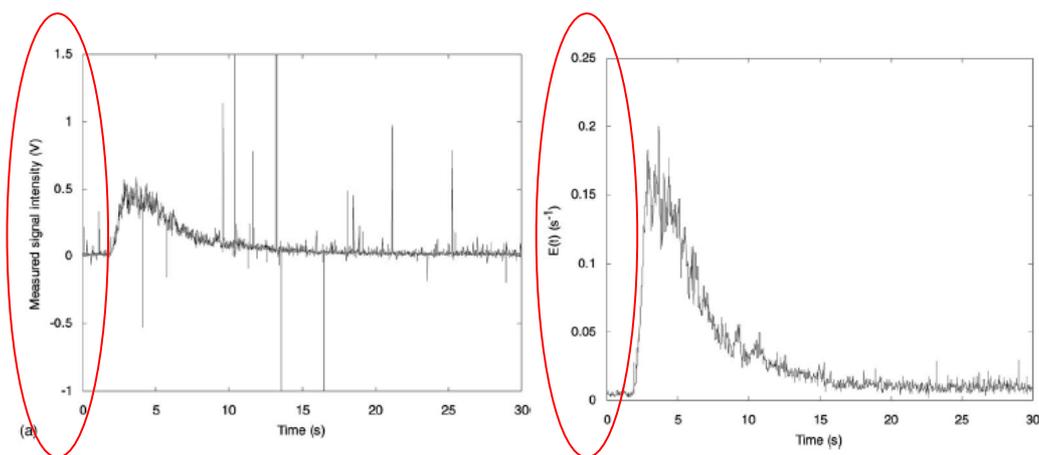
### 3. DESARROLLO DEL MÉTODO

#### 3.1. Descripción del Método.

La medición del tiempo de residencia, según el método empleado por Harris et al. [5], se realiza registrando la intensidad de emisión de luz de las partículas fosforescentes de trazador. Estas partículas son expuestas a la luz emitida por un flash de fotografía en el inicio de la zona de medición, en cuyo momento se registra el tiempo de inicio del experimento, las partículas se mueven por la zona de medición por acción del aire que se inyecta al sistema, en el final de la zona de medición se encuentra un PMT (Photo-Multiplier Tube: Tubo Fotomultiplicador), el cual detecta la intensidad luminosa de las partículas del trazador, esto genera una gráfica de intensidad de emisión Vs tiempo, convirtiendo la señal eléctrica del PMT con la interfaz adecuada [5], en dichas gráficas se puede obtener el tiempo promedio de residencia de los sólidos en el punto donde se registra la mayor intensidad de emisión de las partículas, que es donde se tendrá la mayor cantidad de partículas abandonando simultáneamente la zona de medición.



**FIGURA 1.** Esquema del método de medición de RTD empleado por Harris et al., mostrando los dos métodos alternativos de activación (a) activación planar y (b) activación en el punto de inyección. (Harris et al., 2003)



**FIGURA 2.** Curvas de Intensidad de Señal Medida (a) y de Intensidad de Emisión Vs Tiempo (b) para un experimento de Medición de Tiempo de Residencia. El Tiempo Promedio de Residencia se localiza en la zona de máxima intensidad de emisión (enmarcada por una elipse roja). Adaptado de Harris et al. [5].

Para adaptar este método al prototipo de reactor de lecho transportado del Laboratorio de Fluidodinámica de la UNEXPO, el trabajo se dividió en dos partes fundamentales: hardware y software. El desarrollo y construcción del hardware se realizó en cuatro módulos: percepción, amplificación, procesamiento y transmisión de datos, y alimentación. Por su parte el software cumplió dos etapas de desarrollo: alto nivel y bajo nivel. [6]

### 3.1.1. Hardware

#### 3.1.1.1. Módulo de Percepción

Para la medición de la intensidad luminosa emitida por las partículas se emplearon dos sensores ubicados en la entrada y en la salida de la zona de medición, respectivamente. Luego del estudio de las ondas de luminiscencia de las partículas de trazador se eligieron los sensores que se consideraron mejor adaptados a las condiciones del experimento, dichos sensores son los TEMT6000, éstos fueron colocados internamente en una conexión “T” de PVC para, posteriormente, ser acoplados en los puntos de entrada y salida de la zona de medición en cuestión, para esto, se acopló un conector Header de 3 pines a la PBC (Printed Circuit Board: Tarjeta de Circuito Impreso) del sensor, se perforó la conexión “T” y se utilizó un pegamento epóxico para fijar los componentes y sellar las fugas de aire [6].

#### 3.1.1.2. Módulo de Amplificación y Acondicionamiento de la Señal

En este módulo se estudiaron, en primer lugar, las señales provenientes de los sensores. Para esto, se realizaron pruebas a exposiciones de luz controladas: oscuridad total; “condiciones normales”,

considerada como la cantidad de luz emitida por un foco de 22 W en el techo (3 metros) de una habitación de 6 metros cuadrados; y “exposición máxima”, considerada como la exposición directa del sensor a una fuente luminosa. En cada caso, se midió la corriente generada por los sensores, los resultados se muestran en la Tabla 3 [6].

