



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

# Monitoreo y control de un sistema de microfiltración con membranas de disco

TESIS

Que para obtener el título de  
Ingeniera Mecatrónica

P R E S E N T A

Dulce Fabiola Rodríguez Miranda

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Miguel Ángel Bazán Ramírez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Agradecimientos

A *Dios* por darme la oportunidad de seguir conquistando mis sueños, por ser la luz en mi camino.

A la *Universidad Nacional Autónoma de México* y la *Facultad de Ingeniería* por haber sido mi segundo hogar, por haberme dado las herramientas y el conocimiento para llegar a ser Ingeniera.

Al *Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico* por la agradable estancia y darme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente.

Al *M.I. Miguel Ángel Bazán* por ser asesor, padre y amigo, gracias por los consejos, la confianza, la paciencia, por su tiempo, por su dedicación, por compartir su conocimiento y su interés en que me convierta en mejor persona e Ingeniera.

A la *Dra. María Soledad Córdova* por su confianza, por su tiempo, por su apoyo incondicional y por todo el aprendizaje que me deja.

Al *Dr. Gabriel Ascanio*, a la *Dra. María del Pilar Corona*, a la *Ing. Adriana Yoloxochil* por orientarme y brindarme su apoyo y sabiduría para culminar este sueño.

A mis *profesores, amigos y familia* que me han ayudado y apoyado en mi formación personal y académica a lo largo de la vida.

## Dedicatorias

A mis padres *Mary* y *Robert* por el regalo de la vida, por caminar a mi lado, cuidando de mis tropiezos, de mis logros, de mis frustraciones, inspirándome a seguir soñando, los que han secado mis lágrimas y curado mis heridas. Aquellos que me han educado y malcriado aún más, a los que he querido y admirado en todo momento. Gracias por su amor, por su tiempo, por su esfuerzo, por sus consejos, por su sabiduría, por su confianza, gracias por ser los mejores maestros de la vida.

A mis padres *Lucy* y *Ray* por ser los mejores abuelos que la vida me pudo regalar, a quienes en gran parte debo mis logros y éxitos, gracias por su tiempo, por jugar conmigo y por consentirme. ¡Gracias!

A *Lore* y *Arnulfo* por ser parte fundamental en mi formación, por los valores que me enseñaron y por su esfuerzo sin medida. ¡Gracias abuelitos!

A mis hermanos *Ale* y *Kary* por dar alegría a mis días, por ser mis cómplices en esta vida, por su apoyo incondicional, los que me han dado los peores consejos y tan hermosos recuerdos. ¡Los amo hermanos!

A mis padrinos *Lupita* y *Jaime* por ser pilares en mi formación personal, profesional y espiritual. Gracias por el apoyo y por brindarme un hogar. Gracias por su cariño tan sincero.

A mi tía *Beti* por su bello cariño, por consentirme, por el apoyo tan sincero que siempre me ha ofrecido. ¡Gracias tía!

A *Nancy*, por su bella y loca amistad, por las risas, las alegrías, las tristezas, por todos los desvelos, por los buenos y malos proyectos, por su apoyo incondicional, por el aprendizaje, y por el gran equipo que llegamos a ser. ¡Te Quiero Nan! También agradezco a la *familia Reyna Lino* por el apoyo y la amabilidad que siempre me brindaron. ¡Gracias!

A *Eli*, *Clau*, *Marianita* y *Karen*, por su sincera y hermosa amistad, por haber compartido tan bellos momentos, por hacerme reír, por las locuras, las tristezas, por escucharme, por motivarme y por ayudarme a ser mejor persona. ¡Las amo amigas!

A *Carmen* por su hermosa amistad, por las risas descontroladas, por su apoyo, su confianza, por siempre escucharme, por los consejos, por los bellos recuerdos, por estar en mi vida, por compartir su locura y calidez. Gracias Car. ¡Te quiero!

A *Cintha* por enseñarme a disfrutar la vida, por hacerme reír, por alimentar mis sueños, por motivarme a ser mejor y por contagiarme sus ganas de querer cambiar el mundo. ¡Te quiero Cin!

A Julio por ser el niño de la risa contagiosa, por escucharme, por estar en los buenos y malos momentos, por su calidez y su cariño. ¡Te Quiero niño!

A *Maty, Don Carlos, Víctor, mis padres y hermanos*, por compartir el regalo tan bello que Dios nos dio: ¡La música! Gracias por compartir su talento, ensayos y escenarios. Gracias por complementarme la existencia, gracias por ser personas tan especiales en mi vida. ¡Los amo!

A mi primo *Adriel* por ser el mejor monkiki del mundo. A mi tía *Ali* por su apoyo y cariño. ¡Gracias!

Al equipo de Ingeniería de Proceso: *Migue, Dra. Marisol, Nancy, Jenn, Juanito, Isaac, Isa, George, Dany, Adrián, Perla, Magali, Toño y Hugo* por compartir su saber, gracias por su amistad, gracias por ser sujetos de prueba, por apoyarme en los buenos y malos días, por las risas, sin ustedes esto no sería posible. ¡Gracias amigos, los quiero!

A la familia *Miranda* por su cariño, por su alegría, por siempre confiar en mí. *Eli, Karla, Bertha, Sandy, Don Cris, Tía Miquis, Tío Poncho, Tía Ernes*. ¡Gracias!

Gracias a todos *mis profesores* por regalarme su tiempo y saber a lo largo de toda mi vida, sin ustedes no alcanzaría este sueño.

A *mi México* por darme la oportunidad de llegar a ser Ingeniera.

¡Gracias!

# ÍNDICE

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

## CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

1.1 Métodos de separación	1
1.2 Filtración por membranas	1
1.3 Motivación	5
1.4 Objetivos	6

## CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

2.1 Equipo de microfiltración	7
-------------------------------	---

## CAPÍTULO 3. INTERFAZ DE CONTROL Y MONITOREO

3.1 Descripción de la interfaz de usuario	14
---	----

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1 Caracterización y calibración por accesorio	17
4.2 Experimentos realizados	24

CONCLUSIONES 27

BIBLIOGRAFÍA 28

ANEXOS 30

## **LISTA DE FIGURAS**

*Figura 1.* Flujos presentes en un sistema de filtración por membrana con flujo cruzado.

*Figura 2.* Equipo de microfiltración a) Esquema del equipo; b) Equipo en operación.

*Figura 3.* Celda para membrana a) de acrílico; b) de ABS.

*Figura 4.* Membranas a) poliméricas; b) cerámicas.

*Figura 5.* Válvula solenoide.

*Figura 6.* Electroválvula.

*Figura 7.* Transductor de presión.

*Figura 8.* Bomba de velocidad variable.

*Figura 9.* Sistema ultrasónico.

*Figura 10.* a) Balanza SPX 6201; b) Interfaz de dispositivo USB.

*Figura 11.* Módulo puente H L298.

*Figura 12.* Módulo de relevadores.

*Figura 13.* Tarjeta de control de velocidad.

*Figura 14.* NI DAQ 6008.

*Figura 15.* Interfaz de usuario.

*Figura 16.* Monitoreo de presiones.

*Figura 17.* Control ultrasónico.

*Figura 18.* Control válvula solenoide.

*Figura 19.* Control bomba.

*Figura 20.* Control electroválvula.

*Figura 21.* Curvas características de transductores.

*Figura 22.* Curva característica punta ultrasónica.

*Figura 23.* Punta ultrasónica y celda.

*Figura 24.* Operación válvula solenoide.

*Figura 25.* Curva característica bomba.

*Figura 26.* Operación bomba a diferentes niveles a)  $20 \text{ mls}^{-1}$ ; b)  $25 \text{ mls}^{-1}$ .

*Figura 27.* Registro de datos.

*Figura 28.* Sistema permeado.

*Figura 29.* Jugo de nopal.

*Figura 30.* a) jugo de nopal; b) jugo de nopal permeado; c) monitoreo presiones nopal.

*Figura 31.* a) Resultado de la clarificación; b) Gráfica con las presiones de clarificación.

*Figura 32.* Celda y punta ultrasónica.

*Figura A2.* Circuito de accionamiento ultrasónico.

*Figura A3.* Circuito de accionamiento solenoide.

*Figura A4.* Circuito de acondicionamiento bomba.

*Figura A5.* Datos experimentales.



## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 1. *Clasificación de la filtración.*

Tabla 2. *Operación de la punta 2 del scaler dental.*

Tabla 3. *Cierre de válvula vs Presión.*

Tabla A2.1 *Caracterización transductores de presión.*

Tabla A2.2 *Caracterización de punta ultrasónica.*

Tabla A2.3. *Flujo volumétrico que proporciona la bomba con base en niveles de operación.*

Tabla A2.4. *Cierre vs Tiempo.*

## **RESUMEN**

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema para el monitoreo y control de un equipo de microfiltración mediante una interfaz de usuario con la cual se establecen, modifican y controlan las condiciones de operación del sistema. Con esta interfaz, también es posible activar los accesorios para llevar a cabo la limpieza y reducir el taponamiento de las membranas sin retirar de la celda. Con la interfaz de usuario se pueden monitorear los comportamientos de las presiones de las líneas de flujo en tiempo real. De manera simultánea se evalúa el desempeño de la membrana y se estima la presión transmembrana, basada en las presiones de entrada, salida y permeado de la celda. Además, se puede cuantificar el flujo másico del permeado por medio de una balanza. Con base en las variables, presión transmembrana y flujo másico de permeado, es posible identificar la presencia del fenómeno de taponamiento en la membrana. Con una válvula solenoide y/o una punta ultrasónica, se pueden hacer limpieza y control del taponamiento. Al finalizar los experimentos se genera un reporte con la adquisición de los datos de presión y flujo másico, para su análisis posterior.

