



TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE ECATEPEC

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA,
MECATRÓNICA E INDUSTRIAL**

**MAESTRÍA EN EFICIENCIA ENERGÉTICA Y
ENERGÍAS RENOVABLES**

**OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE
HUMIDIFICACIÓN DE UN BIOFILTRO
DE LECHO ESCURRIDO**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN EFICIENCIA ENERGÉTICA Y
ENERGÍAS RENOVABLES**

PRESENTA:

ING. ALAN GARDUÑO MONTERO

DIRECTOR:

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

2020

TECNOLOGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE ECATEPEC POSGRADO EN EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES

CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS

En el Estado de México, el día 03 del mes de diciembre del año 2020, el que suscribe Alan Garduño Montero, alumno del programa Maestría en Eficiencia Energética y Energías Renovables con número de matrícula 201821389 adscrito a la División de ingeniería Mecatrónica e Industrial, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección del M. en C. Wenceslao C. Bonilla Blancas y ceden los derechos del trabajo titulado: **“Optimización del sistema de humidificación de un biofiltro de lecho escurrido”** al Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, graficas o datos del trabajo, sin el permiso expreso del autor y del director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: alangm.ingmec@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citarla fuente del mismo



Alan Garduño Montero



GOBIERNO DEL
ESTADO DE MÉXICO

DICTAMEN DE LIBERACIÓN DE PROYECTO
DE TESIS

FO-TESE-DA-90

TIT05-ANEXO PM



DIRECCIÓN ACADÉMICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECATRÓNICA E INDUSTRIAL
MAESTRÍA EN EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES

Fecha: 26 DE OCTUBRE DE 2020

Datos generales

Nombre del alumno:

GARDUÑO

MONTERO

ALAN

Apellido paterno

Apellido materno

Nombres (s)

Matrícula: 201821389

PROYECTO: OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE HUMIDIFICACIÓN DE UN BIOFILTRO DE LECHO ESCURRIDO

DIRECTOR: M. EN C. WENCESLAO CUAUHTÉMOC BONILLA BLANCAS

Dictamen:

Con base en el registro No. POSG-MPEER/DIMMI/2020/03 correspondiente al periodo escolar 2020-2, asignado al proyecto de tesis OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE HUMIDIFICACIÓN DE UN BIOFILTRO DE LECHO ESCURRIDO y presentado por el alumno referido; y después de haber sido desarrolladas las actividades requeridas, el Comité Tutorial, conformado por los integrantes que firman al calce, ha determinado que SI (X) NO () han sido cubiertos en su totalidad los requisitos que permitan a esta División Académica liberar al alumno de los trámites académicos para tal efecto e iniciar el trámite de obtención de grado de maestría en la Unidad de Registro y Certificación de este Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

Observaciones:

NINGUNA

Comité tutorial

M. EN C. WENCESLAO CUAUHTÉMOC BONILLA BLANCAS

DR. ARMANDO GONZÁLEZ SÁNCHEZ

DR. MARTÍN SALAZAR PEREYRA

M. EN C. JOSÉ CARLOS ALEJANDRO AGUILAR ANASTACIO



Elaboró: DR. AGUSTÍN MORA ORTEGA Coordinador de Posgrado	Revisó y Visó Bueno: M. EN C. HÉCTOR RODRÍGUEZ CARMONA Jefe de División	Enterado: M. EN C. ARMANDO ALCALDE MARTÍNEZ Director Académico
--------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------

DEDICO ESTE TRABAJO...

A mis padres, **Rogelio Garduño Patlán** y **Nancy Montero Álvarez**, por todo su apoyo y amor. *Las palabras nunca serán suficientes para expresarles todo el amor y la gratitud que siento por ustedes.*

A **Jonathan Esaú Garduño Montero** y **Rogelio Garduño Montero**. Por siempre estar ahí en cada momento de mi vida.

A **Delfino Montero Ramírez** y **Rosa María Álvarez Lara** porque aún en la distancia son, han sido y seguirán siendo inspiración y aliento para mí.

A **Damaris Vianey Castillo Cerecedo**, por tu amor, apoyo, lealtad y constancia. Por las cosas maravillosas que hemos vivido y por las cosas hermosas que vendrán.

A **David Muñoz**, **Ivon Huerta**, **Allain Aguirre**, **Carlos Guzmán**, **Román Suárez**, **Ana García** y **Juan Mares**, por su recepción tan amistosa, por los buenos momentos, así como el apoyo y la ayuda brindada.

AGRADECIMIENTOS

A Wenceslao Bonilla por su constante dirección, apoyo y paciencia

A los miembros del comité evaluador:

M. en C. Wenceslao C. Bonilla Blancas

M. en C. José Carlos A. Aguilar Anastasio

Dr. Martín Salazar Pereyra

Dr. Armando Gonzáles Sánchez

Al Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec por la contribución a mi formación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico otorgado para la realización de este trabajo.

RESUMEN

En el presente trabajo se reporta el diseño y la implementación de un sistema de sensores para la medición de la humedad en el lecho de un biofiltro de lecho escurrido con espuma de poliuretano (EP) como medio de soporte. Las mediciones obtenidas a partir de los sensores fueron usadas a su vez para la implementación de estrategias discretas de control que permitieran mantener la humedad del lecho en el rango de entre 70 y 90%.

En una primera etapa del trabajo se diseñó el conjunto de sensores empleados para la determinación de la humedad del lecho. También se implementaron sensores para la medición de la humedad relativa de la corriente de aire a la entrada y a la salida para la determinación de arrastre de agua en función de la diferencia de humedades. Se llevaron pruebas de desecado con una corriente de aire a la entrada de 1.7 L/min para determinar el tiempo promedio en el cual un lecho completamente saturado pierde todo el medio acuoso retenido. En una segunda etapa se lleva a cabo un estudio con un cambio en la configuración del aire a la entrada, se implementa una etapa de prehumidificación para determinar el tiempo promedio de la pérdida del medio acuoso retenido para una corriente de aire cercana a las condiciones de saturación.

Para el monitoreo de las variables instrumentadas se empleó un programa en un ambiente virtual soportado en LabVIEW con el propósito de mantener el sistema en la condición de humedad deseada, se implementó un sistema por estrategias de control para las acciones discretas de la bomba que suministra el medio acuoso al lecho del biofiltro. La contribución principal del presente trabajo es la determinación y el control de la humedad del lecho en condiciones dinámicas para una obtener una adecuación de las necesidades de la biopelícula y la mejora en el proceso global de eliminación de contaminantes.

NOMENCLATURA

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

H₂S: Sulfuro de hidrógeno

COV: Compuesto Orgánico Volátil

BLE: Biofiltro de Lecho Ecurrido

HAP: Contaminantes Peligrosos del Aire (Hazardous Air Pollutants)

EP: Espuma de poliuretano

PLC: Controlador Lógico Programable (Programmable Logic Controller)

$e(t)$: Error del sistema en el dominio del tiempo

θ_i : Valor de consigna o valor deseado de determinada variable

θ_0 : Valor real medido de la variable objetivo del sistema

$u(t)$: Entrada en el dominio del tiempo

$y(t)$: Salida o respuesta en el dominio del tiempo

TDR: Reflectometría en el Dominio del Tiempo (Time Domain Reflectometry)

C_{TOL}: Concentración de Tolueno (ppm)

P_{ATM}: Presión Atmosférica (kPa)

η_g : Ratio del volumen de la fase gaseosa y el volumen representativo elemental

V_g : Velocidad superficial

j_b : Consumo biológico de determinado contaminante objetivo

F_a^z : Flujo másico del aire

ρ_a^* : Densidad del aire

ρ_c : Densidad del material de empaque

j_v : Tasa de evaporación del agua por unidad de volumen del reactor

W: Contenido de agua en una base de peso seco

Re: Tasa de evaporación de agua del lecho

Rer: Tasa de producción de agua

Rv: Tasa de agua transferida a la fase gaseosa

HR_a: Humedad relativa del aire

EC: Eficiencia de remoción

V_{in}: Voltaje de entrada (v)

V_{out} : Voltaje de salida (v)

$C_{biofiltro}$: Capacitancia del biofiltro (μF)

ϵ_{BF} : Constante dieléctrica del medio filtrante

v : Fracción volumétrica de cada elemento del i -ésimo elemento del lecho del biofiltro

$H(\%)$: Humedad porcentual del lecho de espuma de poliuretano

V_M : Valor de conductividad eléctrica medido por el sensor del lecho (Valor digital)

$V_{m\acute{a}x}$: Valor máximo de conductividad eléctrica obtenido en condiciones dinámicas (Valor digital)

VRH : Valor gravimétrico de retención hidráulica (g)

MRH : Máximo valor gravimétrico de Retención Hidráulica (g)

$MR_{m\acute{a}x}$: Máxima cantidad de medio acuoso retenido en el lecho (L)

N : Número total de piezas de espuma de poliuretano

V_{EP} : Volumen individual de cada pieza de espuma de poliuretano (L)

ϵ : Fracción hueca de la espuma de poliuretano

k_n : coeficiente de escurrimiento por cada bloque

w_l : Tasa de medio acuoso arrastrado por la corriente gaseosa (g/min)

h_{out} : Humedad absoluta de la corriente gaseosa a la salida del biofiltro (g/L)

h_{in} : Humedad absoluta de la corriente gaseosa a la entrada del biofiltro (g/L)

Q_g : Caudal volumétrico de la corriente gaseosa a la entrada del biofiltro (L/min)

$MR_{m\acute{a}x_{exp}}$: Máxima cantidad de medio acuoso retenido en el lecho obtenido de forma experimental (L)

ρ_w : Densidad del medio acuoso (g/L)

HR_L : Humedad relativa del lecho

A_T : Área de transferencia total de bloque a bloque (m^2)

CONTENIDO

RESUMEN	4
NOMENCLATURA	4
ÍNDICE DE FIGURAS	9
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 La energía	11
1.2 Contaminación ambiental	11
1.3 Fuentes renovables de energía	13
1.3.1 Biocombustibles	13
1.3.2 Biogás	19
1.3.3 Purificación de biogás	21
1.3.4 Humedad de la biopelícula	35
1.4 Sistemas de control	38
1.4.1 Retroalimentación	39
1.4.2 Enfoques de control clásico	43
1.5 Control inteligente	46
1.5.1 Sistemas de control basados en reglas	47
1.5.2 Cálculo proposicional.....	47
1.5.3 Sintaxis de la lógica proposicional	49
1.5.4 Semántica de la lógica proposicional	50
1.5.5 Consecuencia lógica	51
2. ANTECEDENTES	51
3. JUSTIFICACIÓN	59
4. OBJETIVO GENERAL	59
5. OBJETIVOS PARTICULARES	59
6. MATERIALES Y MÉTODOS	59
6.1 Sistema experimental	59

6.1.1	Biofiltro de lecho escurrido escala laboratorio.....	59
6.2	Pruebas para la caracterización de los sensores de humedad del lecho	63
6.3	Pruebas de desecado del lecho del biofiltro.....	64
6.4	Pruebas del control aplicado	66
6.4.1	ON/OFF	66
6.4.2	Estrategias de control basadas en reglas	68
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	69
7.1	Caracterización de los sensores de humedad del lecho	69
7.2	Pruebas de desecado del lecho del biofiltro.....	71
7.3	Pruebas de control aplicado	73
7.3.1	ON/OFF	73
7.3.2	Estrategias de control basadas en reglas	75
8.	CONCLUSIONES.....	77
9.	BIBLIOGRAFIA	79
ANEXO 1	83
Código empleado para la captura de datos.	83
ANEXO 2	89
Interfaz en LabVIEW para el monitoreo de las variables.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. RUTAS PARA LA PRODUCCIÓN DE DIESEL ALTERNATIVO CAPAZ DE ALTERNAR CON DIESEL DE ORIGEN FÓSIL.	18
FIGURA 2. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN BIOLAVADOR.	28
FIGURA 3. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN BIOFILTRO	31
FIGURA 4. RANGO DE APLICACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE GASES.	32
FIGURA 5. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN BIOFILTRO DE LECHO ESCURRIDO.	33
FIGURA 6. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN SISTEMA CON UNA ENTRADA Y UNA SALIDA.....	39
FIGURA 7. TIPOS DE SISTEMAS, A) LAZO ABIERTO B) LAZO CERRADO.	41
FIGURA 8. SISTEMA DE LAZO CERRADO.	42
FIGURA 9. COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA DE CONTROL ON/OFF.....	43
FIGURA 10. COMPORTAMIENTO DE UN CONTROLADOR PID EN EL TIEMPO.	46
FIGURA 11. TANQUE PARA ALMACENAMIENTO DE LÍQUIDOS CON UN VOLUMEN MÁXIMO DE 100M ³	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 12. FUNCIONES DE MEMBRESIA DE LOS CONJUNTOS A _D , B _D Y C _D . ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
FIGURA 13. CORTE A DEL CONJUNTO C PARA $\mu(X)=0.6$ Y $\mu(X)=0.4$	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 14. CENTRO DE CONJUNTOS DIFUSOS.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 15. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO SIMPLIFICADO DEL CIRCUITO DEL SENSOR	56
FIGURA 16. ESQUEMÁTICO DEL SISTEMA DE HUMIDIFICACIÓN DEL BIOFILTRO DE LECHO ESCURRIDO	61
FIGURA 17. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL CONTROL ON/OFF DEL SISTEMA DE HUMIDIFICACIÓN.....	67
FIGURA 18. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL CONTROL (BASADO EN LA EXPERIENCIA DEL OPERADOR)	69
FIGURA 19. CURVAS RESPUESTA DEL SISTEMA A DIFERENTES TIEMPOS DE IRRIGACIÓN.	70
FIGURA 20. CURVAS DE TIEMPO DE DESECADO.....	71
FIGURA 21. PRUEBAS DE DESECADO.....	72
FIGURA 22. PRUEBA DE 12 HORAS PARA EL CONTROL ON/OFF APLICADO AL CONTROL DE LA HUMEDAD DEL LECHO	74
FIGURA 23. PRUEBA DE 6 HORAS PARA EL CONTROL ON/OFF APLICADO AL CONTROL DE LA HUMEDAD DEL LECHO	75

FIGURA 24. PRUEBA DE 12 HORAS PARA EL CONTROL POR ESTRATEGIAS
APLICADO AL CONTROL DE LA HUMEDAD DEL LECHO 76

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PROPIEDADES DE LOS CULTIVOS DE BIOMASA.....; **ERROR!**
MARCADOR NO DEFINIDO.

TABLA 2. COMPARACIÓN DEL PODER CALORÍFICO DEL BIOGÁS CON OTROS
COMBUSTIBLES20

TABLA 3. ELIMINACIÓN DE COMPUESTOS ESPECÍFICOS DEL BIOGÁS
RELACIONADO CON SU USO.....; **ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

1. INTRODUCCIÓN

1.1 La energía

Desde el comienzo de la historia de la humanidad, la energía ha estado estrechamente ligada al desarrollo y crecimiento de la sociedad. Las diferentes manifestaciones de la energía no dependen de la comprensión que el hombre tiene sobre ella, pero cuando el ser humano tuvo un mejor entendimiento de la forma de utilizarla y las ventajas que ofrecía su uso, comenzó el verdadero progreso técnico y tecnológico. La evolución de la sociedad parte del descubrimiento del fuego y la forma de reproducirlo. Gracias al fuego podían ahuyentar a animales peligrosos, mantener la temperatura apropiada para su supervivencia y un medio de cocción para los alimentos; por lo que este representaba seguridad, confort y nutrición. Para poder producir el fuego, la humanidad entendió que eran necesarios ciertos materiales capaces de sustentar la combustión: los combustibles. Tras la primera revolución industrial, la sociedad humana comenzó su migración hacia el carbón, como un energético de uso intensivo. Con el desarrollo de la máquina de vapor, se descubrió el potencial de la energía térmica para ser transformada en trabajo útil. A principios del siglo XX se tuvo el primer gran acercamiento hacia el hidrocarburo por excelencia: el petróleo. La fabricación de vehículos automotores y el desarrollo de las técnicas de destilación de hidrocarburos, convirtieron al petróleo en símbolo de poder económico, confort y progreso. Lamentablemente el uso desmesurado ha acarreado severos problemas ambientales.

1.2 Contaminación ambiental

La contaminación atmosférica consiste en la deposición de materiales indeseables en la atmosfera, la cual es una mezcla de gases que se encuentran en un delicado equilibrio de concentraciones y del cual dependen las diferentes especies animales y vegetales del mundo. Por lo tanto, la emisión de compuestos que rompen el equilibrio atmosférico representa un peligro constante con un largo historial.

Si bien, existen fuentes de contaminación natural, las contribuciones antropogénicas de compuestos indeseables han sido especialmente superiores, específicamente desde la revolución industrial. Pero, independientemente del tipo de génesis que se tenga, los niveles de contaminación han alcanzado máximos históricos, por ejemplo, estudios han revelado que en los últimos 200 años la concentración global de CO₂ ha incrementado en un 31%, es decir, 20 Gt de carbón se han agregado al medio ambiente [1].

La energía es indispensable para la sociedad actual: sin ella las fábricas no podrían operar, no existirían las comodidades del mundo moderno, incluso el área de la salud depende completamente de ella. El crecimiento acelerado de la población ha incrementado las requisiciones energéticas del mundo, y con ello también han incrementado las emisiones contaminantes [2]. Las fuentes fósiles (petróleo, carbón y gas) son la base energética del mundo, la quema de combustibles de origen fósil así como su uso en la industria química incrementan la concentración de gases de efecto invernadero en la atmosfera, tales como: CO₂, CO, CH₄, CFC, compuestos halogenados, N₂O, ozono y peroxiacetilnitrato [1].

Tristemente el control de las emisiones contaminantes no siempre ha sido un tema prioritario. El poco o nulo control sobre la emisión de gases contaminantes provenientes de la quema de combustibles fósiles ha comprometido la integridad del medio ambiente teniendo como consecuencia directa de esto al calentamiento global [3].

Como puede verse, los problemas ambientales más importantes relacionan directamente el uso intensivo de la energía con el cambio climático (contaminación atmosférica y efecto invernadero). Por tal razón, en los últimos años se ha analizado un amplio margen para la minimización de gases de efecto invernadero mediante el uso eficiente de la energía y el mayor uso de las fuentes renovables de energía [2].

1.3 Fuentes renovables de energía

Las fuentes tradicionales de energía que sostienen las actividades humanas a nivel mundial se concentran en los hidrocarburos: el carbón, el petróleo y el gas. Sin embargo, los hidrocarburos no son los únicos repositorios de energía, existen otras fuentes de energía, como las fuentes renovables de energía. A diferencia de las fuentes fósiles las fuentes renovables pueden estar continuamente disponibles para la sociedad y se regeneran en ciclos de tiempo considerablemente breves [4], [5].

El sol es esencialmente el origen, directo o indirecto, de toda manifestación de la energía dentro del planeta: la energía térmica del sol provoca las diferencias de presión que dan lugar a los vientos, también provoca el cambio de fase del agua que eventualmente provoca la precipitación y por ende la energía hidráulica. La energía lumínica del sol es parte esencial de la fotosíntesis de las plantas que a su vez constituyen la biomasa. De forma general, podemos decir que las fuentes renovables de energía son: eólica, termosolar, fotovoltaica, hidráulica, mareomotriz, geotérmica y biomasa [4], [6].

1.3.1 Biocombustibles

La energía solar es utilizada por las plantas para sintetizar la materia orgánica mediante la fotosíntesis. La materia orgánica puede ser incorporada y transformada por animales e incluso el ser humano [6]. El término biocombustible es un nombre genérico usado para referirse a los combustibles derivados de la biomasa, materia orgánica proveniente de plantas, de desechos de animales y humanos; la biomasa es un método natural de almacenamiento de la energía solar en forma de energía química [7].

En los inicios de la civilización, la madera fue el energético predominante y su uso tenía un carácter mayormente doméstico: calor y cocina. Sin embargo, conforme incrementó el consumo per cápita de energía y también la población mundial, la quema de la madera llegó a ser insuficiente para satisfacer las

necesidades energéticas de la humanidad; la madera fue sustituida primero por el carbón y eventualmente por el petróleo y el gas [8].

La biomasa se ha convertido en una atractiva fuente de energía debido a sus bondades ambientales. A diferencia de los combustibles convencionales, los combustibles derivados de la biomasa liberan emisiones de carbono neutras, es decir, carbono que previamente había sido fijado por los organismos vivos empleados como fuente de energía. Aunque los biocombustibles son muy prometedores, lo cierto es que por sí solos no son capaces de sostener la demanda energética mundial, pero si pueden tener cierto grado de alternancia con los combustibles tradicionales [9].

Al comienzo del siglo XXI el uso de la biomasa era sumamente diferente en los diferentes países: Por un lado, la mayoría de los países de la OCDE usan menos del 3% de la biomasa para la producción de energía, en tanto, varios países en vías de desarrollo cubren más del 30% de sus necesidades energéticas de productos agrícolas o boscosos. Por ejemplo, más del 35% de la energía eléctrica en Cuba provino de la caña de azúcar; y el Brasil más del 25% de las necesidades energéticas del país se sustentaron en caña de azúcar y maíz, usados para la producción de biocombustibles y electricidad [8], [10].

Biocombustibles solidos

Los residuos orgánicos sólidos, en sus diferentes presentaciones (madera, cultivos específicos, residuos de cultivos y desechos orgánicos) son materiales renovables y sustentables. A estos materiales se les suele conocer como “biomasa”, y pueden ser usados como fuente de energía y productos químicos. Cuando se combustiona a la biomasa vegetal, se suele liberar dióxido de carbono, este es usualmente considerado neutro ya que previamente había sido fijado de la atmosfera en las plantas, árboles y cultivos. Los combustibles sólidos pueden ser divididos en 5 grupos de acuerdo con su fuente de origen:

1. Madera y residuos provenientes de bosques
2. Residuos de cultivos para consumo humano
3. Cultivos destinados a la generación de energía

4. Desechos orgánicos de animales
5. Desechos sólidos municipales

La madera con fines energéticos debe provenir preferiblemente de los desechos y excedentes de la industria y la construcción. Por otro lado, los desechos de cultivo tienen un potencial energético interesante, debido a que tradicionalmente eran productos indeseables provenientes de la industria alimenticia.

Además, existen cultivos destinados específicamente a la generación de energía los cuales no son utilizados para consumo humano. Los céspedes y matorrales de rotación corta pueden ser utilizados para la generación de energía. Los pastos perenes solían ser utilizados como forraje, sin embargo, su alto contenido de celulosa y lignina han llamado la atención para su uso energético.

En general, la biomasa tiene una densidad energética muy por debajo de los hidrocarburos fósiles, debido a esto se requieren volúmenes considerablemente grandes de biomasa para ser competitivos, todo esto acarrea costos energéticos adicionales, por ejemplo, para la transportación. Los criterios establecidos para el uso de pastos energéticos son:

1. Adecuado para la región donde se quiere implementar
2. Se debe propagar con facilidad
3. Debe tener un alto rendimiento por hectárea
4. Balance positivo de energía
5. El cultivo debe ser sostenible
6. Debe ser resistente a plagas y enfermedades
7. Diversidad genética que hace que estas se adapten a las condiciones
8. Debe ser perene
9. Tener costos competitivos con cultivos alimenticios.

La biomasa como fuente de energía parece prometedora, sin embargo, por si misma no puede ser considerada competitiva contra las fuentes fósiles de energía, Existen aspectos técnicos, tecnológicos, ambientales y sociales que

deben ser trabajados aún para el uso responsable de los biocombustibles sólidos [11].

Biocombustibles líquidos

Los combustibles líquidos derivados del petróleo son ampliamente usados en todo el mundo, y las cantidades que suelen consumirse año con año no son menos que impresionantes.

Los biocombustibles líquidos son productos de procesos para la obtención de combustibles de segunda o tercera generación, y tienen como objetivo alternar e incluso remplazar a los combustibles líquidos tradicionales. Algunos de estos pueden complementar e incluso remplazar a la gasolina (como el metanol, bioetanol, biobutanol y gasolina FT) o al Diesel (Biodiesel). Respecto a los combustibles que pueden alternar con la gasolina aquellos que han sido mayormente utilizados y desarrollados han sido el metanol y el etanol.

Metanol

El metanol (CH_3OH) es un alcohol simple, conocido comúnmente como *alcohol de madera*. Es tóxico, sin color, líquido con un olor ligero, el cual puede ser usado en motores que encienden con chispa. Aunque tiene un poder calorífico menor a la gasolina, su alta tasa de octanos otorga potencia y aceleración. El metanol es corrosivo y derramarlo en agua representa un peligro ambiental, sin embargo, ofrece mejoras en las emisiones, como reducción en hidrocarburos y óxido de nitrógeno. Anteriormente había sido empleado en vehículos M85 (85% de metanol con 15% de gasolina); sin embargo, el uso más prometedor del metanol está orientado actualmente hacia las celdas de combustible de hidrógeno, donde mediante un proceso se forma hidrógeno a partir de metanol.

Bioetanol

El etanol tiene un alto calor de vaporización, lo que significa que a medida que el combustible es vaporizado la mezcla se enfría a una temperatura más baja que la gasolina, manteniéndose vaporizado y permitiendo el acceso de mayor cantidad de combustible al motor, compensando su menor contenido de energía. El etanol tiene una mayor cantidad de octanos y una mayor cantidad de oxígeno.

Sin embargo, debido a que su calor de combustión es menor que el de la gasolina, se tiene una reducción en el rendimiento y un incremento del consumo de entre 15-25%. Otra desventaja del etanol como combustible consiste en la presencia de agua, esto puede provocar corrosión en tanques de acero; el etanol debe someterse a un tratamiento adicional para hacerlo anhidrido.