**TABLA 3.** Valores de corriente en el sensor a distintas exposiciones de luz [6]

<b>Exposición de Luz</b>	<b>Valor de la corriente emitida por el sensor</b>
<b>Oscuridad Total</b>	0 A
<b>Condiciones Normales</b>	5 $\mu$ A
<b>Exposición Máxima</b>	20 mA

Luego de esto, se expuso el sensor directamente al trazador cargado previamente durante diferentes intervalos de tiempo, la máxima corriente en el sensor se registra al exponerlo al trazador inmediatamente que ha finalizado la carga del mismo, los resultados se muestran en la Tabla 4 a continuación [6].

**TABLA 4.** Valores de corriente en el sensor expuesto al trazador [6]

<b>Tiempo después de la carga (min)</b>	<b>Valor de la corriente emitida por el sensor</b>
<b>0</b>	1 $\mu$ A
<b>1</b>	6 nA
<b>2</b>	3,4 nA
<b>5</b>	0 A

La señal proveniente de los sensores es una señal de corriente analógica que varía con respecto a la cantidad de luz que reciben, este valor de corriente debe ser percibido por el amplificador instrumental, por lo que se transformarán los niveles de corriente a niveles de tensión, por medio de un resistor conectado a tierra [6].

Se realizaron pruebas de para determinar el valor más apropiado del resistor que limite menos la corriente sin afectar notablemente la apreciación, para esto se expuso el sensor a niveles de luz

controlados, variando el valor del resistor y midiendo los niveles de corriente, esto se muestra en la Tabla 5 a continuación [6].

**TABLA 5.** Valores de corriente en el sensor para distintos valores del resistor [6].

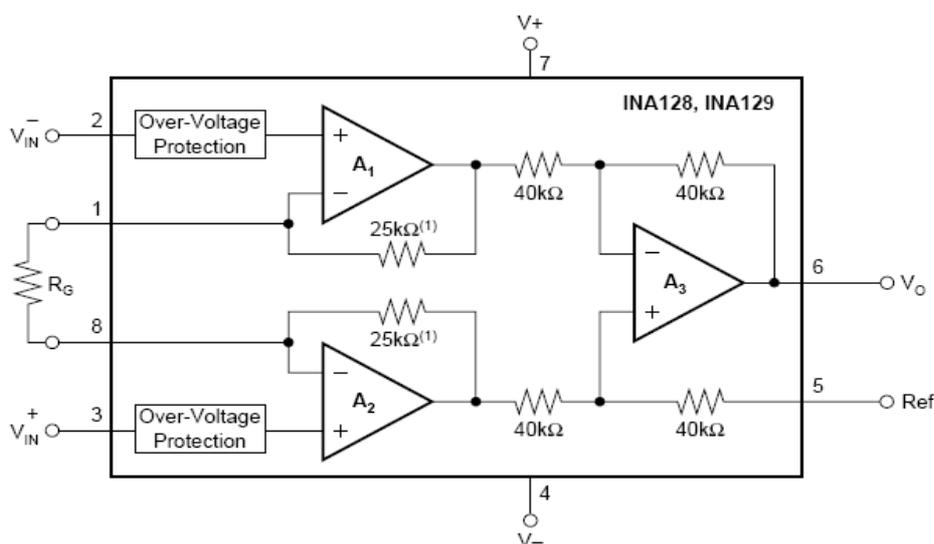
Exposición de luz	Resistencia	Corriente del sensor
Condiciones normales	1 k $\Omega$	5 $\mu$ A
Exposición Máxima	1 k $\Omega$	4,7 mA
Condiciones normales	10 k $\Omega$	5 $\mu$ A
Exposición Máxima	10 k $\Omega$	3,2 mA
Condiciones normales	100 k $\Omega$	3 $\mu$ A
Exposición Máxima	100 k $\Omega$	750 $\mu$ A
Condiciones normales	1 M $\Omega$	0 A
Exposición Máxima	1 M $\Omega$	280 $\mu$ A

De aquí se concluye que el valor más apropiado para el resistor es de 10 k $\Omega$  ya que este valor limita muy poco los valores de corriente y genera una tensión apreciable en el amplificador instrumental.