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo presenta el desarrollo del control y monitoreo de un sistema de microfiltración a escala piloto, diseñado para recabar datos de un proceso de filtración e implementar técnicas de limpieza de la membrana por medio de distintos accesorios; *scaler* dental ultrasónico, válvulas solenoide, válvula de estrangulamientos, etc...

El primer capítulo describe el principio de operación, clasificación y configuraciones de la filtración por membranas.

En el segundo capítulo se describe brevemente las características y especificaciones de los elementos del sistema de microfiltración; módulo de la membrana, bomba de velocidad variable, balanza, transductores de presión, actuadores, tarjetas de control y de adquisición de datos.

La descripción de la interfaz de usuario desarrollada en *Labview*® se describe en el capítulo tres, así como la descripción del funcionamiento y operación de sus elementos.

En el cuarto capítulo se abordan la caracterización, calibración y pruebas de aplicación del sistema de monitoreo y control con diferentes fluidos; agua destilada, mucílago de nopal y cerveza artesanal.

# CAPITULO 1

## ANTECEDENTES

### *1.1 Métodos de separación*

En la ingeniería de proceso existen procesos de separación en los que se aprovecha diferentes propiedades del material. Se separan tanto cuerpos sólidos como mezclas líquidas, compuestas de 2 o más elementos, mediante diferentes procedimientos. Los métodos de separación de mezclas son métodos físicos y/o químicos. Algunos ejemplos son; vaporización, tamización, decantación, filtración, precipitación, destilación, cromatografía.

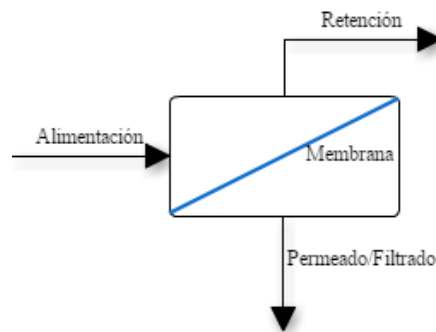
En el caso particular de la filtración, se trata de un proceso de separación de componentes al forzar un fluido a través de una superficie porosa y retener los sólidos de mayor tamaño de partícula que los poros (Picado *et al*, 2008). Para ello, se utilizan membranas semipermeables de distintas características en su estructura, función y condiciones de operación, como medio de separación. De esta forma, las partículas de mayor tamaño que el poro de la superficie son retenidas y forman una capa sobre dicha superficie porosa. Por tanto, la filtración de disoluciones es un proceso que puede ser utilizado para fraccionar y separar componentes de una solución, disminuir la carga bacteriana y de esporas presentes en la solución, y/o concentrar componentes.

### *1.2 Filtración por membranas*

Los procesos de filtración por membranas son muy frecuentes en las industrias; textil, farmacéutica, biomédica, petroquímica, nuclear, alimentaria, de papel, etc.

La operación básica del filtrado puede ser por flujo normal (FFN) o por flujo tangencial (FFT). En el sistema de FFN, el fluido se dirige de manera perpendicular a la superficie de la membrana, permitiendo que la columna del fluido ejerza una presión sobre la membrana. Así, los componentes de mayor tamaño de partícula se acumulan sobre la superficie de la membrana y el resto pasa a través de la misma. En el sistema de FFT, también llamado de flujo cruzado, el fluido se dirige de manera paralela a la superficie de la membrana, ejerciendo una diferencia de presión que obliga a una porción de fluido a

dirigirse hacia la membrana. Lo que permite la retención de los componentes de mayor tamaño y el libre paso del resto de la solución a través de la membrana, al igual que en el sistema de FFN. En este sistema los componentes que son retenidos por la membrana pueden ser arrastrados por el flujo tangencial hacia un reservorio para la recirculación de la disolución y evitar la obstrucción de los poros de la membrana. Una ventaja de la filtración por flujo cruzado es que reduce la formación de la capa de taponamiento de filtrado (Charcosset *et al*, 2012). De tal manera que el flujo de alimentación hacia la membrana se puede dividir en dos; uno de permeado que contiene el material que ha pasado a través de la membrana y uno de retenido en el que se recogen todos los componentes que no atraviesan la membrana, figura 1 (Strathmann *et al*, 2006).



*Figura 1.* Esquema de flujos presentes en un sistema de filtración por membrana con flujo cruzado.

Los procesos de filtración basados en gradientes de presión se pueden clasificar por el tamaño de poro de las membranas, como: microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y osmosis inversa (RO). En la tabla 1 se observan los intervalos de tamaño de poro y ejemplos de la retención de algunos componentes.

Comercialmente las membranas son de materiales poliméricos, cerámicos o metálicos. Algunas de las ventajas que presentan las membranas cerámicas son la resistencia a altas temperaturas, la resistencia a ácidos y bases, la resistencia mecánica, la larga vida útil y que son amigables con el medio ambiente.

Tabla 1. *Clasificación de la filtración.*

Proceso	Tamaño de poro	Rango de presiones	Separación de componentes
Microfiltración	0.05-10 $\mu\text{m}$	0.5-3 bar	Bacterias, hongos emulsiones.
Ultrafiltración	0.001-0.1 $\mu\text{m}$	1- 10 bar	Proteínas, virus, bacterias, emulsiones, coloides, negro de humo.
Nanofiltración	0.5 - 2 $\mu\text{m}$	5-30 bar	Proteínas, virus.
Osmosis inversa	< 0.0005 $\mu\text{m}$	10-50 bar	Azúcares, sales solubles, gases, solventes orgánicos.

Las principales variables a considerar en un proceso de filtración con membranas y flujo cruzado son; la presión transmembrana (TMP) y velocidad lineal del flujo cruzado (CFV). Algunos autores, como Badan-Ribiero *et al* (2008) recomiendan un proceso de acondicionamiento de la membrana para reducir los efectos de polarización e hidrofobicidad, así como una adecuada limpieza de la membrana cuando se presenta una caída del 70% en el flujo de permeado (Badan-Ribiero *et al* ,2008, Agana *et al.*, 2011). Una desventaja crítica de utilizar este tipo de procesos en la industria es el taponamiento de las membranas y su frecuencia de limpieza. El proceso de limpieza tiene la finalidad de restablecer el flujo de permeado al remover las partículas acumuladas sobre la superficie de la membrana. La formación de un gel, o nata, sobre la superficie de la membrana es una de las causas del taponamiento y esto puede ser formado por distintos materiales como hidróxidos metálicos, materia orgánica, materiales macromoleculares, componentes biológicos, etc. Los mecanismos de taponamiento también dependen del proceso. Las consecuencias de una membrana que presenta taponamiento o *fouling* se observan en la reducción del flujo volumétrico de permeado, un producto deficiente del permeado, incremento en el consumo de energía y costos de post-tratamiento, así como reducción en el tiempo de vida útil de la membrana (Goosen *et al*, 2005). Es posible utilizar agentes químicos para la limpieza y desinfección, su contenido de surfactantes puede favorecer la

humectabilidad de la membrana y la solubilidad del material que se deposita en la superficie de la membrana (D'Souza y Mawson, 2005). Los medios de prevención, o control, de los efectos del *fouling* de la membrana son tan heterogéneos y diferentes como los materiales y mecanismos que los ocasionan. Los principales procedimientos para un control del *fouling* son; pretratamiento del fluido, modificaciones a la superficie de la membrana, optimización de la hidrodinámica del módulo de la membrana y limpieza de la membrana con agentes químicos. Otro método efectivo es invertir el sentido del flujo de permeado en la membrana para retirar el material que se precipita en la superficie de la misma, por intervalos de segundos (Strathmann *et al*, 2006; Shi *et al*, 2014). Otros métodos se han propuesto para la reducción del *fouling* en las membranas, así como para mejorar la eficiencia de la limpieza de la membrana. Algunos de ellos incluyen la vibración, el burbujeo por gas, el lavado a contracorriente, el flujo pulsátil y el campo eléctrico, sin embargo, cada método cuenta con limitaciones para su aplicación a escala.

Estudios recientes proponen el uso de un campo de ultrasonido en los procesos con membranas como una alternativa de control para reducir el taponamiento y mejorar la calidad del permeado. Kobayashi *et al* (2003) proponen que los parámetros de un campo de ultrasonido tienen efectos significativos en el desempeño de la membrana en un sistema de flujo cruzado, los parámetros son la frecuencia, la potencia y la dirección de la irradiación del campo. El uso del ultrasonido mejora el desempeño de la membrana, al reducir la materia orgánica depositada en la superficie de la membrana y reducir el incremento de la TMP respecto al tiempo, sin que el ultrasonido provoque degradación de la materia orgánica, esto debido a la capacidad de remover los componentes depositados en la superficie por la cavitación generada por las burbujas a bajas frecuencias (Naddeo *et al*, 2014). El ultrasonido a bajas frecuencias (35-50 kHz) permite que haya un mejor desempeño de la membrana y favorece al flujo de permeado al reducirse la resistencia de flujo ocasionada por el taponamiento.

