

**TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE ECATEPEC**  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECATRÓNICA E  
INDUSTRIAL



TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
**MAESTRO EN EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS  
RENOVABLES**

**CONTROL APLICADO A UN BIOFILTRO DE LECHO  
ESCURRIDO PARA MEJORAR EL COEFICIENTE GLOBAL  
DE TRANSFERENCIA DE MASA**

PRESENTA  
**ING. MAURICIO ENRIQUE SERVIN TREJO.**

DIRECTOR  
**M. EN C. WENCESLAO CUAUHTÉMOC BONILLA BLANCAS.**

## **RESUMEN**

El presente trabajo especifica dos tipos de control para aplicarlo a sistemas de biofiltración de lecho escurrido, uno utilizando un control básico on-off y otro implementado una metodología de mayor complejidad que es el control PID, ambos controles se aplican a la humedad y a la temperatura que se tiene en el empaque del biofiltro ya que en este punto ambos son una variable crítica en el proceso de biofiltración. El antecedente bajo el cual se desarrolló este proyecto fue el trabajo titulado "Uso de respirometrías heterogéneas para estimar coeficientes de transferencia de masa interfaciales y parámetros biocinéticos en biofiltros de lecho escurrido"<sup>13</sup>, del cual se partió y posteriormente se decidió enfocar en la etapa de control, como resultado se obtuvo las rutinas de control perfectamente aplicables y configurables al uso de sistemas de biofiltración.

## **ABSTRACT**

The present work specifies two types of control to apply to a drained bed biofilter, one using a basic on-off control and another implemented a methodology with greater complexity that is the PID control, both controls are applied to the humidity and temperature has in the packaging of the biofilter since at this point both are a critical variable in the process of biofiltration. The antecedent under which this project was developed was the work entitled "Uso de respirometrías heterogéneas para estimar coeficientes de transferencia de masa interfaciales y parámetros biocinéticos en biofiltros de lecho escurrido"<sup>13</sup>, from which it was split and later it was decided to focus on the stage of control, as a result the control routines were perfectly applicable and configurable to the use of biofiltration systems.

<b>ÍNDICE GENERAL</b>	
<b>RESUMEN</b> .....	1
<b>ABSTRACT</b> .....	2
<b>NOMENCLATURA</b> .....	5
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	5
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	6
<b>CAPÍTULO I: Introducción</b> .....	7
1.1 Tipos de fuentes de energía.....	7
1.2 Perspectiva de las energías renovables. ....	8
1.3 Biocombustibles. ....	9
1.4 Biogás. ....	10
1.5 Tecnologías para enriquecimiento de biogás. ....	11
1.5.1 Tecnologías físico-químicas.....	11
1.5.2 Tecnologías biológicas.....	12
1.6 Tipos de biofiltros. ....	13
1.7 Opciones de mejora para los sistemas de biofiltro de lecho escurrido .....	15
- Empaques.....	15
- Variables físicas predominantes. ....	16
- Control. ....	16
<b>Capitulo II: Antecedentes</b> .....	18
<b>CAPITULO III: Justificación y objetivos.</b> .....	19
3.1 JUSTIFICACIÓN.....	19
3.2 OBJETIVO GENERAL.....	19
3.2.1 OBJETIVOS PARTICULARES .....	19
<b>CAPITULO IV: Materiales y métodos</b> .....	20
4.1 sistema experimental.....	20
Volúmenes del biofiltro.....	21

4.2 control aplicado al sistema. ....	22
4.3 instrumentación del sistema. ....	23
4.4 interfaz. ....	23
4.5 pruebas. ....	23
<b>CAPITULO V: Resultados</b> .....	25
5.1 Interfaz Humano Maquina (HMI) .....	25
5.2 control ON-OFF .....	27
5.3 control PID .....	29
<b>CONCLUSIONES</b> .....	31
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	32
<b>ANEXOS</b> .....	34

## **NOMENCLATURA**

ppm= partículas por millón

BF= biofiltro

BLE= biofiltro de lecho escurrido

P= proporcional

PI= proporcional integral

PD= proporcional derivativo

PID= proporcional integral derivativo

PVC= policloruro de vinilo

HMI= interfaz humano maquina (del inglés human-machine interface)

SCADA= supervisión control y adquisición de datos (del inglés Supervisory Control And Data Acquisition)

$K_p$ = constante proporcional

$T_i$ = tiempo integral

$T_d$ = tiempo diferencial

S= variable compleja en el dominio de la frecuencia

## ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1. División de fuentes de energía. ....	7
Figura 2. Evolución de las fuentes de energía. ....	8
Figura 3. Teoría del pico de hubbert de manera gráfica. ....	9
Figura 4. Rangos de aplicación de tecnologías de purificación. ....	11
Figura 5. Diagrama de un Biofiltro. ....	13
Figura 6. Diagrama de un Biofiltro de lecho escurrido ....	14
Figura 7. Diagrama de biolavadores. ....	15
Figura 8. Sistema experimental de biofiltración. ....	20
Figura 9. Diagrama de las partes y dimensiones del biofiltro. ....	22
Figura 10. Diagrama de control. ....	23
Figura 11 HMI del control ON-OFF ....	25
Figura 12. HMI del control PID.....	27
Figura 13. Código para control ON-OFF de temperatura ....	28
Figura 14. Código para control ON-OFF de humedad.....	28
Figura 15. Librería PID DAQFactory utilizado para humedad ....	29
Figura 16. Librería PID DAQFactory utilizado para humedad ....	30
Figura 17. Diagrama de proceso de pruebas abióticas. ....	34
Figura 18. Diagrama de proceso del proyecto. ....	35

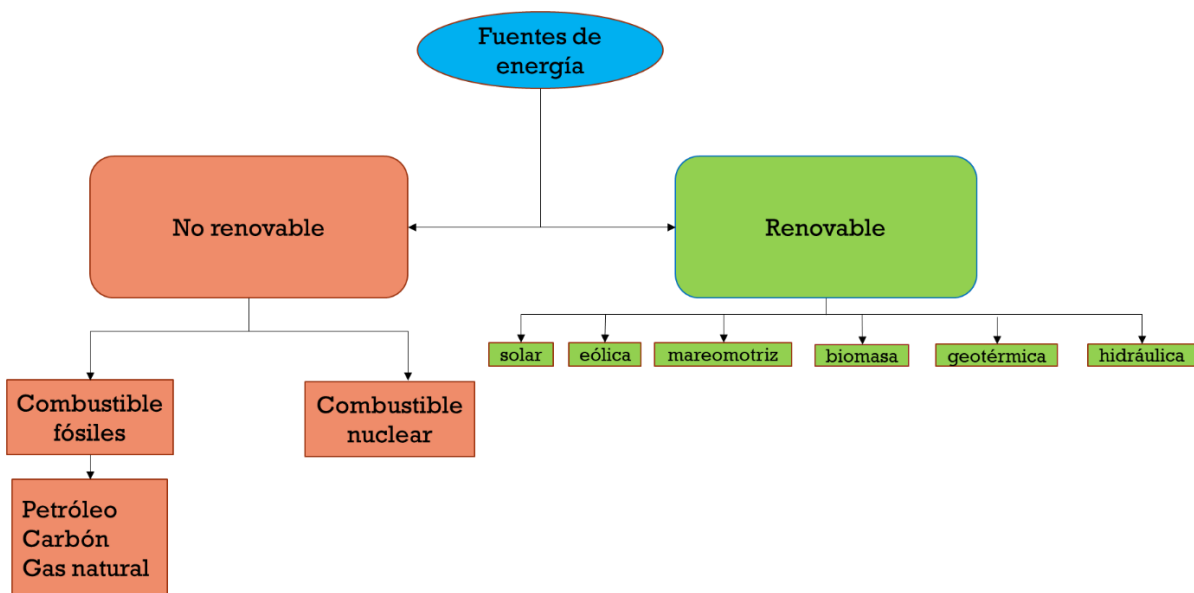
## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Componentes del biofiltro. ....	21
Tabla 2. Descripción de interfaz ON-OFF.....	26
Tabla 3. Descripción de interfaz PID.....	27
Tabla 4. Descripción de la librería PID.....	29

## CAPÍTULO I: Introducción

### 1.1 Tipos de fuentes de energía.

Las fuentes de energía se dividen principalmente en dos vertientes: renovables y no renovables. Dentro de las no renovables se encuentran las de mayor uso actualmente, que son los hidrocarburos y sus derivados, sin embargo, no siempre ha sido así, la obtención de energía para las diversas actividades cotidianas alrededor del mundo ha evolucionado con el tiempo, debido principalmente al agotamiento de recursos naturales como la madera, el carbón y el petróleo. Así mismo, con los avances tecnológicos se ha podido incursionar en las energías renovables, como los biocombustibles, energía mareomotriz, energía solar y la energía eólica. En la figura 1 se muestra un diagrama en el cual se hace la división de los tipos de energías<sup>1</sup>.