En el desarrollo de esta etapa, se utilizaron amplificadores operacionales INAP128P, el circuito esquemático del mismo se muestra en la Figura 3 [7]. El INAP128P posee diversos niveles de ganancia, que dependerán del valor del resistor R<sub>G</sub>. Estos valores se observan en la siguiente tabla:

**TABLA 6:** Valores de ganancia para el INAP128P [7].

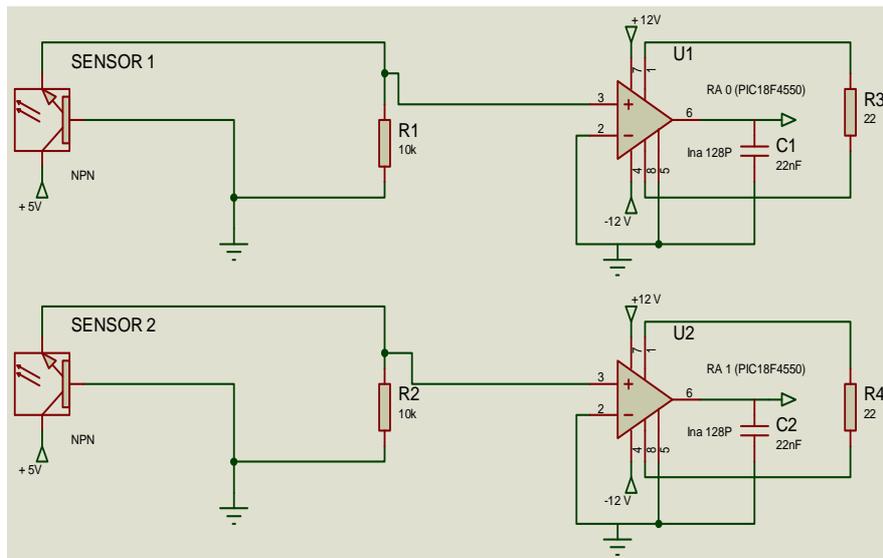
Ganancia Deseada (V/V)	$R_G$ ( $\Omega$ )	$R_G$ 1% más cercana ( $\Omega$ )
1	NC	NC
2	50,00 k	49,9 k
5	12,50 k	12,4 k
10	5,556 k	5,62 k
20	2,632 k	2,61 k
50	1,02 k	1,02 k
100	505,1	511
200	251,3	249
500	100,2	100
1000	50,05	49,9
2000	25,01	24,9
5000	10,00	10
10000	5,001	4,99



**FIGURA 3.** Circuito esquemático del INAP128P [7]

Los niveles de amplificación del sistema dependerán de muchos factores, entre los más importantes está los niveles de luminosidad del trazador, ya que para un trazador en óptimas condiciones, las ganancias

deberán ser ajustadas a niveles bajos para evitar la saturación en las gráficas de los tiempos de residencia, mientras que para un trazador que haya pasado por varios ciclos de inyección, se requerirá un nivel mayor de ganancia [6]. Para obtener un mejor desempeño del dispositivo, se le incorporó un selector de ganancia, que permitió variar los niveles de la misma desde  $G = 10$  hasta  $G = 10.000$ , cuyos valores se corresponden con los mostrados en la Tabla 5. Luego de esto, se estableció el siguiente circuito para el acondicionamiento de la señal. (Ver Figura 4)



**FIGURA 4.** Diagrama esquemático del Módulo de Amplificación y Acondicionamiento de la Señal [6]

### 3.1.1.3. Módulo de Procesamiento y Transmisión de Datos

Este módulo se encarga de adquirir la señal analógica de ambos sensores. Se hará una multiplexación, conversión analógica/digital y luego se enviará la información, vía USB, al computador [6].

Es muy importante tener en cuenta la que para asegurar que los datos adquiridos y transmitidos reflejen el comportamiento del sistema en estudio la velocidad o *ritmo* de muestreo debe ser lo suficientemente alto para corresponder a las condiciones del sistema (ver Figura 1).

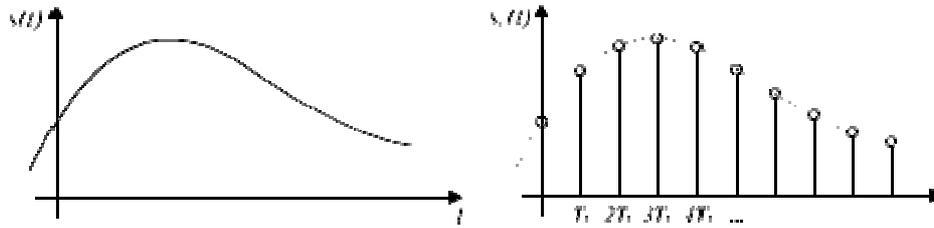


FIGURA 5. Señal original y señal muestreada [8]

Según el Teorema de Muestreo de Nyquist para poder replicar con exactitud aproximada la forma de una onda, es necesario que la frecuencia de muestreo sea superior al doble de la máxima frecuencia a muestrear [9].

En el prototipo de reactor de circulación, las velocidades del flujo gas – sólido en que se efectuarán los estudios comprenden el intervalo entre 8 m/s a 33 m/s [10] a lo largo de una longitud de 2 m. De esto, se obtiene la Tabla 7, que muestra la frecuencia de muestreo para las velocidades de flujo en cuestión.