El uso continuo del ultrasonido a una frecuencia de 50 kHz tiene una mayor efectividad tanto en el control del taponamiento como en la eficiencia de limpieza de la membrana, mientras que los pulsos de ultrasonido pueden favorecer las variaciones de flujo

en cualquier frecuencia. No obstante, hay que tener cuidado con las altas frecuencias, ya que el taponamiento de la superficie puede ser irreversible (Muthukumaran *et al*, 2007).

En el grupo de Ingeniería de Proceso, CCADET – UNAM, se implementaron tanto un proceso de microfiltración como varias técnicas antitaponamiento de membranas cerámicas por ultrasonido. Para ello, se diseñó y construyó un prototipo para membranas cerámicas de disco que permite evaluar los métodos combinados de limpieza *in situ* para el control y reducción del taponamiento de la superficie de la membrana.

### *1.3 Motivación*

Se tiene un prototipo de pruebas, pero se requiere de un sistema de control modular para evaluar tanto de manera individual como combinada los mecanismos de limpieza y reducción del taponamiento *in situ*, en diferentes condiciones de operación. A nivel académico se han desarrollado algunos sistemas de separación de componentes con diferentes herramientas de instrumentación, control y monitoreo que permiten automatizar el proceso de separación de las mezclas a través de sistemas electrónicos, sensores, actuadores, etc., y llevar el control de las operaciones mediante una computadora. Sin embargo, el prototipo diseñado en CCADET no está instrumentado y es altamente valioso que las etapas de limpieza del equipo *in situ* sean automatizadas, donde se evite detener la línea de proceso y desmontar membranas.

Por tanto, en este proyecto se propone desarrollar un sistema de monitoreo y control del proceso de microfiltración. Con este sistema es posible establecer las condiciones de operación en cada proceso por medio de una interfaz para observar su comportamiento y desarrollo. Además, modificar las condiciones de operación para mantener el flujo de permeado constante y hacer uso de técnicas de control del taponamiento de la membrana por medio de accesorios instalados en el sistema de microfiltración.



## *1.4 Objetivos*

### **Objetivo general.**

- Diseñar e implementar un sistema mecatrónico para el monitoreo y el control de un proceso de microfiltración y sus mecanismos para controlar el taponamiento de las membranas.

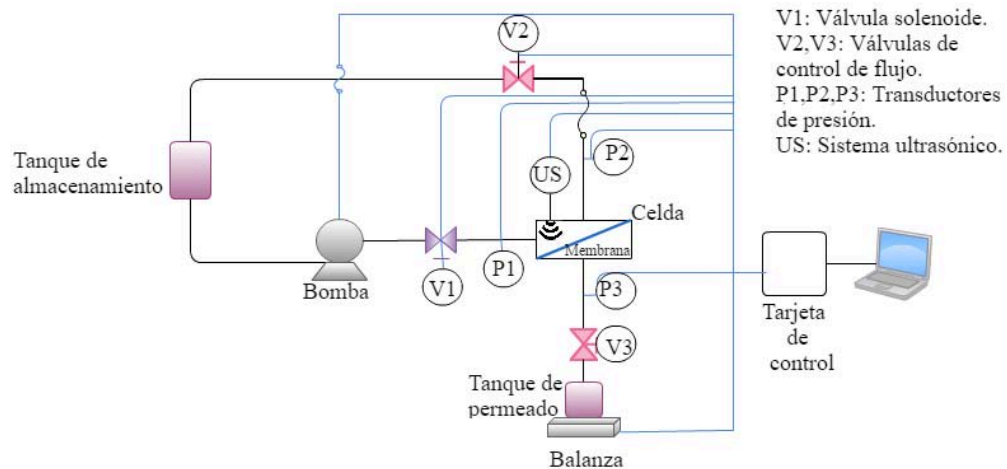
### **Objetivos específicos.**

- Caracterizar la operación de cada accesorio y la operación del sistema de microfiltración en conjunto.
- Diseñar y desarrollar una interfaz de usuario.
- Establecer la comunicación entre los accesorios y la interfaz.
- Adquirir los datos y generar una bitácora.

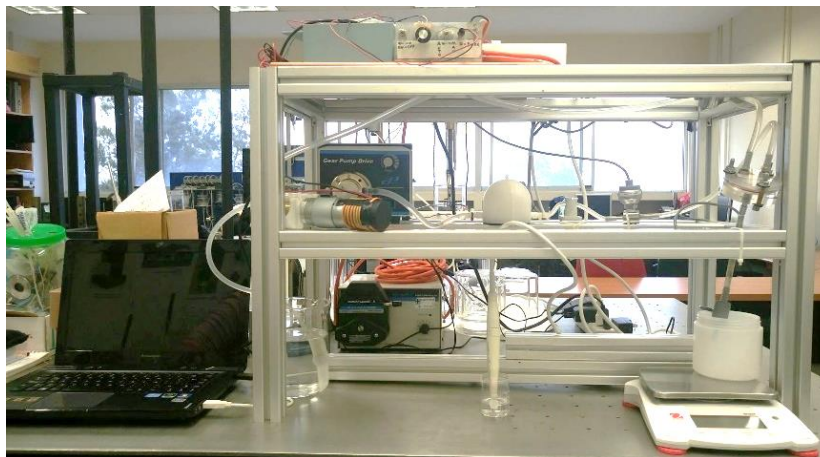
## CAPITULO 2

### 2.1 EQUIPO DE MICROFILTRACIÓN

El equipo de microfiltración, figura 2, está compuesto por: un tanque de almacenamiento del fluido a filtrar, un tanque de permeado, una celda para membranas de disco, membrana, una válvula solenoide, una electroválvula de control de flujo, tres transductores de presión, una bomba de velocidad variable, una balanza, un sistema ultrasónico, una tarjeta de control de velocidad para motor de corriente directa, una tarjeta de adquisición de datos y una computadora portátil.



a)



b)

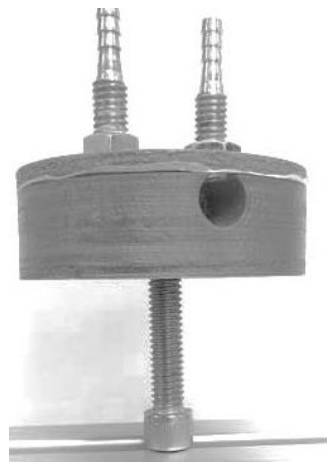
Figura 2. Equipo de microfiltración: a) esquema del equipo; b) equipo en operación.

## Celda y membranas de disco

Se cuenta con dos celdas para las membranas. En la figura 3a se puede observar una celda para membrana de disco de acrílico, la cual cuenta con tres líneas (alimentación, retención y permeado). En la figura 3b se observa una celda de ABS, con las tres líneas y una entrada para trabajar con la punta ultrasónica en su interior. Ambas celdas tienen medidas de 47 mm de diámetro interior y profundidad de 11 mm, mientras que los diámetros exteriores son de 75 mm y altura de 20 mm.



a)



b)

Figura 3. Celda para membrana: a) de acrílico; b) de ABS.

Las membranas utilizadas son membranas de disco *Advantec*®, poliméricas de una mezcla de ester celulosa de 47 mm de diámetro, tamaño de poro de 0.45  $\mu\text{m}$ , figura 4, y membranas cerámicas de disco *Disram Inside Tami*® con diámetros de 47 y 90 mm.



a)



b)

Figura 4. Membranas: a) poliméricas; b) cerámicas.

## ACTUADORES Y TRANSDUCTORES

### Válvula solenoide

La válvula solenoide Pk-0802-no 3 de *Takasago Fluidic Systems*®, figura 5, tiene una frecuencia de operación máxima de 20 Hz, alimentación de 12 V y consumo de 10 W, con tubería de diámetro interior de 6 mm y exterior de 8 mm.



Figura 5. Válvula solenoide



Figura 6. Electroválvula

### Electroválvula

La electroválvula, compuesta por dos elementos, la válvula *Pure-Fit*® *Tru*, con abrazadera de nylon reforzado con fibra de vidrio, para tubos flexibles de hasta 17.8 mm de diámetro exterior, parte inferior de la figura 6 y el motorreductor de corriente directa, EMG49, parte superior de la figura 6, con velocidad nominal de 122 rpm, corriente nominal de 2100 mA, velocidad sin carga de 143 rpm, corriente sin carga de 500 mA, 34.7 W de potencia nominal y una caja de engranes de reducción de 49:1, longitud total de 124 mm, diámetro del motor de 45mm, diámetro del eje 8 mm y longitud del eje de 19 mm.

## Transductores de presión

El sistema cuenta con tres transductores de presión *Cole Parmer*® modelo 68075, figura 7, con cuerpo de acero y conexión ¼ plg NPT, con un intervalo de operación de 5, 25 y 50 psi, alimentación de 12 a 28 V y un voltaje de salida de 0.5 a 5.5 V. Cada transductor se encuentra en una de las líneas de flujo del sistema.



Figura 7. Transductor de presión

## Bomba de velocidad variable

La bomba de velocidad variable es de la marca *Cole-Parmer*®, modelo 1511-10, con un flujo de alimentación máximo de  $37 \text{ ml s}^{-1}$ , con un motor de CD de 90 V, 52 W, una velocidad máxima de 5000 rpm y dimensiones de 215x 161x 131 mm, figura 8.