Pese a todo, una razón para sustituir a la gasolina por etanol es que el etanol puede ser obtenido de material biológico y es tanto renovable como sostenible, además de que se reducen las emisiones de carbono mediante su uso. Sin embargo, un problema persistente es que los principales sustratos para la obtención de etanol son de carácter alimenticio. Por ello, la investigación actual esta direccionada en la búsqueda de sustratos para la producción de etanol que no sean cultivos de consumo humano, por ejemplo, la lignocelulosa, el cual es un material sumamente abundante, que además de no ser de consumo humano es considerablemente económico.

Biodiesel

Tanto el transporte como la industria pesada utilizan el Diesel ampliamente. Este suele ser empleado en tractores, barcos, bombas, generadores, trenes, camiones para transporte pesado, etc. El motor diseñado por Diesel arranco por primera vez en 1893, este tenía el propósito de funcionar con carbón en polvo y aceites vegetales. Debido a que la industria petroquímica tuvo un crecimiento abundante a principios del siglo XX, se dejó de utilizar combustibles vegetales para ser completamente desplazados por la fracción de crudo llamada solamente *Diesel* [11].

El biodiesel puede ser obtenido a partir de aceites vegetales, naturales o reciclados, incluso de grasa animal [6], [12]. Para reemplazar al Diesel como combustible sin la necesidad de hacer modificaciones en los motores donde se emplea, es necesario que el sustituto tenga propiedades similares tales como:

- Un poder calorífico de entre 38-40 MJ/kg [11]
- Un índice de cetanos de alrededor de 50 [11]

- La viscosidad del combustible es importante debido a que este debe fluir sin problemas por las líneas de transporte y a través de los inyectores, si el sustituto es muy viscoso este puede sufrir de una atomización pobre [11], [13].
- Se requiere un punto de ignición de entre 64-80°C [11].
- El sustituto debe estar disponible en grandes cantidades [11]–[13].

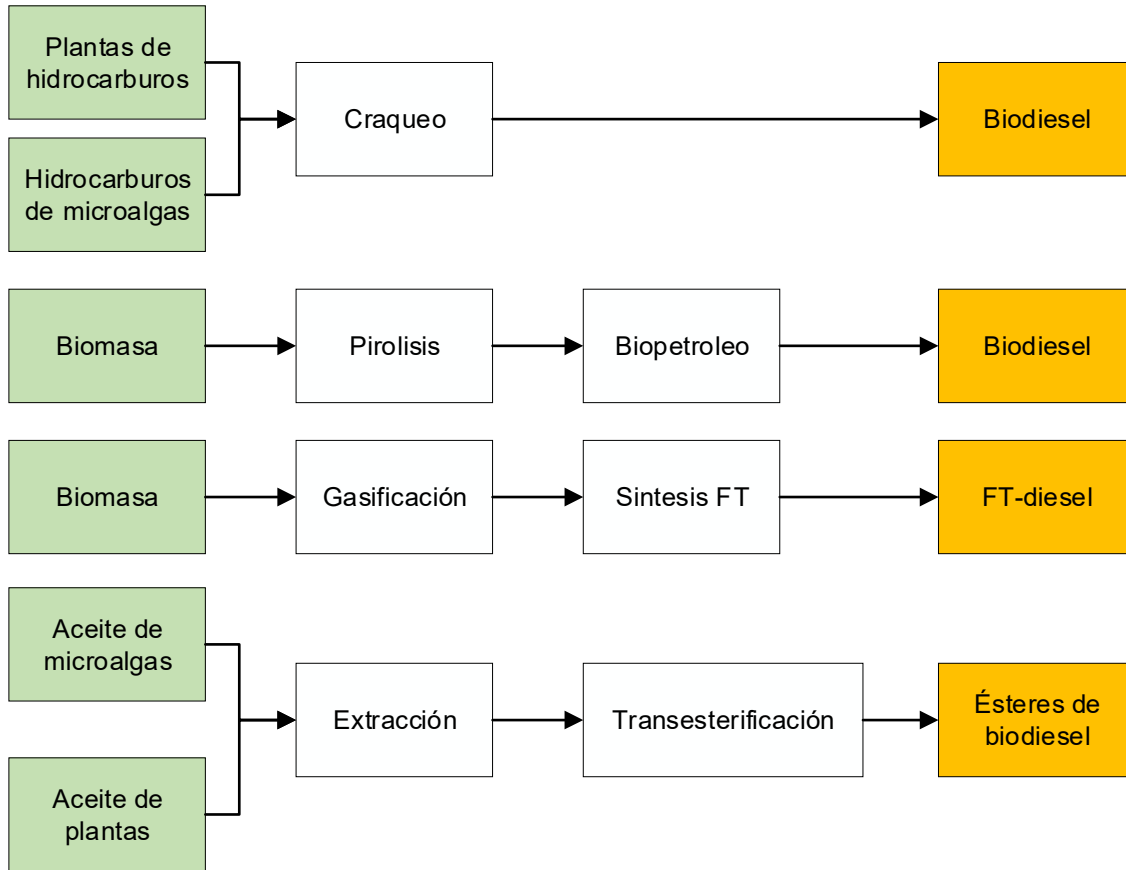


Figura 1. Rutas para la producción de Diesel alternativo capaz de alternar con Diesel de origen fósil.

Existen diferentes fuentes de las que puede obtenerse el biodiesel, tanto proveniente de productos agrícolas como de cultivos microbianos, Los procesos utilizados para cada fuente potencial de biodiesel se presentan en la *Figura 1*. [11], [13].

Las propiedades del biodiesel lo acercan mucho a su contraparte fósil. Los ésteres metílicos provenientes de diferentes sustratos tienen la viscosidad, la

densidad, el número de cetanos, entre otras propiedades, para ser fácilmente adaptados a los motores Diesel [14]. La investigación actual esta direccionada al estudio de diferentes sustratos para la obtención de biodiesel, así como el mejoramiento de los procesos, de tal forma que puedan disminuirse los costos de producción del biocombustible [15].

Biocombustibles gaseosos

Los biocombustibles gaseosos son utilizados tanto en la industria energética, así como en la industria química. Si bien son ampliamente usados en la generación de calor, ya han adquirido popularidad en la generación de energía eléctrica y se ha extendido su uso en el transporte. Los biocombustibles gaseosos más comunes son: Biogás, Hidrogeno, Dimetil éter (DME) [11].

1.3.2 Biogás

Cuando la materia orgánica se somete a descomposición en ausencia de oxígeno, se genera un gas compuesto en su mayoría por metano (CH_4), con una cantidad considerable de Dióxido de carbono junto con otras fracciones minoritarias de otros compuestos orgánicos importantes. Las condiciones favorables para la generación de biogás suelen presentarse en rellenos sanitarios así como en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR); además su generación y capturar en granjas es posible mediante la digestión anaerobia de estiércol animal, en el caso de la industria alimenticia mediante la digestión anaerobia de residuos orgánicos alimenticios.[16]

La composición de biogás y su proporción volumétrica es muy variable, estas dependen tanto de la naturaleza de la materia como la fuente de la materia prima. La concentración promedio de los compuestos del biogás es de:

- Metano (CH_4) de entre 55-70%,
- Dióxido de carbono (CO_2) de entre 30-45%,
- Nitrógeno (N_2) entre 0 y 1%
- Oxígeno (O_2) con un máximo de 0.5%,
- Sulfuro de hidrogeno (H_2S) de entre 0-10,000 ppm_v

- Compuestos halogenados $<0.1 \text{ mg Nm}^{-3}$,
- Compuestos orgánicos de silicio $2\text{--}41 \text{ mg N}^{\text{m}-3}$,
- Agua $5\text{--}10\%$,
- Benceno, Tolueno y Xileno (BTX) $< 0.1\text{--}5 \text{ mg Nm}^{-3}$,
- Hidrocarburos $0\text{--}200 \text{ mg Nm}^{-3}$
- Amoníaco (NH₃) $0\text{--}100 \text{ ppmv}$ [17]

Existen bacterias que son capaces de generar metano a partir de la digestión de compuestos presentes en la materia orgánica, esta clase de microorganismos son conocidos como *metanogénicos*. Es digno de mención que además de los metanogénicos existen otras especies de microorganismos que, a diferentes condiciones de temperatura, humedad, presión y pH, son capaces de generar otros compuestos mediante la degradación de la materia prima, tales como hidrogeno o sulfuro de hidrogeno. A pesar de lo anterior, porcentualmente la generación de metano es mayoritaria [16].

Tabla 1. Comparación del poder calorífico del biogás con otros combustibles (adaptación de [16])

Combustible	Valor calorífico(aproximado)
Gas natural	36 MJ/m^3
Gas LP (Licuado de petróleo)	45.2 MJ/kg
Queroseno	43.1 MJ/kg
Diésel	45 MJ/kg
Biogás	21 MJ/m^3

Se ha reconocido abiertamente que los compuestos presentes en el biogás tienen impactos directos en el ambiente, y de hecho se considera que el metano es un gas de efecto invernadero particularmente notable. Sin embargo, muy temprano en el siglo XX los países en vías de desarrollo reconocieron el alto potencial energético de los desechos orgánicos animales, pero el biogás proveniente de la degradación anaeróbica de materia orgánica no era el foco de interés debido a que la energía proveniente de combustibles fósiles era abundante y barata, pero todo cambió a principios de la década de 1970 a raíz de algunas crisis petroleras. A partir de ese momento creció el interés en la energía proveniente del metano,

resultando en el desarrollo de reactores anaeróbicos de alta velocidad con el propósito de tratar grandes cantidades de aguas residuales con procesos anaeróbicos [16].

La energía contenida en el biogás no es nada despreciable, si bien en su rendimiento global parece ser fácilmente superado por los combustibles convencionales tradicionales (Tabla 2), al tener en cuenta que en marcos productivos el metano es un producto residual, su captura para usos energéticos lo hace sumamente atractivo. Teniendo en cuenta lo anterior, su explotación representa ingresos importantes así como costos evitados, con beneficios ambientales implícitos [18].

1.3.3 Purificación de biogás

Pese al potencial tan grande que posee, existen problemas asociados con la captura y uso del biogás. A excepción del metano, los compuestos presentes en el biogás se consideran indeseables debido a que restan valor energético al gas o tienen impactos negativos en los sistemas donde se pretende implementar, por ejemplo, se consideran perjudiciales para cualquier dispositivo de conversión termo catalítica; además la presencia de estos compuestos genera emisiones nocivas para el medio ambiente. Los principales contaminantes del biogás son el H₂S, el NH₃ y los siloxanos. Aunque el CO₂ implica carbón neutro y no se le considera técnicamente un contaminante, diluye el poder calorífico de la mezcla. [17].

Los principales contaminantes y sus efectos se explican a continuación:

- *Sulfuro de hidrogeno (H₂S) y Mercaptanos:* El H₂S es un gas con mayor densidad que la del aire. A concentraciones superiores a 15 ppm puede provocar irritación ocular y de las vías respiratorias, hasta náuseas y vomito en humanos. En concentraciones por encima de las 150 ppm puede provocar parálisis de los nervios olfatorios. Se considera mortal en exposición prolongada para concentraciones superiores a 375 ppm, el efecto letal para un

máximo de una hora se presenta para concentraciones superiores a 750 ppm y se tienen efectos inmediatos para concentraciones de 1000 ppm (0.1%).

El H₂S es altamente corrosivo para equipos metálicos como compresores y motores de combustión interna. Reducen la vida útil de los lubricantes y piezas metálicas de motores. Además, el H₂S puede dar paso a la formación de SO₂ y SO₃, que en presencia de agua son más tóxicos y corrosivos que su precursor.

- *Amoniaco (NH₃)*: El NH₃ es más ligero que el aire, es tóxico y lacrimógeno. El límite de *Exposición Ocupacional Estándar* es de 10 ppm. La combustión de NH₃ da lugar a la formación de NH_x, precursor de lluvia ácida. La generación de NH₃ está asociada a la degradación anaeróbica de proteínas que, aunque es necesario para la actividad metabólica de algunas bacterias en altas concentraciones se considera inhibitorio. Algunos metanogénicos son considerablemente más susceptibles a la presencia de NH₃, por lo que la generación *in situ* del compuesto puede impactar desfavorablemente en el rendimiento de la biomasa para la generación de metano (CH₄).
- *Siloxanos*: Son compuestos que contienen un enlace Si-O y radicales orgánicos. Pueden presentarse en el biogás de forma lineal o cíclica, y tienen propiedades como estabilidad térmica, baja inflamabilidad, son levemente tóxicos y de baja biodegradabilidad (se consideran recalcitrantes). Durante la oxidación en cámaras de combustión forman Óxidos de Silicio, los cuales se depositan como microcristales de cuarzo en los equipos del motor (bujías, válvulas, cabezas de cilindro, etc.) que lleva a la abrasión de la superficie interna del motor. Por lo anterior, se considera indispensable su remoción [17].

Debido a lo anterior, es imprescindible sujetar a la mezcla gaseosa a un tratamiento posterior. Además de los propósitos ambientales, el uso energético del biogás también condiciona el proceso o los procesos de purificación a los que se deberá someter la mezcla gaseosa [17].

La eliminación del H₂S es indispensable para la mayoría de los usos energéticos del biogás. Por ejemplo, para su uso en calentadores de agua o calderas así como su uso en vehículos automotores y generación de potencia eléctrica se requiere su eliminación

si la concentración supera las 1000 ppm. Es digno de mención que para la inyección de biogás en la red de gas natural haya normativas reguladoras que dictan el estándar en países como: Alemania, Francia, Suecia y Suiza, donde la concentración permitida no debe superar 100 mg/Nm³ [19]–[21].

Existe una amplia gama de técnicas para retirar diferentes contaminantes objetivos, muchas de estas utilizan la comprensión de las características físico-químicas de los compuestos indeseables para su remoción, otros métodos consisten en tecnologías emergentes basadas en la capacidad que tienen ciertos consorcios microbiológicos de remover estos contaminantes [22].

Eliminación de H₂S

Debido a sus efectos adversos, el H₂S es el principal contaminante presente en el biogás por lo que su remoción es indispensable prácticamente para cualquier uso energético. Los métodos utilizados en el tratamiento del H₂S pueden ser divididos en dos tipos: *in situ* y *ex situ*. Muchos de los métodos de tratamiento son de un carácter físico-químico y están diseñados para el tratamiento de altas cargas del contaminante, ya que estos tratamientos están ligados a la industria petroquímica. Sin embargo, el biogás tiene un contenido sensiblemente menor de H₂S. El desarrollo de tecnologías de tratamiento basadas en procesos biológicos ha vuelto sumamente rentable el tratamiento del H₂S a bajas concentraciones, como el que se tiene presente en corrientes gaseosas de biogás[17]. Todo tipo de tratamiento tiene ventajas y desventajas asociadas, algunas de estas tienen que ver con aspectos físico-químicos de los medios usados en los tratamientos. Otro factor limitante para el tratamiento del contaminante es la concentración del H₂S en la mezcla y la tasa de la corriente gaseosa (Tabla 4).

Métodos físico-químicos

Las características físico-químicas de los contaminantes condicionan las tecnologías para su tratamiento. Para el caso del H₂S se usan metodologías tradicionales para el control de contaminantes gaseosos, tales como: absorción,

adsorción y membranas de separación (para concentraciones moderadas a bajas de H₂S, por debajo de las 20 ton/día) [17].

Absorción

Consiste en la transferencia del contaminante del gas a un medio líquido, esto ocurre debido al gradiente de concentraciones entre ambos medios. El rendimiento de este método depende de la solubilidad del contaminante en el medio líquido, existen dos tipos de absorción: física o química. En la absorción física, suele disolverse el H₂S en un disolvente. En tanto la absorción química requiere además de una etapa de reacción química entre el H₂S y el disolvente. Los disolventes físicos suelen ser agua o algún disolvente orgánico, aunque el método más común es el lavado en agua [17].

En agua

Consiste en un método robusto de deposición del H₂S en agua por un gradiente de concentraciones. Existen dos tipos de proceso de absorción en agua: la absorción en un solo paso y la absorción regenerativa. Para el caso de la absorción en un solo paso se requiere un alto consumo de agua, caso contrario a la absorción regenerativa, donde suele tratarse el agua saturada para ser reutilizada. Algunos problemas implícitos en la remoción del H₂S mediante lavadores de agua son el uso de grandes volúmenes de agua o el crecimiento de microorganismos en el soporte de retención [17].

Química

Debido a la afinidad que tiene el H₂S por cationes metálicos puede llevarse a cabo una absorción química en soluciones acuosas. Estos procesos ayudan a disminuir el consumo de agua y de energía; algunas soluciones usualmente empleadas pueden ser: Solución de NaOH, solución de FeCl₂, solución de Fe(OH)₃ y soluciones de aminas. Estas soluciones pueden capturar azufre elemental de un proceso previo de conversión catalítica (S⁰) o también sulfuro (S⁻²) [17], [18].

La absorción química de H₂S en una solución de Fe(III)-EDTA ha llamado particularmente la atención. El H₂S se disuelve en una solución acuosa y se

elimina catalíticamente mediante quelatos de hierro. El azufre producido puede ser retirado de la solución mediante sedimentación o filtración. Entre las ventajas del uso de la solución de Fe-EDTA están: se evita un gran consumo de productos químicos, la regeneración se lleva a cabo a temperatura ambiente, el CH₄ y el CO₂ mantienen volúmenes prácticamente constantes en todo el proceso y la eficiencia de remoción va desde el 90% hasta el 100%. Entre las desventajas se cuentan: la eficiencia depende mayormente del flujo volumétrico de la solución y para una concentración máxima de 2% de H₂S en el biogás con un flujo volumétrico máximo del biogás de 1dm³/min [17].

Adsorción

Consiste en la transferencia del contaminante del gas a un medio sólido. Suelen considerarse procesos ‘secos’ debido a que en estos procesos no suelen usarse fases líquidas. En estos procesos suelen emplearse lechos en configuraciones de flujo ascendente o descendente con el objetivo de favorecer el contacto del gas con el sólido. Estos procesos suelen darse en procesos por semi lotes, debido a que el flujo constante del gas gradualmente satura el medio adsorbente. La adsorción no suele darse en procesos de desulfuración a gran escala debido a que *el adsorbente no puede ser regenerado* y su vida útil es relativamente corta. Suele emplearse para la purificación de biogás a pequeña escala [17], [18].

Adsorción en carbón activado

Consiste en la deposición de azufre elemental (S⁰), proveniente de la reducción catalítica del H₂S, en carbón activado, se usa a menudo ioduro de potasio (KI) o ácido sulfúrico (H₂SO₄) como un catalizador. Las condiciones de operación para la adsorción usualmente implican presiones que van desde los 700 a 800 kPa y temperaturas de entre 50 y 70°C. Las etapas de regeneración requieren de configuraciones de dos o más contenedores y el uso de nitrógeno caliente. Sin embargo, el carbón activado no suele regenerarse, usualmente se sustituye [17], [18].

Adsorción en óxidos de hierro

El H₂S reacciona fácilmente con el óxido e hidróxido de hierro para formar sulfuro de hierro, por ello, las esponjas de hierro son conocidas como los mejores adsorbentes. Debido a que las esponjas de hierro suelen tener una superficie de contacto menor para la adsorción del H₂S, se utilizan virutas de madera impregnadas de óxido de hierro como material de reacción, de esa forma se incrementa la superficie de contacto. Debido a que el proceso es ligeramente endotérmico, suele ser necesario elevar la temperatura al rango de 25 a 50°C. Debe de evitarse la condensación de agua en el óxido de hierro, dado que el agua reduce la superficie reactiva. Para etapas de regeneración es necesario acondicionar el proceso para impedir la autoignición y configuraciones de dos o más lechos para la reactivación por turnos [17], [18].

Membrana de separación

El H₂S puede ser separado del biogás mediante la difusión en una membrana semipermeable. Dicha membrana no puede ser traspasada por la corriente gaseosa de CH₄, pero tanto el H₂S como el CO₂ pueden traspasarla. El proceso de eliminación del H₂S mediante una membrana de absorción de fase gaseosa a líquida consiste en lo siguiente:

- Las moléculas de la corriente gaseosa fluyen en una dirección y son difundidas a través de la membrana [17].
- Al traspasar la membrana, las moléculas son absorbidas por un líquido (preferentemente NaOH) que fluye en contracorriente.

Para poder apreciar mejor la eficacia del método baste un ejemplo: a una temperatura de entre 25 a 35°C, el biogás con una concentración de 2% (20,000 cm³/m³) de H₂S puede ser reducida a menos de 250 ppm (250 cm³/m³), teniendo una eficiencia de más del 98%.

Pese a ser considerablemente eficientes, las membranas de separación tienen grandes desventajas por encima de otros métodos. Sobre todo la implementación del sistema es sumamente compleja, además tiene asociados altos costos de mantenimiento y la propia fabricación de la membrana representa altos costos

económicos [19]. Todo lo cual impacta en el precio final del biogás para propósitos energéticos.

Métodos biológicos

La tendencia global actual tiene una aceptación creciente hacia el desarrollo sostenible, por lo que los proyectos energéticos que se conjuntan con el cuidado del medio ambiente han llegado a ser un campo de interés activo, como lo son las biotecnologías para el tratamiento de contaminantes [18]. El particular interés que se tiene sobre las biotecnologías, por encima de su contraparte físico-química, es que estas no suelen utilizar cantidades intensas de energía para retirar contaminantes del biogás [23].

Las biotecnologías para el tratamiento de contaminantes, particularmente para la eliminación del H_2S , depende de la capacidad que tienen ciertos microorganismos de metabolizar contaminantes en un proceso denominado: oxidación biocatalítica. Para los microorganismos los diferentes compuestos orgánicos volátiles (COV), pueden ser tanto fuente de energía (contaminantes oxidados en rutas catabólicas), como fuente de carbono (para procesos anabólicos, como el crecimiento de las células) [23],

En términos generales, los procesos químicos de eliminación del H_2S son caros debido a la demanda de reactivos químicos y los costos energéticos asociados a los procesos. Por otro lado, los métodos biológicos han demostrado tener el potencial de superar casi todas las desventajas de los procesos químicos tradicionales [17]. Las biotecnologías para el tratamiento de COV tienen ciertas generalidades: son sistemas basados en la degradación de contaminantes mediante la actividad biológica de microorganismos específicos para un rango de flujo y concentraciones específicos (Figura). Las principales biotecnologías utilizadas para la remoción de H_2S son los Biofiltros de Lecho Ecurrido (BLE) y los Biofiltros [22].

Biolavadores

Como se ha comentado anteriormente, los procesos tradicionales para la eliminación del H_2S son caros debido a la necesidad de reactivos y a las

requisiciones energéticas implicadas. Estas problemáticas asociadas a los procesos tradicionales han abierto la brecha para el desarrollo de tecnologías más económicas y ambientalmente amigables. Los procesos biológicos para la eliminación del sulfuro de hidrógeno se han presentado como una alternativa deseable por encima de los métodos químicos tradicionales, superando incluso las desventajas que adolecen estos últimos [22].

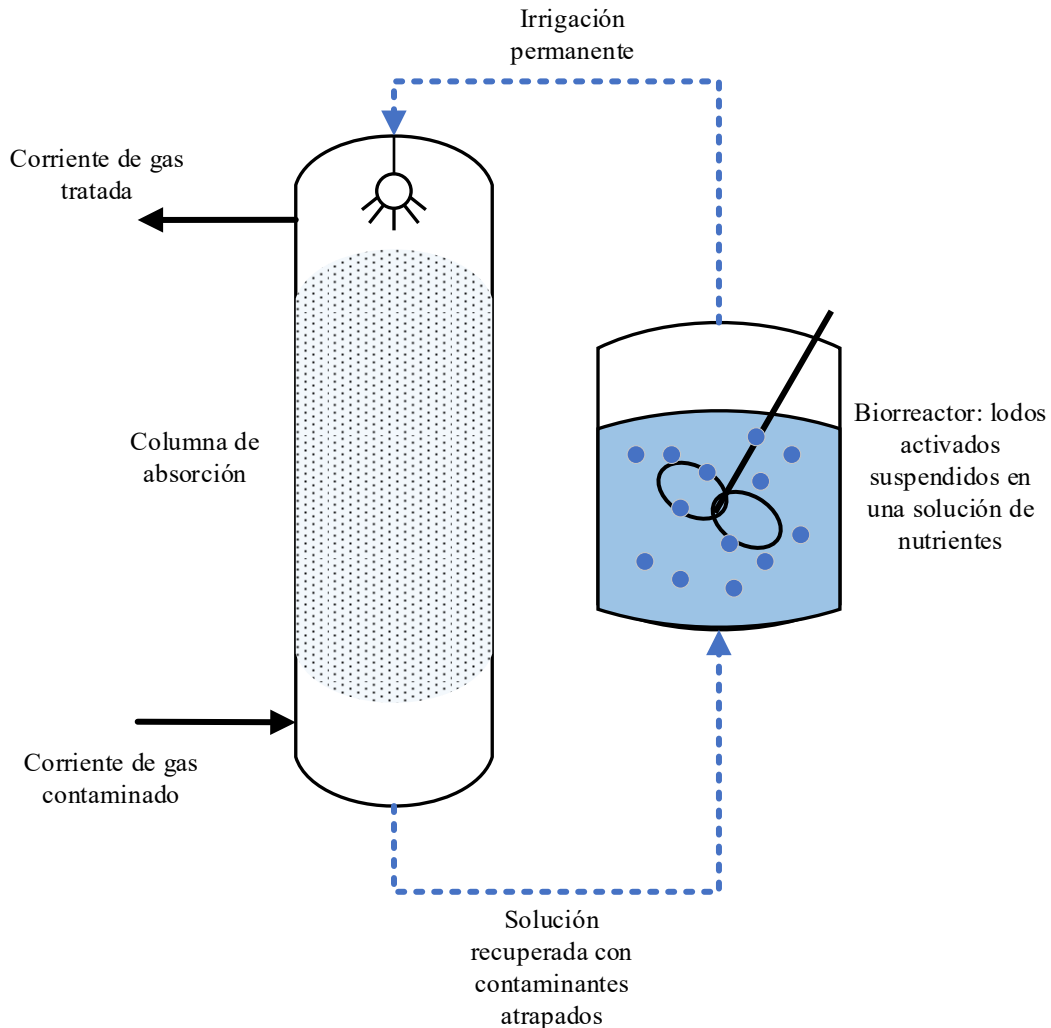


Figura 2. Diagrama esquemático de un biolavador.