TABLA 7. Velocidades y Frecuencias de Muestreo [6]

Velocidad (m/s)	Distancia (m)	Frecuencia (Hz)
8	2	4
33	2	16,5

Según el Teorema de Nyquist [9], la frecuencia de muestreo mínima que permitirá replicar la forma de la onda que describe la intensidad de emisión de luz del trazador será el doble de la frecuencia máxima a muestrear, esto es  $2 \times 16,5 \text{ Hz} = 33 \text{ Hz}$ . Teniendo en cuenta la velocidad del experimento, y con el fin de obtener una mayor exactitud, la frecuencia máxima se fijará en el máximo posible según las capacidades de los componentes empleados, esto permite emplear una frecuencia de muestreo diez veces mayor a la frecuencia máxima, es decir, 165 Hz.

Este módulo se encargará de adquirir la señal analógica de ambos sensores, se hará una multiplexación, conversión analógica/digital y luego se enviará la información vía USB al computador. El dispositivo encargado de realizar todas estas tareas será el PIC18F4550, que por medio del software de bajo nivel se encargará de recibir simultáneamente las señales de los amplificadores vía analógica, para luego procesarlas y enviarlas en tiempo real, a través del puerto USB, al software de alto nivel que se

encuentra en el computador. En la Figura N° 6 a continuación se muestra un diagrama esquemático del hardware del módulo.

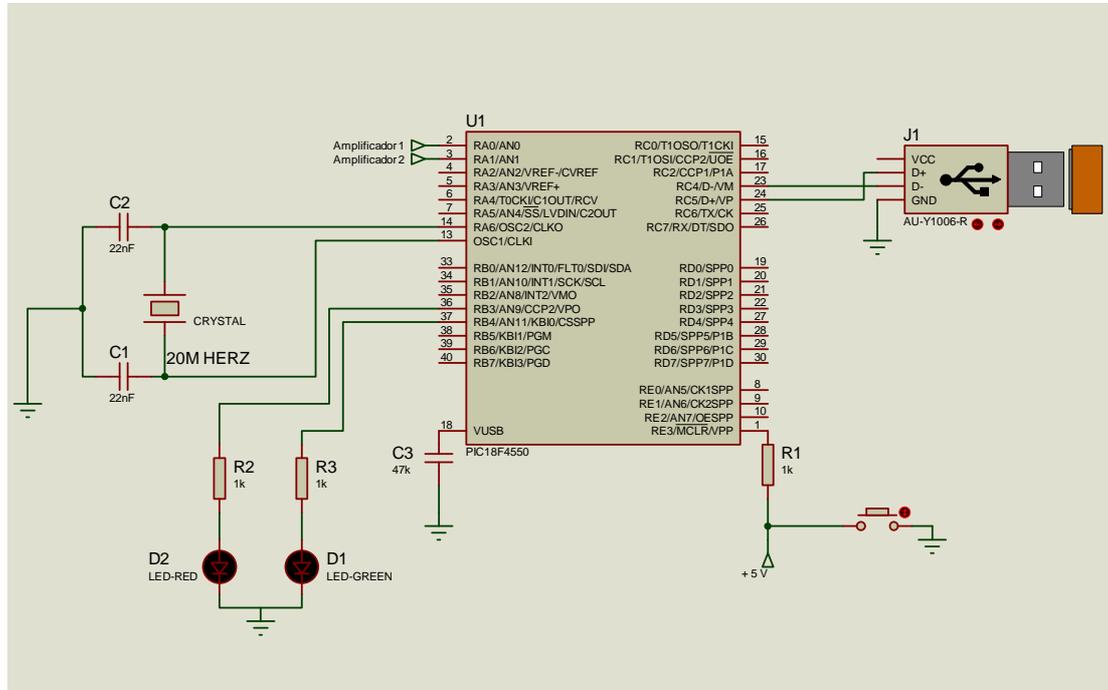


FIGURA N° 6. Diagrama esquemático del Módulo de Adquisición y Transmisión de Datos [6]

#### 3.1.1.4. Módulo de Alimentación.

El sistema en total cuenta con tres fuentes de alimentación: una de +12 V, otra de -12 V, y por último, una de +5 V. En la Figura 7 se observa un esquema del circuito.

Las fuentes de  $\pm 12$  V alimentan a los amplificadores instrumentales y la fuente de +5 V alimenta el PIC18F4550 y los sensores TEMENT6000.

Finalmente, todos estos módulos se integraron en uno solo, en la Figura 8 se muestra dicha integración.