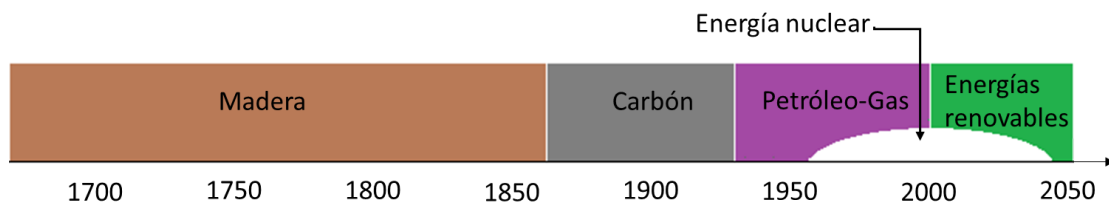


*Figura 1 División de fuentes de energía.*

A finales del siglo XIX la madera era el principal recurso energético utilizado para cocinar y para calefacción, posteriormente se implementó el carbón mineral que por alrededor de 75 años fue la principal fuente de recurso natural energético para finalmente ser sustituido por los hidrocarburos, los cuales hasta la fecha son utilizados para la generación de energía eléctrica al igual que para uso doméstico, hablando del gas natural y derivados del petróleo, mientras la energía nuclear tuvo lugar a mediados del siglo XX y hasta la fecha, sin embargo, su perspectiva de uso no es muy favorable debido a diferentes



factores como los desechos que genera y los riesgos que presentan, por lo cual, en la actualidad la visión prometedora para la obtención de energía está en las fuentes de energía renovables, impulsadas por el agotamiento de los recursos naturales utilizados como fuente de energía así como los beneficios ambientales e incentivos socioeconómicos que se obtienen al utilizar las fuentes renovables <sup>123</sup>. En la Figura 2 se muestra la evolución de las fuentes de energía en una línea de tiempo, desde el uso para actividades domésticas como cocinar o tener una fuente de calor, hasta la prospectiva al año 2050 para la generación de energía eléctrica.



*Figura 2. Evolución de las fuentes de energía.*

## 1.2 Perspectiva de las energías renovables.

En la actualidad, el desarrollo de un país va ligado a su sector energético por la relación que tiene el producto interno bruto y la demanda energética. Por lo cual la generación de energía es un punto crítico a nivel mundial, sumado a esto la problemática ambiental con la generación eléctrica mediante los recursos naturales no renovables y la cantidad finita que se tiene de estos<sup>4</sup>, provoca que se promuevan y estimulen los proyectos para generación de energía eléctrica que disminuyan o erradiquen las emisiones de compuestos o desechos dañinos para el medio ambiente. Bajo este contexto, las tecnologías para aumentar la eficiencia energética o las energías renovables tienen un panorama mundial bastante favorable para el futuro<sup>3</sup>.

Realizando un análisis sobre la evolución de la demanda energética, producción y costos, se puede inferir la necesidad de encontrar una opción energética que reduzca los costos de producción, además la teoría conocida como "hubbert peak" <sup>4</sup> menciona que el petróleo por ser un recurso no renovable tiene reservas finitas, por lo tanto, a medida que se agotan estas reservas el costo del petróleo aumenta. En la figura 3 se muestra de manera gráfica la teoría de hubbert peak, en esta teoría al entrar en curva en declive se menciona que el precio del petróleo y sus derivados se dispararan una vez alcanzado el pico donde la producción haya sobrepasado las reservas, por lo cual la producción de

energía será cada vez más costosa para finalmente consumir todo el recurso y no tener más producción de esta forma<sup>4</sup>. Gracias a esto las energías renovables comienzan a tener mayor importancia en desarrollo y aplicación, así mismo se debe investigar aquellas energías renovables que puedan adaptarse a la tecnología actual, es decir que la energía pueda adaptarse a las máquinas y su requerimiento energético.

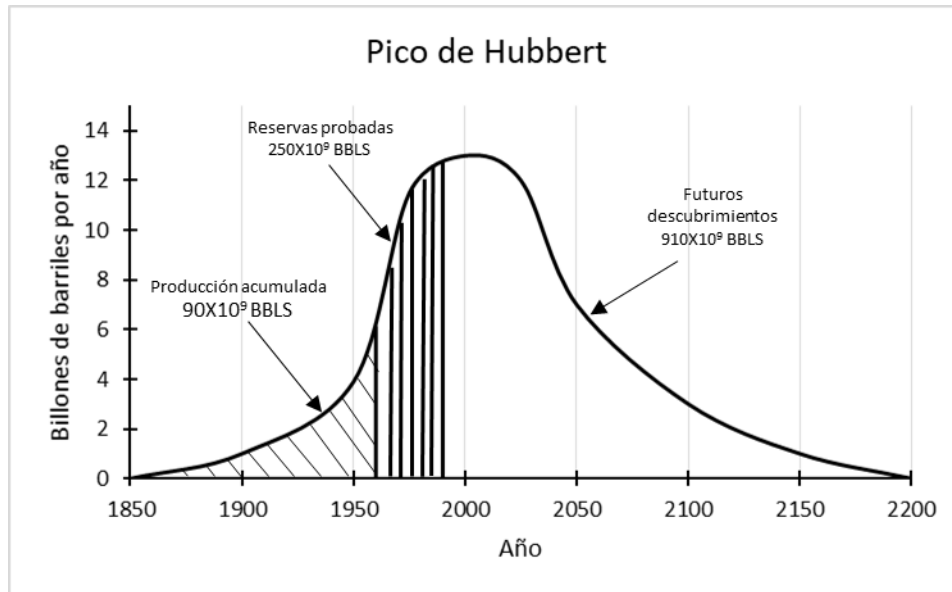


Figura 3. Teoría del pico de hubbert de manera gráfica.

### 1.3 Biocombustibles.

Una de las fuentes prometedoras para la transición al uso en mayor proporción de las energías renovables son los biocombustibles, se denomina biocombustible a todo combustible obtenido de biomasa, la biomasa en su más aceptada definición se considera como material orgánico con origen de un proceso biológico de organismos recientemente vivos, por esto último los combustibles fósiles no pueden ser incluidos en este término ya que aunque tengan un origen de un proceso biológico este fue en épocas remotas. Así que los biocombustibles son derivados de una planta, un animal, o los productos y desechos que ambos puedan tener<sup>56</sup>.

Los biocombustibles se encuentran en estado sólido, líquido o gaseoso y son obtenidos mediante procesos mecánicos, termoquímicos, extractivos o biotecnológicos. Dentro de los biocombustibles sólidos se encuentran: paja, leña sin procesar, triturados finos, carbón vegetal y comprimidos de estos, los procesos para la obtención de este tipo son mecánicos o termoquímicos, como son la pirolisis, astillado, trituración o compactación. Los de estado líquido se obtienen mediante procesos termoquímicos, biotecnológicos o

extractivos, de los cuales se destacan pirolisis, fermentación y extracción físico-química, empleadas para obtener aceites, etanol, ésteres e hidrocarburos. Por último los biocombustibles gaseosos ocupan procesos termoquímicos, biotecnológicos o ambos, dentro de esta división de los biocombustibles se encuentra el biogás y tiene un mayor potencial para su generación dentro de los biocombustibles debido a que se ha estado produciendo de manera natural en mundo mediante la descomposición de los desechos y actualmente es captado de lugares que se tiene en todo asentamiento humano como los vertederos de basura o las zonas ganaderas<sup>67</sup>.

#### 1.4 Biogás.

El biogás es una mezcla mayoritariamente de metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), cuando el biogás tiene una concentración de metano mayor a 45% se vuelve inflamable, por esta cualidad el físico italiano Alessandro Volta logro identificarlo a finales del siglo XVII en las burbujas que emergían en un pantano<sup>8</sup>. El biogás comenzó su auge durante la segunda guerra mundial por la escasez de combustible, posteriormente en la década de los 60 su producción en india le dio un impulso para impactar ambiental y energéticamente ya que fue generado de los desechos bovinos y además de un biocombustible obtenían abono biológico para sus tierras. Posteriormente china implemento la producción de biogás mediante programas de construcción de digestores<sup>9</sup>. Actualmente se realiza la producción y captación del biogás en vertederos de basura, digestores aerobios y anaerobios, aprovechando de esta manera los desecho urbanos y animales. Así mismo, el uso del biogás es implementado tanto a nivel doméstico como industrial debido a su contenido energético que va de 6 a 6.5 kW h/m<sup>3</sup> con una concentración de metano del 55% al 70%, bióxido de carbono de 30% al 45%, vapor de agua de 2% a 7%, concentraciones menores al 2% de nitrógeno, oxígeno e hidrógeno y de 20 a 20,000 ppm de sulfuro de hidrógeno. Las concentraciones de los diferentes elementos que componen el biogás varían según la materia orgánica de donde proviene<sup>91011</sup>.

Los requerimientos para el uso del biogás en las tecnologías actuales que funcionan con gas natural es equiparar el contenido energético, el gas natural tiene un contenido energético de 8 a 12 kW h/m<sup>3</sup> por lo que se debe tener un proceso para que el biogás alcance estos niveles además de eliminar componentes que puedan llegar a dañar los equipos. Para el uso del biogás como sustituto del gas natural se han desarrollado diversas tecnologías para lograr dicha meta, la cual se conoce como enriquecimiento de

biogás<sup>1012913</sup>.