Figura 8. Bomba de velocidad variable

## Sistema ultrasónico

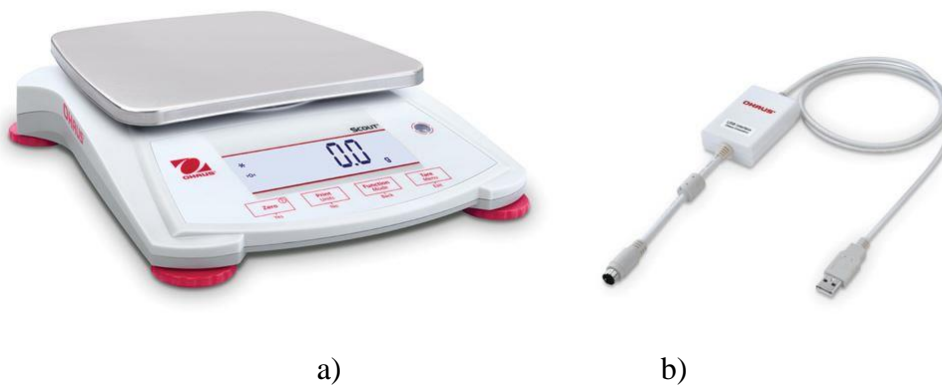
El sistema ultrasónico, con módulo de control y punta ultrasónica, figura 9, es de la marca *Satelec Suprasson*® modelo P5 Booster, con un intervalo de 27 a 33 kHz y con tiempo de operación máximo de 10 minutos sin interrupción.



*Figura 9.* Sistema ultrasónico

## Balanza

La balanza es una Ohaus *Scout*® SPX 6201, figura 10, con capacidad máxima de 6.2 kg, lectura mínima de 0.1 g, material de acero inoxidable, con un plato de 140 x 170 mm, alimentación con un adaptador de CA o 4 pilas AA; la comunicación se realiza a través de interfaz USB.



*Figura 10.* a) Balanza SPX 6201 b) Interfaz de dispositivo USB

## Control de velocidad, puente H L298N

El módulo puente H L298, figura 11, permite el control de dos motores de corriente directa o un motor a pasos bipolar, el voltaje de operación es de 5 a 35 V y máxima corriente de operación de 2 A por motor, voltaje lógico de 5 V, corriente de control de 0- 36 mA y máxima potencia de 25 W.

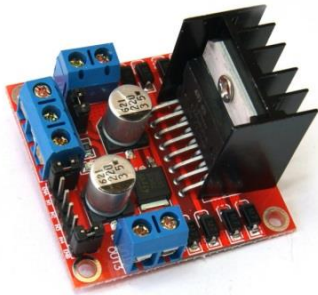


Figura 11. Módulo puente H L298



Figura 12. Módulo de relevadores

## Módulo de relevadores

El módulo de 4 relevadores de *Songle Relay*®, figura 12, cuenta con conectores para 4 entradas, alimentación de 5 V, con un consumo de 360 mA, con contactos capaces de controlar hasta 250 V a 10 A.

## TARJETAS DE ADQUISICIÓN Y CONTROL

### Tarjeta de control de velocidad

La tarjeta de control de velocidad de rotación de la bomba, figura 13, marca *KB Electronics*®, modelo KBMM-125 parte 9444, con alimentación de 115 V de CA, con voltaje de salida regulable de 90 V de CD, máxima corriente de 8 A y potencia máxima de 0.6 KW.

## Tarjeta de adquisición de datos NI DAQ 6008

La tarjeta de adquisición de datos de *National Instruments*® (*DAQ* por sus siglas en inglés), figura 14, modelo 6008, con 8 entradas analógicas y 4 entradas diferenciales, 2 salidas analógicas y 12 entradas y salidas digitales, con una resolución de 12 bits, la transferencia de datos se realiza mediante comunicación serial a una computadora por puerto USB, ver Anexo 1.



Figura 13. Tarjeta de control de velocidad



Figura 14. NI DAQ 6008



## CAPITULO 3

### 3.1 DESCRIPCIÓN DE LA INTERFAZ DE USUARIO

El sistema de microfiltración es controlado y monitoreado por medio de una interfaz de usuario instalada en una computadora portátil. Se desarrolló con el soporte del *software LabView®*. La comunicación entre la interfaz y el sistema se realiza mediante puerto serial. La interfaz básicamente cuenta con cinco secciones, figura 15:

- 1) Monitoreo de presiones
- 2) Control del sistema ultrasónico
- 3) Control de la válvula solenoide
- 4) Control de la bomba de desplazamiento positivo
- 5) Control de la electroválvula



Figura 15. Interfaz de usuario

En la sección de monitoreo de presiones, figura 16, se observa la presión que corresponde a cada transductor, P1, P2, P3 y la estimación de TMP, ecuación (1).

$$TMP = \frac{P1+P2}{2} - P3 \quad (1)$$

donde *TMP* es la presión transmembrana, *P1* es la presión de alimentación, *P2* es la presión de retención y *P3* es la presión de permeado. Se cuenta con tres botones que permiten observar de manera visual el comportamiento de las presiones durante el desarrollo del proceso de filtración, así como los valores numéricos de las presiones en psi y bar. Al costado derecho se encuentra una alerta visual que se activa cuando se rebasa la presión máxima para cada transductor. Se genera una bitácora con los datos de cada experimentación, la cual se puede iniciar y pausar con un botón situado en esta sección.

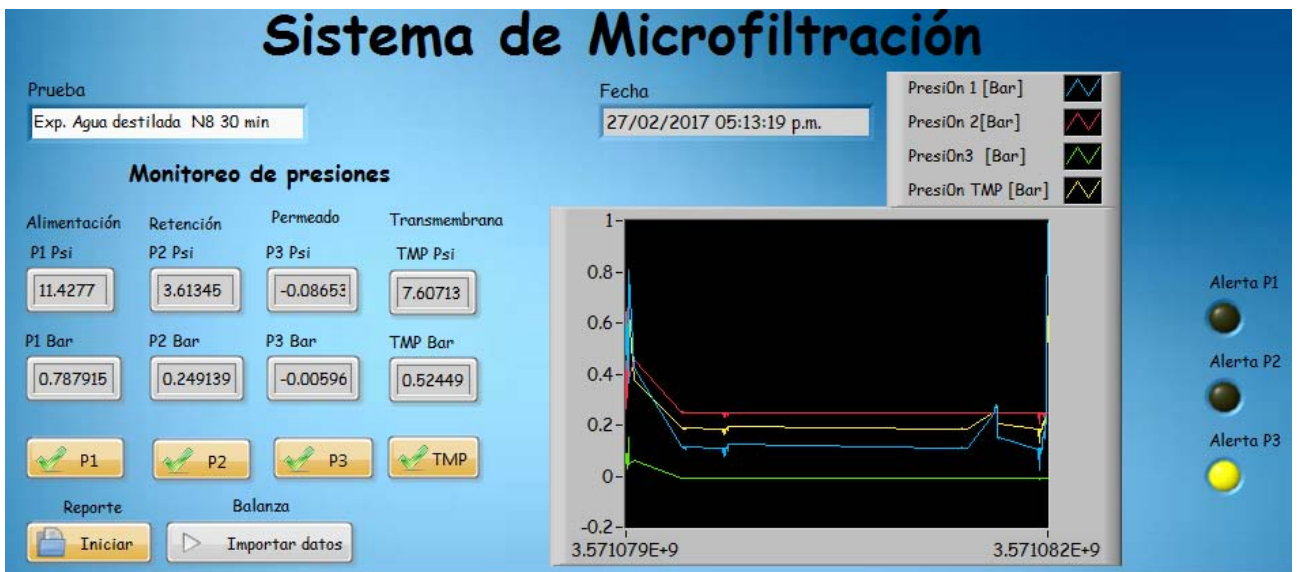


Figura 16. Monitoreo de presiones

Debajo del monitoreo de presiones se encuentra la segunda sección, figura 17, el control del sistema ultrasónico, en la cual se establecen las condiciones de la punta, tanto nivel y tiempo de operación mediante controles numéricos. El tiempo se visualiza con un temporizador que enciende un indicador mientras el ultrasónico está en operación, de lo contrario permanece apagado. El nivel de frecuencia es visualizado numéricamente.



Figura 17. Control ultrasónico



Figura 18. Control válvula solenoide

La tercera sección, es el control de la válvula solenoide, figura 18, en la cual se establece la frecuencia y el tiempo de operación. De igual manera que el sistema ultrasónico cuenta con un temporizador que indica el tiempo restante de funcionamiento. Al costado derecho se encuentra la sección del control de la bomba de velocidad variable, figura 19, en la cual se elige el nivel de operación; se cuenta con un botón y un indicador visual de apagado y encendido de la bomba. La última sección es el control de la válvula de estrangulamiento, figura 20, en la cual se establece el giro y el sentido, ya sea para abrirla o cerrarla mediante un botón de inicio.