Un biolavador convencional está constituido por dos subunidades: (1) una torre de absorción y (2) un biorreactor (Figura 2). En la torre de absorción los contaminantes gaseosos se transfieren a un medio acuoso en condiciones de saturación (o cercanas a la saturación), la transferencia se lleva a cabo en un

líquido disperso (mediante un atomizador o un aspersor) en una configuración de contracorriente para un flujo gaseoso ascendente [22], [23]. El líquido alojado en la parte inferior (donde se han alojado los contaminantes gaseosos) de la columna de absorción es recirculado al reactor biológico donde se lleva a cabo la oxidación por microorganismos libres o inmovilizados en un medio inerte[22], [23].

Algunas de las ventajas de los Biolavadores son las siguientes:

- Estabilidad en la operación y buen control de los parámetros biológicos (pH, nutrientes).
- Los biofiltros no tienen grandes caídas de presión
- Su instalación no requiere espacios grandes.

Sin embargo, aún tienen limitaciones tales como:

- Los biofiltros están adaptados para el tratamiento de compuestos orgánicos volátiles (COV) con coeficientes de Henry por debajo de 0.01 y concentraciones en la fase gaseosa menores a 5g/m^3 .
- Se tiene una superficie de contacto sumamente pequeña para la transferencia de gas/líquido (generalmente por debajo de los 300 m^{-1})
- Se producen lodos sedimentados en el fondo del biorreactor además de aguas residuales que deben ser tratadas posteriormente [23].

Estudios recientes han mostrado que la adición de agentes emulsionantes (como aceites de silicón) en la solución acuosa pueden mejorar significativamente la eliminación de contaminantes poco solubles, ya que estos favorecen la transferencia de masa de los COV. Sin embargo, a pesar del progreso en el desarrollo de los Biolavadores existen biotecnologías que superan con facilidad las virtudes de los estos [17].

Biofiltros

Desde 1980 las tecnologías biológicas para el control de olores mediante el tratamiento de compuestos orgánicos volátiles (COV) y contaminantes peligrosos del aire (HAP, por sus siglas en inglés), han sido establecidas como

una opción ambientalmente bondadosa a la vez que ha sido capaz de reducir costos de operación.

Si bien, la gama de tratamientos no representa un volumen considerablemente numérico, ya existen métodos bien catalogados y de eficacia probada. Algunos de estos procesos combinan las ventajas de los tratamientos químicos y las bondades de los tratamientos biológicos, aunque actualmente se persigue el desarrollo de tratamientos que puedan desprenderse por completo de la etapa química. En este aspecto, los biofiltros son tecnologías sumamente prometedoras, los cuales ya han sido aplicados en un amplio rango de pH tanto en condiciones anaeróbicas como aeróbicas [17].

Los biofiltros son biorreactores de lecho fijo, en el cual los microorganismos son inmovilizados. En lo que a configuración se refiere, un biofiltro de lecho escurrido es equivalente a un lavador químico de gases. Los gases contaminados fluyen a través del medio poroso y la oxidación biológica del compuesto orgánico volátil (COV) solo se lleva a cabo cuando esta difundido en la biopelícula [23]. Existen dos configuraciones para los biofiltros:

- Biofiltros de diseño abierto: poseen un flujo de gas ascendente, suelen estar instalados en el exterior ya que requieren de grandes espacios, por lo que son sumamente influenciados por los cambios de clima.
- Biofiltros de diseño encerrado: necesitan volúmenes más restringidos que la configuración abierta, suelen instalarse en habitaciones cerradas y pueden tener flujo ascendente o descendente.

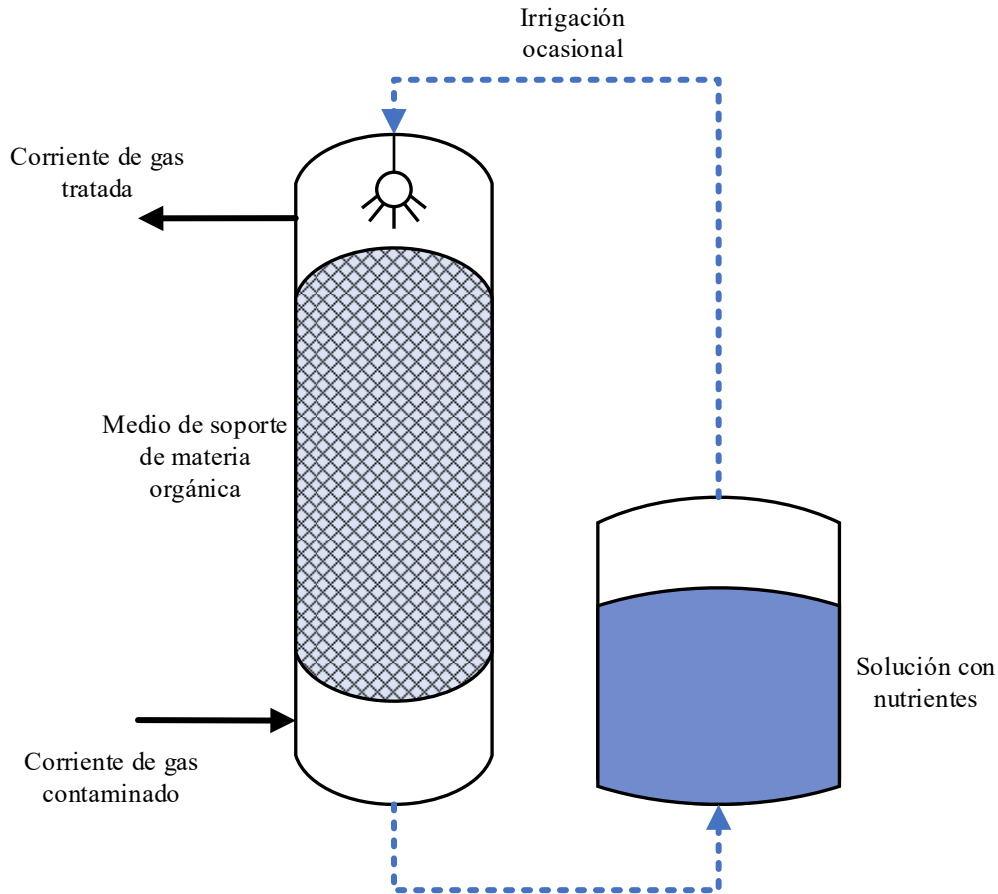


Figura 3. Diagrama esquemático de un biofiltro

Algunas otras características de los biofiltros de una configuración tradicional son:

- Poseen un lecho de materiales orgánicos, tales como: compostas, desechos de madera, turba, bagazo de caña, cascaras de cacahuate, etc. [22], [23]. Los materiales que suelen usarse de soporte tienen el propósito de suministrar minerales para sostener a la población microbológica [22].
- Posee un sistema de irrigación ocasional que se recircula del fondo de la columna.

El líquido que suele recircularse tiene el objetivo de dar un aporte adicional de nutrientes o ser un medio neutralizante para el constante reacondicionamiento del biofiltro [22], [23].

Los biofiltros consisten en tecnologías fácilmente de habilitar, sin embargo, tienen problemas implícitos, por ejemplo: el material usado como medio de soporte suele degradarse, de tal forma, que debe ser cambiado para garantizar el rendimiento del equipo [22] .

Biofiltros de lecho escurrido

Los biofiltros de lecho escurrido consisten en columnas empacadas que, a diferencia de los biofiltros, utilizan empaques de material inerte para sostener cultivos microbiológicos [23]. Suelen ser utilizados para el tratamiento de corrientes gaseosas altas y a bajas concentraciones de H₂S [17], [22] (Figura 4).

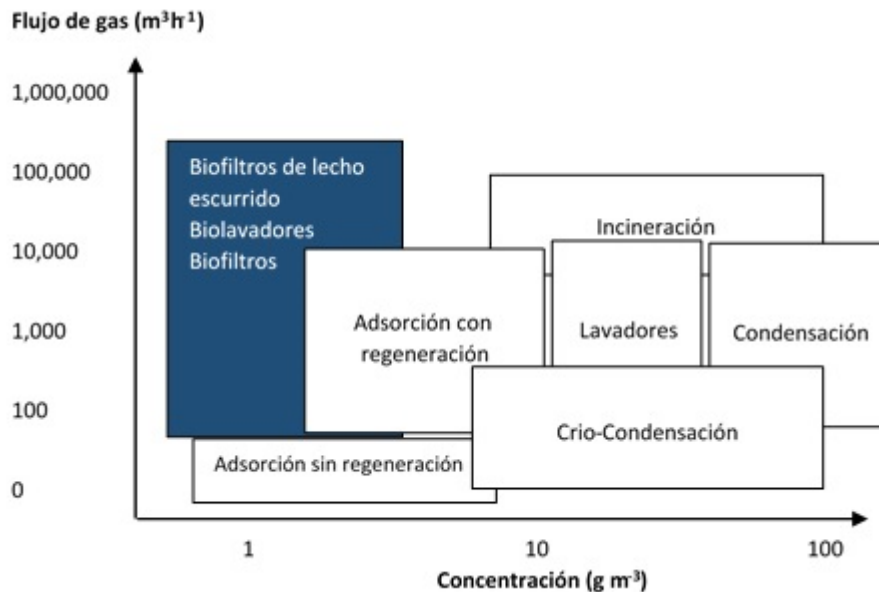


Figura 4. Rango de aplicación para el tratamiento de gases [22].

Los biofiltros de lecho escurrido (BLE) tienen la misma constitución base de los biofiltros (Figura 5). El material de soporte suele ser un medio poroso, los microorganismos se alojan en la superficie y los poros de este material. Los materiales filtrantes usado como medio de soporte deben (1) facilitar el flujo del gas y líquido a través de él, (2) favorecer el crecimiento y desarrollo de la microflora y (3) resistir el aplastamiento y la compactación [23]. Los medios

inertes usados en los biofiltros de lecho escurrido más comunes son: estructuras de plástico, resinas, cerámicos, celite, *espuma de poliuretano (EP)*, entre otros [24].

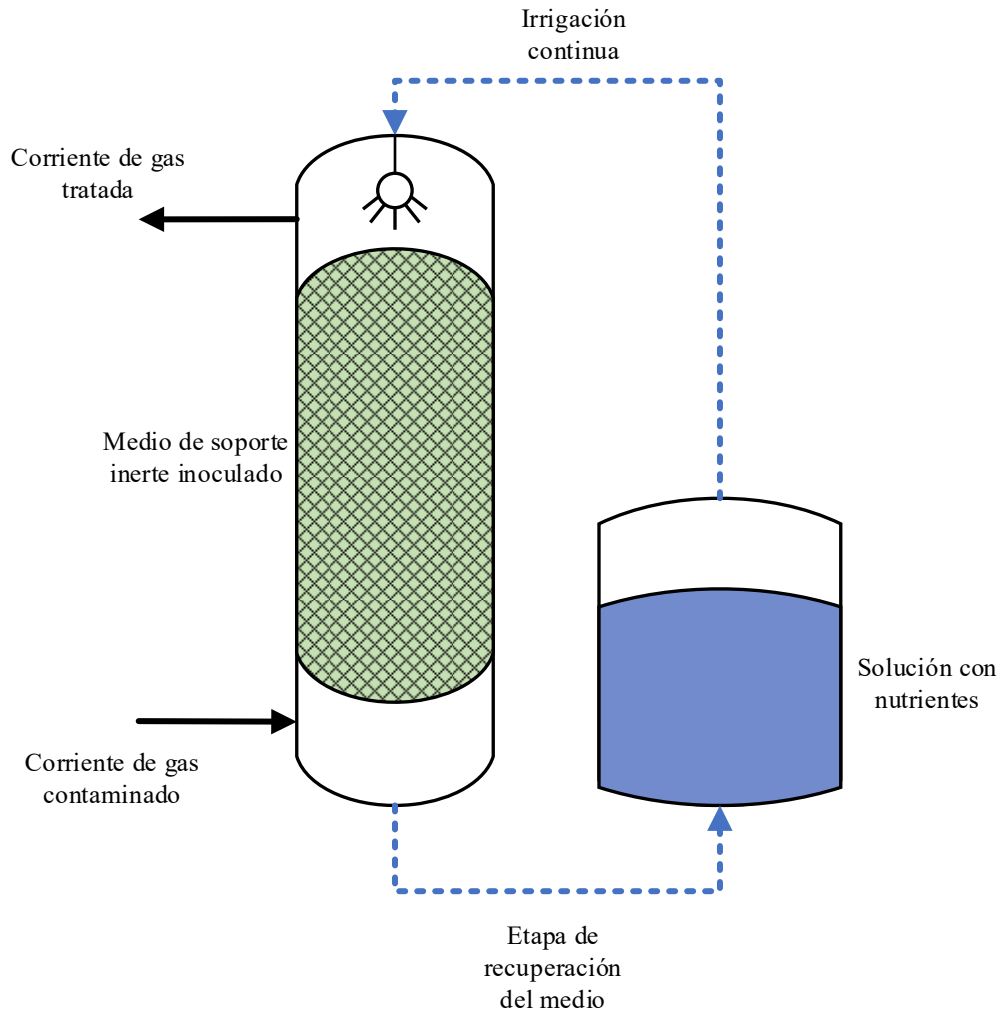


Figura 5. Diagrama esquemático de un biofiltro de lecho escurrido.

Otra característica de los BLE es que el sistema cuenta además con una fase de recirculación periódica de un medio líquido el cual funciona como un medio de humidificación, para aportar nutrientes y para la neutralización de la biopelícula, la corriente acuosa suele ingresar al sistema desde la parte superior para recuperarse en la parte inferior de la columna [22].

Un sistema impulsor introduce la corriente gaseosa al sistema, esta entra usualmente a contra corriente del flujo acuoso. El contaminante se trasfiere

desde la corriente gaseosa hacia la biopelícula húmeda para ser transformado eventualmente en alguna forma reducida de azufre, así como en CO₂ y H₂O [17], [22]. Otra diferencia básica entre los biofiltros y los biofiltros de lecho escurrido, es que estos últimos requieren de una irrigación periódica debido a que el medio de soporte no consiste en una fuente de minerales, por lo que los microorganismos dependen completamente de la irrigación para la obtención de carbono [23].

Ventajas

Si bien los biofiltros de lecho escurrido son más complejos de construir y su operación no es simple, tienen implícitas ventajas que los promueven como una opción viable por encima de otros sistemas biológicos. Algunas ventajas son:

- Se tiene un control del proceso biológico basado en la capacidad de controlar el medio acuoso recirculado.
- Es un reactor biológico estable.
- Es capaz de tratar mayores cargas de contaminante sin sufrir problemas de inhibición[17].

Desventajas

Sin embargo, aun padece problemas y limitaciones asociadas al tratamiento de biogás con interés energético. Entre los problemas más comunes se tienen:

- Taponamiento del sistema debido a la acumulación de azufre elemental (S⁰) producto de la oxidación biológica parcial del H₂S.
- Riesgos potenciales y nada despreciables de explosividad debido a la presencia de oxígeno aportado para favorecer la oxidación (en sistemas aeróbicos).
- Presencia de trazas de siloxanos y de compuestos orgánicos reducidos de azufre (CORA).
- *Humedad excesiva que dificulta el control del microambiente de los microorganismos suspendidos* [17], [22].

- *Sobre secado de la biopelícula que compromete la integridad de los microorganismos, lo que también afecta la remoción de contaminantes [25].*

La investigación aplicada a los biofiltros de lecho escurrido tiene como objetivo principal el desarrollo de un proceso biológico robusto y fiable para el tratamiento del H₂S a concentraciones altas (por encima de los 10 gm⁻³), teniendo en cuenta que el H₂S es el principal contaminante del biogás para propósitos energéticos [17], [22]. Muchos de los campos de investigación actual se dirigen a la solución de alguna de las anteriores limitaciones (o derivada de estas). Los campos abordan las problemáticas mediante aspectos relacionados con la transferencia de masa, las características microbiológicas de los reactores, los parámetros de operación y el *modelado para el control automático de los procesos implícitos en los biofiltros de lecho escurrido* [17].

1.3.4 Humedad de la biopelícula

Como se detalló previamente, uno de los problemas más importantes para el funcionamiento de los biofiltros tiene que ver con el control de la humedad del lecho para evitar tanto la *humedad excesiva* como el *sobre secado* del lecho biológicamente activo [18]. El principal reto a nivel reactor consiste en mantener la humedad del lecho en un rango ideal para favorecer la degradación del H₂S [22].

El contenido de humedad de un medio filtrante biológicamente activo *es el parámetro de operación más importante en un biofiltro de lecho escurrido, debido a que este impacta directamente en el rendimiento del sistema, y es el parámetro más susceptible a cambios* [25]. La falta de un control eficiente de humedad puede acarrear diferentes problemas:

a) Falta de humedad

- Para un lecho sin colonizar, si la humedad es insuficiente puede impedirse la formación de una biopelícula que soporte la respiración y el crecimiento microbiano [25].

- Para un lecho con una biopelícula existente, la falta de humedad disminuye la actividad biológica del sistema lo que acarrea a una disminución en el rendimiento global del sistema [25]–[27].

b) Exceso de humedad

- Para una biopelícula existente, el exceso de humedad impide la transferencia de masa de la fase gaseosa a la biopelícula, especialmente para sustancias contaminantes hidrofóbicas[22], [25].
- Se puede producir el taponamiento del medio poroso lo que disminuye la superficie de contacto con la biopelícula y la formación de zonas anaerobias [22], [25], [26].

La humedad óptima para la operación de un biofiltro depende de las características físicas del medio de soporte y del contaminante objetivo. Para el caso de medios inertes, la literatura y la experiencia en la operación de biofiltros sugieren que la humedad óptima para compuestos hidrofóbicos se encuentra en el rango de entre 40 y 60% de humedad por peso, preferentemente hacia el valor menor del rango. En el caso de medios ligeros altamente porosos usados como medio de soporte de biopelículas para el tratamiento de COV hidrofílicos (como lo es el caso del H₂S), la humedad deseable se encuentra en el rango de entre 70 y 90% de humedad [25].

El control de la humedad del biofiltro requiere un mejor entendimiento del proceso de secado del medio de soporte debido a cambios en la humedad relativa y la temperatura de la corriente de gas a la entrada, además también es importante tomar en cuenta la producción de calor debido a la oxidación del contaminante por parte de la biopelícula [26]. Por lo anterior, podríamos decir que los principales factores que pueden llevar al desecado o a la sobre humidificación de un biofiltro son:

- Enfriamiento adiabático/humidificación
- Biooxidación
- Perdidas por condensación/ganancias de calor
- Degradación del medio de soporte

- Sistema impulso de la corriente gaseosa [22], [25].

La degradación del medio de soporte no afecta directamente a los biofiltros de lecho escurrido, los cuales suelen tener medios filtrantes inertes. Además, las configuraciones de operación que contemplan una etapa de prehumidificación de la corriente gaseosa, con humedades relativas ligeramente por encima del 90% (correspondientes a la temperatura de saturación adiabática) logran evitar el desecado debido al enfriamiento adiabático [25].

En el caso de biofiltros completamente cerrados, la determinación del contenido de humedad del lecho es particularmente difícil. Tradicionalmente, el monitoreo de la humedad para la automatización del proceso ha seguido dos enfoques:

- Obtención de la humedad del lecho mediante puntos de muestreo localizados en diferentes estratos del medio filtrante. *Estas medidas pueden basarse en la variación de la conductividad o capacidad eléctrica.* La precisión de este enfoque depende considerablemente de la cantidad de zonas del lecho medidas, la longitud o volumen del lecho, la homogeneidad del medio filtrante y la propia sensibilidad de los sensores empleados [25].
- Obtención de la humedad del lecho mediante celdas de carga. La medida se basa en la capacidad de medir gravimétricamente la cantidad de agua que es retenida en el lecho. Aunque la humedad medida gravimétricamente es un indicador indirecto para conocer la humedad real *constituye una medida razonable y útil para efectos de diseño, operación y control de biofiltros de lecho escurrido* [25].

Es bien conocido que los patrones desiguales de aspersión pueden contribuir a variaciones espaciales en el contenido de humedad del lecho, esto puede afectar la representatividad de las medidas obtenidas, en especial para muestras o mediciones puntuales. Por tal razón, es necesario tener un sistema de irrigación y de medición cuidadosamente diseñado para producir datos significativos de humedad [25].

Los sistemas de irrigación deben cubrir ampliamente el lecho, debe tomarse en cuenta que las variaciones gravimétricas del peso total del lecho *únicamente reflejan cambios en el contenido de humedad, por lo que son indicadores indirectos*. Los controladores mayormente empleados, utilizan las medidas obtenidas de los puntos de muestreo, *las cuales son eventualmente procesadas por controladores lógicos programables (PLC) que determinan las necesidades de irrigación y controlan la duración y la frecuencia de la aspersion* [25].

1.4 Sistemas de control

La ingeniería de control tiene por objetivo comprender los sistemas físicos y las interacciones entre sistemas para tener dominio sobre los fenómenos que operan en ellos. La práctica de la ingeniería de control utiliza estrategias de diseño para mejorar los procesos para la transformación de la materia y el uso eficiente de la energía.

Los sistemas automatizados requieren del soporte de distintos campos de las ciencias para alcanzar sus objetivos concretos. Es necesaria la comprensión de leyes y modelos en campos científicos que por su naturaleza matemática facilitan el entendimiento de los sistemas físicos reales. Un sistema de control consiste en la interconexión de aquellos componentes para obtener una respuesta deseada [28]. Al hablar de un *sistema físico* nos referimos a la combinación de componentes o elementos que actúan conjuntamente para alcanzar un objetivo en específico. Por su parte, un componente es una unidad con propiedades particulares dentro del sistema, el cual cumple con una función específica [29]. Existen dos principios fundamentales a considerar para la comprensión de los sistemas desde el punto de vista del control:

- La relación causa y efecto: Representa la respuesta que ofrece un sistema ante un estímulo. Para toda entrada al sistema existe una salida correspondiente; una salida deseada es el resultado de una entrada específica. Esta relación puede conocerse mediante un estudio minucioso del propio sistema [28].

- La realimentación en sistemas de control: los sistemas en lazo cerrado utilizan una medida de la salida real para ser comparada con una salida deseada y entonces llevar a cabo la corrección del estado actual del sistema [28], [30].

La idea de una realimentación puede parecer engañosamente simple, sin embargo, es una herramienta extremadamente potente. La realimentación logra reducir los efectos de las perturbaciones, disminuye la sensibilidad del sistema a las variables de proceso y puede ayudar a un sistema a seguir fielmente sus señales de entrada [30].

Muchas de las propiedades deseables de la realimentación se pueden lograr con controladores simples, tales como: control on/off, Proporcional, integral y PID. Si bien se considera que el control PID es simple, el modelado físico-matemático que nutre el control no lo es realmente [28], [30]. Antes de hablar de los sistemas de control existentes es importante ahondar un poco más en la idea de la realimentación.

1.4.1 Retroalimentación

Todo sistema físico es susceptible a cambios o variaciones debido a la aplicación de un impulso entrante o una señal de entrada. Este es esencialmente el comportamiento de un sistema bajo el criterio del principio fundamental de causa y efecto previamente comentado. La Figura 6 nos da una noción simple de este concepto: Un sistema puede recibir una señal de entrada $u(t)$, entonces el sistema tiene una respuesta, la respuesta es una salida inducida por la entrada, es decir, un efecto [31].

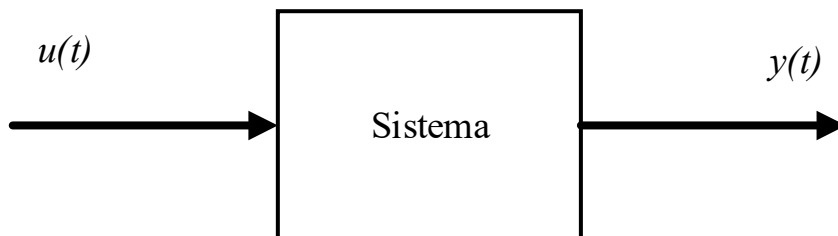


Figura 6, Diagrama esquemático de un sistema con una entrada y una salida

Como se puede apreciar en la Figura 6, la salida $y(t)$ está relacionada con la entrada $u(t)$ mediante la siguiente ecuación:

$$y(t) = T \cdot u(t) \quad (1.4.1)$$

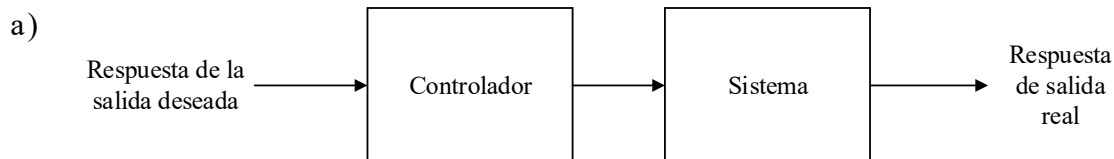
T es un factor de proporcionalidad sobre la salida $y(t)$ debido a la entrada $u(t)$, *representa la susceptibilidad que tiene el sistema a responder a una entrada $u(t)$* . Sin importar el tipo de fenómeno físico que se represente, siempre existen relaciones proporcionales de entradas y salidas [31].

Partiendo de la idea anterior podemos decir entonces que un sistema de control busca solucionar el siguiente problema elemental:

“Dado un sistema T bajo control y su respuesta deseada $y(t)$, encontrar una señal de entrada $u(t)$ apropiada, tal que, cuando la señal es aplicada al sistema T , la salida del sistema debe ser la respuesta deseada $y(t)$ ”[31].