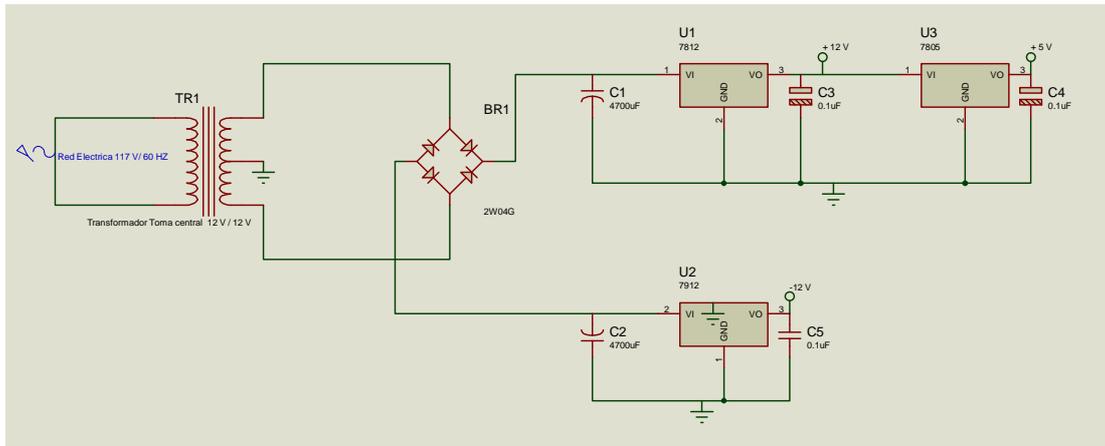


FIGURA 7. Diagrama esquemático del Módulo de Alimentación [6]

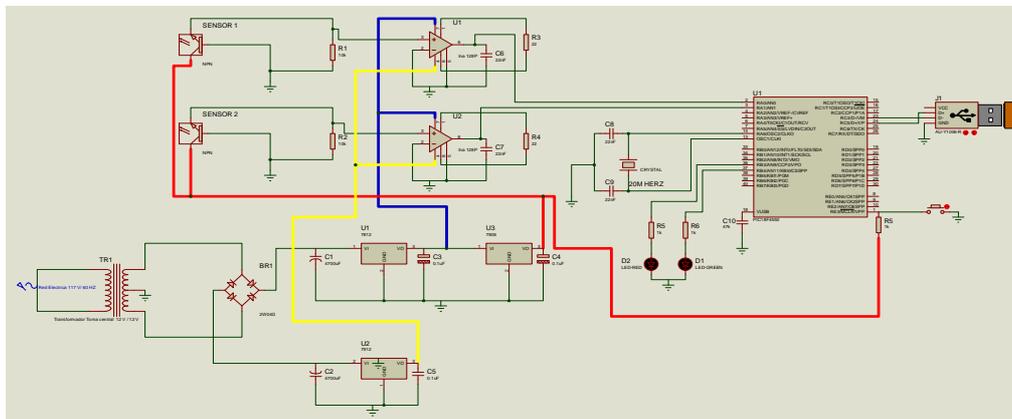


FIGURA 8. Diagrama esquemático del hardware integrado [6]

### 3.1.2. Software.

#### 3.1.2.1. Software de Bajo Nivel.

Este software es el que utiliza el PIC18F4550 para convertir los datos de las señales de los sensores a códigos digitales para, posteriormente, enviar cada conversión a la PC para visualizar la señal. Este código se escribió en lenguaje C por medio del compilador PIC C. [6]

El código trabaja de la forma siguiente: al ser conectado el puerto USB, se mantiene en espera por la señal de conexión del software de alto nivel. En cuanto esta señal se recibe, se enumera el puerto y se realiza la conexión entre la PC y el PIC18F4550, luego de esto se configura y arranca el primer cronómetro, inicia la adquisición de la señal analógica y se hace la conversión, se toma el valor del primer cronómetro, y se realiza la conversión de la misma manera para la segunda señal. Luego estos

datos son enviados vía USB simultáneamente y en tiempo real, repitiéndose el ciclo por el tiempo establecido por el software de alto nivel. En la Figura 9 se presenta un diagrama de flujo del software de bajo nivel.

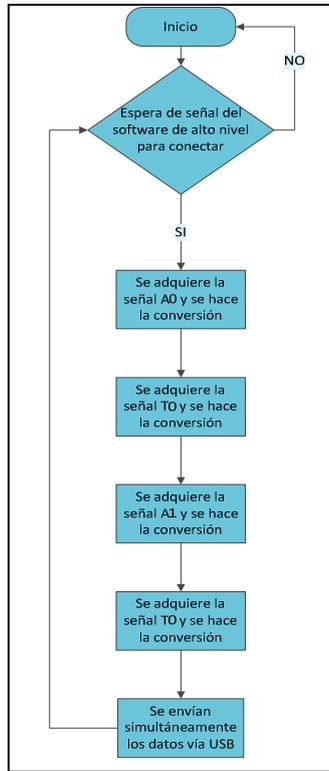


FIGURA 9. Diagrama de bloques del software de bajo nivel [6]

### 3.1.2.2. Software de Alto Nivel.

Utilizando MATLAB ® se desarrolló una interfaz gráfica de usuario (GUI, por sus siglas en inglés) que trabaja en coordinación con el software de bajo nivel del PIC18F4550, los datos enviados desde el PIC se coordinan en una trama que se repite de manera cíclica para luego ser recibida en la PC. Por medio de la interfaz gráfica, el usuario establece el tiempo de adquisición de los datos y habilita la comunicación USB, luego, se reciben los datos y se almacenan en vectores, cada uno con su respectiva identificación, al finalizar la adquisición de los datos, el programa realiza los cálculos de los valores máximos de intensidad luminosa y los tiempos correspondientes a tales valores, para ser mostrados en pantalla junto con tres gráficas correspondientes a cada uno de los sensores y la tercera con la superposición de las anteriores. En las Figura 10 se muestra el diagrama de bloques del software de alto nivel, y en la ¡Error!