Figura 19. Control bomba



Figura 20. Control electroválvula

## CAPITULO 4

### RESULTADOS

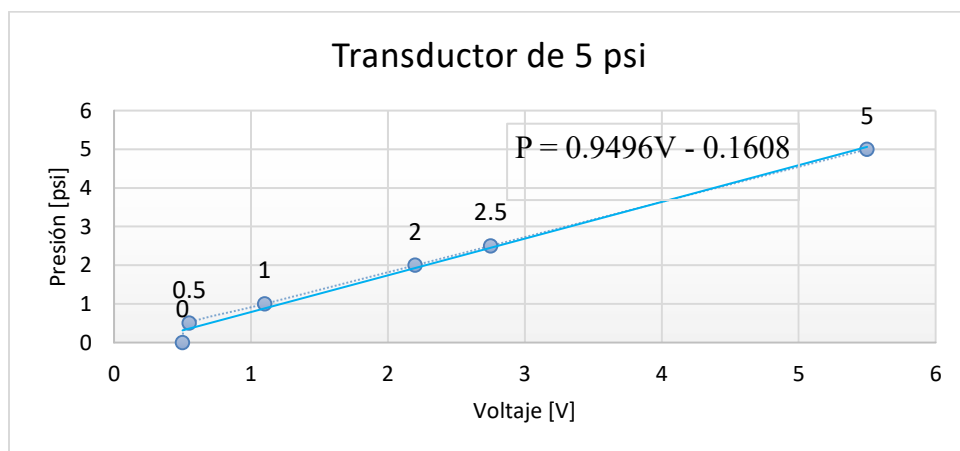
#### 4.1 Caracterización de accesorios

Uno de los resultados obtenidos fue la caracterización y calibración de cada uno de los accesorios del sistema: transductores de presión, la punta ultrasónica, válvula solenoide, bomba de velocidad variable, electroválvula y la balanza.

#### Caracterización de los transductores de presión

Los transductores de presión permiten la lectura de la presión manométrica y convierten esta presión en una señal analógica. Así que mediante una entrada analógica es posible interpretar la lectura del transductor.

La caracterización de los tres transductores de presión se realizó con la ayuda de una compresora de aire, la cual operó a diferentes niveles de presión y se realizó un registro entre la presión suministrada por la compresora y el voltaje generado por la salida de los transductores. En la tabla A2.1 (ver anexo 2) se presentan los datos de presión y voltaje obtenidos para cada transductor a diferentes voltajes y en la figura 21 se observa la curva característica y la ecuación que describe el comportamiento de la presión en función del voltaje para cada uno.



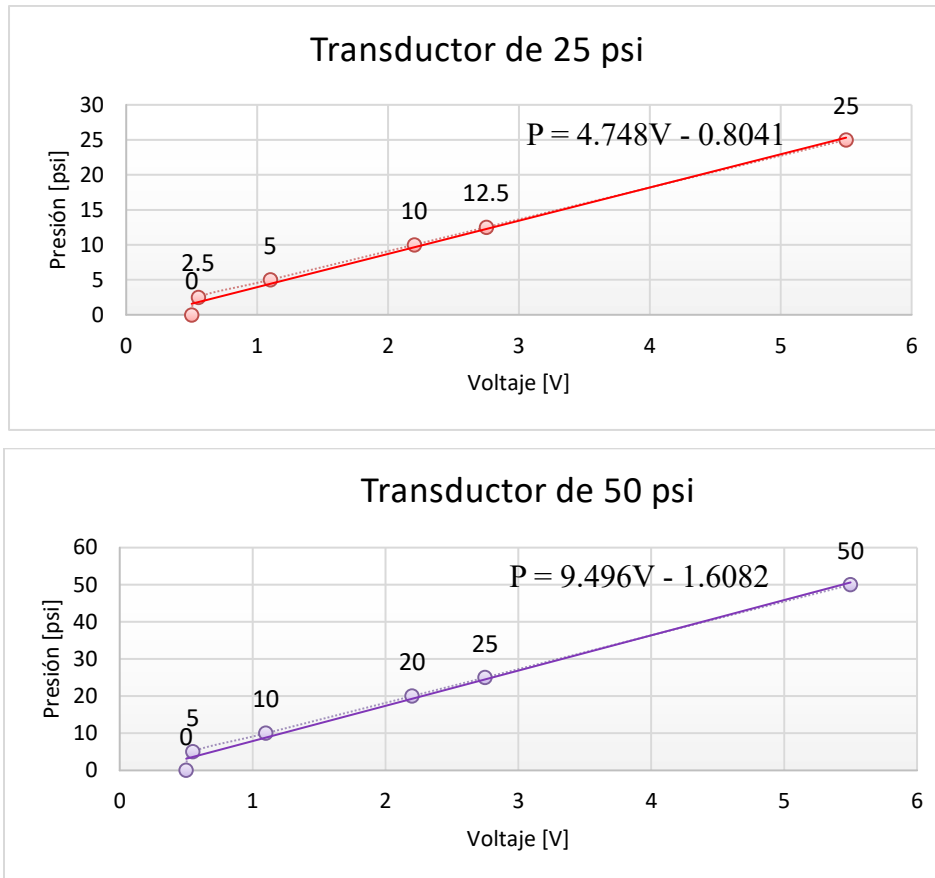


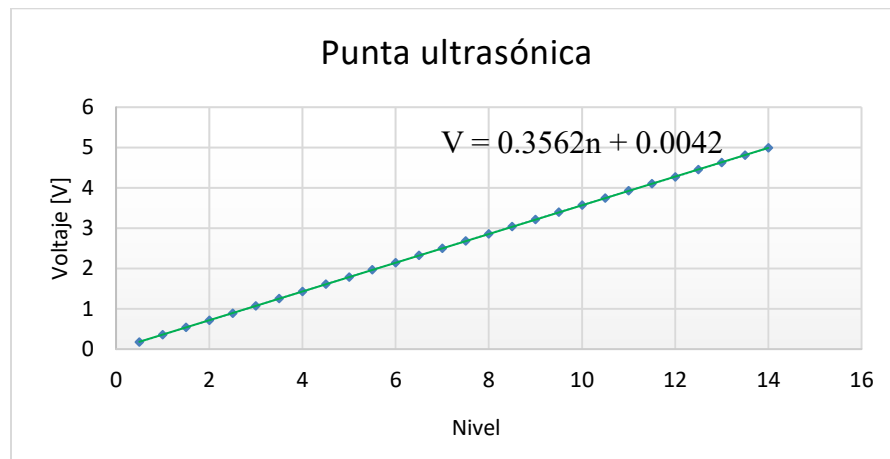
Figura 21. Curvas características de los transductores. P=presión, V=voltaje.

En caso de exceder el rango de operación de cada transductor, en la línea de alimentación para cada transductor, se implementó un circuito de desactivación mediante el módulo de relevadores y tres salidas digitales de la *DAQ*.

### Caracterización de la punta ultrasónica

Anteriormente el sistema de control comercial de la punta ultrasónica se realizaba mediante un potenciómetro físico y un pedal de accionamiento por el tiempo y potencia que el usuario necesitara, este sistema de control fue modificado para su uso sustituyendo los componentes físicos por controladores digitales. El sistema ultrasónico es utilizado para generar perturbaciones al interior de la celda, el nivel de frecuencia de la punta ultrasónica es controlado mediante una salida analógica de la *DAQ* y en cuanto al tiempo de funcionamiento se cuenta con un circuito de accionamiento que se activa mediante una salida digital de la *DAQ* por un tiempo previamente establecido (ver Anexo 3).

El sistema ultrasónico contaba con modulación manual de 14 niveles con una frecuencia máxima de 33 kHz y 5 V, figura 22 (ver anexo 2). Se registró el voltaje y la frecuencia correspondiente para cada nivel, con lo cual se obtuvieron dos ecuaciones, relacionando el nivel con el voltaje de salida, y el nivel con la frecuencia de operación. Así que mediante el voltaje generado por una salida analógica de la *DAQ* se implementó una lista de niveles de 0.5 a 14 con incrementos de 0.5. El tiempo de operación de la punta se comprobó con un cronómetro.



*Figura 22.* Curva característica punta ultrasónica  
donde V: voltaje, n: nivel.





En la figura 23 se observa la operación del sistema ultrasónico inmerso en glicerina. Con ayuda de luz *UV* (*led UV*) y pintura fluorescente se comprobó la operación del sistema y sus límites de operación, 22 a 33 kHz.



*Figura 23.* Punta ultrasónica y celda

En la Tabla 2 se observa la operación de la punta ultrasónica con glicerina diluida en agua al 80% (porcentaje en peso) y violeta de genciana al 5% (porcentaje en peso) diluida en la glicerina al 80%, a diferentes frecuencias en 15 segundos.