Existen dos tipos de control tradicional, los cuales tienen los mismos elementos básicos, *entrada-sistema-salida*, pero con diferencias considerablemente grandes:

- Sistema de lazo abierto: La señal de entrada aplicada al sistema no depende de la salida, es decir, la señal $u(t)$ no es una función de $y(t)$ [31]. (*véase la Figura 7*).
- Sistema de lazo cerrado: en este tipo de control se utiliza una medida adicional de la salida real, para compararla con la respuesta de salida deseada (*véase la Figura 7*). La medida de la salida se denomina *señal de realimentación* [28].



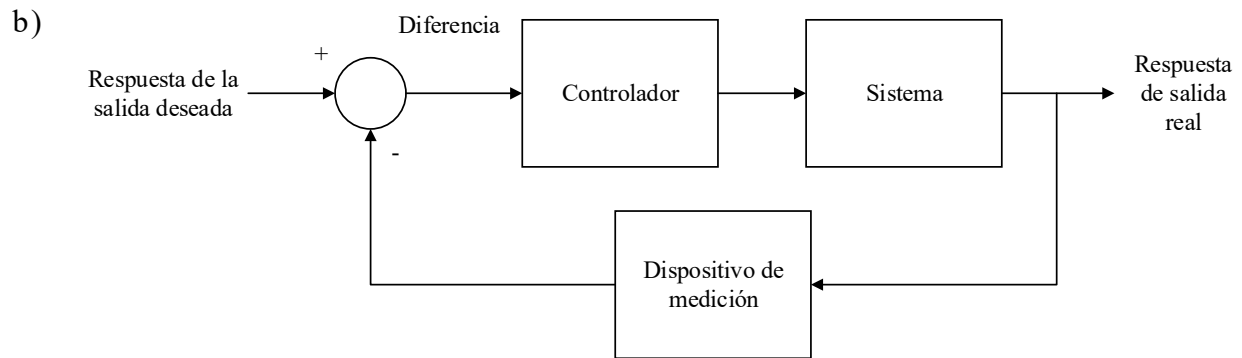


Figura 7. Tipos de sistemas, a) Lazo abierto b) Lazo cerrado.

En el caso del sistema de control de lazo cerrado se tiende a mantener una relación *prescrita* de la variable de salida con respecto a la variable de entrada, la acción del sistema de control depende absolutamente de la diferencia de la respuesta de salida deseada con la respuesta de salida real. Esta diferencia suele denominarse *error* ($e(t)$), y se define de la siguiente forma:

$$e(t) = \theta_i - \theta_0 \quad (1.4.2)$$

Donde:

- θ_i representa el valor prescrito o valor deseado para la variable a controlar
- θ_0 representa la salida real medida a través de instrumentos específicos para el tipo de variable.

Para medir el lazo de realimentación se suelen ocupar instrumentos capaces de medir la variable de salida a la vez que pueden influir en la entrada aplicada al sistema, y específicamente, al proceso que corrige la salida. Los sensores son instrumentos capaces de medir diferentes tipos de variables: humedad, temperatura, conductividad eléctrica, concentración de gases proximidad, entre otros. Son capaces de generar un impulso eléctrico proporcional a la medición para ser comparados con la señal de entrada prescrita [32].

Regularmente el valor consignado no suele variar con el tiempo, pero la salida θ_0 suele tener un comportamiento dinámico, es decir, cambia en el tiempo [32]. Para controlar un proceso, el sistema de control con realimentación determina el

grado del error, después el error se amplifica para controlar el proceso. El concepto de realimentación es el fundamento del análisis y diseño de sistemas de control [28].

La Figura 8, representa un sistema de control con realimentación con un cambio en la simbología empleada para entenderse desde un punto de vista matemático, necesario para definir mejor los sistemas de control clásicos.

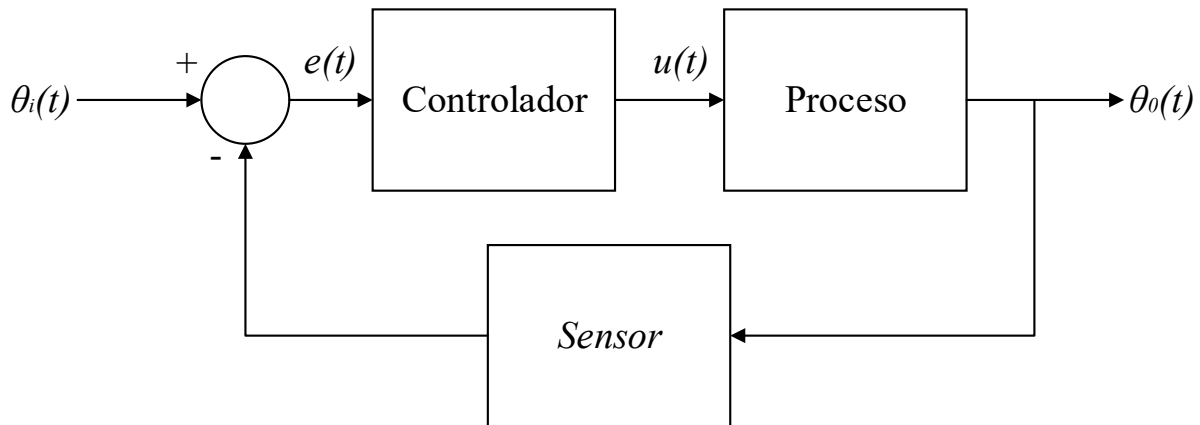


Figura 8. Sistema de lazo cerrado identificando las variables de entrada, salida consignada, salida real y error, como variables en el tiempo.

Controlador: Es un sistema que consta, básicamente, de dos elementos: Un elemento de control y Un elemento de corrección. El elemento de control es aquel que *decide* que *acción* se debe tomar cuando recibe una señal de error ($e(t)$). Por otro lado, el Elemento de corrección es aquel que se utiliza para producir un cambio en el proceso para eliminar el error; este ultimo elemento suele denominarse *Actuador*.

Proceso: Se define como proceso, o planta, al sistema donde se encuentra la variable a controlar.

Sensor: Es aquel elemento que produce una señal cuantificada relacionada con la condición de la variable controlada. Este elemento proporcional la señal de realimentación al elemento de comparación el cual determina el grado del error [32], [33].

1.4.2 Enfoques de control clásico

Control on/off

Es un tipo de control simple, está basado en el proceso de comparación mediante un lazo de realimentación, por lo que es un sistema de lazo cerrado.

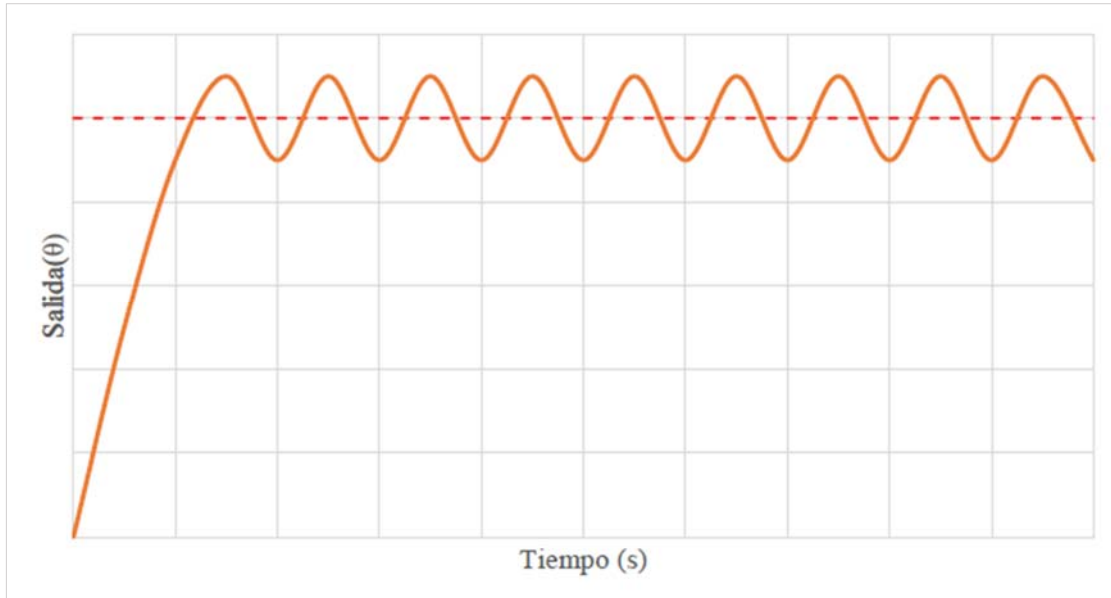


Figura 9. Comportamiento de un sistema de control on/off.

Como su nombre lo sugiere, el controlador se activa o desactiva en valores concretos. Elementalmente se establece un valor de consigna para su activación, esta acción se describe matemáticamente en la ecuación (1.4.3)

$$u(t) \begin{cases} u_{m\acute{a}x} & \text{si } e > 0 \\ u_{m\acute{i}n} & \text{si } e < 0 \end{cases} \quad (1.4.3)$$

Aunque el objetivo es mantener el sistema en un valor deseado, la salida es oscilante entorno al valor objetivo (véase Figura 9). En un estado ideal libre de error la salida ideal es igual al valor prescrito. Cuando la salida real es menor al valor prescrito entonces el sistema se activa ($u_{m\acute{a}x}$), solo cuando el valor de la salida es mayor al valor consignado después de un tiempo arbitrario (donde $e < 0$) el sistema de control se desactiva ($u_{m\acute{i}n}$) [30].

Control Proporcional

Si bien, el control on-off permite lograr cierto grado de gobierno sobre la salida del sistema, el sistema sobreactúa. Una pequeña variación en la salida del sistema lleva a la acción máxima. El control proporcional por su parte evita esta sobre acción mediante un control proporcional al error, es decir, un error *pequeño* lleva a una acción *pequeña*, mientras que un error *grande* lleva a una acción *grande* [30]. El control proporcional trata de disminuir el tamaño del error a través de una relación como el que se aprecia en la ecuación (1.4.4)

$$u(t) = K(\theta_i - \theta_0) = Ke(t) \quad (1.4.4)$$

Donde K representa la ganancia del controlador, el cual es un factor de proporcionalidad aplicado al error ($e(t)$), para determinar el grado de intervención del controlador ($u(t)$) en cada instante de tiempo [32].

Control Integral

Pese a que en el control proporcional la respuesta tiene una relación directamente proporcional al tamaño del error evitando la sobre acción, no es poco común que se desvíe del punto de consigna. Esto puede ser evitado con el control integral. En el control integral la salida del controlador es proporcional a la integral de la señal de error e en el tiempo, es decir:

$$u(t) = k_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (1.4.5)$$

Para este caso k_i representa la ganancia integral. Considerando la naturaleza del control cuando el error (e) es constante y teniendo así una salida constante se tiene que:

$$u_0 = k_i e_0 t \quad (1.4.6)$$

Como u_0 es constante el error es igual a 0. De esto se deduce que, *si hay un estado estacionario y un controlador tiene una acción integral, el error del estado estacionario siempre es 0* [30], [32].

Sin embargo, el control integral tiene asociada una inestabilidad relativa. Esta inestabilidad se puede reducir mediante aplicar una extensión del control integral denominado *Control proporcional integral*, el cual es la combinación del control proporcional con el control integral de la forma [32]:

$$u(t) = Ke(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (1.4.7)$$

PID

Cuando el control adquiere una forma derivativa, la salida del controlador proporcional a la razón de cambio con el tiempo del error (e), es decir:

$$u(t) = k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1.4.8)$$

Para la salida k_d representa la ganancia derivativa. En el control derivativo, tan pronto como la señal de error inicia puede haber una salida del controlador muy grande debido a que está asociada a *la razón de cambio del error y no al error en sí*. De esta forma, el control derivativo no corrige al error actual, toma una acción correctiva para un error futuro, antes de que este se presente. Si el error es constante o varía con lentitud, el control derivativo no puede tomar acción por lo cual se le suele usar combinado con otras formas de control [32].

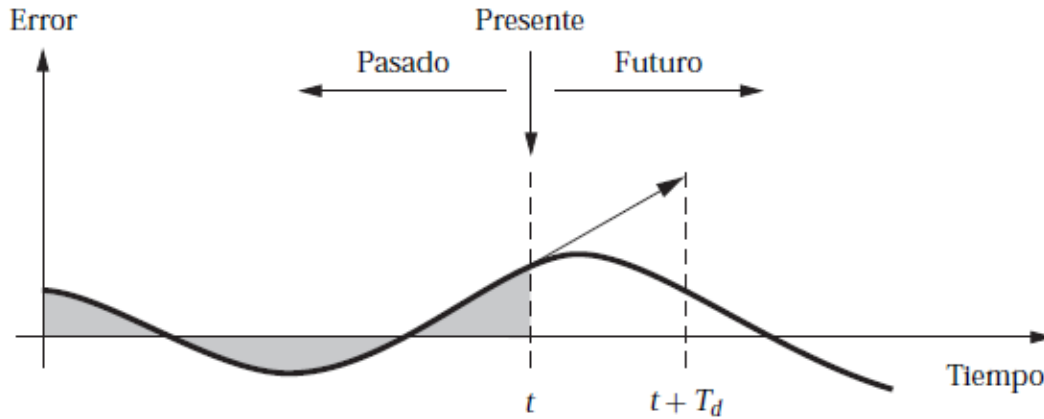


Figura 10. Comportamiento de un controlador PID en el tiempo.

El control PID consiste en sumar las virtudes propias del control proporcional, el integral y el derivativo. En una sola ecuación se representa el historial del sistema: el pasado (acción integral), el presente (proporcional) y el futuro (por una extrapolación lineal) (véase la Figura 10). El controlador PID obedece a la ecuación (1.4.9) [30].

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1.4.9)$$

Los parámetros del controlador se llaman: ganancia proporcional K , tiempo integral T_i y tiempo derivativo T_d . El controlador PID ha demostrado tener la capacidad de resolver una amplia cantidad de problemas de control.

1.5 Control inteligente

En las últimas décadas, un enfoque de control ha ganado considerable atención. Para diferenciarlo del enfoque clásico o tradicional (que ya hemos abordado) suele llamársele *Control inteligente*. Como hemos visto anteriormente, la forma tradicional de abordar el comportamiento dinámico de un sistema o proceso es mediante el uso de modelos matemáticos que emplean ecuaciones diferenciales [31].

El termino *Control inteligente* esta direccionado a problemas de control de un carácter general, esto es, referido a sistemas que no pueden ser descritos adecuadamente mediante un marco de ecuaciones diferenciales, sin embargo, sí se requieren otros modelos matemáticos; por ejemplo, modelados de sistema de eventos discretos. En general los modelos pueden ser aplicados a sistemas ordinarios y, más importante, a sistemas cuya complejidad desafía a los métodos de control convencionales [31].

Algunos enfoques de control inteligente emplean *Sistemas basados en reglas* (por ejemplo: sistema experto basado en reglas y lógica difusa) o son en si mismos *Sistemas de control basados en reglas*, los cuales han sido aplicados con éxito en el campo de la biotecnología moderna con resultados sumamente prometedores [31], [34].

1.5.1 Sistemas de control basados en reglas

Como su nombre lo expresa, son sistemas de control que trabajan mediante la aplicación de reglas expresadas en términos de proposiciones lógicas, los cuales comparan resultados y aplican nuevas inferencias lógicas en función del cambio dado en las variables de control. Estos sistemas se han vuelto sumamente populares debido a que facilitan la modelización del comportamiento y el control de sistemas físicos complejos. Los sistemas de control basados en reglas definen acciones si se cumplen ciertas condiciones predefinidas. Consisten en una herramienta muy popular aplicada en control jerarquizado, control experto y control difuso. Los análisis de reglas más completos, la inferencia y los sistemas basados en reglas suelen ser ejecutados en el dominio de la *lógica*. Estos sistemas lógicos son construidos como composiciones de axiomas y reglas inferenciales [35], [36].

1.5.2 Cálculo proposicional

Se conoce como *Cálculo proposicional* al sistema lógico más simple, en lo que a su sintaxis y semántica se refiere. Este es construido *únicamente* con símbolos proposicionales y conectivos lógicos, introduciendo así muchas ideas básicas

que se incorporaran a un sistema lógico avanzado. El nombre *Proposicional* alude al hecho de que este tipo de lógica está limitada al uso de proposiciones como el único medio para expresar el conocimiento acerca de los hechos sujetos a consideración. Por lo anterior puede decirse que las proposiciones lógicas son representaciones lingüísticas que permiten expresar y razonar los estados de un sistema en términos binarios, es decir, como *cierto* o *falso* [35], [36].

La expresión formal de una proposición lógica emplea al menos tres tipos de elementos, los cuales son:

- Un conjunto de símbolos proposicionales (de carácter alfabético)

$$P = \{p, q, r, \dots, p_1, q_1, r_1, \dots, p_2, q_2, r_2\}$$
- Un conjunto de conectores lógicos: \wedge (conjunción), \vee (disyunción), \neg (negación), \rightarrow (implicación) y \leftrightarrow (equivalencia).
- Un par de símbolos especiales: \top (denota que una fórmula es siempre verdadera) y \perp (denota que una fórmula siempre es falsa).

En términos lingüísticos las equivalencias para cada símbolo son las siguientes, expresadas en la Tabla.

<i>Símbolo</i>	<i>Equivalente lingüístico</i>
\wedge	<i>y (and)</i>
\vee	<i>o (or)</i>
\neg	<i>no (not)</i>
\rightarrow	<i>Si entonces (if then)</i>
\leftrightarrow	<i>Si y solo si (if and only if)</i>
\top	<i>Cierto (True)</i>
\perp	<i>Falso (False)</i>

Por ejemplo, asumiendo el significado de A y B como sigue

$A = \text{el cielo es azul}$

$B = \text{el cielo tiene nubes}$

Entonces diríamos que $A \wedge B$ significa:

'El cielo es azul y tiene nubes'

Sin embargo, es digno de mención que no toda expresión puede considerarse una proposición lógica. De hecho, las únicas expresiones legales dentro de la lógica proposicional son las *fórmulas bien formadas* (o simplemente *formulas*). Elementalmente, una fórmula es una expresión a la que puede ser asignada un valor lógico (cierto o falso).

1.5.3 Sintaxis de la lógica proposicional

La relación entre los elementos proposicionales y los elementos lógicos para formar proposiciones lógicas está dada por una serie de condiciones lógicas básicas, las cuales nos permiten distinguir *como debe estar estructurada una formula bien formada* (el termino *bien formada* se refiere a la estructura de la sintaxis por lo que *no se refiere a que sea cierto o falso*).

Sea P el conjunto de los símbolos proposicionales. El conjunto de todas las *fórmulas lógicas proposicionales* FOR está definida inductivamente como sigue:

- Los dos símbolos especiales $\top \in FOR$ y $\perp \in FOR$;
- Para cualquier $p \in P, p \in FOR$;
- Si $\Phi \in FOR$ entonces $(\neg \Phi) \in FOR$;
- Si $\Phi, \Psi \in FOR$ entonces $(\Phi \wedge \Psi) \in FOR, (\Phi \vee \Psi) \in FOR, (\Phi \rightarrow \Psi) \in FOR, (\Phi \leftrightarrow \Psi) \in FOR$.
- Ningún otro elemento pertenece a FOR .

Los elementos del conjunto de símbolos proposicionales y los símbolos especiales constituyen lo que se denomina como *Formula atómica* o simplemente *átomos*. Todas las fórmulas están constituidas por átomos conectados mediante conectores lógicos; estos últimos tienen una jerarquización definida de la siguiente forma:

- Negación (\neg)
- Conjunción (\wedge)
- Disyunción (\vee)
- Implicación (\rightarrow)
- Equivalencia (\leftrightarrow)

También los paréntesis nos permiten priorizar las operaciones lógicas por lo que es importante respetar los elementos de agrupación. En el caso de formulaciones complejas suele ser muy útil o hasta indispensable el uso de paréntesis para estructurar apropiadamente la formula.

1.5.4 Semántica de la lógica proposicional

No debemos dar por hecho que los diferentes símbolos combinados poseen significados por sí mismos. A fin de evaluar cualquier fórmula de lógica proposicional es indispensable asignar un significado a sus símbolos. El proceso de establecer una relación entre el conjunto de símbolos su significado se conoce como *asignar una interpretación a la formula proposicional*. Para esto es necesario asignar el valor de verdad a la formula, es decir, evaluar el valor de verdad de sus componentes y de toda la formula hasta el final.

Desde un punto de vista matemático, a fin de asignar el valor de verdad a los símbolos proposicionales uno debe hacer un definir un apropiado mapeo I . Sea P el conjunto de los símbolos proposicionales y denote $\{T,F\}$ el conjunto de los valores de verdad (*cierto y falso respectivamente*).

Una interpretación de I es cualquier función de la forma

$$I: P \rightarrow \{T, F\}$$

En el caso de $I(p) = T$ diremos que p es cierto bajo la interpretación de I , lo cual se escribe como

$$\models I p$$

Esto se lee como *p es satisfecho bajo la interpretación de I*. Si por otro lado $I(p) = F$ diremos que *p es falso bajo la interpretación de I*. Esto se escribe como

$$\not\models I p$$

Lo cual se lee como '*p no está satisfecho bajo la interpretación de I*'.

De acuerdo a lo indicado las reglas de cualquier fórmula bien formada de FOR solo se les puede asignar su valor de verdad *una única vez*, de esta forma se provee una conocida interpretación inicial de los símbolos proposicionales.

1.5.5 Consecuencia lógica

En términos de proposiciones lógicas las consecuencias lógicas pueden ser definidas de la siguiente forma:

Sea $\Phi, \varphi \in FOR$ cualquier fórmula. La fórmula φ sigue lógicamente de la formula $\Phi \leftrightarrow$ para cualquier interpretación I satisface Φ , también I satisface φ . La forma de abreviarlo es:

$$\Phi \models \varphi$$

Si eso ocurre, podemos decir que φ es una *consecuencia lógica* de Φ . Una definición equivalente de consecuencia lógica es la siguiente:

Se dice que una formula G es una consecuencia lógica de un conjunto de formulas $F = \{F_1, \dots, F_n\}$ $n \geq 1$, y esto se denota como $F \models G$, si por cada interpretación de w para los cuales $w(F_1 \wedge \dots \wedge F_n) = T$ tenemos que $w(G) = T$.

2. ANTECEDENTES

En el presente apartado se presentan aquellos trabajos de investigación que sirven como fundamento para la realización del presente trabajo. Cabe mencionar que no se encontraron antecedentes directos respecto al estudio del proceso de humidificación de *Biofiltros de lecho escurrido*.

Chris Van Lith et al (1997) hicieron una revisión respecto al diseño tradicional de los biofiltros con medios de soporte orgánicos. Respecto a la parte de monitoreo de la humedad del lecho, distinguieron entre tres diferentes esquemas de instrumentación, sensores basados en la conductividad del lecho, sensores capacitivos y celdas de carga. Además, indican algunos problemas asociados con la medición de sensores basados en la conductividad del lecho: debido a que la medición solo representa el estado de una pequeña área del lecho *se requieren varios puntos de medición en el lecho para tener una medida considerablemente precisa de la humedad y tanto más es así en lechos considerablemente heterogéneos*. El problema con las mediciones gravimétricas desde el punto de vista de los autores es que no permiten conocer el estado *on-line* de la humedad del lecho.

Respecto a los sistemas para el control de la humedad del lecho Chris Van Lith et al establecen que los datos obtenidos del monitoreo de la humedad pueden ser procesados para emplearse en esquemas de control que van desde un control manual hasta un control automático como puede apreciarse en la Tabla 4.

Tabla 2. Opciones de control de humedad de biofiltros [37].

Método	Descripción
Automático	PLC: El contenido de humedad del medio filtrante es medido automáticamente. Los resultados del monitoreo controlan un sistema automático de aspersión del medio. Un contenido de humedad excesivo provoca que se suspenda la irrigación.
Semiautomático	La frecuencia y duración de la irrigación son controladas mediante un temporizador el cual es ajustado periódicamente basado en muestreos del medio o un monitoreo automático de la humedad.
Manual/Periódico	Se instala una válvula manual a un sistema de aspersión. La aspersión es llevada periódicamente basado en muestreos periódicos del medio.
Manual/ad hoc	No se instala ningún sistema de aspersión. La humedad se monitorea periódicamente y si es necesario, se ajusta manualmente mediante una manguera atomizadora.

De acuerdo a los autores, patrones desiguales de aspersión y lechos heterogéneos pueden provocar considerables variaciones espaciales en el contenido de humedad del lecho. Por lo anterior, se requieren sistemas de irrigación cuidadosamente diseñados.

Por otro lado, **Peter A. Gostomski et al (1997)** emplearon por primera vez la Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR) para determinar la cantidad de agua presente en un lecho húmedo, esta técnica fue diseñada originalmente para estimar el volumen de agua en suelos. Además, se evaluó la tensiometría como una opción adicional para la medición *on-line* del agua en el lecho.

Para el estudio de secado se empleó un medio de soporte de compost con una humedad inicial de 60% (por peso seco). La temperatura promedio de la prueba fue de 30°C el flujo del aire a la entrada fue de 0.11L/min. Por otro lado, los experimentos con el biofiltro usaron un compost constituido de dos terceras partes de madera y un tercio de estiércol de pollo. El flujo volumétrico de la corriente gaseosa (15 L/min, $C_{TOL}=140\text{ppm}$) a una temperatura promedio de 25°C. El contenido volumétrico de agua fue normalizado con el máximo valor obtenido durante los experimentos. La caída de presión promedio en el biofiltro fue de 12 Pa, la presión atmosférica promedio fue de 86.1 kPa, la presión promedio a la salida es de $P_{ATM}+13.7$ kPa.