No se encuentra el origen de la referencia. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. la captura de pantalla del GUI.

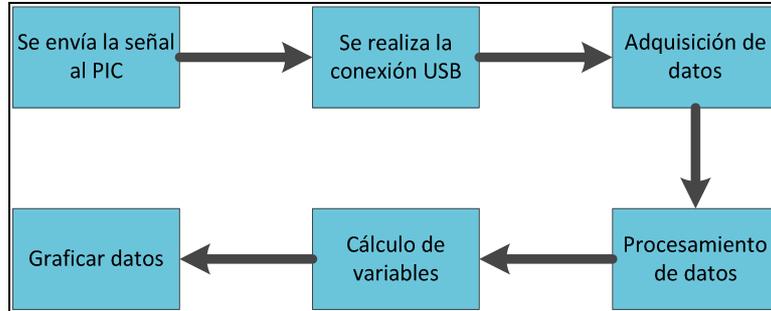


FIGURA 10. Diagrama de bloques del software de alto nivel [6].



FIGURA 11. Captura de pantalla de la interfaz gráfica, se observan el campo de entrada para el tiempo de adquisición y los campos de salida para el tiempo correspondiente a cada uno de los sensores y el tiempo de residencia en el lazo de regeneración (enmarcados por una elipse roja) [6]

### 3.2. Instalación y Pruebas.

Una vez desarrollados los módulos de hardware y software del dispositivo se realizaron un conjunto de experimentos para determinar los límites de operación y confiabilidad del sistema, así como su precisión y exactitud. Para ello se establecieron pruebas a tiempos constantes y se dividió el trabajo en dos etapas correspondientes a la geometría de flujo empleada: horizontal y vertical.

#### 3.2.1. Pruebas Horizontales.

Aunque el prototipo de reactor de lecho transportado opera en un lazo de circulación ascendente – descendente, se realizaron las primeras pruebas empleando flujo horizontal, esto para asegurar que los diversos módulos del sistema de detección operasen correctamente antes de enfrentarlos con las

dificultades inherentes al flujo gas – sólido en modo ascendente. Para esto se empleó una tubería del mismo material y diámetro del tramo ascendente del reactor (PVC, 1”) con la diferencia de que la longitud de la tubería horizontal fue de aproximadamente cinco metros, la zona de inyección de trazador se colocó al inicio del tramo y los sensores a tres metros de ésta y separados dos metros entre sí para emular las condiciones del sistema original, al final de la zona de medición se instaló un conjunto de ciclones convencionales y tolvas de almacenamiento para recolectar el trazador utilizado en las pruebas. El objetivo principal de las mediciones realizadas fue obtener los parámetros de calibración y ajustes de los módulos del sistema, para luego ser llevados al reactor de circulación.

### **3.2.2. Pruebas Verticales.**

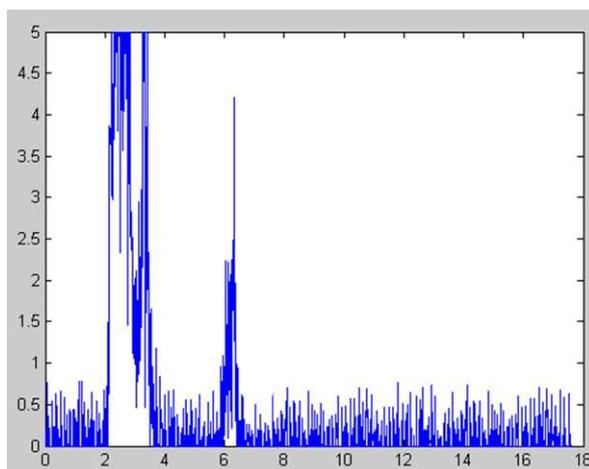
Luego de concluidas las pruebas horizontales, se realizó el montaje del dispositivo en el tramo de regeneración del reactor. Se instalaron nuevamente las partes del reactor que se utilizaron en las pruebas horizontales y se instalaron los sensores en sus posiciones correspondientes. Debido al roce del sólido con el aire de inyección y las paredes del reactor, en conjunto con las altas velocidades del flujo, se generó una gran cantidad de electricidad estática que afectó el circuito de adquisición, rompiendo la comunicación entre el dispositivo y la PC. Para evitar esto, se empleó cable de instrumentación en todas las conexiones, en conjunto con el montaje de los conectores de los sensores en pequeñas tarjetas PCB para evitar el ruido. Seguidamente se instaló un sistema de aterramiento, que se acopló directamente al chasis del reactor, donde se conectaron todos los puntos que debían llevarse a tierra para disminuir el efecto de la electricidad estática. Finalmente, se realizaron las pruebas en el sistema a diferentes velocidades de inyección del aire: 3 L/s; 4 L/s y 5 L/s.