Tabla 2. *Operación de la punta 2 del scaler dental*

Tiempo		Punta 2 del scaler
0s	15 s	
		Frecuencia 29 kHz
		
		31 kHz

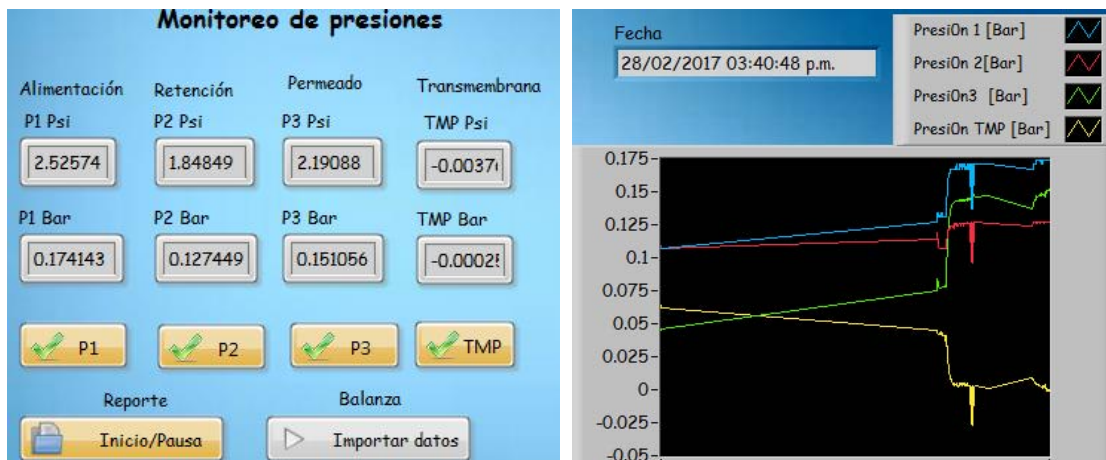
### Caracterización de válvula solenoide

La válvula solenoide es utilizada para generar perturbaciones en las mangueras de transporte del fluido a filtrar; la frecuencia de dicha válvula solenoide es controlada mediante un circuito de accionamiento que se activa y desactiva mediante una salida digital de la *DAQ* por un tiempo previamente establecido, ver Anexo 4. La caracterización de la válvula solenoide se realizó con ayuda de un osciloscopio, con el cual se midieron la cantidad de pulsos que se generaban por unidad de tiempo.

En la figura 24a se observa el monitoreo de las presiones sin la operación de la válvula solenoide, donde la línea azul corresponde a la presión de alimentación, la línea roja a la presión de retención, la línea verde a la presión de permeado y la línea amarilla a la presión transmembrana (TMP). En la figura 24b se observa como las presiones cambia respecto a la frecuencia de cierre y apertura de la válvula solenoide; en este caso se aplicó una frecuencia de 10 Hz por 10 s.



a)



b)

Figura 24. Operación válvula solenoide. a) Monitoreo inicial de las presiones en tiempo 0 b) Monitoreo de las presiones posterior al tiempo de operación de 10 seg.



## Bomba de velocidad variable

La alimentación del fluido a filtrar se realiza de manera modular y constante mediante la bomba de velocidad variable, cuya velocidad de alimentación es controlada mediante el voltaje de salida analógico de la *DAQ* aplicado en el motor de la bomba, ver anexo 4. La caracterización de la bomba se realizó con agua destilada. El voltaje máximo del motor de la bomba se moduló en 10 niveles, para cada nivel se registró el flujo volumétrico; es decir, los mililitros que se obtuvieron en determinado tiempo, figura 25. Finalmente se estimó el flujo promedio correspondiente a cada nivel, Tabla A2.3 (ver Anexo 2).

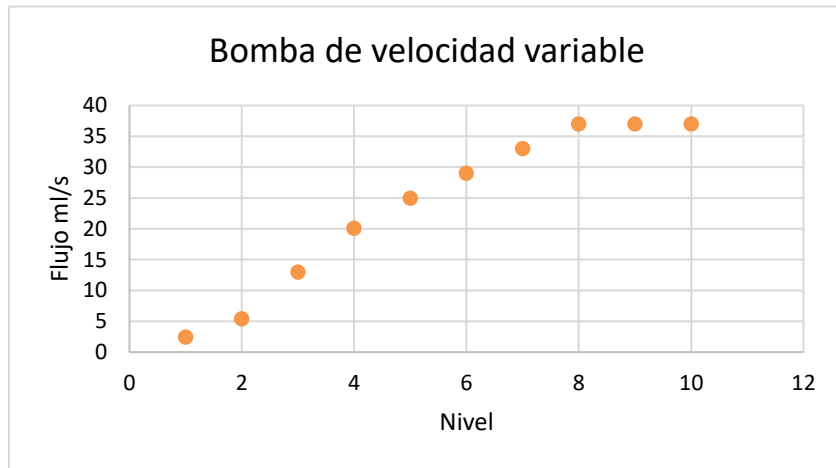
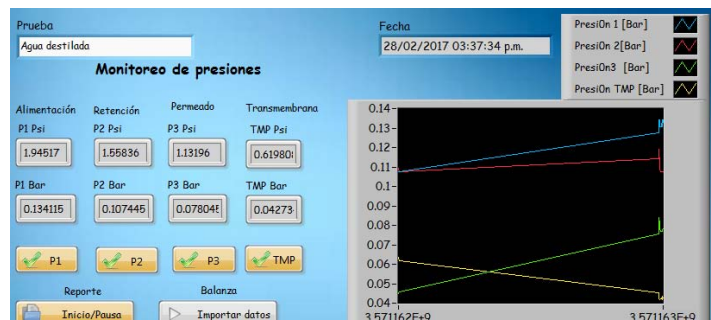
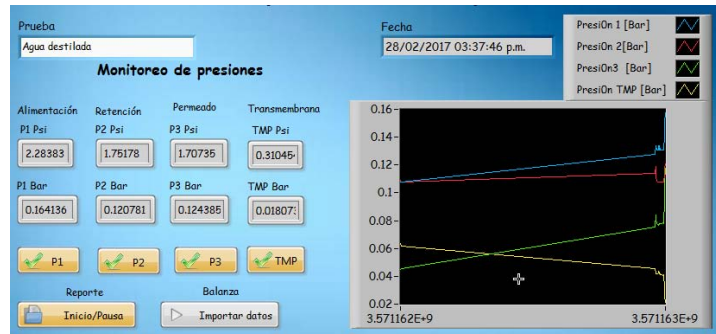


Figura 25. Caracterización de la bomba.

En la figura 26 se observa el funcionamiento de la bomba de velocidad variable y efecto que produce sobre las líneas de presión al cambiar el nivel de operación.



a)



b)

Figura 26. Operación de la bomba a diferentes niveles: a) flujo  $20 \text{ mls}^{-1}$ ; b)  $25 \text{ mls}^{-1}$

## Electroválvula

La electroválvula es utilizada para regular el flujo del fluido a filtrar mediante su posición, la cual es controlada mediante el giro del motorreductor, (controlado con el puente H y dos salidas digitales de la *DAQ*) en función de la presión de retención. La Tabla 3 muestran los resultados de la caracterización de la válvula, en la cual se mantuvo un flujo de alimentación constante ( $13 \text{ mls}^{-1}$ ), se realizaron giros de  $1/8$  de vuelta en la abrazadera de la válvula hasta completar 2 vueltas completas en la abrazadera. Por cada giro se hizo operar el motor por un tiempo constante (tabla A2.4, ver anexo 2). Se caracterizó para cada nivel de la bomba con el objetivo de ver el comportamiento de la presión de retención, al abrir o cerrar la válvula. Sin embargo, los cambios no son lineales y el usuario tendrá que activar el motorreductor en la interfaz hasta llegar a la presión deseada.

Tabla 3. Cierre de válvula vs Presión

Cierre	Presión [psi]		
1/8	3.9	8/8	4.47-4-51
2/8	4.08- 4.03	9/8	4.71-4.76
3/8	4.13- 4.18	10/8	4.95-4.76
4/8	4.18-4.22	11/8	4.95- 5
5/8	4.22-4.27	12/8	5.58-5.60
6/8	4.27-4.32	14/8	6.98-7.03
7/8	4.37-4.42	15/8	9.11-9.16
8/8	4.47-4-51	16/8	13.6-13.56

## Balanza

Se configuró y calibraron unidades y tiempo de muestreo de la balanza, de modo que registrara los datos en gramos cada segundo, almacenándolos en un archivo de texto mediante la interfaz USB y el *software SPDC Data Collection V2.01*, que ofrece el distribuidor de la balanza, de tal forma que el flujo de permeado es monitoreado mediante la balanza y recuperado posteriormente en una bitácora de experimentación, figura 27.

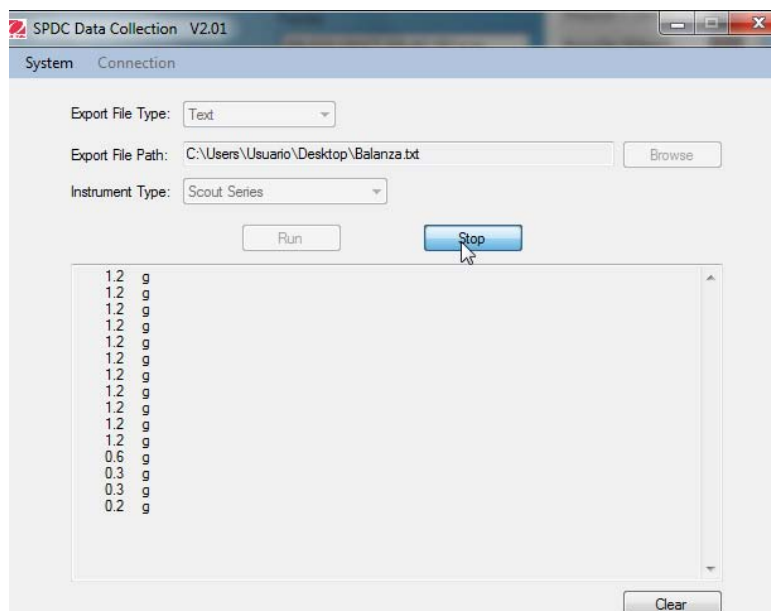


Figura 27. Registro de datos de masa.