### 1.5 Tecnologías para enriquecimiento de biogás.

Los tratamientos para la purificación de biogás han evolucionado a la par con la tecnología, lo que ha permitido alcanzar mejores eficiencias en los procesos de remoción de contaminantes adaptando alguna técnica a cada caso particular dependiendo de las características del gas a purificar (flujo, temperatura, composición, presión, etc)<sup>14</sup> y los contaminantes que se deseen retirar (solubilidad, toxicidad, corrosividad, combustibilidad, biodegradabilidad, etc.)<sup>15</sup>. La división de estos métodos puede darse en dos principales tecnologías siendo las físico-químicas y las biológicas<sup>16</sup>. En la figura 4 se muestran los rangos de aplicación de las diferentes tecnologías para remoción de contaminantes orgánicos volátiles en efluentes gaseosos dependiendo del flujo a purificar y la concentración de contaminantes.

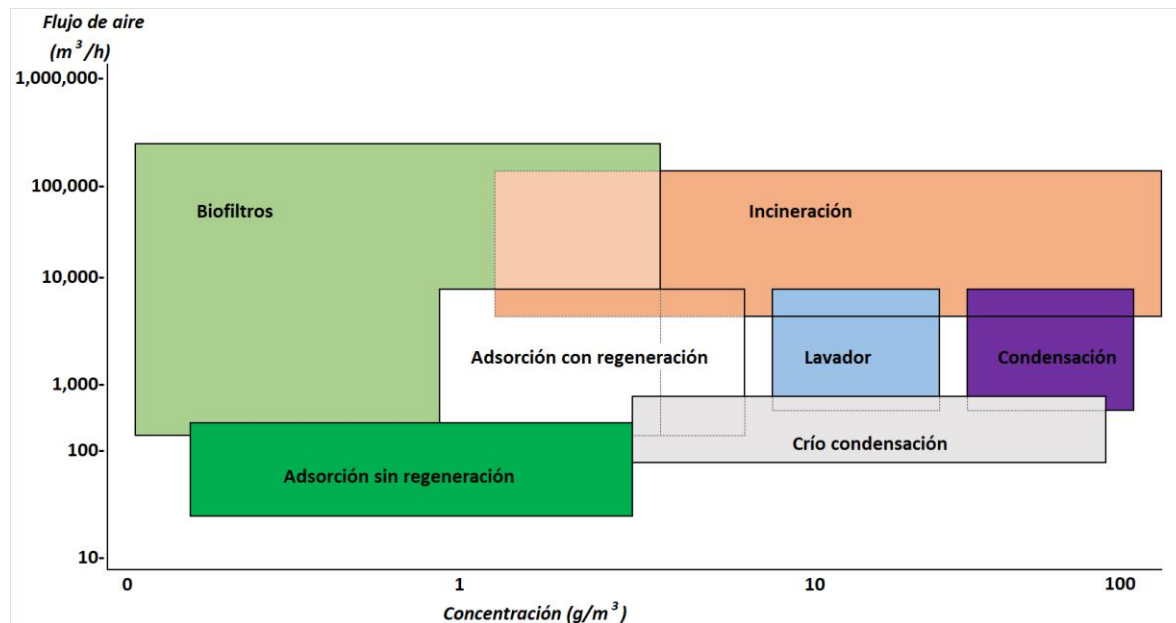


Figura 4. Rangos de aplicación de tecnologías de purificación.

#### 1.5.1 Tecnologías físico-químicas

- Incineración.

En este proceso los contaminantes son oxidados a CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O mediante quemadores con temperaturas que van de los 700 a los 1000°C para la incineración térmica y de 350 a 700 para incineración catalítica, en esta última se utiliza un agente catalizador

normalmente incluidos los óxidos metálicos. El problema con este tratamiento son los gases que se producen ya que para alcanzar las temperaturas se debe tener un flujo de combustible, lo cual aumenta el costo de producción y se producen NO<sub>x</sub>, CO y HCl.

- Condensación.

Este tratamiento funciona con altas concentraciones de contaminante y depende a su vez de las cualidades termodinámicas del gas contaminado. La técnica consiste en realizar el cambio de fase a líquido, lo cual se logra con el enfriado del flujo gaseoso.

- Adsorción.

Para este proceso se utiliza un agente adsorbente generalmente el carbón activado, el cual adsorbe los contaminantes, desventajas de este sistema son los incrementos de costo en la operación ya que el agente adsorbente debe ser sustituido cuando este saturado de contaminante, también se debe considerar que es un tratamiento eficiente ante concentraciones de contaminantes bajas.

- Absorción.

Para este proceso se implementa un agente absorbente, el cual absorbe los contaminantes del gas, esto lo realiza al contacto del gas con el líquido absorbente. En esta técnica se debe considerar la solubilidad del contaminante considerando que generalmente como agente absorbente se emplea el agua, sosa caustica, aminas y algunos hidrocarburos.

- Membranas.

Esta técnica consiste en pasar una corriente, a alta presión, de gas contaminado a través de una membrana que bloquea el paso de los contaminantes purificando así el gas.

### 1.5.2 Tecnologías biológicas

- Biofiltración.

La Biofiltración se define como todo proceso biológico utilizado para el control o tratamiento de compuestos volátiles orgánicos e inorgánicos presentes en la fase gaseosa. En la biofiltración, los microorganismos son los responsables de la remoción biológica de los contaminantes<sup>17</sup>, estos realizan trabajo de forma continua y el sustrato

(gas) que los alimenta es degradado en componentes con mayor simplicidad<sup>141819</sup>.

### 1.6 Tipos de biofiltros.

Hay diferentes tipos de biofiltros, pudiéndose dividir en abiertos y cerrados, de los cuales el enfoque será en los cerrados los que a su vez tiene una subdivisión en tres: biofiltros (BF), biofiltro de lecho escurrido (BLE) y biolavador. Esta clasificación se basa en las condiciones en las que se encuentran los microorganismos en el sistema y del patrón de flujo de la fase acuosa<sup>18</sup>.

#### - Biofiltro.

Los biofiltros (figura 5), constan de un lecho empacado que se conoce como material de soporte y que puede ser sintético u orgánico, que sirve como soporte para los microorganismos y en el caso de los empaques orgánicos como fuente de nutrientes para el crecimiento microbiano. Ejemplos de materiales de empaque utilizados en este tipo de filtros son: rocas porosas, tierra de diatomeas, perlita, tierra, trozos de maderas, diferentes tipos de compostas, residuos orgánicos tales como cáscaras de cacahuate, de arroz o de coco, cortezas de pino, fibra de caña de azúcar, entre otros. El principio de los biofiltros consiste en hacer pasar la corriente gaseosa que contiene al contaminante a través del lecho en donde los contaminantes son degradados por los microorganismos <sup>16</sup>.

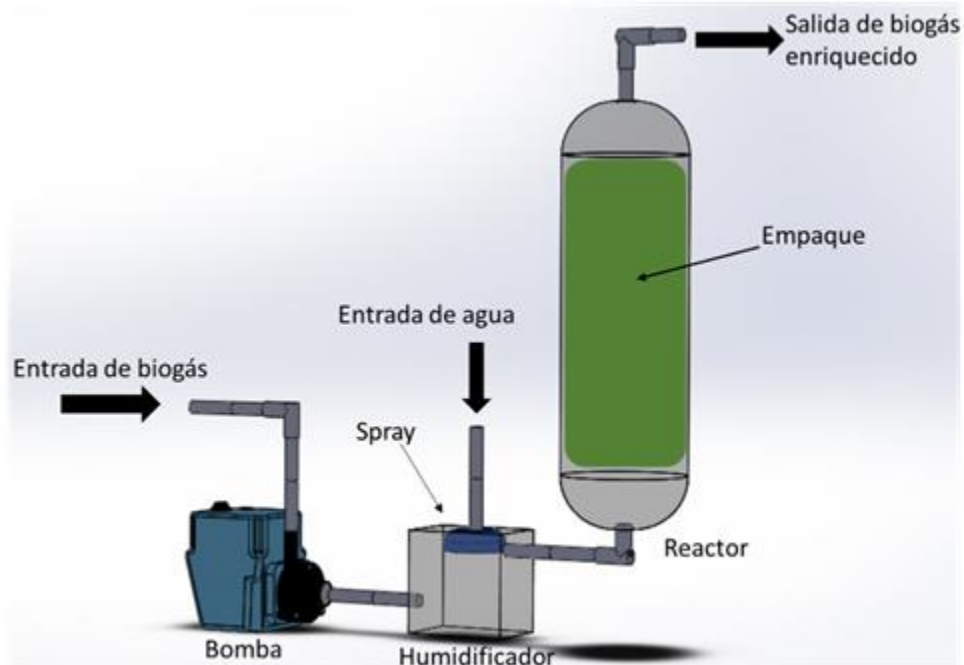


Figura 5. Diagrama de un Biofiltro.

- Biofiltro de lecho escurrido.