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Se realizaron experimentos en el prototipo de reactor de lecho transportado ubicado en el Laboratorio de Fluidodinámica de la UNEXPO, Vicerrectorado Barquisimeto. En cada experimento se midió la intensidad de la luz emitida por el trazador mientras circula por el tramo de regeneración del prototipo versus el tiempo de adquisición. En cada prueba se varió la velocidad del flujo del aire dentro de los límites de operación del reactor.

En la Figura N° 12 se puede observar cómo se va formando la curva de manera creciente a partir de los dos segundos, llega al límite superior entre 2 y 3 segundos para decaer a los cuatro segundos, también se observa otro pico a los 6 segundos, que se corresponde con el sensor ubicado a la salida del lazo de regeneración. El hecho de que la curva alcance el límite superior se debe a la alta intensidad de emisión

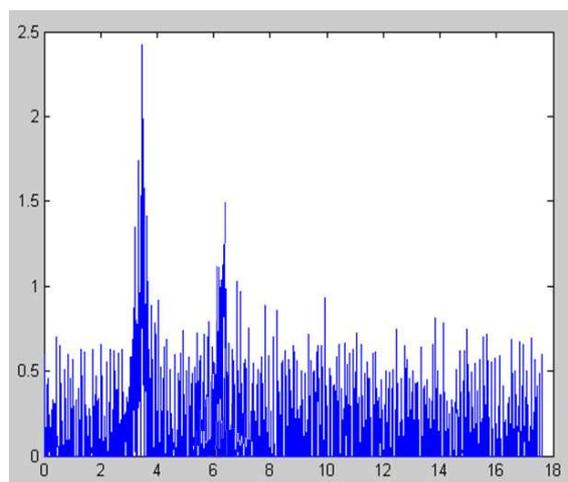
de luz del trazador, lo que ocasiona la saturación del sensor debido al alto valor de ganancia que fue seleccionado, esto puede corregirse simplemente variando dicho valor con el selector de ganancia del aparato.



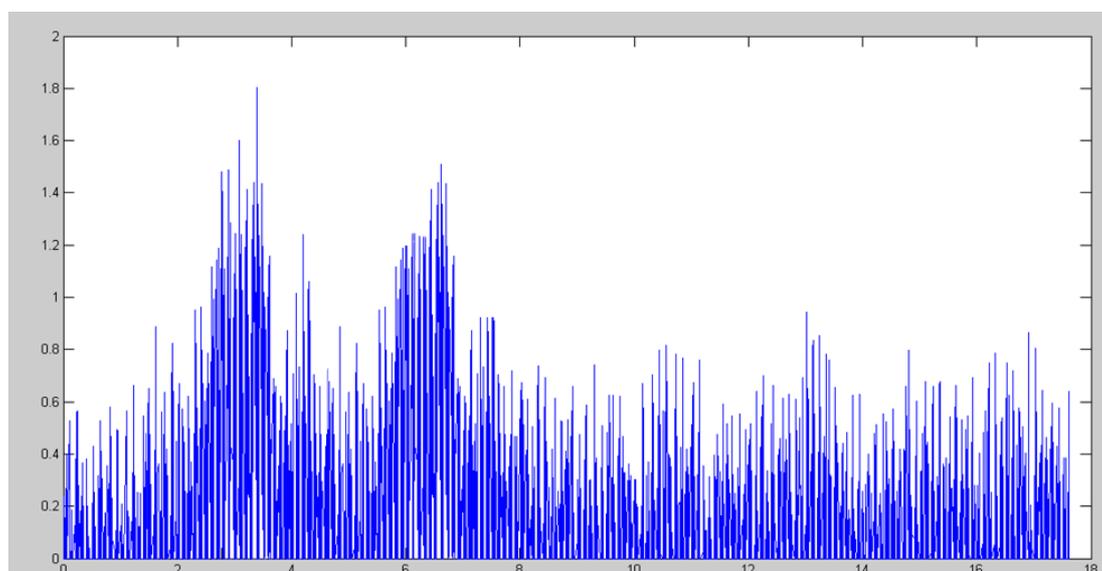
**FIGURA N° 12.** Intensidad de Emisión Vs Tiempo de Adquisición a una velocidad de flujo de 3 L/s [6]

En la Figura 13 se observan dos picos de emisión alrededor de los 3 y 6 segundos respectivamente, con un margen apreciable de ruido, sin embargo esto no afecta en mayor medida la detección.