### 4.2 Experimentos realizados

Después de realizar la calibración y caracterización de cada accesorio, se comprobó el funcionamiento del sistema con diferentes fluidos: agua destilada, jugo de nopal para concentrar mucílago y cerveza artesanal sin clarificar. Se utilizaron diferentes condiciones de flujo, de frecuencia, y combinación de los elementos de limpieza del sistema.

Con el agua destilada se realizaron pruebas de permeabilidad, utilizando tres flujos de alimentación: 20, 25 y 29  $\text{mls}^{-1}$ , variando la presión transmembrana a través de la válvula de estrangulamiento y el motorreductor. En el registro de la bitácora se procesaron los datos de presiones y flujo másico (Anexo 6). En la figura 28 se observa a la salida de la celda para membrana el flujo de permeado monitoreado por la balanza.



Figura 28. Sistema permeado



Figura 29. Jugo de nopal

En el caso del jugo de nopal, figura 30a, se llevó a cabo la filtración con membranas poliméricas. La clarificación de la concentración de jugo de nopal se observa en la figura 30b. Mientras que en la figura 30c se observa el monitoreo del proceso con el jugo de nopal, donde se observa la variación de las presiones, la línea P1 corresponde a la presión de alimentación, P2 a la presión de retenido y P3 a la presión de permeado y la estimación de TMP.

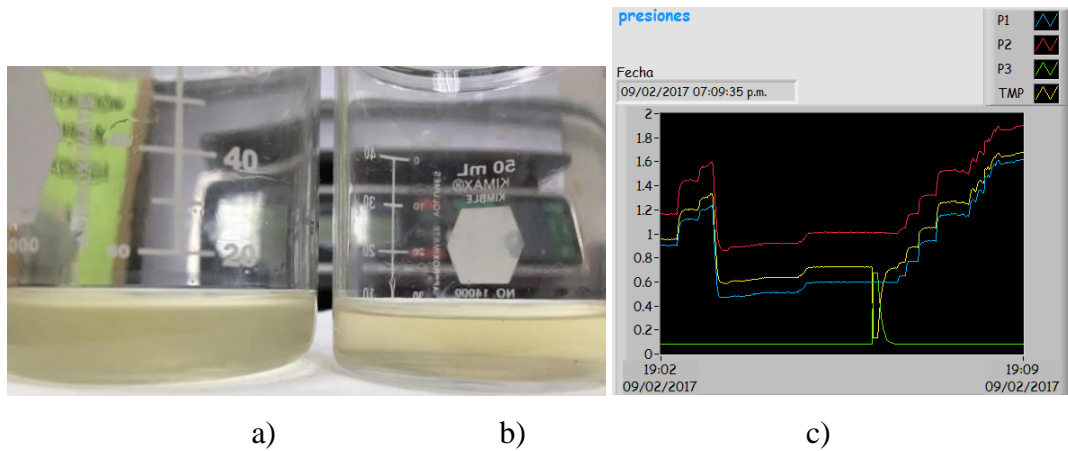


Figura 30. a) jugo de nopal; b) agua de nopal permeado; c) monitoreo presiones jugo de nopal

Se utilizaron diferentes membranas de disco poliméricas para la filtración de la cerveza, figura 31. Se observa la clarificación de la cerveza (la más oscura corresponde al fluido sin filtrar), mientras que el fluido claro es el permeado. El monitoreo de las

presiones de la cerveza artesanal se observa en la figura 31 b, donde la línea de color azul corresponde a la presión de alimentación, la línea de color rojo a la presión de alimentación, la línea de color verde a la presión de permeado, y la línea de color amarillo a la estimación de TMP que se monitorea con respecto al tiempo.

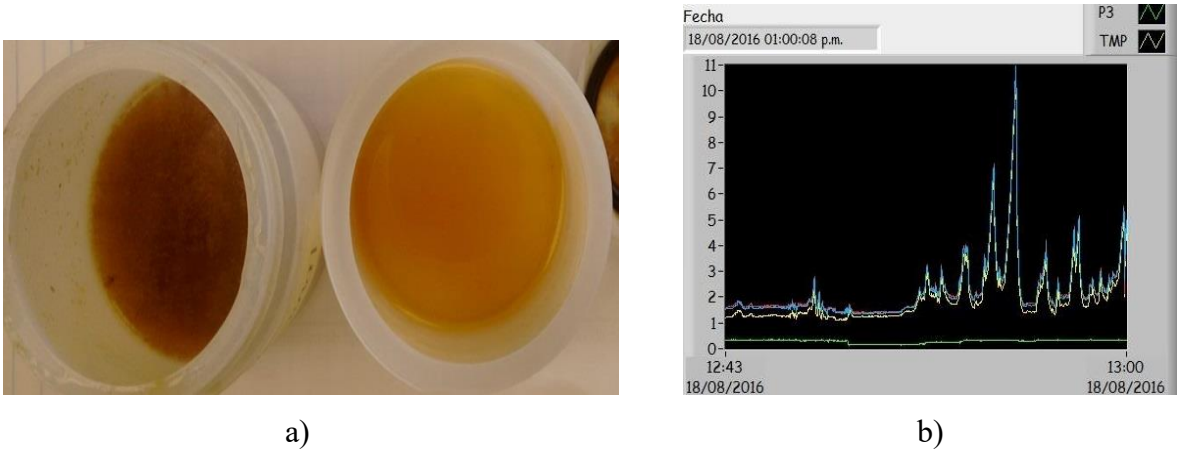


Figura 31. a) Resultado de la clarificación; b) Gráfica con las presiones de clarificación.

Con la interfaz desarrollada, es posible establecer, modificar y controlar las condiciones de operación del sistema. Así como activar los accesorios para llevar a cabo la limpieza y reducir el taponamiento de las membranas sin retirar de la celda, figura 32.



Figura 32. Montaje de la membrana y la punta ultrasónica en la celda de limpieza.

## CONCLUSIONES

El sistema de control y monitoreo desarrollado permite llevar a cabo experimentos de microfiltración en diferentes condiciones de operación. Así mismo, es posible la caracterización del desempeño de las membranas de disco de forma sencilla.

Por medio de la interfaz de usuario desarrollada se permite la interacción funcional del usuario con el sistema, se puede trabajar con valores pre-establecidos por el usuario, se permite operar los actuadores y accesorios en forma modular y se genera la bitácora con los datos adquiridos durante el experimento

La experimentación realizada con agua destilada, jugo de nopal y cerveza artesanal corrobora la operación adecuada de todos los elementos y el monitoreo de los valores de las presiones en cada línea de flujo, la estimación de la caída de presión en la celda de la membrana (TMP).

El control de variables permite mantener constante el flujo generado por la bomba, el nivel de frecuencia y tiempo de operación de la punta ultrasónica, la frecuencia de operación de la válvula solenoide. Esto genera repetitividad de las pruebas. En el caso de la válvula de estrangulamiento, su comportamiento no es lineal debido a la inestabilidad en la operación del motorreductor.

Se propone como trabajo a futuro:

Implementar sensores de fin de carrera en los extremos de la válvula de estrangulamiento que interpreten la posición de la válvula como abierta o cerrada y sustituir el motorreductor por un motor a pasos.

Generar rutinas de experimentación previamente establecidas en la interfaz de usuario, para aplicar técnicas de limpieza en la membrana.

## BIBLIOGRAFÍA

### Referencias.

Agana, B., Reeve, D., Orbell, J. (2011) *Optimitazion of the parameters for a 50 nm ZrO2 ceramic membrane as applied to the ultrafiltration of post-electrodeposition rinse wasterwater. Desalination* (31), pp. 325-332.

Badan-Ribiero, A., Bei, N., Goncalves, G., Cunha-Petrus, J., Viotto, L (2008). *The optimization of soybean oil degumming on a pilot scale using a ceramic membrane. Journal of Food Engineering*. pp.514-521.

Calzada A. Serrano R. (2005). *Implementación de un sistema automatizado en el área de jarabes para la preparación de refrescos*. Tesis de Licenciatura, Instituto Politécnico Nacional. México, DF.

Charcosset, C. *Membrane Processes in Biotechnology and Pharmaceutics*. Elsevier, 2012. ISBN 0444563377, 9780444563378.

Goosen, M.F.A., Sablani, S.S., Al-Hinai, H., Al-Obeidani, S., Al-Belushi, R., Jackson, D. (2005) *Fouling of reverse osmosis and ultrafiltration membranes: a critical review*. Sep. Sci. Technol. (39) pp. 2261-2297.

Kobayashi, T., Kobayashi, T., Hosaka, Y. Fuji, N. (2003) *Ultrasound-enhanced membrane cleaning processes applied water treatments: influence of sonic frequency on filtration treatments. Ultrasonics*. (41) pp. 185-190.

Muthukumaran, S., Kentish, S.E., Stevens, G.W., Ashokkumarb, M., Mawson, R. (2007) *The application of ultrasound to dairy ultrafiltration: The influence of operating conditions. Journal of Food Engineering*, (81) pp. 364-373.