En los filtros de escurrimiento los procesos de absorción de gases y regeneración de la fase líquida ocurren simultáneamente (figura 6). Generalmente consisten en columnas empacadas con material que permite el desarrollo de una película microbiana que favorece el aumento de la densidad celular volumétrica. Por lo general el área específica del empaque (área de contacto por unidad de volumen de columna) es relativamente baja (100 a 300 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) y se prefieren volúmenes vacíos altos (90 a 95%) para minimizar la caída de presión en la columna y el riesgo de que el espacio vacío sea obstruido por el crecimiento microbiano. En los filtros de escurrimiento se alcanzan valores de densidad de microorganismos de hasta 60 kg SST m<sup>-3</sup> (sólidos suspendidos totales) lo que incrementa sensiblemente la eficiencia de remoción volumétrica. Estos equipos son muy recomendados cuando los compuestos de oxidación no son volátiles y se acumulan en la fase líquida. Éste es el caso de los sulfatos, nitratos y cloruros, que además de disminuir el pH durante la degradación, son inhibitorios para los microorganismos en concentraciones elevadas <sup>19</sup>.

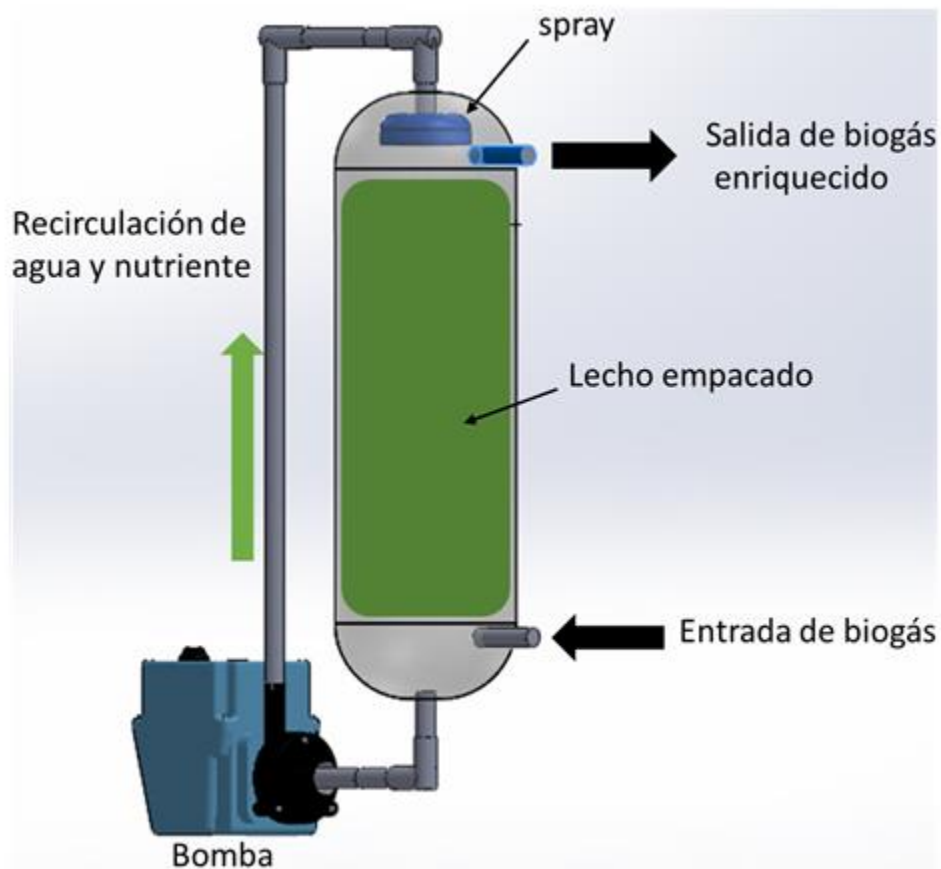


Figura 6. Diagrama de un Biofiltro de lecho escurrido

- Biolavador.

Los biolavadores consisten de un compartimiento en donde se lleva a cabo la absorción y el reactor biológico de regeneración (figura 7). En el compartimiento de absorción los contaminantes se transfieren a un medio acuoso hasta condiciones cercanas a la saturación. El líquido se recircula al reactor biológico en donde se lleva a cabo la oxidación por microorganismos libres o inmovilizados. En casos en los que las concentraciones de contaminante son elevadas, se puede agregar aire no contaminado para completar la oxidación. Una vez reducida la concentración del contaminante en el líquido éste es reciclado al compartimiento de absorción. El líquido contiene nutrientes inorgánicos que sostienen una población microbiana estable. Las densidades celulares son menores que en los filtros de escurrimiento <sup>18</sup>.

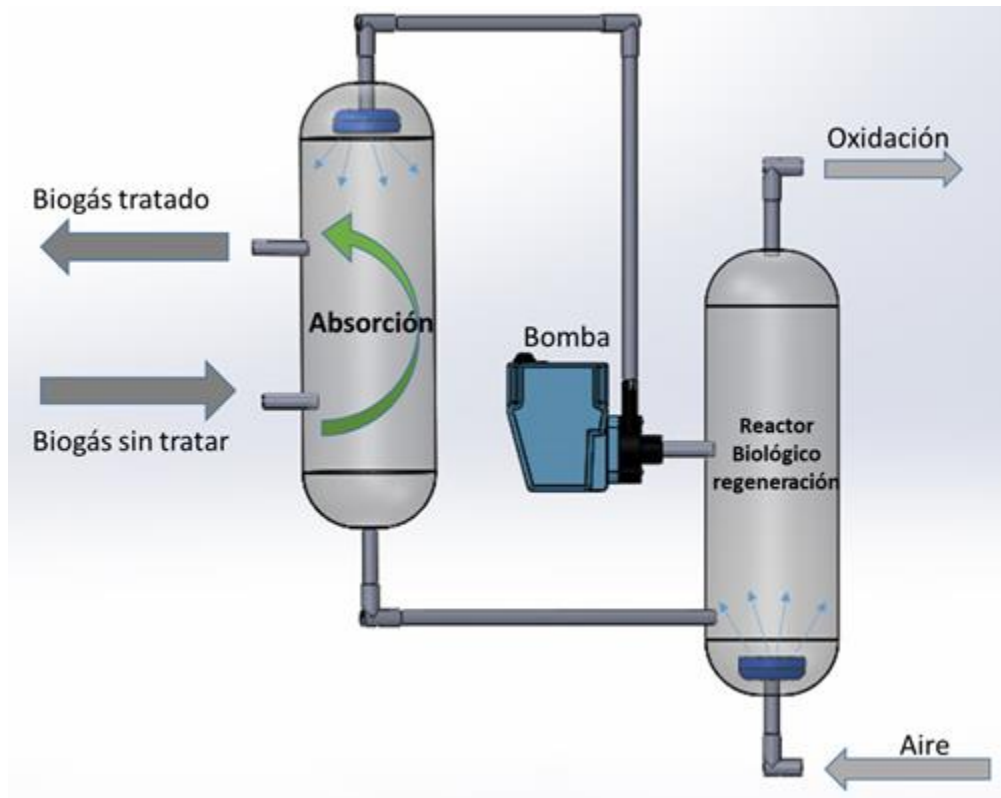


Figura 7. Diagrama de biolavadores.

### 1.7 Opciones de mejora para los sistemas de biofiltro de lecho escurrido

- Empaques.

Una parte importante para mejorar el desempeño de los biofiltros es el material de soporte, ya que dependiendo de sus características puede incrementar la eficiencia de remoción de contaminantes al aumentar el área de contacto entre los microorganismos y



el gas contaminado, reducir las pérdidas de presión, evitar el efecto de taponamiento y mantener un porcentaje de humedad. Los tipos de empaques también han evolucionado, han pasado de material orgánico a material inorgánico para mejorar dichas características, dentro de los materiales orgánicos se encuentra la composta, la turba, derivados de la madera y suelos, lo cual con la evolución de los materiales se ha llegado a usar como soporte canicas, esponja de poliuretano, anillos pall, anillos kaldness, anillos de Copolímero aleatorio de polipropileno, etc<sup>15201618</sup>.

- Variables físicas predominantes.

Los sistemas de biofiltración realizan su proceso con organismos biológicos, los cuales son afectados en su desarrollo y función de remoción de contaminantes por las condiciones del medio en el que se encuentran, se han realizado estudios para determinar las variables que tienen un impacto directo sobre la microbiología, dichos estudios han determinado las variables físicas que promueven el desarrollo y reproducción tales como la temperatura, humedad, pH, oxigenación y la presencia de sustrato para satisfacer las necesidades de nutrición<sup>169</sup>. Por estas razones para el diseño y desarrollo de un sistema de biofiltración se debe tener especial cuidado en las variables que afecten el tipo de microorganismo que se implementa.

- Instrumentación.

Como parte de la evolución de los biofiltros se ha implementado la instrumentación para ayudar a obtener valores puntuales de diferentes variables que se tienen dentro del sistema de biofiltración, lo cual se realiza mediante sensores específicos, dependiendo del estudio a realizar. En la actualidad se tiene un amplio catálogo de sensores para adecuarlos a los requerimientos, en los biofiltros los sensores con mayor implementación según reportes y artículos son los de presión, temperatura, caudal, pH, humedad, nivel y detectores de componentes químicos<sup>211822</sup>.