Los resultados mostraron que un lecho puede ser secado muy rápidamente cuando se tienen corrientes con humedades relativas menores al 90%. Cuando la corriente gaseosa tiene valores de humedad relativa cercanos a 90% la pérdida de agua del lecho se estimó en 1% por día. Se confirmó que para un lecho compacto la medición basada en TDR es factible.

Marcia Morales et al (2003) detallaron las mecánicas de secado que suelen operar en un biofiltro, siendo predominantes el secado debido a (a) Una incompleta saturación del flujo gaseoso y (b) debido a la reacción biológica. Emplearon un modelo matemático para un estudio analítico de la pérdida de

humedad de un lecho biológicamente activo. Tal modelo incorporo transporte de masa y de calor acoplando fenómenos físicos y biológicos.

El modelo matemático basado en el balance de masa tiene un enfoque fenomenológico y es de interés especial para el presente trabajo. a) Para el contaminante en la fase gaseosa la ecuación (2.1) describe el balance de masa.

$$\eta_g \frac{\partial C_{tol}}{\partial t} = -V_g \frac{\partial C_{tol}}{\partial z} - j_b \quad (2.1)$$

Donde η_g es la ratio entre el volumen de la fase gaseosa y el volumen representativo elemental, V_g es la velocidad superficial y j_b es la tasa de consumo biológico para el tolueno.

b) Para el vapor de agua en la fase gaseosa (humedad absoluta del aire):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{F_a^z}{\rho_a^* \eta_g} \frac{\partial X}{\partial z} + \frac{j_v}{\eta_g} \quad (2.2)$$

Donde F_a^z es el flujo masico de aire, ρ_a^* es la densidad del aire, ρ_c es la densidad aparente del material de empaque y j_v es la tasa de evaporación del agua por unidad del volumen de reactor.

c) El contenido de agua en la fase unificada solido-liquido:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = Re + Rer \quad (2.3)$$

Dónde: W es el contenido de agua en una base de peso seco, Re es la tasa de evaporación del agua y **Rer** es la tasa de producción de agua. La tasa de evaporación del agua (**Re**) es igual al agua transferida en la fase gaseosa (**Rv**).

Los términos del balance de masa completo se detallan en el trabajo de los autores. Para la parte experimental se empleó una mezcla de aire prehumidificado y tolueno que ingresó al biofiltro, el rango de la humedad relativa para las pruebas fue entre 50 a 75% (RH_a). Por otro lado, el rango de

temperaturas fue de 28-40°C y las velocidades del aire entre 2.94 y 29.42 m/h. Se utilizó una celda de carga para medir el agua perdida debido a las mecánicas de desecado.

Se observó una pérdida del 50% del agua presente en el lecho al cabo de 100 horas en un primer caso y 65 horas para un segundo experimento, las humedades relativas de la corriente gaseosa fueron menores a 60% y las tasas de evaporación fueron 10 y 18 $\text{mg}_{\text{agua}}/\text{g}_{\text{turba seca}}$ respectivamente. La tasa de evaporación más baja obtenida fue de 0.5 $\text{mg}_{\text{agua}}/\text{g}_{\text{turba seca}}$, para una temperatura de 20°C y una humedad relativa de la corriente gaseosa a la entrada de 90%. En las pruebas se comprobó que la mayor eficiencia de remoción de tolueno ($\text{EC}/\text{EC}_{\text{máx}} > 0.9$) se tuvo para corrientes gaseosas a la entrada con humedades relativas por encima del 70% y un contenido de agua en el lecho de $1.5 < W < 2 \text{ g}_{\text{agua}}/\text{g}_{\text{turba seca}}$.

Yang et al (2013) estudiaron la medición de la humedad en un lecho de viruta de madera. Identificaron problemas con la medición de la humedad de lechos no compactos por los métodos tradicionales de medición. Descartaron la medición del contenido de agua en el lecho usando TDR porque en primera instancia este método fue diseñado para la medición de contenido de agua en lechos semejantes a suelos. Identificaron a los sensores de rayos X como los mejores para la medición de la cantidad de agua en un lecho húmedo, pero fueron descartados por ser una metodología demasiado costosa y riesgosa para ser implementadas un biofiltro.

La propuesta de los autores consistió en la fabricación de sensores basados en la impedancia correlacionados con un modelo de contribuciones dieléctricas considerando que el lecho puede ser intrínsecamente conductor de la electricidad y no únicamente el agua.

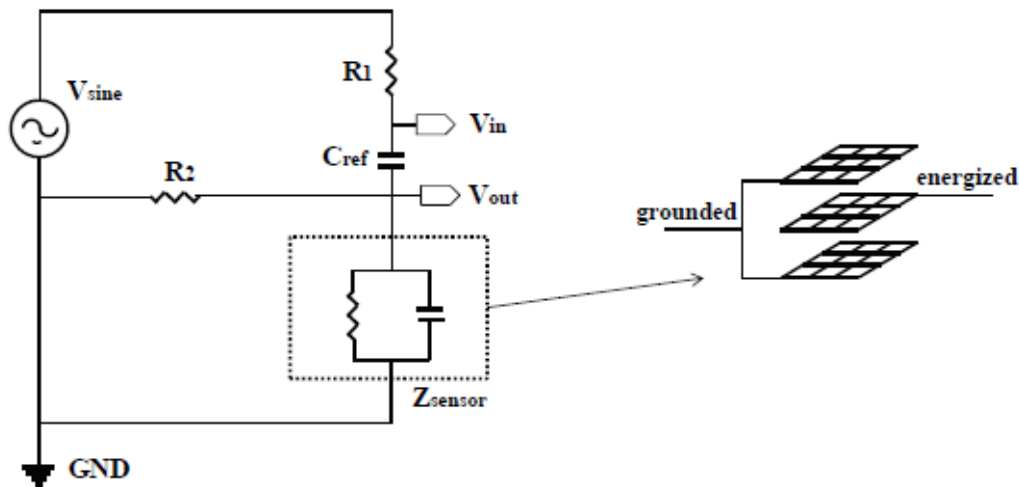


Figura 11. Diagrama esquemático simplificado del circuito del sensor (extraído de [38])

Consideraron que el comportamiento dieléctrico del lecho húmedo es análogo a una conexión paralela de una resistencia y un capacitor por lo que un cambio en la humedad afecta al voltaje de salida del circuito. Debido a lo anterior la ratio del V_{in} y V_{out} también puede ser un indicador directo de la humedad del lecho. El diagrama eléctrico que los autores emplearon para el diseño del sensor puede apreciarse en la Figura 15.

Además, se implementaron estrategias de control basadas en la medición *on-line* de la humedad del lecho como fuente de retroalimentación. Las estrategias de control tenían el objetivo de mantener el lecho en una humedad dentro del rango de 45% a 55%. La estrategia de control fue compuesta de dos enfoques: El primer enfoque fue diseñado para agregar agua durante 30s (120 ml) una vez al día. El segundo enfoque seguía el siguiente procedimiento, cada 3 horas se comparaban las lecturas de los sensores (V_{in}/V_{out}) si la lectura era menor a 2.4 (equivalente a 44% de humedad) la bomba se accionaba durante 30s. Si el valor de la lectura se encontraba en el rango de 2.4 y 3.0 la bomba no se accionaba. Y si la lectura era superior a 3.0 se detenía el primer enfoque y no había acciones del segundo enfoque.

Los autores identificaron comportamientos en las mediciones que aluden al buen funcionamiento del sensor. Por ejemplo, un pico de voltaje mayor a 0.1 inmediatamente después de la irrigación, relacionado con la sensibilidad del sensor a variaciones en la cantidad de agua. El control de la humedad favoreció la eficiencia de remoción del biofiltro logrando retirar hasta 92% de amoníaco durante la biooxidación y una disminución de hasta el 84% de óxido nitroso en el proceso.

Por último, Zheng et al (2017) retomaron el estudio de los sensores basados en la impedancia y en algunos parámetros que pueden afectar a la medición de la cantidad de agua en el lecho de un biofiltro. En primera instancia encontraron nuevos problemas en la medición de la cantidad de agua usando TDR en lechos heterogéneos, altamente porosos o con altas caídas de presión. El estudio se enfocó en un lecho conformado de viruta de madera, con el propósito de examinar el efecto de la distribución del tamaño de partícula y la carga de nitrógeno en las mediciones del sensor de humedad. Una vez determinado el grado de interferencia de la distribución del tamaño de partícula y la carga de nitrógeno en la medición, los autores desarrollaron un modelo para facilitar la medida de la cantidad de agua del lecho *on-line*.

Las pruebas llevadas a cabo muestran que el contenido de humedad medido por el sensor basado en la impedancia puede verse considerablemente afectado por altas distribuciones de tamaño de partícula. En un estudio comparativo, cuando las mediciones del sensor se encuentran por encima de 55% de humedad un lecho con una ratio volumétrica de 1:4 puede registrar valores 0.5 veces menores que un lecho con una ratio volumétrica de 1:1, para la misma cantidad de agua retenida. Esto demuestra que para lechos altamente porosos es necesario hacer un ajuste en las mediciones directas basadas en la impedancia.

Los autores evaluaron el grado de interferencia debido a la constante dieléctrica de cada uno de los elementos implicados. El estudio mostró que en valores de humedad porcentual por encima del 55% por peso húmedo la presencia de nitrato de amonio puede desviar las mediciones en alrededor de +5%, mientras que en

la presencia de hidróxido de amonio enriquecido puede tenerse una medición incrementada de hasta 250% en comparación con un lecho húmedo con agua.

Con base al estudio los autores hicieron un ajuste en el valor de la capacitancia del medio filtrante de la siguiente forma:

$$Lectura = 1 + \left| \frac{C_{biofiltro}}{C_{ref}} \right| \quad (2.4)$$

Con un valor de capacitancia del medio del biofiltro de:

$$C_{biofiltro} = \frac{\epsilon_{BF} A}{d} \quad (2.5)$$

Dónde: A es el área de los platos del sensor y d es la distancia de entre los platos.

Para la constante dieléctrica del medio del biofiltro se tiene que:

$$\epsilon_{BF}^a = \sum_i^n \epsilon_i^a v_i \quad (2.6)$$

Para la cual ϵ_{BF} es la constante dieléctrica del medio del biofiltro, i es cada componente del medio, v es la fracción volumétrica de cada componente y a es un valor cercano a 0.5.

Como se comentó previamente, los trabajos reportados como antecedentes enfocan su estudio en biofiltros (con medios de soporte orgánico) a diferencia del presente trabajo cuyo objeto de estudio es un *Biofiltro de lecho escurrido*. La propuesta del presente trabajo de investigación es diseñar e implementar un conjunto de instrumentos que permitan el monitoreo de la humedad del lecho en condiciones dinámicas, así como el control de la irrigación del lecho para un lecho poroso inerte tomando en cuenta la perturbación debido a un arrastre adiabático por parte de una corriente de aire a la entrada a diferentes condiciones de humedad relativa.

3. JUSTIFICACIÓN

Existe una considerable cantidad de parámetros que afectan la capacidad de remoción de contaminantes de un biofiltro de lecho escurrido. De entre todos estos, la humedad del medio filtrante biológicamente activo es el más importante, ya que tiene un impacto directo en el rendimiento del sistema y es sumamente susceptible a cambios. Si bien, la literatura ofrece información sobre el rango óptimo de humedad para diferentes medios filtrantes y consorcios bacterianos, no se tiene un sistema estándar de irrigación que garantice la más alta eficiencia de remoción de contaminantes del sistema de biofiltración. En el presente trabajo se propone la implementación de un sistema de control para el optimizar el proceso de humidificación aplicado a un biofiltro de lecho escurrido escala laboratorio para el tratamiento de H₂S.

4. OBJETIVO GENERAL

Optimizar el sistema de irrigación para un mejor control de la humedad del lecho empacado en un Biofiltro de lecho escurrido.

5. OBJETIVOS PARTICULARES

- a) Diseñar e implementar un sistema de sensores de humedad relativa de gas, humedad del lecho empacado, temperatura del gas y temperatura del líquido recirculado.
- b) Determinar las curvas de respuesta voltaje-tiempo del sistema para la humedad del lecho empacado.
- c) Implementar una estrategia de control para la humidificación del lecho.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Sistema experimental

6.1.1 Biofiltro de lecho escurrido escala laboratorio

Todas las pruebas se llevaron a cabo en un biofiltro escala laboratorio manufacturado en el Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (véase

Diagrama esquemático pág. 61). Los materiales empleados para la construcción de la columna empacada, el tanque de recirculación y el sistema de control se detallará a continuación.

Columna empacada

El sistema experimental consta de un biofiltro de lecho escurrido escala laboratorio construido con un tubo cilíndrico de PVC transparente con acoplamientos herméticos. El diámetro interno del tubo es de 0.06m, la altura total del dispositivo es de 0.77m.

El material de empaque utilizado consta de fracciones pseudocirculares de Espuma de Poliuretano distribuido uniformemente en la longitud axial del cilindro de PVC. La altura efectiva del material de empaque es de 0.35m lo cual corresponde a un volumen empacado de 0.989 lt.

El flujo volumétrico de aire que alimenta a la columna está configurado para 1.7 Lt min⁻¹ (ajustado manualmente con un caudalímetro de bola). La humedad relativa y la temperatura de la corriente gaseosa, se miden empleando sensores DHT11 a la entrada y a la salida del biofiltro.

Para la fase líquida se empleó una bomba de recirculación (*2E-NDVR*, Little Giant; Colorado, USA) y un aspersor (*QPHA Spray Tip Brown*, Spraying System Co.) dentro del biofiltro, que irriga el líquido a un flujo volumétrico de 0.23 lt/min. La bomba se activa y desactiva empleando un relevador (SRD-05VDC-SL-C, Ningbo *Songle* Relay Co.; China) que se activa y desactiva a través del microcontrolador.

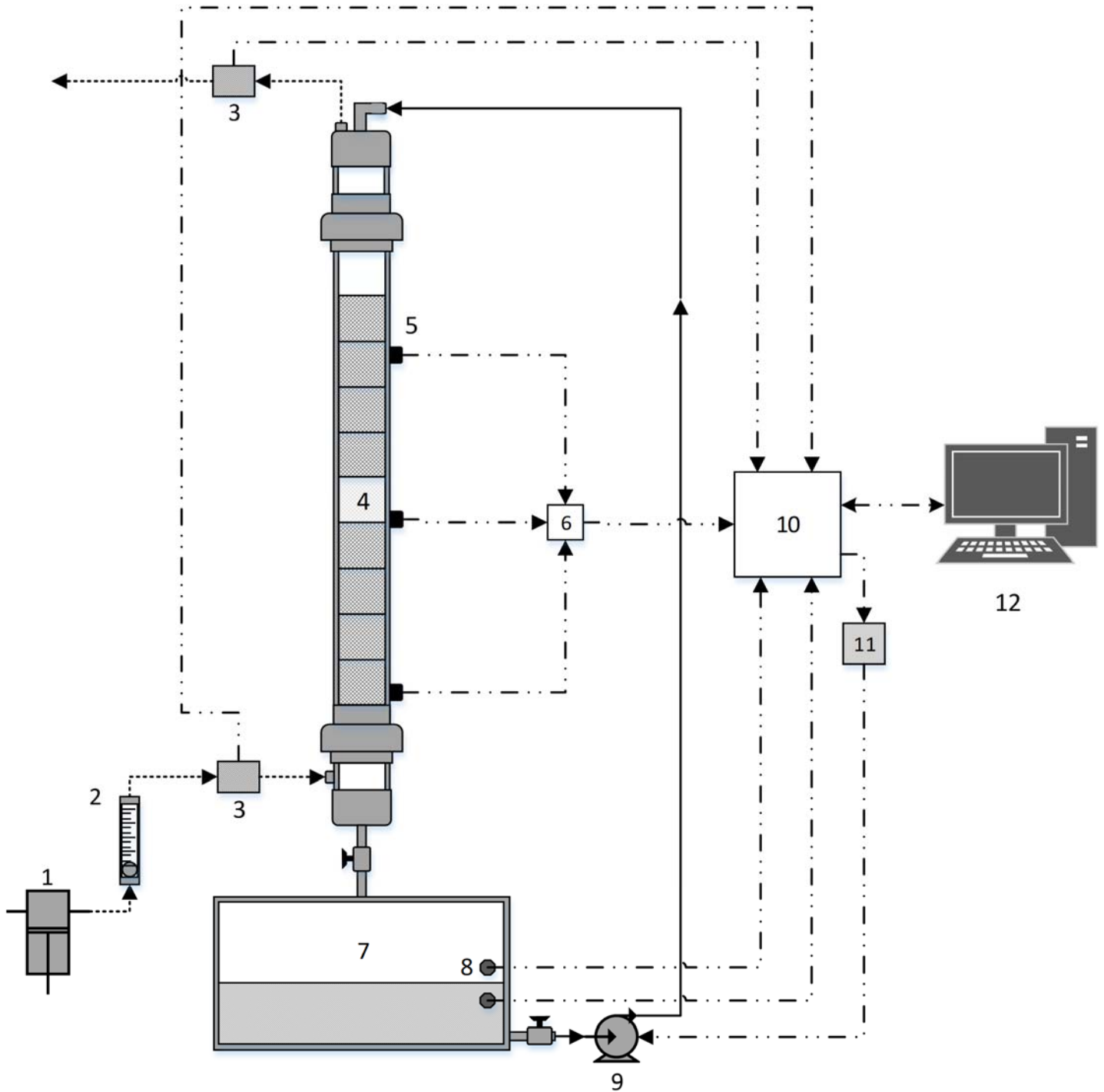


Figura 126. Diagrama esquemático del sistema de humidificación del biofiltro. (1) Compresor de aire, (2) caudalímetro de bola, (3) sensor de humedad y temperatura DHT11, (4) empaque de espuma de poliuretano, (5) sensores de humedad, (6) comparador LM393, (7) tanque de líquido de recirculación, (8) sensores de temperatura DS18B20, (9) bomba de recirculación Little Giant, (10) tarjeta de adquisición de datos I/O, (11) relevador SRD-05VDC-SL-C, (12) computadora.

Para la medición de la humedad del lecho se emplearon electrodos de acero inoxidable. Las sondas utilizadas para la medición de la conductividad eléctrica fueron manufacturadas en acero inoxidable y tienen una longitud efectiva de 1" con un diámetro de 1.5mm, estas se encuentran atornilladas a la columna de PVC y están hermetizadas para impedir fugas de la corriente gaseosa. El tipo de medición se basa en la conductividad eléctrica de un lecho no conductor. Se emplea un sensor basado en un comparados LM393 (*Texas Instruments*; Texas, USA).

Se emplearon dos sensores DS18B20 (*Dallas Semiconductor*; Texas, USA) para medir la temperatura dentro del tanque de recirculación, uno inmerso en el líquido recirculado y otro en la parte superior del tanque (*head space*) fuera del líquido.

Todos los sensores están conectados a la misma tarjeta de adquisición de datos, la cual está conectada a su vez a una computadora para la captura continua de datos durante las pruebas. Los datos son procesados posteriormente para cada estudio particular. Se utilizo una tarjeta Arduino Uno como una tarjeta I/O para la captura de los datos obtenidos, así como para el control de la bomba. Al ser un hardware libre y tener un entorno de programación abierto, fue adaptado a las necesidades particulares del proyecto; además es sumamente amigable con otros esquemas de programación, por ejemplo, la programación por bloques en el ambiente LabVIEW que se empleó para el desarrollo de los programas de monitoreo y control utilizados en el presente trabajo.

Sistema de monitoreo y de aplicación de estrategias de control

Para el estudio de la respuesta del sistema a las acciones de la bomba se utilizó un sistema de adquisición de datos, el cual eventualmente evoluciono al sistema de control por estrategias empleado. El conjunto de instrumentos para el monitoreo de la humedad de la corriente gaseosa, la humedad del lecho, la temperatura de la corriente gaseosa y la corriente acuosa, así como el sistema de acción de la bomba de recirculación se detallará a continuación.

6.2 Pruebas para la caracterización de los sensores de humedad del lecho

Los sensores introducidos en los tres estratos de la columna vertical tienen el propósito de cuantificar la variación de la conductividad eléctrica al hacer circular o suspender medio de cultivo en el lecho empacado. Las sondas empleadas para este estudio y para el monitoreo de la humedad del empaque del biofiltro fueron manufacturadas, la razón fue que no existían sondas comerciales que cumplieran con las necesidades específicas del estudio. Se requerían sondas que pudieran medir la conductividad eléctrica, pero que no fueran susceptibles a la corrosión debido a que el líquido recirculado era una suspensión de base acuosa.

La conductividad eléctrica está directamente asociada con la cantidad de medio de cultivo presente en el lecho. La máxima retención hidráulica del lecho estará dada por una irrigación suficientemente prolongada para que el lecho pueda saturarse de medio. Además, se requiere saber del valor máximo de la conductividad eléctrica para el lecho humidificado y así establecer la humedad porcentual de la siguiente forma:

$$H(\%) = \left(\frac{V_M}{V_{m\acute{a}x}} \right) * 100 = \left(\frac{VRH}{MRH} \right) * 100 \quad (6.2.1)$$

Donde:

- $H(\%)$: representa la humedad porcentual del lecho
- V_M : Valor de conductividad eléctrica medida por el sensor
- $V_{m\acute{a}x}$: Valor de conductividad eléctrica máximo en condiciones dinámicas.
- VRH : Valor Retención Hidráulica, es el valor gravimétrico de medio acuoso retenido en el lecho.
- MRH : Máxima Retención Hidráulica, es el máximo valor gravimétrico de medio acuoso retenido en el lecho.

Por lo anterior, se llevaron a cabo tres sets de experimentos con las mismas condiciones de operación:

- Se parte de un lecho completamente seco.
- El caudal volumétrico de la corriente gaseosa se establece en 1.7 lt/min
- La corriente gaseosa pasa por una etapa de prehumidificación en el tanque de recirculación de medio de cultivo.
- El caudal volumétrico de líquido recirculado (medio de cultivo) es de 0.23 lt/min

Los tiempos de irrigación para cada experimento fueron de: 5, 10 y 20 minutos. Cada prueba para cada tiempo de irrigación se llevó a cabo por triplicado, es decir, se repitió la misma prueba con 5 minutos de irrigación bajo las mismas condiciones de operación para eventualmente darle un tratamiento estadístico a los datos; de la misma forma para la irrigación de 10 y 20 minutos.

La rutina establecida para la captura de datos consistió en lo siguiente:

1. 5 minutos de captura de datos sin acción de la bomba
2. Tiempo de irrigación con captura de datos según la prueba
3. 20 minutos de captura de datos sin la acción de la bomba después de la irrigación.

6.3 Pruebas de desecado del lecho del biofiltro

Se llevaron a cabo dos pruebas para la determinación del secado del lecho. En primer esquema se configuró para que la corriente de gas a la entrada del biofiltro no estuviera prehumidificada, es decir, se ingresó la corriente de aire al biofiltro sin previamente hacerse pasar al tanque de recirculación.

En el segundo esquema la corriente de gas a la entrada del biofiltro se encontraba prehumidificada, esto mediante hacer pasar la corriente de gas por el tanque de recirculación y eventualmente ser ingresada al biofiltro.

En cada caso se midió la humedad relativa a la entrada y a la salida del biofiltro. En la segunda configuración se pretende alcanzar humedades de la corriente gaseosa cercanas a la saturación con el objetivo de reducir el arrastre adiabático de medio acuoso del lecho.

Las pruebas siguieron la siguiente rutina:

1. 20 minutos de irrigación para un lecho completamente seco
2. El caudal volumétrico de la corriente de gas a la entrada fue de 1.7 L/min.
3. Después de la irrigación se capturaron datos por aproximadamente 8 horas.

Para determinar la cantidad de medio de cultivo que es necesario suministrar diario se emplea un balance de masa simple. Para calcular la máxima cantidad de medio acuoso que es capaz de retener el lecho se emplea la ecuación:

$$MR_{m\acute{a}x} = N * (V_{EP} * \varepsilon) * k \quad (6.2.2)$$

Donde:

$MR_{m\acute{a}x}$: Máxima cantidad de medio acuoso que puede retener el lecho [L].

N: Número de piezas de espuma de poliuretano que conforman el lecho

V_{EP} : Volumen de cada pieza individual de espuma de poliuretano [L]

ε : Fracción hueca del lecho de espuma de poliuretano.

k : Constante de escurrimiento.

Para el cculo del agua retirada por parte de la corriente gaseosa se empleó un balance de masa simple:

$$w_l = (h_{out} - h_{in}) * Q_g \quad (6.2.3)$$

Donde:

w_l : Tasa de medio acuoso perdido [g/min].

h_{out} : Humedad absoluta a la salida del biofiltro [g/L]

h_{in} : Humedad absoluta a la entrada del biofiltro [g/L]

Q_g : Caudal volumétrico de la corriente gaseosa a la entrada del biofiltro [L/min].

Para determinar experimentalmente la cantidad de agua que retenida en el lecho se siguió la siguiente rutina:

1. Se irriego continuamente el lecho durante 20 minutos con la corriente de gas circulando por el biofiltro.
2. Después de la irrigación se midió gravimétricamente la cantidad de agua retenida en cada pieza de espuma de poliuretano.
3. Se determinó la cantidad total de agua retenida mediante una suma aritmética

$$MR_{máx_{exp}} = \frac{1}{\rho} \sum_{i=1}^n s_i \quad (6.2.4)$$

Donde:

$MR_{máx_{exp}}$: Es la cantidad máxima de medio retenida en el lecho determinada de forma experimental [L].

ρ_w : densidad del medio acuoso [g/L]

n : n -ésima pieza de espuma de poliuretano.

s_i : agua retenida en la i -ésima pieza de espuma de poliuretano del lecho [g].