En la Figura 14 se observa que los picos comienzan a formarse entre 2 y 4 segundos, y entre 5 y 8 segundos; también se observa un alto nivel de ruido, esto se debe al alto valor de la ganancia del dispositivo que fue seleccionada para detectar el trazador, ya que debido al uso continuo, el trazador sufrió un severo desgaste y se afectó su capacidad de emisión.



**FIGURA 13.** Intensidad de Emisión Vs Tiempo de Adquisición a una velocidad de flujo de 4 L/s [6]



**FIGURA 14.** Intensidad de Emisión Vs Tiempo de Adquisición a una velocidad de flujo de 5 L/s [6]

Si se comparan estos resultados con los mostrados en la Figura 2, se observa la similitud en el comportamiento de la respuesta obtenida: la intensidad de emisión se incrementa a medida que aumenta la cantidad de trazador alcanzando el detector, lo que indica estadísticamente, que en ese momento la mayor cantidad de partículas de trazador con propiedades y comportamiento semejantes atraviesan la zona de detección. El tiempo de respuesta de los sensores y el sistema de detección demostró ser adecuado para las velocidades del flujo gas-sólido en que se operará el prototipo de reactor de lecho transportado, resultando esto en un método alternativo de medición de tiempo de residencia para flujo

gas-sólido de alta velocidad, de fabricación relativamente económica y aplicación sencilla, además que no implica el uso de trazadores potencialmente peligrosos.

## 5. CONCLUSIONES

- Se estableció que el método que resulta más adecuado al lazo de regeneración del prototipo de reactor de lecho transportado es la medición con trazadores fosforescentes.
- Se estudió y determinó el sensor más adecuado para sustituir el uso de tubos fotomultiplicadores en la detección de trazadores fosforescentes bajo las condiciones de operación del prototipo de reactor de lecho transportado.
- Se diseñó y construyó un dispositivo de detección que permite medir el tiempo de residencia en el lazo de regeneración del prototipo de reactor de lecho transportado. Además del software de bajo y alto nivel que permite: la conversión analógica-digital de la señal adquirida, con una velocidad de muestreo lo suficientemente alta como para reproducir la señal analógica original; y la operación del dispositivo en un ambiente sencillo, cómodo y robusto.
- Se instaló un sistema de aterramiento al prototipo de reactor de lecho transportado, logrando reducir al mínimo esta perturbación.
- Se realizaron pruebas de flujo y detección en condiciones controladas, logrando obtener resultados satisfactorios.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Harris, A. T., Davidson, J. F., & Thorpe, R. B. (2002). A novel method for measuring residence time distribution in short time scale particulate systems. *Chemical Engineering Journal* , 89, 127-142.
- [2]. Huang, C., Quian, Z., Zhang, M., & Wei, F. (2006). Solids mixing in a downflow circulating fluidized bed of 0,418-m in diameter. *Powder Technology* , 161, 48-52.
- [3]. Avidan, A., & Yerushalmi, J. (1985). Solids mixing in an expanded top fluid bed. *AIChE Journal*, 31 [5], 835-841.
- [4]. Arévalo P., J. G., & Salazar C., M. (2008). *Desarrollo de métodos de medición de tiempo de residencia en un prototipo de reactor de circulación*. Trabajo Especial de Grado, Universidad

Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre", Departamento de Ingeniería Química, Barquisimeto.

- [5]. Harris, A. T., Davidson, J. F., & Thorpe, R. B. (2003). Particle residence time distribution in circulating fluidized beds. *Chemical Engineering Science* , 58, 2181-2202.
- [6]. Rojas U., J. M. (2011). *Sistema de adquisición de datos para la medición del tiempo de residencia de un prototipo de reactor de circulación*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre", Departamento de Ingeniería Electrónica, Barquisimeto.
- [7]. Burr Brown Corporation. (1996, Octubre). INA128 INA 129 Precision, Low Power Instrumentation Amplifiers. *Product Data Sheet* . Estados Unidos de América.
- [8]. Wikipedia. (17 de Octubre de 2011). *Wikipedia - La Enciclopedia Libre*. Recuperado el 24 de Febrero de 2011, de [http://es.wikipedia.org/wiki/Frecuencia\\_de\\_muestreo](http://es.wikipedia.org/wiki/Frecuencia_de_muestreo)
- [9]. Martínez, E. (07 de Julio de 2007). *Teoría del muestreo de Nyquist*. Recuperado el 24 de Febrero de 2011, de Eveliux.com: <http://www.eveliux.com/mx/teoria-del-muestreo-de-nyquist.php>
- [10]. Rodríguez, J. E., & Montes, F. D. (2007). *Diseño de un prototipo de reactor de lecho transportado de corto tiempo de residencia*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre", Departamento de Ingeniería Química, Barquisimeto.