- Control.

El control de procesos nació de la necesidad de perfeccionar las distintas actividades en las que se requiere mantener una variable de salida de manera estable, sin importar las perturbaciones que se tengan del exterior <sup>18</sup>, es por ello que con la evolución y mejor comprensión de la actividad microbiana dentro del biofiltro se optó por incorporar controles a los sistemas de biofiltración <sup>20</sup>.

La implementación de un control es uno de los pasos para mejorar el proceso de biofiltración ya que un objetivo del control es la optimización de un proceso, con la instrumentación previa necesaria, un buen control aplicado a un biofiltro es capaz de incrementar la eficiencia<sup>23</sup>. Los tipos de control básico son los ON-OFF, proporcional (P), proporcional integral (PI), proporcional derivativo (PD) y proporcional integral derivativo (PID), teniendo cada uno su tiempo para alcanzar el estado estable y su variación con respecto al punto en que se debe mantener una variable, a este punto se le conoce como set point. Cada sistema de control tiene su complejidad siendo el más sencillo un control ON-OFF el de mayor complejidad un PID.

## Capítulo II: Antecedentes.

### 2.1 antecedentes

Los primeros reportes del uso de los sistemas de biofiltración datan de 1923 y se utilizaron en la depuración del aire contaminado por ácido sulfhídrico procedente de una depuradora de agua. Éstos fueron sistemas abiertos en los que se empleaba suelo poroso como soporte, se hacían huecos en el suelo y se colocaba un sistema de tubos perforados en la base que dejaban pasar aire a través del suelo<sup>18</sup>. La técnica fue evolucionando hasta que a partir de la década de los 70 se pudieron aplicar para cargas de contaminante con mayores concentraciones. Fue en la década de los 80 que el estudio y conocimiento de la técnica tomo fuerza y se desarrollaron sistemas cerrados, algunos con sistemas de control computarizados y empleando medios filtrantes inorgánicos novedosos, tales como el carbón activado granular, el poliestireno y las cerámicas. A mediados de esa década se publican también diferentes modelos matemáticos que permiten optimizar y comprender mejor los sistemas de biofiltración. Posteriormente, a nivel laboratorio, el estudio de la biofiltración permitió hacer de ésta una tecnología versátil para el control de diversos compuestos volátiles, como son los compuestos halogenados, no halogenados, alifáticos, aromáticos y compuestos que contienen azufre<sup>9</sup>.

Un factor que ha ayudado en el aumento de la eficiencia de la técnica de biofiltración en los biofiltros cerrados es la adecuación de sistemas de control, pudiendo así llevar a cabo estudios para determinar las condiciones adecuadas para realizar una biofiltración con mayor capacidad para la eliminación de los componentes no deseados y poder determinar los factores físicos que impactan en ellos<sup>22</sup>.

En la actualidad existen diversos estudios con relación a los biofiltros, en los cuales se investigó como mejorar el proceso cambiando el material de relleno (lecho empacado), introduciendo algún compuesto adicional como carbón activado, nitrógeno, partículas de vidrio o compuestos ricos en carbonato de calcio. Se han determinado los factores físicos que afectan la eficiencia de un biofiltro, entre estos se encuentra la temperatura, la presión, humedad, pH, oxigenación, concentración y tiempo de residencia dentro del biofiltro. Se han determinado parámetros para algunas variables como la temperatura entre 25° y 50°C, pH>3 y humedad en el lecho empacado oscilando en el 50%. Realizando una revisión bibliográfica con respecto a los sistemas de control que tienen los biofiltros, no se encuentra una investigación directa al control de los biofiltros, sin embargo, se han usado por separado controles de: temperatura, presión, concentración de compuestos y pH <sup>242517</sup>.

## **CAPITULO III: Justificación y objetivos.**

### **3.1 JUSTIFICACIÓN**

Los biofiltros han demostrado ser una tecnología eficiente para el tratamiento de corrientes gaseosas con impurezas. La manipulación de las variables físicas que afectan el proceso implica el uso de control aplicado, con lo que se puede lograr una mejora en la transferencia de masa en las fases continuas, mejorando las condiciones del medio para el crecimiento y desempeño de los microorganismos, logrando un aumento en la remoción de los contaminantes. En este trabajo se propone implementar el uso de distintas metodologías de control aplicado para lograr la mejora del proceso de biofiltración.

### **3.2 OBJETIVO GENERAL**

Mejora la capacidad de eliminación de contaminantes con el uso de un biofiltro de lecho escurrido, mejorando la transferencia de masa en las fases continuas (liquido-gas) aplicando control sobre las variables de humedad, pH y temperatura.

#### **3.2.1 OBJETIVOS PARTICULARES**

- Diseñar y construir un biofiltro de lecho escurrido con control sobre las variables de temperatura, pH y humedad.
- Realizar pruebas para determinar las mejores condiciones de temperatura, pH y humedad para aumentar la transferencia de masa entre líquido y gas.
- Implementar diferentes tipos de empaques.
- Determinar coeficiente de transferencia de masa
- Realizar pruebas para validar la optimización

## CAPITULO IV: Materiales y métodos

### 4.1 sistema experimental.

El sistema experimental consiste en una columna de 55.5 cm de altura de los cuales 26.5 cm son del lecho empacado, la columna está construida en PVC transparente con un diámetro interno de 5.08 cm. La circulación de la fase líquido y gas se realiza a contra corriente para evitar problemas de caídas de la humedad. En la figura 8 se muestra una vista de manera transversal del biofiltro y en la tabla 1 se muestran los componentes.

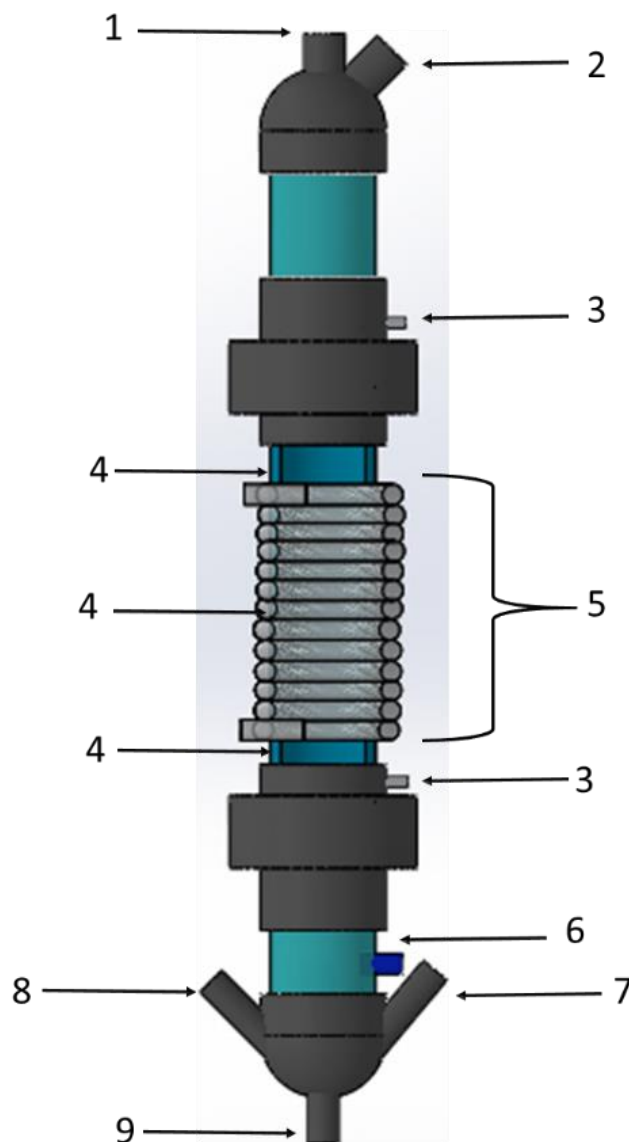


Figura 8. Sistema experimental de biofiltración.

*Tabla 1. Componentes del biofiltro.*

1	Entrada de fluido (nutriente y humedad)
2	Salida de biogás enriquecido
3	Sensor de temperatura
4	Sensor de humedad
5	Enchafetado para control de temperatura
6	Entrada de biogás
7	Puerto para sonda para pH
8	Puerto de sonda para Oxígeno disuelto
9	Salida de fluido

#### Volúmenes del biofiltro

- Vacío

El biofiltro en vacío tiene un volumen total interno de  $1090 \text{ cm}^3$ , siendo  $300 \text{ cm}^3$  del reservorio inferior,  $550 \text{ cm}^3$  del parte central en donde se encontrará el empaque y  $240 \text{ cm}^3$  en la parte superior.

- Anillos pall

El espacio del lecho se rellenó con anillos pall a lo que se determinó el volumen de  $500 \text{ cm}^3$  espacio libre y  $50 \text{ cm}^3$  ocupados por los anillos.

- Espuma de poliuretano

El espacio del lecho se rellenó con cubos de espuma de poliuretano y se determinó el espacio libre de  $530 \text{ cm}^3$  y  $20 \text{ cm}^3$  ocupado por la esponja de poliuretano.