6.4 Pruebas del control aplicado

Se llevaron a cabo pruebas de control aplicado para el control del sistema de irrigación, cada esquema

6.4.1 ON/OFF

Para el controlador on/off implementado para las pruebas, se tomó en cuenta las mismas condiciones óptimas de humedad: que el lecho empacado se mantenga en un rango de humedad entre 70-90% de humedad. Debido a las oscilaciones entorno al punto de consigna, consideraremos un valor intermedio garantizando así que el valor neto de humedad no excederá el 90% pero tampoco disminuirá a menos del 70%. El valor de consigna se establecerá justo en medio del rango óptimo preestablecido, es decir, será de 80% de humedad del lecho.

Para este tipo de control usaremos un valor de humedad promediado, esto debido a que si consideramos un controlador independiente por sensor se tendrán

interferencias de acción; por ejemplo, si el Sensor 1 marca un valor por encima del 90%, mientras que el Sensor 3 marca un valor por debajo del 70%, debido a que se tiene un único sistema de irrigación no estaría definida la acción para ese caso, por lo que no podría garantizarse que el sistema se encuentre en el rango óptimo de humedad.

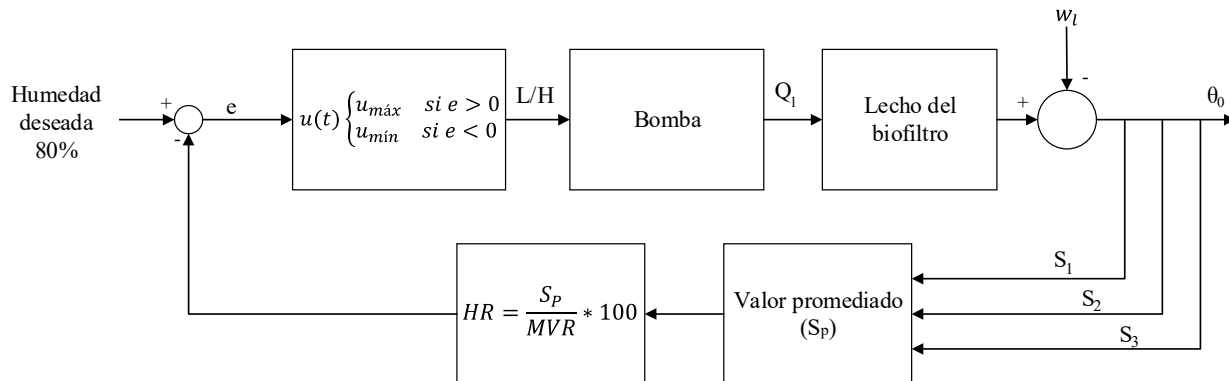


Figura 13. Diagrama esquemático del control on/off del sistema de humidificación.

Prueba de 12 horas

Para un lecho previamente humidificado se accionó el sistema de control, los sensores comenzaron con valores de humedad arbitrarios dependientes de las condiciones ambientales y del propio biofiltro en el momento de la acción.

Para el caso de la prueba de 12 horas las condiciones fueron las siguientes:

- La corriente de gas paso por una etapa previa de humidificación, por lo que la humedad de la corriente gaseosa a la entrada y a la salida del biofiltro se encontraba en condiciones cercana a la saturación.
- La temperatura promedio de la primera mitad de la prueba fue de 24°C, para la segunda mitad de la prueba la temperatura promedio del sistema fue de 28°C.

La humedad promedio del lecho fue de 53% al inicio de la prueba, antes de la primera acción de la bomba.

Prueba de 6 horas

En el caso de la prueba de 6 horas las condiciones de operación del biofiltro fueron las siguientes:

- De la misma forma que en la prueba de 12 horas, la corriente de gas paso por una etapa de prehumidificación, por lo que, a la entrada y a la salida la corriente gaseosa se encontraba en condiciones cercanas a la saturación.
- La humedad promedio del lecho al comienzo de la prueba fue de 56% antes de la primera acción de la bomba.

La temperatura promedio de la primera mitad de la prueba fue de 24°C, y para la segunda mitad de la prueba fue de 27°C.

6.4.2 Estrategias de control basadas en reglas

Se establece un esquema de control considerando el valor de cada sensor en las acciones discretas de la bomba. Las acciones de la bomba obedecen a sentencias de la forma:

$$\text{If } S1=A \quad \text{and } S2=B \quad \text{and } S3=C \\ \text{Then } P=[\text{HIGH/LOW}], \text{ delay}(t) [\text{min}, \text{s}];$$

Donde:

A, B y C: Son los valores porcentuales de humedad del lecho.

P: Bomba encendida o apagada

t: El tiempo de acción de la bomba dependiente de los valores medidos por los sensores.

En la Figura 18, se puede apreciar el esquema de control empleado para el control de la humedad del lecho, incluyendo una perturbación asociada al arrastre adiabático de agua debido a la corriente de gas (w_l)

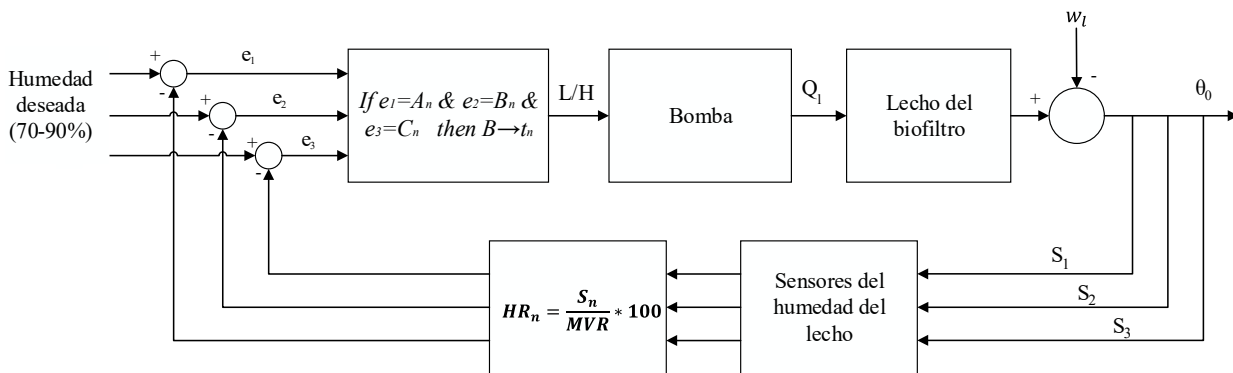


Figura 14. Diagrama esquemático del control (basado en la experiencia del operador) de humedad del BLE.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan, detallan y discuten los resultados de las pruebas para la caracterización de los sensores y el control aplicado a la bomba (on/off).

7.1 Caracterización de los sensores de humedad del lecho

Como se definió anteriormente, el propósito de la prueba era la caracterización de los sensores para diferentes tiempos de irrigación, así como la determinación del valor digital máximo en condiciones de operación dinámicas. A continuación, se detallan los resultados apreciados en las curvas-respuesta del sistema.

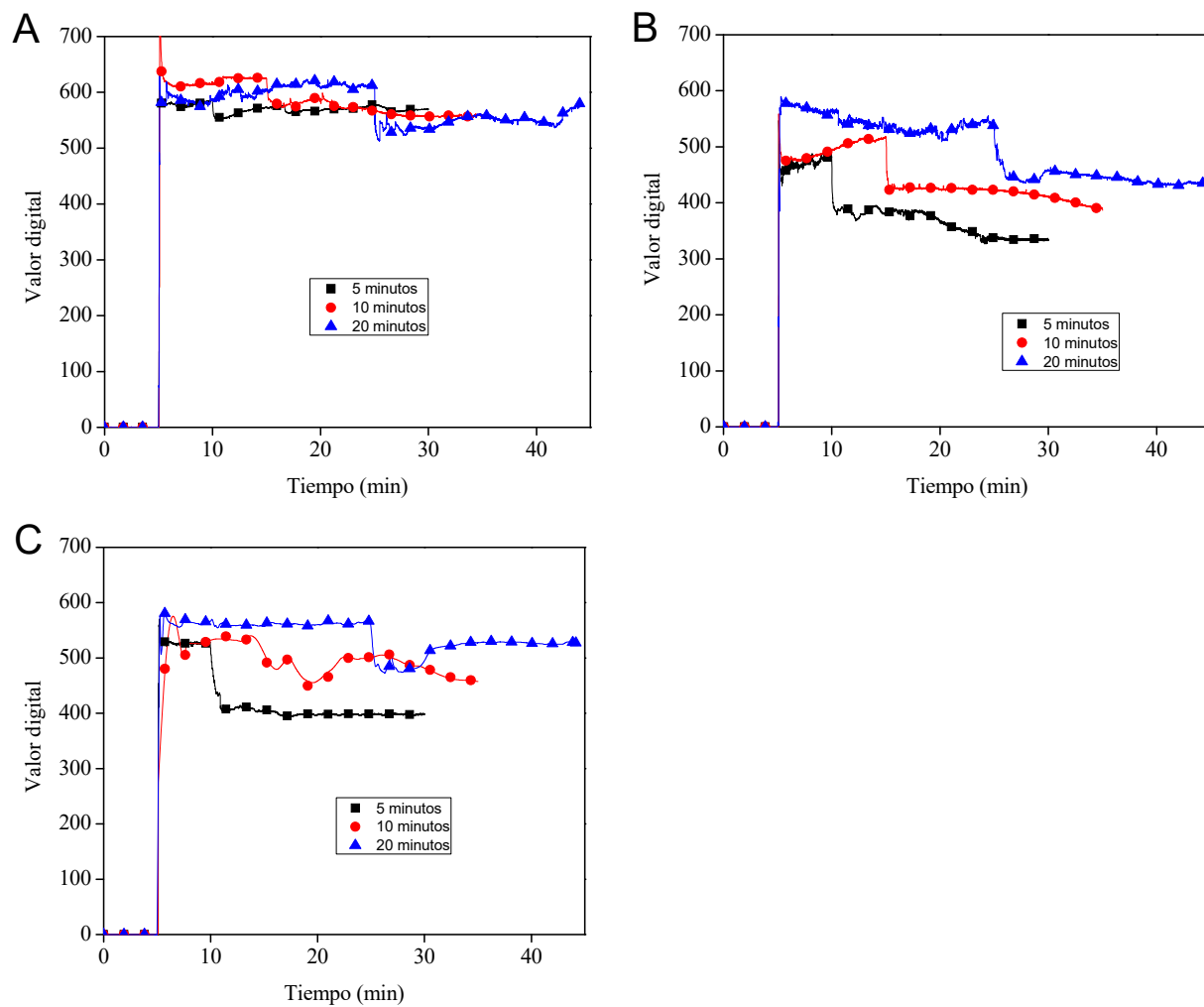


Figura 15. Curvas respuesta del sistema a diferentes tiempos de irrigación. A) Sensor 1, B) Sensor 2 y C) Sensor 3.

Es importante definir algunos detalles del comportamiento que puede apreciarse en las gráficas de la Figura 19:

- El escalón abrupto que hace ascender la curva del 0 valor digital hasta n valor digital representa la intervención de la bomba en la rutina predefinida.
- El descenso escalonado en el valor digital representa la interrupción de la irrigación. Después del escalón el valor digital para cada sensor se mantuvo en valores estables ligeramente perturbados.
- La meseta de valores estables en las curvas-respuesta tienen diferentes duraciones, la más corta es para los 5 minutos de irrigación en tanto la más larga es para los 20 minutos de irrigación.

Para el caso de cada sensor el comportamiento fue distinto a los mismos tiempos de irrigación:

- La Figura A muestra que el lecho en el estrato superior es altamente susceptible a la irrigación de la bomba. Independientemente del tiempo de irrigación se observa el mismo comportamiento.

El lecho logro saturarse aceleradamente debido a su cercanía con el aspersor. De tal forma que después de la suspensión de la irrigación no se tuvo un descenso escalonado demasiado grande en comparación con los otros estratos.

- Como se puede apreciar en la Figura B y C a mayores tiempos de irrigación, los valores digitales son mayores. Lo anterior indica que se requiere una irrigación más prolongada para favorecer la retención hidráulica en el lecho de los estratos inferiores, particularmente cuando se parte de un lecho completamente seco, el comportamiento es distinto cuando se parte de un lecho previamente humidificado.

Por otro lado, para el caso de los estratos inferiores, en tiempos suficientemente prolongados, se suelen presentar perturbaciones adicionales directamente asociadas con el descenso del medio de cultivo de estratos superiores.

7.2 Pruebas de desecado del lecho del biofiltro

Mediante pruebas gravimétricas de retención hidráulica en condiciones dinámicas (hold up dinámico) se determinó que la retención promedio de medio acuoso en el lecho empacado es de 9 gr. Esa cantidad de agua retenida se utilizó para trazar las curvas de desecado.

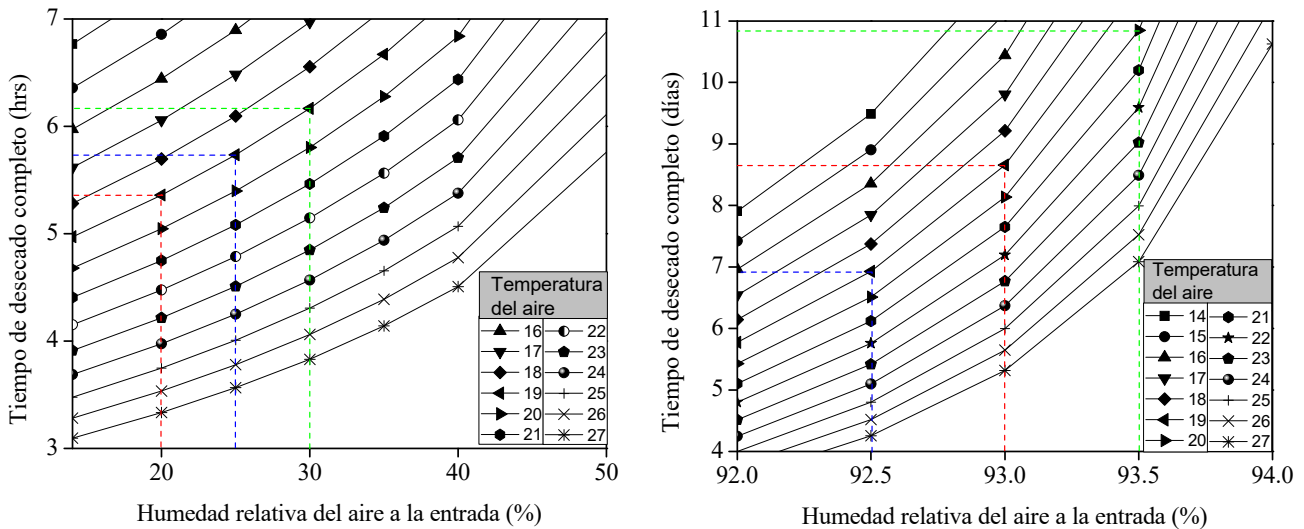


Figura 16. Curvas de tiempo de desecado para diferentes temperaturas y humedades relativas de la corriente de aire a la entrada.

La Figura 20, representa las estimaciones para el tiempo de desecado con una corriente sin prehumidificación (lado izquierdo) para una humedad relativa del aire por debajo del 50% y una corriente de aire con una configuración de prehumidificación en el rango de 92 a 94% de humedad a la entrada (lado derecho). El cálculo se estimó para el rango de temperaturas de 14 a 27°C. Por ejemplo, considerando una humedad relativa constante de 30%, para 27°C el tiempo de desecado es de aproximadamente 3.8 horas; en tanto para 19°C el tiempo de desecado puede extenderse hasta 6.2 horas. Por otro lado, el tiempo de desecado para una corriente de aire a la entrada por encima del 94% puede extenderse por encima de 11 días para retirar completamente la carga de medio acuoso retenido en el lecho empacado.

La humedad promedio de la corriente gaseosa a la entrada del lecho para el estudio fue de 27% con una temperatura promedio de 19°C, en tanto la corriente de gas salió con una humedad promedio de 95%. Como puede apreciarse, la

corriente de gas a la entrada con una humedad promedio por debajo de 40% provoca un desecado alto del lecho para tiempos cercanos a 9 horas.

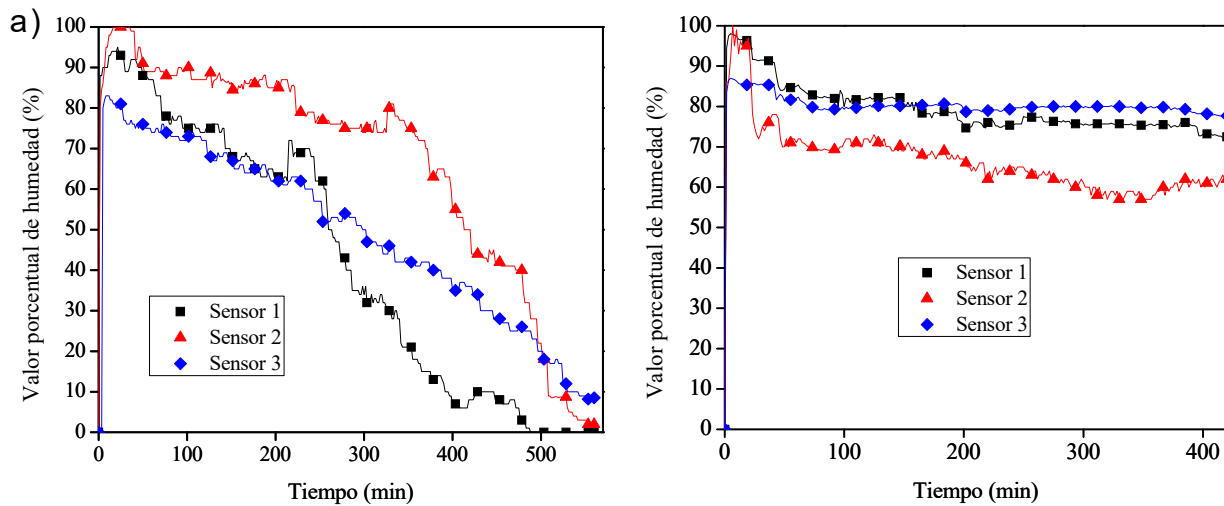


Figura 17. Pruebas de desecado. a) Prueba de desecado de lecho para una corriente de gas sin prehumidificación. B) Prueba de desecado para una corriente gaseosa con prehumidificación.

Para el caso del biofiltro con una corriente de gas prehumidificada, la humedad promedio a la entrada era de alrededor del 95%, con una humedad promedio a la salida de 95%. Como puede apreciarse en la Figura 20 los datos obtenidos son considerablemente más estables. Debido a que la corriente de gas tiene humedades promedio muy cercanas tanto a la entrada como a la salida existe una notable disminución en el arrastre adiabático del agua presente en el lecho. Por lo tanto, para la operación de un biofiltro de lecho escurrido es recomendable una configuración con una corriente gaseosa prehumidificada, de esta forma pueden reducirse considerablemente las intervenciones del sistema de irrigación.

Debido a que las pruebas se extienden por periodos prolongados, las estimaciones de desecado empleando los valores promedio de humedad y temperatura de la corriente gaseosa a la entrada nos permiten tener una idea general del tiempo de desecado del empaque del biofiltro. Por tal razón, la tasa de evaporación es distinta en cada momento de la prueba y depende del cambio de la humedad relativa de la corriente de gas a la entrada y la temperatura ambiental (condiciones atmosféricas). Sin embargo, es considerablemente útil para efectos del control de la cantidad de liquido retenido en el lecho usar la

instrumentación para la estimación de desecado en configuraciones que no permiten una prehumidificación de la corriente de gas a la entrada de un biofiltro de lecho escurrido.

La determinación de la tasa de evaporación y el tiempo de desecado permite diseñar las estrategias para el control discreto de las acciones del sistema de irrigación tomando en cuenta junto con ello la experiencia del operador del sistema para lograr mayor precisión en las acciones del sistema de humidificación.

7.3 Pruebas de control aplicado

A continuación, se detallan y discuten los resultados de las pruebas del control aplicado a la bomba para la irrigación del lecho escurrido del biofiltro.

7.3.1 ON/OFF

Como se detalló previamente, el punto de consigna para este control se seleccionó en 80% de humedad del lecho, para que independientemente de las oscilaciones el valor pudiera mantenerse dentro del rango de 70-90% de humedad. Se llevaron a cabo dos pruebas con el control aplicado al sistema, la primera tuvo una duración de poco más de 12 horas y la segunda tuvo una duración de 6 horas.

Prueba de 12 horas

Como se aprecia en la Figura 21 (inciso a), la humedad promedio del lecho se mantiene dentro del rango de humedad óptimo. Sin embargo, en el caso de los valores individuales de los sensores de ^{b)} humedad (Figura 21 inciso b), el Sensor 1, se mantuvo por encima del límite superior del rango óptimo de humedad, en tanto el Sensor 2 se mantuvo oscilante, por momentos fuera del rango óptimo. Para el caso del Sensor 3, prácticamente el tiempo total de la prueba se mantuvo dentro del rango óptimo.

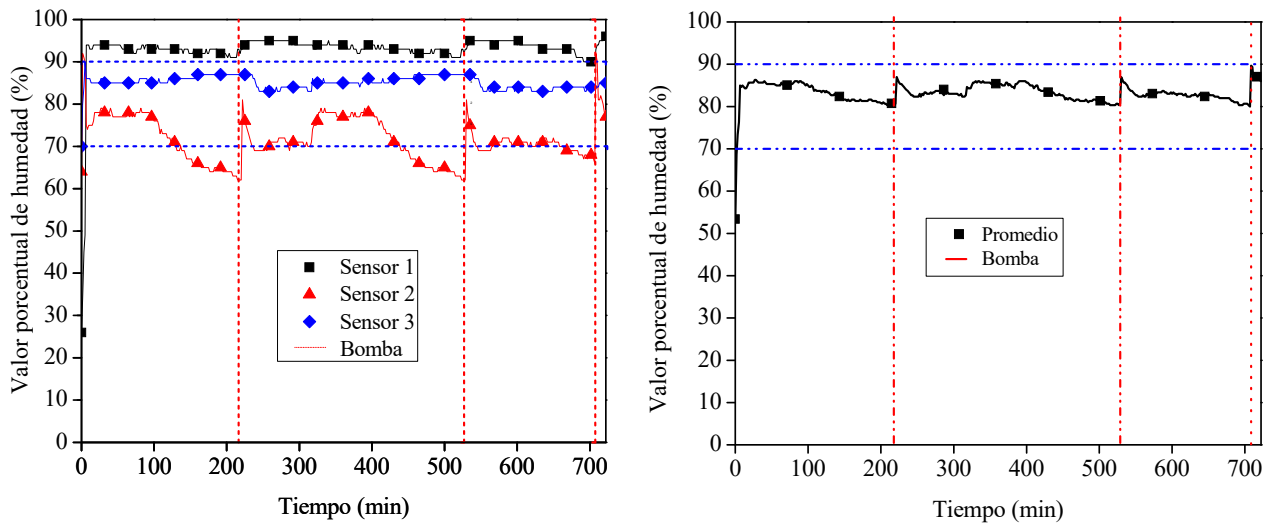


Figura 18. Prueba de 12 horas para el control on/off aplicado al control de la humedad del lecho. a) Para valores de humedad promediados b) Individuales para cada sensor. Sensor 1 (■), Sensor 2(▲) y Sensor 3 (◇) Las líneas azules delimitan el rango de humedad óptimo, las líneas rojas representan las acciones de la bomba.

La bomba actuó un total de 4 veces durante toda la prueba. Como puede apreciarse en la figura, debido a que el estrato superior medido por el Sensor 1 se encontraba por encima del 90% de humedad del lecho, y la humedad del estrato inferior medida por el Sensor 3, la humedad del sensor 2 correspondiente al estrato medio del lecho, se desplomó a valores cercanos al 60% de humedad, antes de la acción de la bomba.

Prueba de 6 horas

Para la prueba de 6 horas, la bomba actuó un total de 3 veces para la corrección del valor promediado de los sensores. A diferencia de la prueba anterior, debido a que el valor de la humedad del lecho en el estrato superior estaba ligeramente por encima del 90% y el valor de la humedad del lecho del estrato inferior se encontró muy cerca del 80%, las acciones de la bomba fueron mayormente provocadas por la humedad medida en el estrato medio del lecho. A diferencia de las pruebas anteriores, los dos estratos inferiores se encontraron prácticamente todo el tiempo dentro del rango de humedad óptimo.

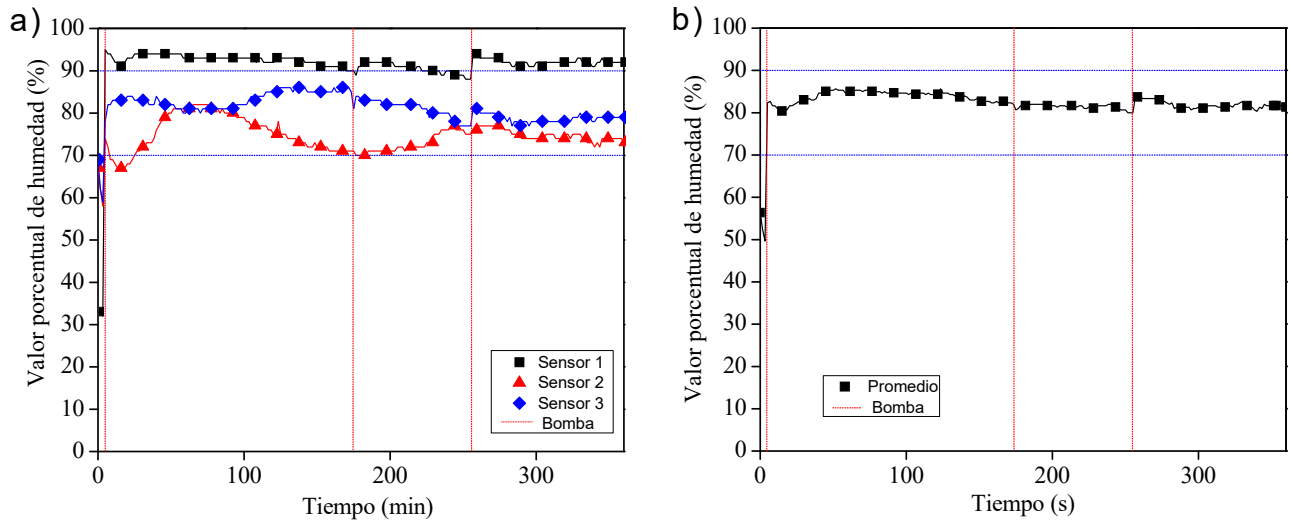


Figura 19. Prueba de 6 horas para el control on/off aplicado al control de la humedad del lecho. a) Para valores de humedad promediados b) Individuales para cada sensor. Sensor 1 (■), Sensor 2(▲) y Sensor 3 (◇) Las líneas azules delimitan el rango de humedad óptimo, las líneas rojas representan las acciones de la bomba.

El problema de utilizar el valor promedio de la humedad medida por los sensores es que la realimentación del sistema de control que acciona la bomba en el esquema on/off no tiene en cuenta los valores propios de los estratos del lecho y, por ende, puede que uno o dos se encuentren fuera del rango óptimo de operación. Las ventajas operativas de esta configuración radican en la sencillez de la implementación, considerando que las operaciones de planta en un biofiltro de lecho escurrido son predominantemente bajo el concepto de PLC, es decir, acciones por interrupciones con tiempos de acción predefinidos.

7.3.2 Estrategias de control basadas en reglas

En el caso de las pruebas con las estrategias de control aplicadas al proceso de humidificación la Figura 24 muestra el comportamiento del sistema a la irrigación. Partiendo de un lecho completamente seco, los primeros 40 minutos corresponden al periodo de adecuación del empaque al liquido recirculado.

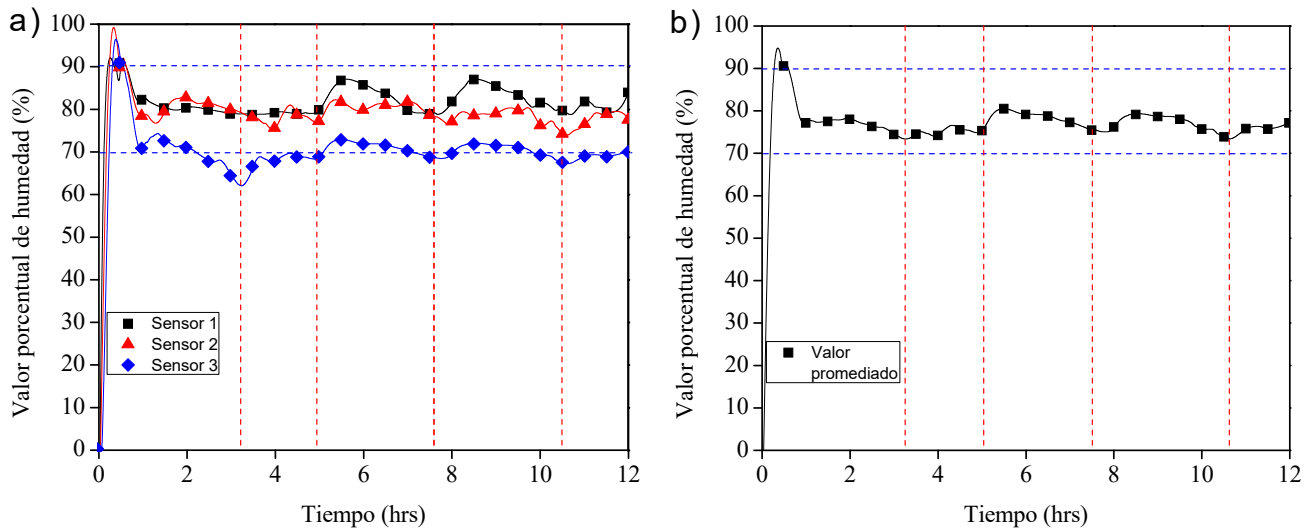


Figura 20. Prueba de 12 horas para el control por estrategias aplicado al control de la humedad del lecho. a) Para valores de humedad promediados b) Individuales para cada sensor. Sensor 1 (■), Sensor 2(▲) y Sensor 3 (◇) Las líneas azules delimitan el rango de humedad óptimo, las líneas rojas representan las acciones de la bomba.

Durante la prueba de 12 horas el sistema de irrigación intervino un total de cuatro veces para estabilizar los valores de humedad dentro del lecho. La primera acción de la bomba, después de la irrigación inicial, tuvo una duración de 30s, en tanto las acciones restantes duraron 15s cada una.

Si bien las estrategias de control no consideraron los valores promedio, sino los valores individuales obtenidos por cada sensor, en el valor promediado de la Figura 24 (lado derecho) ubica en todo momento la cantidad de líquido en el lecho dentro del rango ideal. Es digno de mención que los efectos de una irrigación breve se pueden extender durante minutos o hasta horas, por lo que después de la irrigación el sistema considera un periodo de reacción y estabilidad antes de tomar una acción adicional.

Aunque a primera vista las acciones de control basadas en estrategias parecen tener el mismo efecto en la humedad del lecho, la mayor virtud que tiene este esquema de control es que se reduce la sobre acción del sistema para valores de humedad arbitrarios al arranque de la planta, esto implica que sin importar el valor de humedad medido por los sensores, el esquema de control toma las acciones que emulan el comportamiento de un operario con el objetivo de preservar la integridad de los microorganismos que inoculan el soporte.

8. CONCLUSIONES

Se logro diseñar e implementar un sistema de sensores para la medición de la humedad de la corriente gaseosa, la temperatura de la corriente gaseosa y del líquido para la determinación de la humedad del lecho. Se concluye que la medición de la variación de la conductividad eléctrica de un lecho inerte compuesto por un medio poroso es una medida congruente con la humedad del lecho, siempre y cuando se determine de forma experimental la correlación entre la retención gravimétrica y el valor digital de conductividad. La medición de la humedad de la espuma de poliuretano basada en la conductividad eléctrica es fiable debido a la capacidad de retención hidráulica del material.

Tomando en cuenta el segundo objetivo planteado, la determinación de las curvas de respuesta voltaje-tiempo permiten establecer las correlaciones numéricas necesarias para la determinación de estrategias de control que han de ser aplicadas al sistema. El estudio de la respuesta del sistema para el proceso de la humidificación del lecho inerte permitió establecer los criterios de calibración y corrección de la medición de los sensores en condiciones dinámicas. Tras entender la respuesta del sistema al proceso de humidificación y hacer la correlación con las pruebas gravimétricas se logró tener una medida más precisa de la cantidad de líquido real retenida en el lecho, esta medición podrá tomarse en cuenta en la determinación de la eficiencia global de remoción de contaminantes del biofiltro.

Al conocer mejor la dinámica de desecado presente en el biofiltro de lecho escurrido y tomar en cuenta los efectos de una corriente gaseosa con humedades relativas por debajo del 50% se hizo un cambio en la configuración de la circulación de la corriente gaseosa a la entrada del sistema. El propósito del cambio es incrementar la humedad relativa a la entrada (para incrementarla hasta el 95%) del biofiltro para reducir la tasa de evaporación por arrastre adiabático, todo esto tomando en cuenta condiciones psicrométricas. Mediante esta configuración logro reducirse considerablemente la tasa de desecado del

biofiltro, lo cual a su vez pudo ser validado por una inspección visual del lecho y eventualmente pruebas gravimétricas.

El diseño de las estrategias de control basadas en la experiencia del operador sumadas a una mejor comprensión de la dinámica de desecado permite mantener el sistema en el rango optimo de humedad para obtener la mayor eficiencia global de remoción de contaminantes. El uso de estrategias de control más sofisticadas permite a su vez reducir las intervenciones de sistema de humidificación y preservar la integridad de la biopelícula. La adición rutinaria de líquido al sistema para la humidificación del lecho usualmente lleva a la sobre humidificación del medio de soporte, el uso de estrategias de control permite mantener en un rango óptimo de humedad al empaque del biofiltro.

En conclusión, puede decirse que, el uso de sensores y ambientes virtuales para el monitoreo y el control de variables de proceso en un biofiltro permitirán la mejorar de la capacidad de remoción de contaminantes y mejores estudios respirométricos, en tanto tales sistemas de medición puedan diseñarse e implementarse eficientemente para la medición de variables.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] N. L. Panwar, S. C. Kaushik, and S. Kothari, “Role of renewable energy sources in environmental protection: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 3, pp. 1513–1524, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.11.037.
- [2] I. Dincer, “Renewable energy and sustainable development: A crucial review,” *Renew. Sustain. energy Rev.*, vol. 4, no. 2, pp. 157–175, 2000, doi: 10.1016/S1364-0321(99)00011-8.
- [3] C. W. Bonilla Blancas and S. R. Moiseev, “Uso de respirometrías heterogéneas para estimar coeficientes de transferencia de masa interfaciales y parámetros biocinéticos en biofiltros de lecho escurrido”, 2013.
- [4] L. Merino, “Las energías renovables,” *Haya Comun.*, p. 20, 2007.
- [5] G. S. Alemán-Nava *et al.*, “Renewable energy research progress in Mexico: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 32, pp. 140–153, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.01.004.
- [6] J. C. Schallenberg *et al.*, *Energías renovables y eficiencia energética*. 2008.
- [7] J.G.Speight, “Biofuels Handbook,” *No. 5. R. Soc. Chem.*, pp. 304–330, 2010, doi: 10.1039/9781849731027.
- [8] H. Machrafi, *Alternative Energy Sources*. 2012.
- [9] U. Rasool and S. Hemalatha, “A review on bioenergy and biofuels : sources and their production,” no. January, 2016, doi: 10.21472/bjbs.030501.
- [10] A. Holt and I. J. Pengelly, “Renewable Energy: An Overview,” *15th World Congr. Intell. Transp. Syst. ITS Am. Annu. Meet. 2008*, vol. 6, pp. 3854–3862, 2008, doi: 10.1049/ic.2008.0789.
- [11] A. H. Scragg, “Biofuels: Production, Application and Development,” 2007.
- [12] F. Ma and M. A. Hanna, “Biodiesel production: a review1Journal Series

#12109, Agricultural Research Division, Institute of Agriculture and Natural Resources, University of Nebraska–Lincoln.1,” *Bioresour. Technol.*, vol. 70, no. 1, pp. 1–15, 1999, doi: 10.1016/s0960-8524(99)00025-5.

- [13] T. Elangovan and L.Jeryraj Kumar, “Biodiesel and its Properties from Various Feedstocks,” *Int. J. Trends Eng. Technol.*, vol. 1, no. 2, 2017.
- [14] A. Demirbas, *Biofuels: Securing the planet’s future energy needs*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [15] M. J. Haas, A. J. McAloon, W. C. Yee, and T. A. Foglia, “A process model to estimate biodiesel production costs,” *Bioresour. Technol.*, vol. 97, no. 4, pp. 671–678, 2006, doi: 10.1016/j.biortech.2005.03.039.
- [16] A. Tasneem, T. S.M., and A. S.A., *SpringerBriefs in Environmental Science*. SpringerBriefs in Environmental Science.
- [17] A. D. Dorado, *Purificación y usos del biogás Purification*, no. May. 2017.
- [18] N. Abatzoglou and U. De Sherbrooke, “A review of biogas purification,” pp. 42–71, 2009, doi: 10.1002/bbb.
- [19] D. Pokorna and J. Zabranska, “Sulfur-oxidizing bacteria in environmental technology,” *Biotechnol. Adv.*, vol. 33, no. 6, pp. 1246–1259, 2015, doi: 10.1016/j.biotechadv.2015.02.007.
- [20] C. C. Xu *et al.*, “Biomass Energy,” *Compr. Energy Syst.*, vol. 1–5, pp. 770–794, 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-809597-3.00121-8.
- [21] H. Gabriel, David, Sierra, *Purificación y usos del biogás -*, no. May. 2017.
- [22] F. Bolívar, “Fundamentos y casos exitosos de la biotecnología moderna,” *El Col. Nac. México D. F.*, pp. 625–658, 2004.
- [23] M. C. Delhoménie and M. Heitz, “Biofiltration of air: A review,” *Crit. Rev. Biotechnol.*, vol. 25, no. 1–2, pp. 53–72, 2005, doi: 10.1080/07388550590935814.

- [24] G. A. Serial, F. L. Smith, M. T. Suidan, P. Biswas, and R. O. Brenner, "Evaluation of trickle bed biofilter media for toluene removal," *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 45, no. 10, pp. 801–810, 1995, doi: 10.1080/10473289.1995.10467410.
- [25] C. van Lith, G. Leson, and R. F. Michelsen, "Evaluating design options for biofilters," *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 47, no. 1, pp. 37–48, 1997, doi: 10.1080/10473289.1997.10464410.
- [26] M. Morales, S. Hernández, T. Cornabé, S. Revah, and R. Auria, "Effect of drying on biofilter performance: Modeling and experimental approach," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 37, no. 5, pp. 985–992, 2003, doi: 10.1021/es025970w.
- [27] P. A. Gostomski, J. B. Sisson, and R. S. Cherry, "Water Content Dynamics in Biofiltration: The Role of Humidity and Microbial Heat Generation," *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 47, no. 9, pp. 936–944, 1997, doi: 10.1080/10473289.1997.10463952.
- [28] R. C. Dorf and R. Bishop, "Sistemas de Control Moderno." p. 885, 2005.
- [29] K. Ogata, *Dinámica de sistemas*. 1987.
- [30] K. J. Åström and T. Hägglund, *Control PID avanzado*. 2009.
- [31] P. N. Paraskevopoulos, *Modern Control Engineering*. 2001.
- [32] W. Bolton, "Ingeniería de control," 2001.
- [33] B. C. Kuo, "Sistema de control automático," *Sist. Control Automático*, pp. 16–19, 1996.
- [34] H. te Braake, R. Rabrushka, E. Van Can, and C. Helling, "Predictive control in Biotechnology using Fuzzy and Neural Models." 1998.
- [35] A. Ligêza, *Logical Foundations for Rule-Based Systems*. 2006.
- [36] P. J. F. Lucas and L. C. van der Gaag, "Principles of Expert Systems," *Addison-Wesley Longman*, p. 426, 1991, [Online]. Available:

<https://www.cs.ru.nl/~peterl/proe.pdf>.

- [37] C. Van Lith, G. Leson, and R. Michelsen, “Journal of the Air & Waste Management Association Evaluating Design Options for Biofilters,” no. September 2014, pp. 37–41, 2011, doi: 10.1080/10473289.1997.10464410.
- [38] L. Yang, X. Wang, T. L. Funk, S. Shi, R. S. Gates, and Y. Zhang, “Moisture monitoring and control in gas-phase biofilters to achieve high ammonia removal efficiency and low nitrous oxide generation,” *Trans. ASABE*, vol. 56, no. 5, pp. 1895–1903, 2013, doi: 10.13031/trans.56.9843.

ANEXO 1

Código empleado para la captura de datos.

A continuación, se muestra el código empleado para el monitoreo de las variables: humedad del lecho, humedad de la corriente gaseosa, temperatura de la corriente gaseosa y temperaturas en el tanque.

1. Incluir las librerías para los sensores DHT11 y DS18B20: Dar clic en el botón “Programa”, clic en el apartado “Incluir librería” y, por último, “Administrar bibliotecas”.

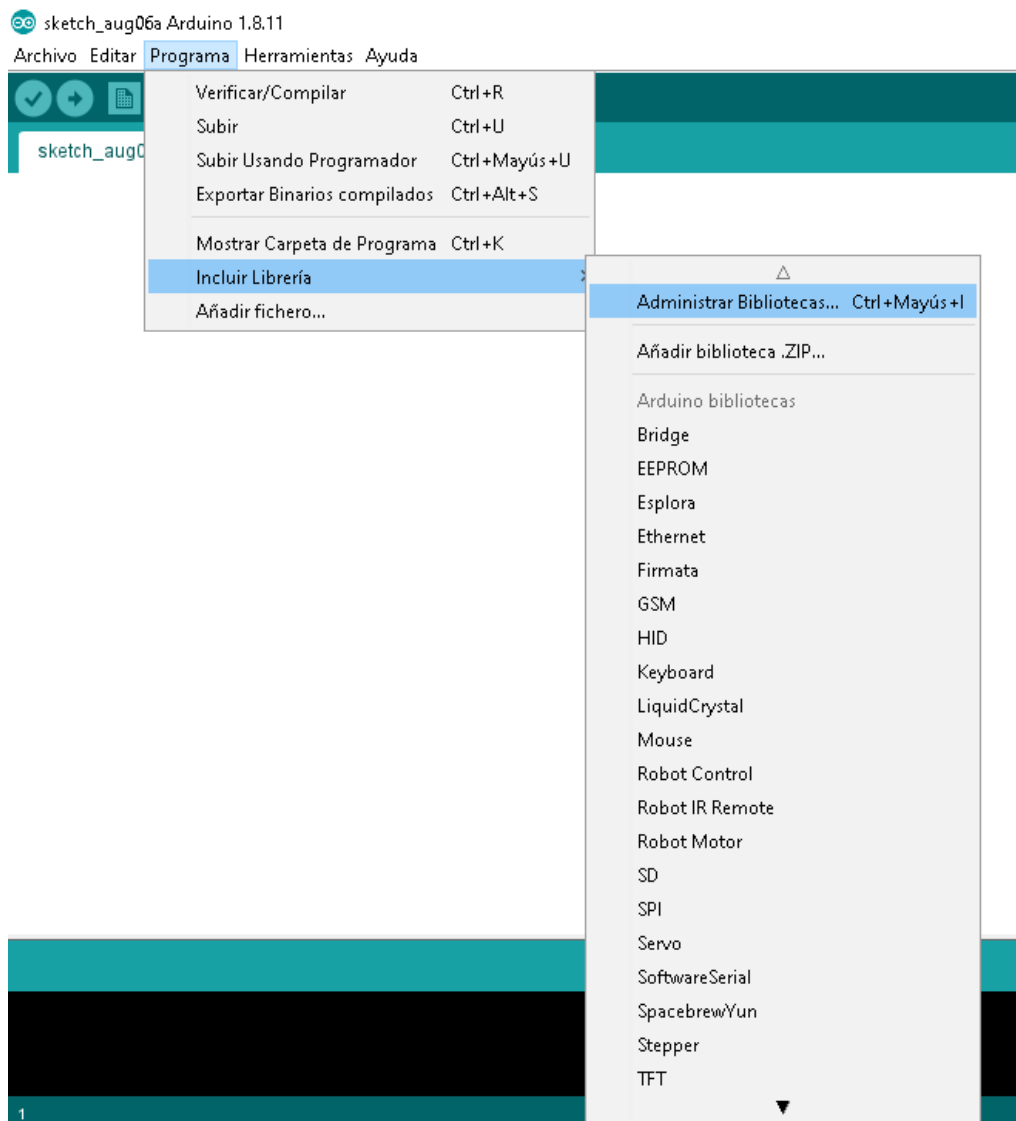


Figura 1. Acceso a las bibliotecas Arduino

2. Buscar las librerías para los sensores DHT11: En la entrada de búsqueda del *Gestor de Librerías* introducir “DHT” y seleccionar la librería “DHT sensor library” de *Adafruit*.

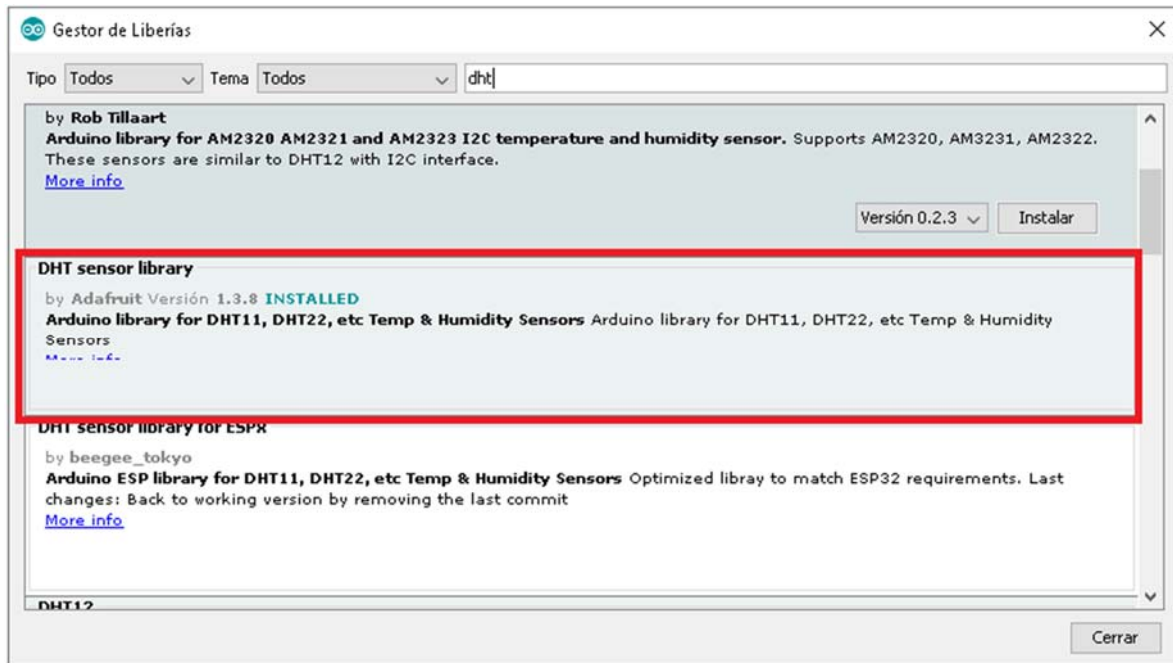


Figura 2. Descarga de librería para sensor DHT11

3. Buscar las librerías para los sensores DS18B20: En la entrada de búsqueda del *Gestor de Librerías* introducir “DS18B20” y seleccionar la librería “DallasTemperature” de *Miles Burton*.

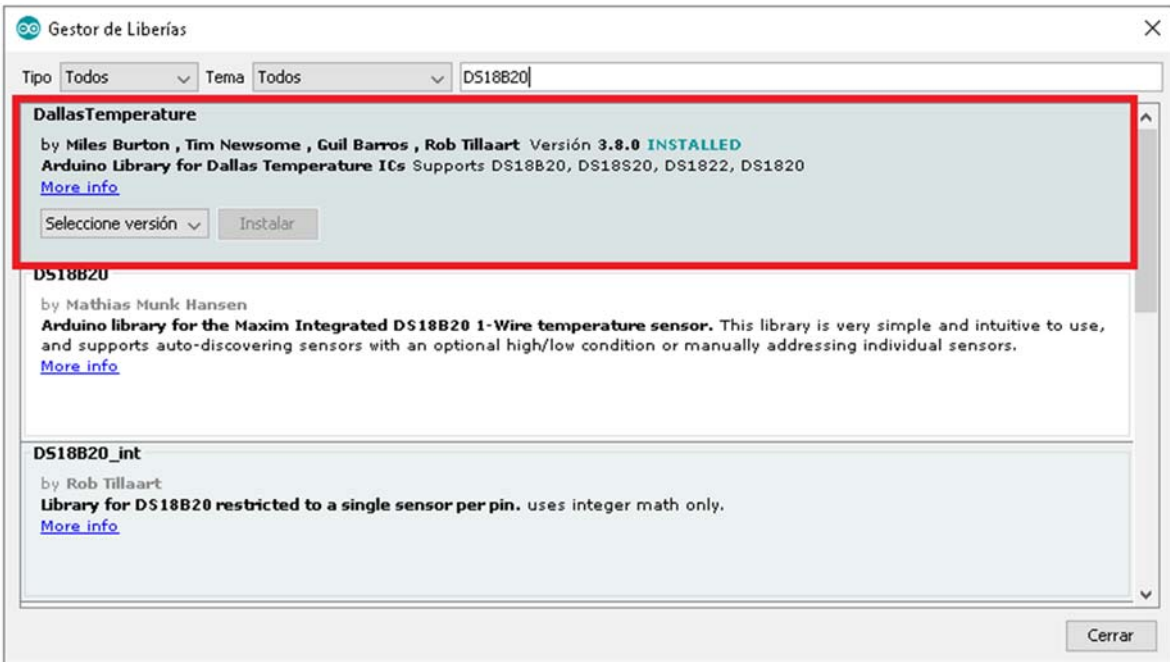


Figura 3. Descarga de librería DallasTemperature

4. Código para el monitoreo: A continuación, se muestra el código completo para la lectura de los sensores. Las sondas empleadas para la medición de la humedad del lecho no requieren librerías adicionales ya que las lecturas que otorgan son analógicas.