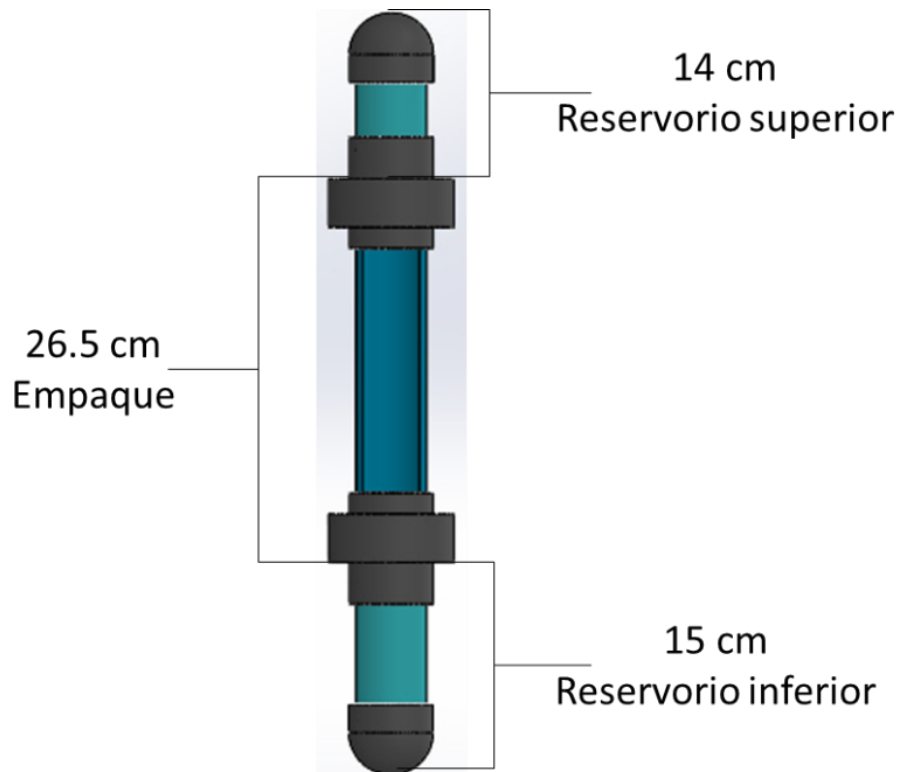


Figura 9. Diagrama de las partes y dimensiones del biofiltro.

#### 4.2 control aplicado al sistema.

Para este trabajo se realizan dos tipos de control multivariable, un ON-OFF y un PID. El control se aplica a lazo cerrado en las variables ph, temperatura y humedad, ambos controles se realizaron con el software DAQFactory que funciona como sistema SCADA (por sus siglas en ingles supervisión control y adquisición de datos). Para el caso del control ON-OFF se realiza un algoritmo dentro del software el cual fija un punto de referencia (set point) y el sistema encenderá y apagará los actuadores para mantener la variable a controlar dentro del rango de tolerancia.

$$C_{PID}(S) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right) \quad (1)$$

Para el control PID se tiene una librería precargada en DAQFactory lo que facilita el diseño, dicha librería realiza un control PID dejando al usuario establecer las constantes  $K_p$ ,  $T_d$  y  $T_i$ . El sistema de control de la librería responde a la ecuación teórica para control

PID descrita en la ecuación 1, así mismo, los controles se realizarán bajo el diagrama de bloques mostrado en la figura 10.

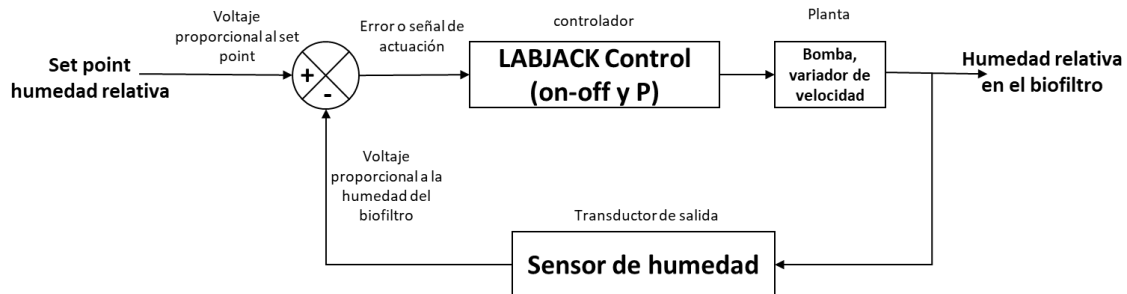


Figura 10. Diagrama de control.

#### 4.3 instrumentación del sistema.

El sistema cuenta con dos sensores de temperatura (LM35, Texas instruments, USA), sensor de humedad (china), sensor de pH (alpha PH 190EUTECH INSTRUMENTS, USA), sensor de oxígeno disuelto (alpha-DO2000PP, EUTECH INSTRUMENTS, USA) y un analizador de gas (ultram, Siemens, Alemania) para analizar la composición del gas a la entrada y salida del biofiltro. Así mismo, cuenta con actuadores los cuales son: bomba de agua (little giant, Franklin Electric, USA) (fasco, 1-AA-MD), resistencia de inmersión (china) y compresor (CRAFTMAN, USA). Con esta instrumentación el sistema tiene lo necesario para aplicar el control a las variables consideradas para este estudio.

#### 4.4 interfaz.

El dispositivo designado para realizar el control, recolectar y almacenar los datos que sean captados con la instrumentación es la tarjeta de adquisición de datos marca LabJack modelo U3-LV (Colorado, USA) junto con el complemento Terminal Board CB15 (LabJack Colorado, USA). Conectado a una computadora (hP Compaq dc7800p, USA), la cual se encarga de desplegar el HMI (interfaz humano-maquina) mediante el software DAQFactory (Azoetech, Oregon, USA).

#### 4.5 pruebas.

Para la validación de la mejora se realizan pruebas abióticas, es decir pruebas sin microorganismo presentes, se realizaron de la siguiente manera:



- Se coloca el empaque dentro del biofiltro.
- Se activa la circulación del gas y del líquido dentro del biofiltro.
- Se purga el oxígeno que contiene el biofiltro (con Nitrógeno se desplaza el oxígeno)
- Se realiza lectura de datos del oxígeno contenido.
- Se cambia la circulación de nitrógeno por una corriente controlada de aire.
- Se procesan los datos para determinar el coeficiente de transferencia de masa.
- Se repite el procedimiento con el control activo y variando los empaques.

## CAPITULO V: Resultados

### 5.1 Interfaz Humano Maquina (HMI)

Un resultado medular del proyecto se basa en el interfaz humano máquina que entra dentro de los sistemas SCADA, fue diseñado de manera agradable al usuario para poder monitorear y controlar el proceso de manera entendible. En la figura 11 se muestra en HMI para el control ON-OFF y en la figura 12 el HMI para el control PID.



Figura 11 HMI del control ON-OFF

El HMI del control ON-OFF cuenta con 5 botones para activar las rutinas con las que se cuenta las cuales de izquierda a derecha en la figura 11 son: rutina de control de humedad (figura 14), rutina de control de temperatura (figura 13), una rutina para activar la circulación de gas en el sistema, rutina de adquisición de datos para almacenar un archivo en el ordenador con los valores de las variables que se miden en los canales creados y por ultimo un botón de paro de emergencia para cualquier situación fuera de control o falla del sistema físico, este último cuenta con un indicador en la parte inferior de los botones y superior a la gráfica el cual cuando es activado el paro de emergencia aparece en rojo y cuando no está activo no se visualiza en la HMI. En la gráfica mostrada en la figura 14 mostrada como el punto 3 se visualiza la variación de temperatura y las

humedades 1, 2 y 3 siendo 1 la humedad inferior registrada en el empaque, 2 la humedad a una altura media del empaque y 3 en la parte superior del empaque. Así mismo se muestra el color con el cual se muestra cada variable en la gráfica y de lado derecho a ella se muestra de manera numérica la humedad promedio y temperatura. En la tabla 2 se realiza una relación de cada número en la figura 14 con el componente que muestra.

*Tabla 2. Descripción de interfaz ON-OFF*

<b>Numero</b>	<b>Componente</b>
1	Botones para activar secuencias( control de humedad, control de temperatura, flujo de gas, adquisición de datos y paro de emergencia)
2	Indicador de activación de paro de emergencia
3	Grafica para humedad y temperatura respectivamente
4	Canales creados
5	Secuencias o rutinas creadas

En la figura 12 se muestra el interfaz humano maquina creado para utilizar el control PID, el interfaz consta de 4 indicadores angulares, 5 botones y 3 leds indicadores. En los indicadores angulares se muestra la carga eléctrica (en porcentaje de 0 a 100) que es proporcionada a la resistencia y a la bomba respectivamente, en los otros 2 se muestra la temperatura en un rango de 0 a 50 °C y la humedad en porcentaje de 0 a 100. El botón de flujo de gas se representa en forma de válvula la cual al presionarse y abrir la válvula cambia de color (rojo indica cerrado y verde abierta), los botones para activar el control de humedad, temperatura y la secuencia de adquisición de datos se muestran activos cuando el led a su lado derecho se ilumina y desactivo cuando el led se apaga. El paro de emergencia al estar activo muestra un mensaje igual al que tiene el interfaz del control ON-OFF figura 11 y al estar inactivo no manda mensaje como se ve en la figura 12. En la tabla 3 se muestra la descripción de cada componente mostrado en relación a la figura 12.