Las lecturas son impresas en el monitor serial de Arduino para el tratamiento posterior de los datos.

```

Pruebas_080420$
#include <DHT.h>
#include <DHT_U.h>

#define DHTPIN1 8           //Se define el pin digital número 8 como la entrada del sensor de humedad y temperatura DHT11, el cual mide las condiciones del gas a la entrada del biofiltro.
#define DHTTYPE DHT11

#define DHTPIN2 9           //Se define el pin digital número 9 como la entrada del sensor de humedad y temperatura DHT11, el cual mide las condiciones del gas a la salida del biofiltro.
#define DHTTYPE DHT11

DHT dht1(DHTPIN1,DHTTYPE);
DHT dht2(DHTPIN2,DHTTYPE);

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

int relay=7;                //Se declaró el puerto digital 7 como "relay", este es el puerto que activa el relevador de la bomba para humidificar el lecho del biofiltro
int Sensor1;                //La entrada "Sensor1" cuantifica la conductividad eléctrica del lecho en el estrato superior de la columna.
int Sensor2;                //La entrada "Sensor2" cuantifica la conductividad eléctrica del lecho en el estrato medio de la columna vertical
int Sensor3;
int Proa;
int Proa2;
int VM;
int VP1;
int VP2;
int VP3;

int temp1;                 //La entrada "temp1" y "hum1" aluden a las mediciones hechas a la corriente gaseosa a la entrada de la columna por el sensor DHT11

```

Figura 4. Código para captura de datos parte 1

```

Pruebas_080420

#include <DHT.h>
#include <DHT_U.h>

#define DHTPIN1 8           //Se define el pin digital número 8 como la entrada del sensor de humedad y temperatura DHT11, el cual mide las condiciones del gas a la entrada del biofiltro.
#define DHTTYPE DHT11

#include <DHT.h>
#include <DHT_U.h>

#define DHTPIN1 8           //Se define el pin digital número 8 como la entrada del sensor de humedad y temperatura DHT11, el cual mide las condiciones del gas a la entrada del biofiltro.
#define DHTTYPE DHT11

#define DHTPIN2 9           //Se define el pin digital número 9 como la entrada del sensor de humedad y temperatura DHT11, el cual mide las condiciones del gas a la salida del biofiltro.
#define DHTTYPE DHT11

DHT dht1(DHTPIN1,DHTTYPE);
DHT dht2(DHTPIN2,DHTTYPE);

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

int relay=7;               //Se declaró el puerto digital 7 como "relay", este es el puerto que activa el relevador de la bomba para humidificar el lecho del biofiltro
int Sensor1;               //La entrada "Sensor1" cuantifica la conductividad eléctrica del lecho en el estrato superior de la columna.
int Sensor2;               //La entrada "Sensor2" cuantifica la conductividad eléctrica del lecho en el estrato medio de la columna vertical
int Sensor3;
int Prom;
int Prom2;

```

Figura 5. Código para captura de datos parte 2

```

Pruebas_080420

int VM;
int VP1;
int VP2;
int VP3;

int temp1;                 //La entrada "temp1" y "hum1" aluden a las mediciones hechas a la corriente gaseosa a la entrada de la columna por el sensor DHT11
int hum1;

int temp2;                 //La entrada "temp2" y "hum2" aluden a las mediciones hechas a la corriente gaseosa a la salida de la columna por el sensor DHT11
int hum2;

int T1;                   //La entrada T1 representa el sensor de temperatura en el interior del tanque de recirculación, este se encuentra en la parte superior y no esta inmerso (HEAD UP)
int T2;                   //La entrada T2 representa el sensor de temperatura en el interior del tanque de recirculación, este se encuentra sumergido en el liquido recirculado.

const byte pinDatosDQ = 10; //Puerto digital en el que estan conectados los sensores DS18B20, para este caso es el puerto digital 10. Tanto el termometro "T1" como el "T2" estan conect
OneWire oneWireObjeto (pinDatosDQ);
DallasTemperature sensorDS18B20(oneWireObjeto);

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  Serial.println("ESTABLECIENDO COMUNICACIÓN CON LOS SENSORES");
  Serial.println(".....");
  delay(5000);

  digitalWrite(relay,HIGH);

  Serial.println("BOMBA APAGADA");
}

```

Figura 6. Código para captura de datos parte 3

```

Pruebas_080420

pinMode(relay,OUTPUT);
dht1.begin();             //Se inicia la comunicación con el sensor dht11 tanto a la entrada como a la salida
dht2.begin();
sensorDS18B20.requestTemperatures(); // put your setup code here, to run once:
delay(3000);

Serial.println("COMUNICACIÓN ESTABLECIDA");
delay(3000);

Sensor1=1023-analogRead(0);
Sensor2=1023-analogRead(1);
Sensor3=1023-analogRead(2);

Prom=(Sensor1+Sensor2+Sensor3)/3;

temp1=dht1.readTemperature();
temp2=dht2.readTemperature();

hum1=dht1.readHumidity();
hum2=dht2.readHumidity();

T1=sensorDS18B20.getTempCByIndex(0);
T2=sensorDS18B20.getTempCByIndex(1);

Serial.println("ESTATUS ACTUAL DEL SISTEMA");
Serial.print("Sensor1: ");
Serial.print(Sensor1);

```

Figura 7. para captura de datos Código parte 4

```

Pruebas_080420
Serial.print(" Sensor2: ");
Serial.print(Sensor2);
Serial.print(" Sensor3: ");
Serial.print(Sensor3);
Serial.print(" Promedio: ");
Serial.println(Prom);
Serial.print("Humedad in: ");
Serial.print(hum1);
Serial.print(" Humedad out: ");
Serial.print(hum2);
Serial.print(" Temperatura in: ");
Serial.print(temp1);
Serial.print(" Temperatura out: ");
Serial.print(temp2);
Serial.print(" Temperatura head up: ");
Serial.print(T1);
Serial.print(" Temperatura bottom: ");
Serial.println(T2);

Serial.println("SECUENCIA DE ARRANQUE COMPLETADA");
delay(2000);

Serial.println(".....");
Serial.println("ENCENDIENDO BOMBA DURANTE 15 MINUTOS");
digitalWrite(relay,LOW);
for(int i=0; i<15; i++) //Captura de datos previo a la accion de la bomba 3000-600=2400 ciclos de 500ms igual a 1200 segundos (20 minutos).
{
  i;
}

```

Figura 8. Código para captura de datos parte 5

```

Pruebas_080420
Serial.println(".....");
delay(1000);
Serial.println("APAGANDO LA BOMBA");
digitalWrite(relay,HIGH);
Serial.println("LECTURA DE DATOS DESPUES DE LA IRRIGACIÓN INICIAL");

Serial.println(".....");
Serial.println("ESTATUS DE ARRANQUE PREVIO AL LOOP DE CONTROL");
Serial.print("Sensor1: ");
Serial.print(Sensor1);
Serial.print(" Sensor2: ");
Serial.print(Sensor2);
Serial.print(" Sensor3: ");
Serial.print(Sensor3);
Serial.print(" Promedio: ");
Serial.println(Prom);
Serial.print("Humedad in: ");
Serial.print(hum1);
Serial.print(" Humedad out: ");
Serial.print(hum2);
Serial.print(" Temperatura in: ");
Serial.print(temp1);
Serial.print(" Temperatura out: ");
Serial.print(temp2);
Serial.print(" Temperatura head up: ");
Serial.print(T1);
Serial.print(" Temperatura bottom: ");
Serial.println(T2);

```

Figura 9. Código para captura de datos parte 6

```

Pruebas_080420
delay(15000);

Serial.println(" ");
Serial.println("INICIANDO LOOP");
}

void loop() {
  VM=600;
  VP1=Sensor1*100/600;
  VP2=Sensor2*100/600;
  VP3=Sensor3*100/600;

  Prom=(VP1+VP2+VP3)/3;

  temp1=dht1.readTemperature();
  temp2=dht2.readTemperature();

  hum1=dht1.readHumidity();
  hum2=dht2.readHumidity();

  T1=sensorD518B20.getTempCByIndex(0);
  T2=sensorD518B20.getTempCByIndex(1);

  Serial.print("Sensor1:/ ");
}

```

Figura 10. Código para captura de datos parte 7

```
Pruebas_080420
Serial.print(Sensor1);
Serial.print(" /VF1/ ");
Serial.print(VF1);
Serial.print(" /Sensor2:/ ");
Serial.print(Sensor2);
Serial.print(" /VF2/ ");
Serial.print(VF2);
Serial.print(" /Sensor3:/ ");
Serial.print(Sensor3);
Serial.print(" /VF3/ ");
Serial.print(VF3);
Serial.print(" /Promedio:/ ");
Serial.print(Prom2);
Serial.print(" /Humedad in:/ ");
Serial.print(hum1);
Serial.print(" /Humedad out:/ ");
Serial.print(hum2);
Serial.print(" /Temperatura in:/ ");
Serial.print(templ);
Serial.print(" /Temperatura out:/ ");
Serial.print(temp2);
Serial.print(" /Temperatura head up:/ ");
Serial.print(T1);
Serial.print(" /Temperatura bottom:/ ");
Serial.println(I2);

digitalWrite(relay,LOW);
delay(1000);
```

Figura 11. Código para captura de datos parte 8

ANEXO 2

Interfaz en LabVIEW para el monitoreo de las variables

Para el monitoreo de las variables en tiempo real en un ambiente grafico se realizó una interfaz en LabVIEW. Además, dicha interfaz permitió ejecutar las estrategias de control para la irrigación del lecho del BLE.

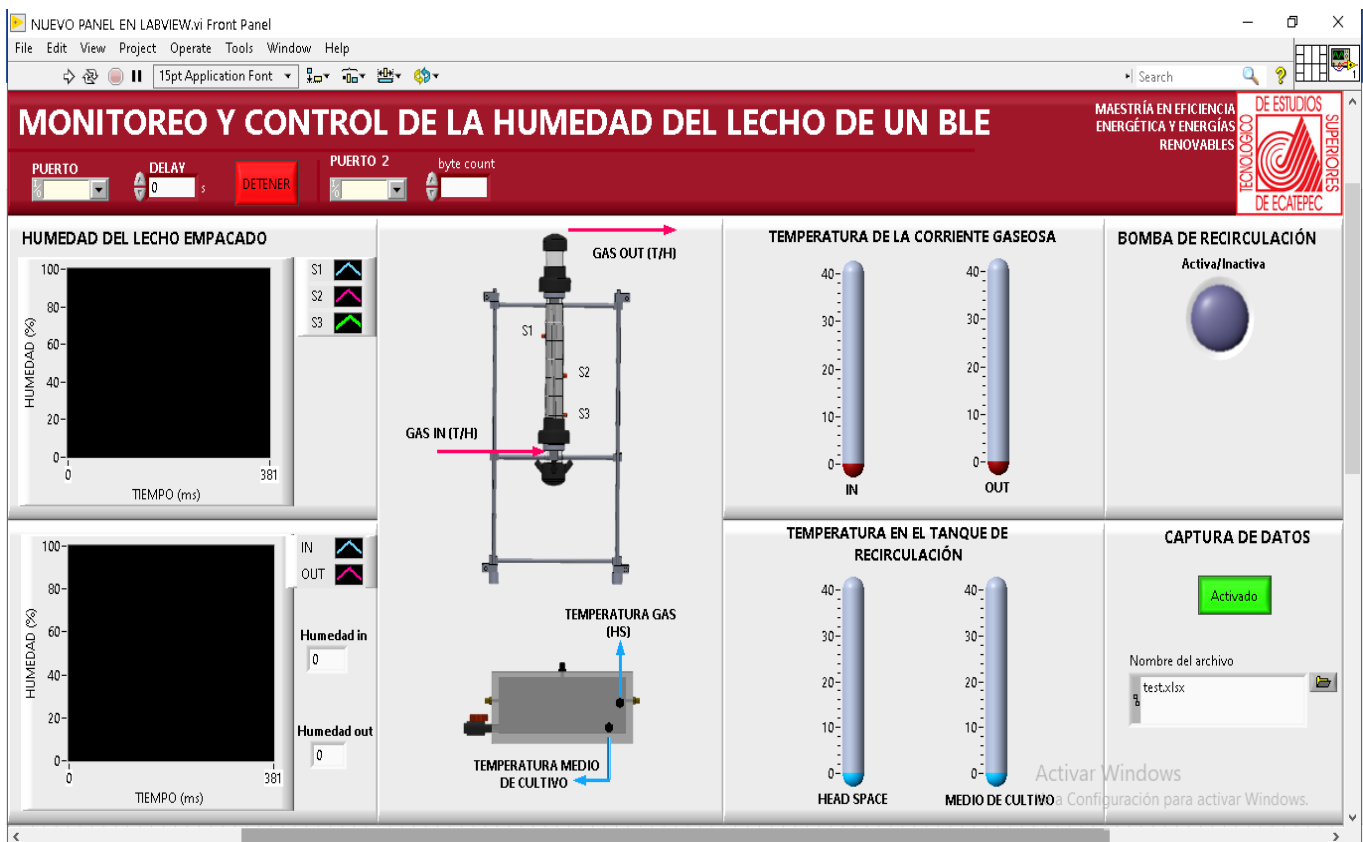


Figura 1. Panel frontal del VI para el monitoreo y control por estrategias de la humedad del biofiltro.

El panel frontal del VI para el monitoreo de la humedad del lecho, humedad de la corriente gaseosa, temperatura del medio acuoso y temperatura de la corriente gaseosa está construido de la siguiente forma:

- En la cintilla superior se tiene un selector del puerto para la tarjeta Arduino empleada como I/O. El primer puerto es para las lecturas analógicas proveniente de los sensores de humedad del lecho con un control para establecer el retraso dado en segundos (s). por otro lado, la siguiente entrada es para la selección del puerto de la tarjeta Arduino con el programa

precargado para la obtención de la humedad de la corriente gaseosa, la temperatura de la corriente gaseosa y la temperatura del medio acuoso.

- Debajo de la cintilla se tienen dos graficadores de onda. En la parte superior se grafica la humedad del lecho medida por cada sensor y eventualmente procesada, en tanto el graficador inferior mide la humedad relativa de la corriente gaseosa.
- Contiguo a los graficadores se tiene un diagrama representativo del biofiltro de lecho escurrido con la ubicación de los diferentes sensores empleados para medir las diferentes variables.
- A continuación, se tienen indicadores para la medición de la temperatura de la corriente gaseosa y del medio acuoso en el tanque.
- Por último, se tiene un indicador LED virtual que indica si la bomba está o no accionada en función de las estrategias de control empleadas para la dosificación del medio acuoso al biofiltro. En la parte inferior se tiene un botón para activar o desactivar la captura de los datos provenientes de los sensores para su eventual almacenamiento en una hoja de cálculo de Excel.

El diagrama de bloques del *background* del VI para la captura de datos se muestra a continuación en la Figura 2.

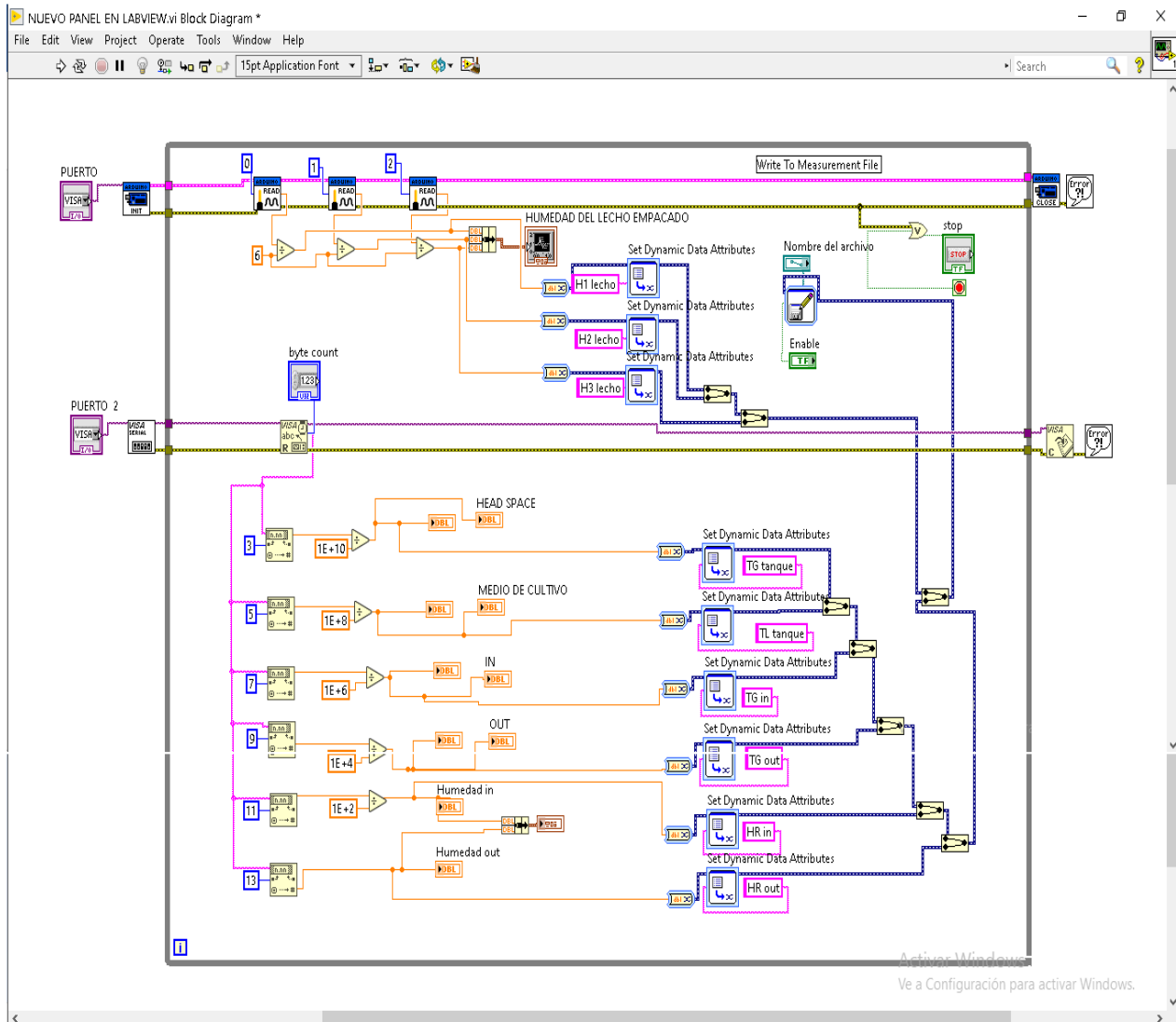


Figura 2. Esquema de bloques del background del VI para el monitoreo de las variables en LabVIEW.

Las reglas empleadas para la estrategia de control usada para la irrigación del lecho se muestran en las Figuras 3 y 4 . En estas se puede apreciar el uso de una estructura de *Formula code* para la programación análoga a lenguaje C de las condiciones de acción de la bomba, así como las *Estructuras de caso* para los diferentes tiempos de irrigación en función del estado del lecho medido por los sensores.

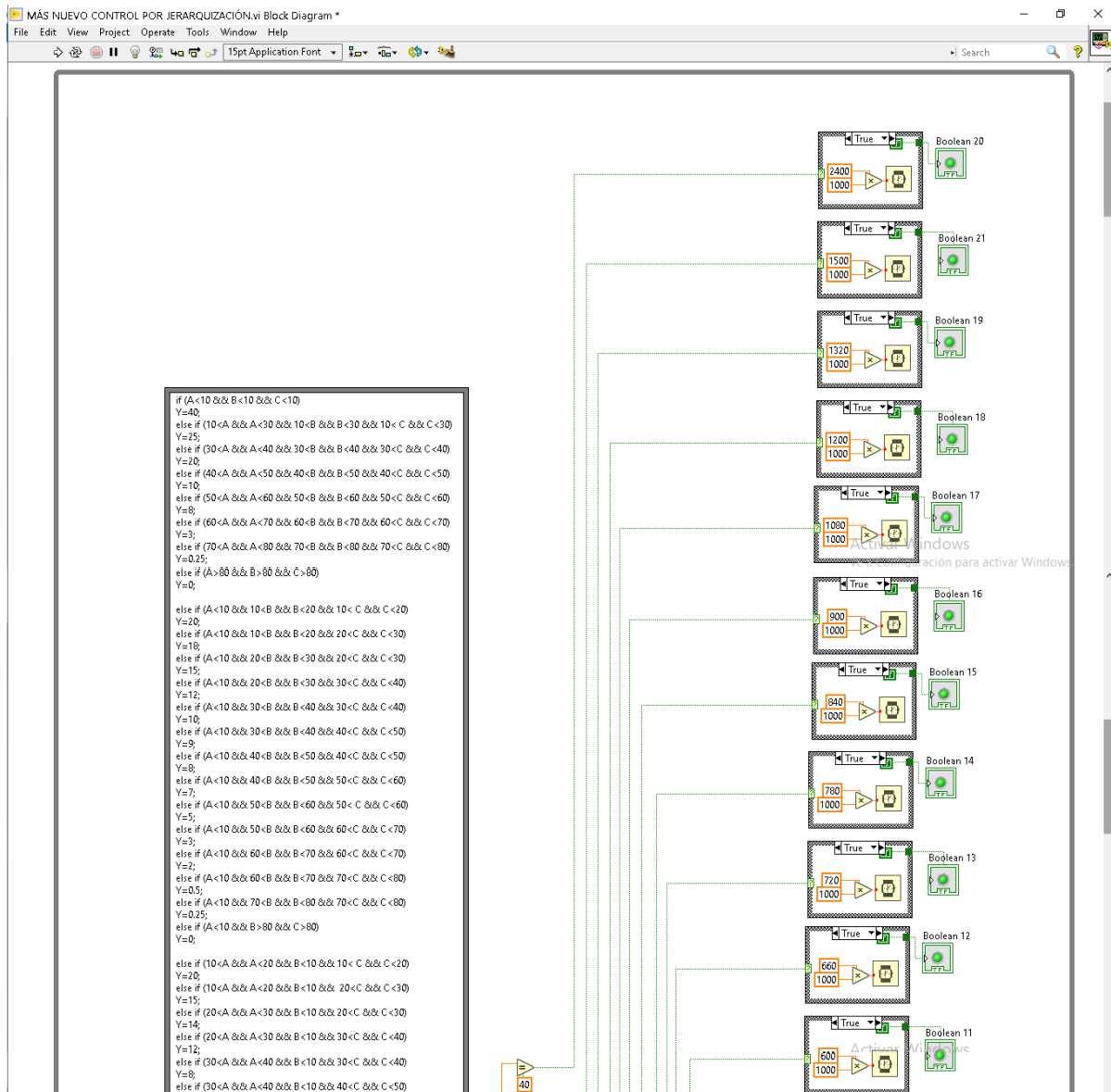


Figura 3. Diagrama por jerarquización para las diferentes acciones de la bomba (Parte 1)

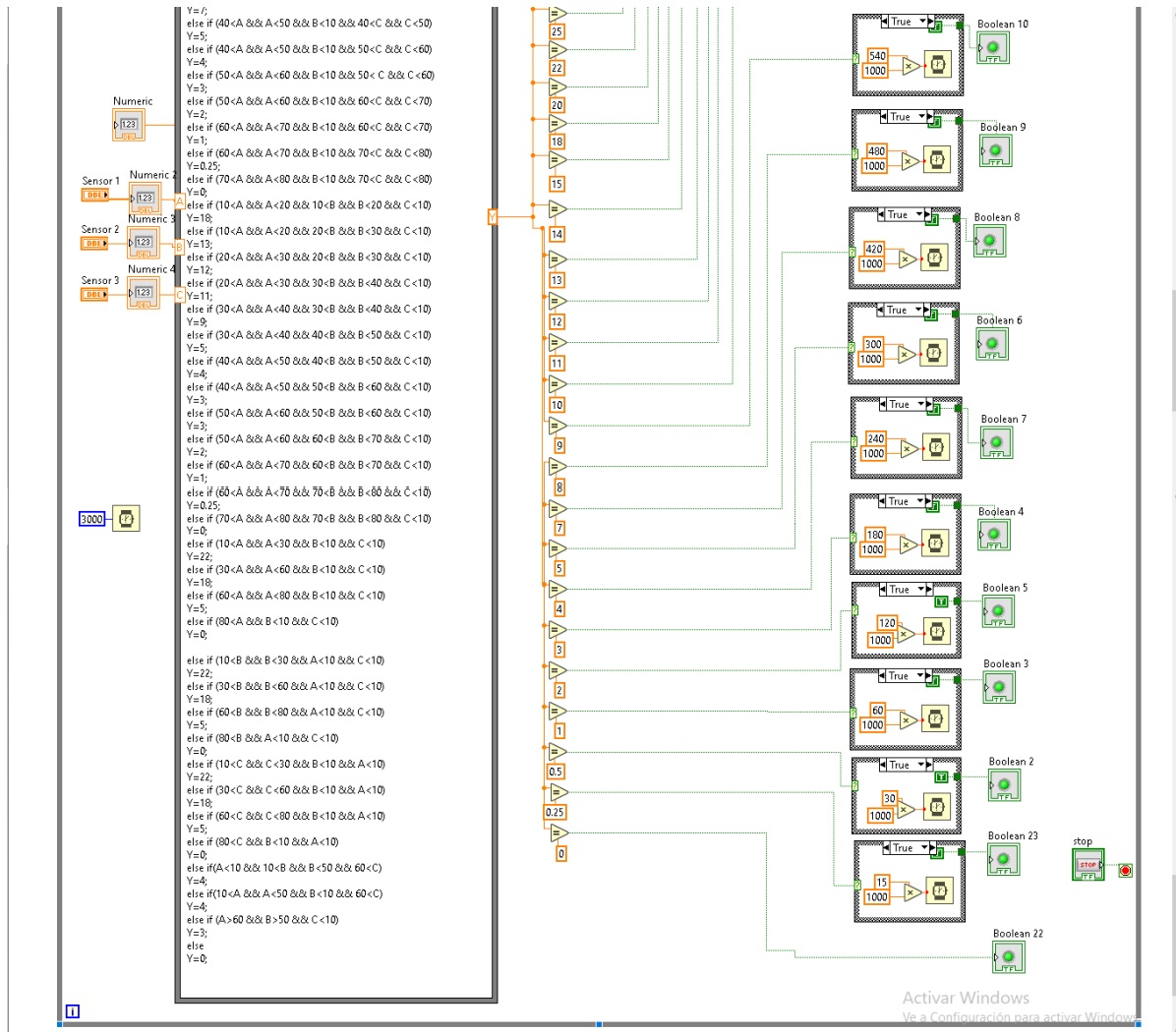


Figura 4. Diagrama por jerarquización para las diferentes acciones de la bomba (Parte 2).

Cada estructura de caso contiene diferentes tiempos de irrigación en función de los posibles estados del sistema. Cuando un estado coincide con una sentencia previamente establecida esta se considera *Cierta* en términos booleanos y activa la bomba determinado tiempo, de lo contrario es *Falso* y no se lleva a cabo ninguna acción. Se tienen 22 posibles casos con diferentes tiempos de irrigación en función de las tres entradas las cuales pueden ser diferentes entre sí.