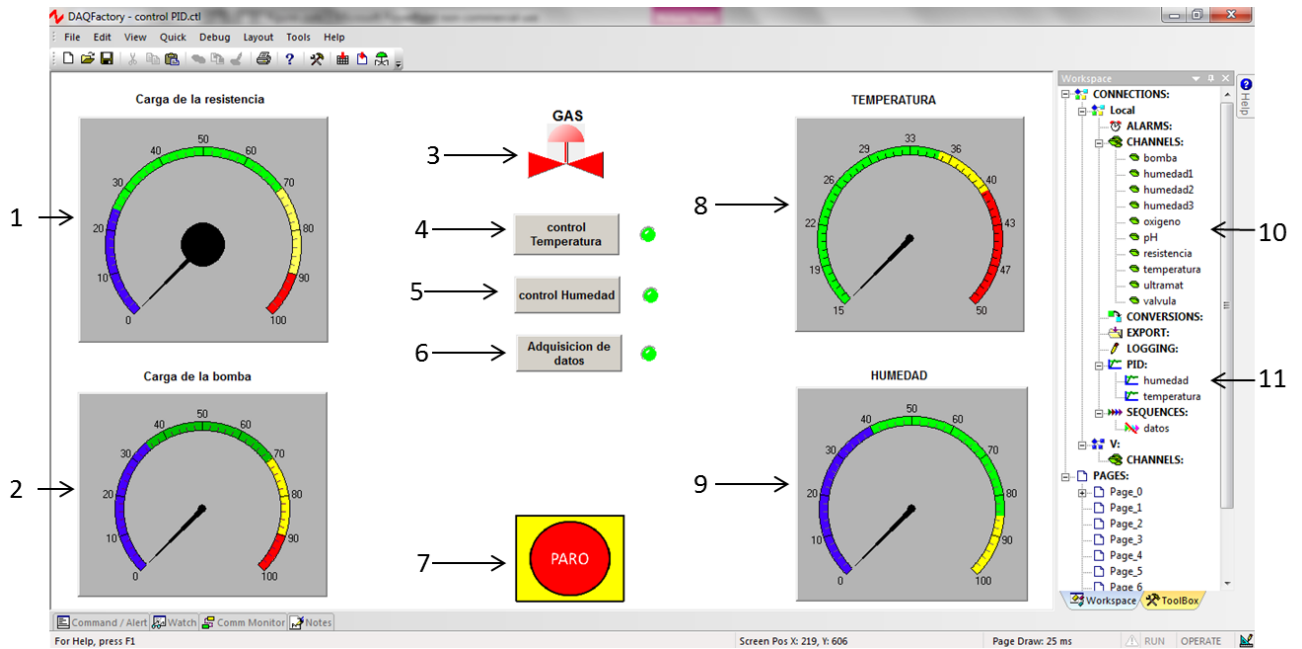


Figura 12. HMI del control PID

Tabla 3. Descripción de interfaz PID

Numero	Componente
1	Indicador de carga eléctrica a resistencia
2	Indicador de carga eléctrica a la bomba
3	Botón para activar válvula de paso de gas
4	Botón para activar control de temperatura
5	Botón para activar control de humedad
6	Botón para activar secuencia de adquisición de datos
7	Botón de paro de emergencia
8	Indicador de temperatura
9	Indicador de humedad
10	Canales creados
11	secuencias

## 5.2 control ON-OFF

El control ON-OFF se realiza bajo la sentencia condicional “si (expresión matemática) entonces (acciones a tomar)”, el cual se introduce al software mediante lenguaje

basado en C. este control se aplica para la temperatura y para la humedad, en la figura13 y 14 se muestra el código desarrollado para el control de temperatura y de humedad respectivamente.

```

1 while (1) //CODIGO DE CONTORL ON-OFF PARA TEMPERATURA MEST2018
2 // mientras el botol asignado se active el ciclo se realiza
3 if (sensort[0] < 40) //si el sensor de temperatura (sensort) es menor que (t)=40(en este ejemplo) entonces
4   calentador = 1 // el calentador se activa
5 // si la linea 3 no se cumple entonces
6 else // el calentador se desactiva
7   calentador = 0 // se da una espera de 5 segundos y el codigo sigue
8   delay(5) // termina la funcion 'if' y regresa a la linea 3
9 endif
10 endwhile // en la linea 3 (t) es el valor que se puede modificar para ajustar el parametro de temperatura

```

Figura 13. Código para control ON-OFF de temperatura

```

1 while (1) //CODIGO DE CONTORL ON-OFF PARA HUMEDAD MEST2018
2 // mientras el botol asignado se active el ciclo se realiza
3 if ((humedad1(0)+humedad2(0)+humedad3(0))/3 < 50) //si el promedio de los sensores de humedad es menor que (h) entonces
4   bomba = 1 // la bomba se activa
5 // si la linea 3 no se cumple entonces
6 else // la bomba se desactiva
7   bomba = 0 // termina la funcion 'if' y regresa a la linea 3
8 endif
9 endwhile // en la linea 3 (h) es el valor que se puede modificar para ajustar el parametro de humedad

```

Figura 14. Código para control ON-OFF de humedad

### 5.3 control PID

El control PID se realiza mediante una librería, la cual realiza el control mediante los coeficientes de  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ , los cuales el usuario puede modificar para ajustar a los requerimientos del sistema. En la figura 15 y 16 de muestra el modo de operar de la librería PID en este caso utilizado para el control de humedad y el de temperatura respectivamente, así como los coeficientes que se están implementando y pueden ser modificados a interés del usuario para corregir el comportamiento físico del sistema.

Tabla 4. Descripción de la librería PID

Numero	Descripción
1	Variable de proceso
2	Set point
3	Canal de salida de la señal
4	Ganancia proporcional
5	Ganancia integral
6	Ganancia derivativa

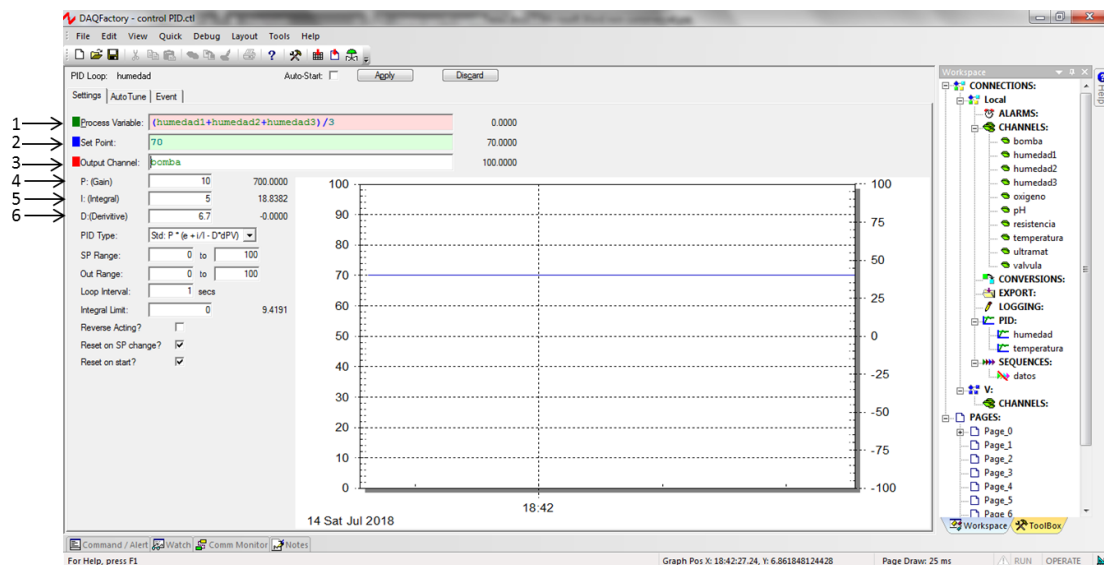


Figura 15. Librería PID DAQFactory utilizado para humedad

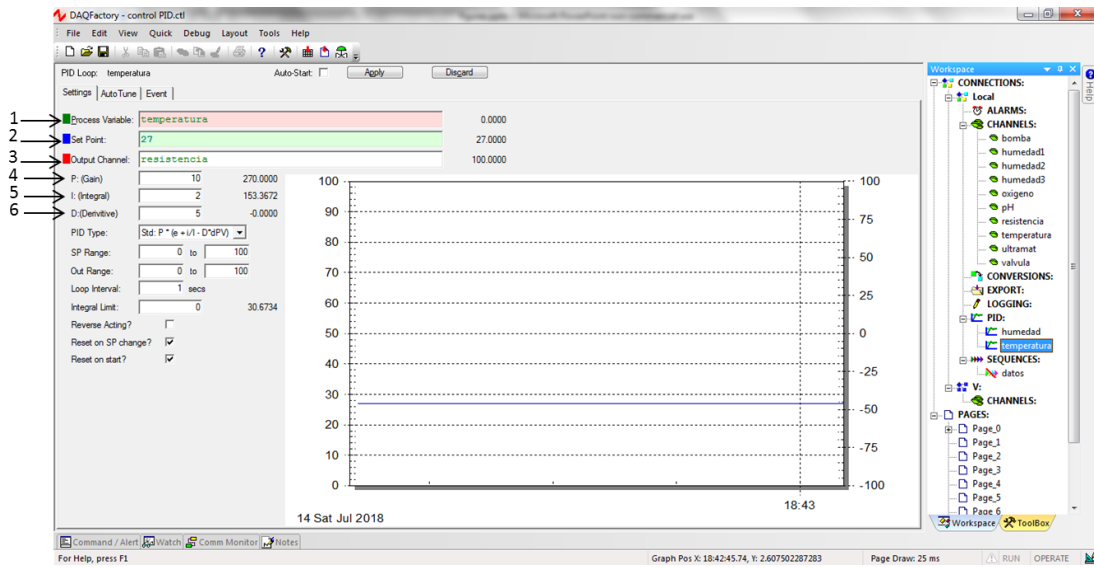


Figura 16. Librería PID DAQFactory utilizado para humedad

En los canales creados se asignan las entradas y salidas del sistema, los cuales se utilizan para definir la variable de proceso y el canal de salida de la señal para realizar el control.

## **CONCLUSION**

El control aplicado desarrollado en este proyecto puede ser adaptado fácilmente a cualquier sistema de biofiltración de lecho escurrido con la finalidad de mantener la humedad y temperatura en los mejores parámetros asignados por el usuario y dejarlo funcionando de manera autónoma por tiempo indefinido, así mismo la secuencia de adquisición de datos da la posibilidad de registrar todos los datos a lo largo del tiempo que se deje en operación el equipo y así poder realizar un análisis de los eventos ocurridos durante la usencia del usuario. Este es el precedente para realizar pruebas y poder definir los parámetros que mejoren el proceso de cada sistema en el cual se aplique el control desarrollado en el presente proyecto.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Deublein D, Steinhauser A. *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction.*; 2011.
2. Alemán-Nava GS, Casiano-Flores VH, Cárdenas-Chávez DL, et al. Renewable energy research progress in Mexico: A review. *Renew Sustain Energy Rev.* 2014;32:140-153. doi:10.1016/j.rser.2014.01.004.
3. Valle-Pereña J, Ortega-Navarro H. Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026. *Secr Energía.* 2012:1-156. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
4. Impending T, Oil W, Oil B, Peaked WO. The Future of Oil and Hubbert ' s Peak Oil Theory. 2014:1-21.
5. Salinas Callejas E, Gasca Quezada V. Los biocombustibles. *El Cotid.* 2009;(157):75-82. <http://www.redalyc.org/pdf/325/32512739009.pdf>.
6. Callejas ES, Quezada VG. Los biocombustibles. *El Cotid.* 2009;24:75-82. doi:10.4067/S0718-09502009000100006.
7. Álvarez C. Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. *Econ Inf.* 2009;(359):63-89.
8. ivan corona zuñiga. Biodigestores ok. 2007:1-69.
9. Moreno MT. *Manual de Biogás.*; 2011.
10. Hoffman JAYR, Im J, Rundell KW, et al. Uso de biogás para ciclo combinado. *Growth (Lakeland).* 2007;1(30):41-50. doi:10.1249/01.MSS.0000093613.30362.DF.
11. Cepero L, Savran V, Blanco D, Piñón MRD, Suarez J, Palacios A. Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores. *Pastos y Forrajes.* 2012;35(2):219-226.
12. Petersson A, Wellinger A. Biogas upgrading technologies—developments and innovations. *IEA Bioenergy.* 2009:20.
13. Para G, Implementación LA. U NIDAD DE P LANEACIÓN M INERO E NERGÉTICA ENERGÍAS ALTERNATIVAS Y DIFUSIÓN Documento ANC-0603-19-01. 2003:1-47.
14. Morero B, Gropelli E, Campanella E a. Revisión de las principales tecnologías de purificación de biogás. *Cienc y Tecnol.* 2010;10:187-202.
15. Cuauht W, Asesor BB, Moiseev SR. Ciencias básicas e ingeniería. 2013.
16. Bolívar F. *Fundamentos Y Casos Exitosos de La Biotecnología Moderna.*; 2004.
17. Dorado AD. *Purificación Y Usos Del Biogás Purification.*; 2017.
18. Villén L. Diseño de un biofiltro. 1992;3(2):257-259. doi:10.1007/BF01397776.
19. Cárdenas B, Revah S, Hernández J. *Tratamiento Biológico de Compuestos*

*Orgánicos Volátiles de Fuentes Fijas.*; 2003.

20. Vergara A, Lara L, Alarcón N, Aroca G. Biofiltración de aire contaminado con hidrocarburos volátiles. *XY Congr Ing Sanit y Ambient AIDIS*. 2003:2-3.
21. Pérez FM. *Diseño de Un Sistema Biológico Para La Eliminación de Acetona Y Estireno En Aire Procedente de Una Industria Especializada En Fabricación de Equipos En Poliéster Reforzado Con Fibra de Vidrio.*; 2012.
22. Norman S. Nise. *Sistemas de Control Para Ingeniería.*; 2013.
23. Liu X, Wang H, Long F, Qi L, Fan H. Bioresource Technology Optimizing and real-time control of biofilm formation , growth and renewal in denitrifying biofilter. 2016;209:326-332. doi:10.1016/j.biortech.2016.02.095.
24. Stahler D, Ladner S, Jackson H. Environmental Protection. *Environ Prot*. 2008;28(February).
25. Valderrama JO, ed. *Informacion Tecnologica*. 75th ed.; 2002.

## ANEXOS A

### Pruebas abióticas

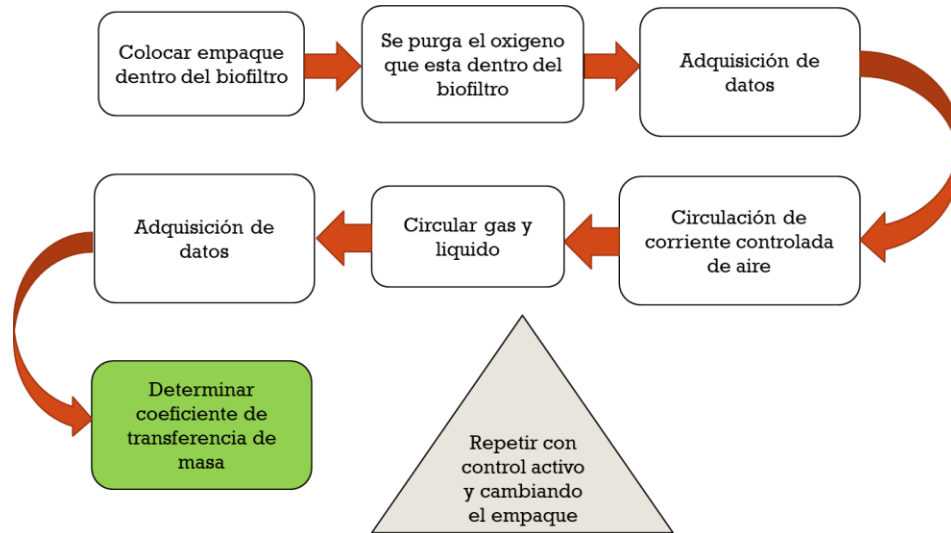


Figura 17. Diagrama de proceso de pruebas abióticas.

Proceso del proyecto

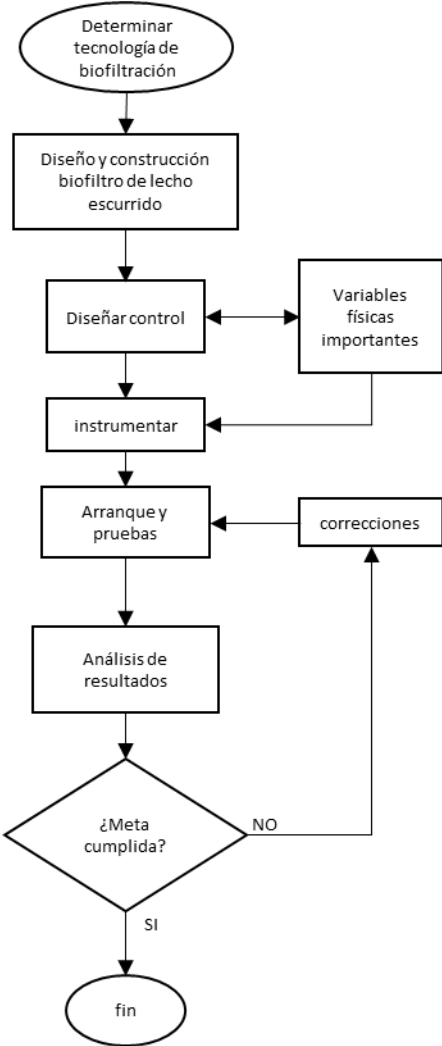


Figura 18. Diagrama de proceso del proyecto.