Olvera T. (2011). *Diseño de configuración de un separador mecánico de líquidos con partículas sólidas*. Tesis de Licenciatura no publicada, Universidad Nacional Autónoma de México, México DF.

Picado A. Álvarez M (2008) *Introducción al estudio de la materia*. Costa Rica: EUNED.

Strathmann, H. Giorno, L. Drioli, E. (2006) *An Introduction to Membrane Science and Techonology*. Italia: B&T.

## Recursos electrónicos.

GEA Group (2016). Productos de GEA Filtration: *La filtración de membrana Planta Piloto de P y R*. Recuperado el 7 de septiembre de 2016 de: <http://www.gea.com/global/en/products/index.jsp#?superpg=1730&page1=0&page2=0>

*KBElectronics's manuals*. Recuperado el 20 de febrero de 2017 de: [http://www.kbelectronics.com/manuals/kbmm\\_smt\\_manual.pdf](http://www.kbelectronics.com/manuals/kbmm_smt_manual.pdf)

Manual bomba de desplazamiento positivo de velocidad variable. Recuperado el 6 de marzo de 2017 de: <https://pim-resources.coleparmer.com/instruction-manual/a-1299-0852.pdf>

Merck (2017) Merck Millipore: *Productos de filtración*. Recuperado el 20 de septiembre de 2016 de: [http://www.merckmillipore.com/MX/es/life-science-research/chromatography-sample-preparation/filtration-products/O3Wb.qB.CnUAAAFBw\\_plvzI\\_.nav](http://www.merckmillipore.com/MX/es/life-science-research/chromatography-sample-preparation/filtration-products/O3Wb.qB.CnUAAAFBw_plvzI_.nav)

National Instruments (2016): *NI DAQ USB 6008*. Recuperado el 2 de mayo de 2016. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/201986>

OHAUS (2016). Recuperado el 8 de Febrero de 2017 de: <http://www.ohaus.com/en-us/products/balances-scales/portable-balances/scout-spx/spx6201-am>

Pololu (2016). *Pololu Robotics&Electronics*. Recuperado el 30 de enero del 2017 de: <https://www.pololu.com/product/1208>

SATELEC. *Manual P5 Booster*. Recuperado el 18 de febrero de 2017 de: [http://de.acteongroup.com/out/pictures/DownloadHandler/Files/ba\\_p5\\_booster\\_i58801\\_o9\\_v4\(1\).pdf](http://de.acteongroup.com/out/pictures/DownloadHandler/Files/ba_p5_booster_i58801_o9_v4(1).pdf)

TAMI Industries (2010). *Advanced ceramic filtration*. Recuperado el 6 de marzo de 2017 de: <http://www.tami-industries.com/ABOUT-US.4.0.html>

TFS Takasago Fluidic System (2010). Recuperado el 8 de febrero de 2017 de: [http://www.takasago-fluidics.com/products\\_valve/pinch/PK/PK-0802-NO\\_26.html](http://www.takasago-fluidics.com/products_valve/pinch/PK/PK-0802-NO_26.html)



# ANEXOS

## ANEXO 1. ESPECIFICACIONES NI-DAQ 6008.

<b>NI DAQ 6008</b>	
<b>Entrada analógica</b>	
Número de canales de una sola terminal	8
Diferenciales	4
Resolución	12 bits
Rango voltaje	-10 a 10 V
<b>Salida analógica</b>	
Número de canales	2
Resolución	12 bits
Rango	0 - 5V
E/S Digital	12
Canales bidireccionales	
<b>Entrada digital</b>	
Rango de voltaje	0- 5 V
<b>Salida digital</b>	
Capacidad de corriente	102 Ma
Rango de voltaje	0- 5 V
<b>Especificaciones físicas</b>	
Longitud	8.51 cm
Ancho	8.18 cm
Altura	2.31 cm

Fuente: Página productos National Instruments.

## ANEXO 2. TABLAS CARACTERIZACIÓN DE INSTRUMENTOS

Tabla A2.1 *Caracterización transductores de presión.*

<b>Voltaje</b>	<b>psi</b>	<b>Voltaje</b>	<b>psi</b>	<b>Voltaje</b>	<b>psi</b>
Transductor de 5		Transductor de 25		Transductor de 50	
0.5	0	0.5	0	0.5	0
0.55	0.5	0.55	2.5	0.55	5
1.1	1	1.1	5	1.1	10
2.2	2	2.2	10	2.2	20
2.75	2.5	2.75	12.5	2.75	25
5.5	5	5.5	25	5.5	50

Tabla A2.2 *Caracterización de punta ultrasónica.*

<b>Nivel</b>	<b>Voltaje</b>	<b>Frecuencia</b>
	<b>[V]</b>	<b>[kHz]</b>
0.5	0.178	27
1	0.358	27.222
1.5	0.536	27.444
2	0.714	27.666
2.5	0.892	27.888
3	1.071	28.11
3.5	1.252	28.332
4	1.43	28.554
4.5	1.609	28.776
5	1.785	28.998
5.5	1.964	29.22
6	2.141	29.442
6.5	2.322	29.664
7	2.502	29.886
7.5	2.68	30.108

8	2.859	30.33
8.5	3.038	30.552
9	3.215	30.774
9.5	3.393	30.996
10	3.569	31.218
10.5	3.747	31.44
11	3.928	31.662
11.5	4.1	31.884
12	4.27	32.106
12.5	4.45	32.328
13	4.63	32.55
13.5	4.81	32.772
14	4.99	32.994

\*Intervalo de frecuencia: Dato de fábrica, SATALEC.

Tabla A2.3 *Flujo volumétrico que proporciona la bomba con base en niveles de operación.*

<b>Nivel</b>	<b>Flujo [ml/s]</b>
1	2.46
2	5.4
3	13
4	20.11
5	25
6	29
7	33
8	37
9	37
10	37

Tabla A2.4. *Cierre vs Tiempo*

<b>Cierre</b>	<b>Tiempo [s]</b>
1/8	0.25
2/8	0.25
3/8	0.25
4/8	0.25
5/8	0.25
6/8	0.25
7/8	0.25
8/8	0.25
9/8	0.25
10/8	0.25
11/8	0.25
12/8	0.25
14/8	0.25
15/8	0.25
16/8	0.25
<b>2 vueltas</b>	<b>3.75</b>

\*La operación del motor se realizó a voltaje constante

### ANEXO 3. CIRCUITO DE ACCIONAMIENTO US

El circuito de control del sistema ultrasónico se realizó mediante un transistor 2N2222 configurado como interruptor. Ver figura A3.

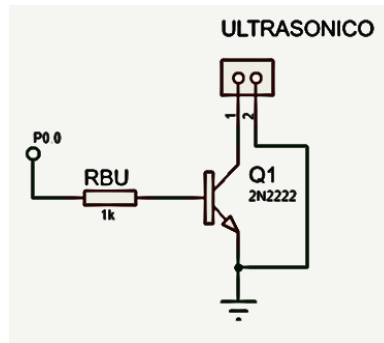


Figura A3. Circuito de accionamiento ultrasónico

Cálculo:

$$\beta_{2n2222} = \frac{I_{cu}}{I_{bu}}; I_{bu} = \frac{I_{cu}}{\beta_{2n2222}}$$

$$R_{bu} = \frac{V_i - V_{be}}{I_{b_{umax}}}$$

Sí:

$$\beta_{2n2222} = 100$$

$$I_{cu} = 100mA$$

$$I_{bu} = \frac{100mA}{100} = 1mA$$

$$I_{b_{umax}} = 1mA * 4 = 4mA$$

$$R_{bu} = \frac{5 - 0.7}{4mA} = 1075\Omega$$

donde:

P0.0= Salida digital DAQ

$$R_{bu} = 1k\Omega$$

$$R_3 = 1k\Omega$$

$\beta_{2n2222}$ : Ganancia Transistor 2n2222.

$I_{cu}$ : Corriente de colector ultrasónico.

$I_{bu}$ : Corriente de base ultrasónico.

$I_{b_{umax}}$ : Máxima corriente base ultrasónico.

$R_{bu}$ : Resistencia de base ultrasónico.

## ANEXO 4. CIRCUITO DE ACCIONAMIENTO VÁLVULA SOLENOIDE

El circuito de control de la válvula solenoide se realizó a través de un transistor de potencia Tip 120 configurado como interruptor. Ver figura A4.

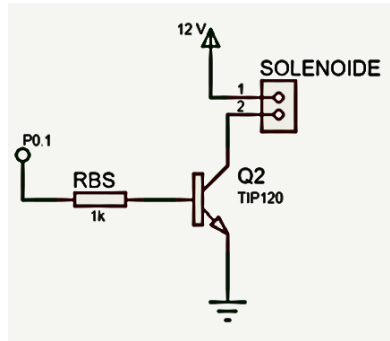


Figura A4. Circuito de accionamiento solenoide

Cálculo:

$$\beta_{120} = \frac{I_{cs}}{I_{bs}}; \quad I_{bs} = \frac{I_{cs}}{\beta_{120}}$$
$$R_{bs} = \frac{V_i - V_{be}}{I_{b_{maxs}}}$$

Sí:

$$\beta_{120} = 1000$$

$$I_{cs} = 1.2A$$

$$I_{bs} = \frac{1.2A}{1000} = 1.2mA$$

$$I_{b_{maxs}} = 1.2mA * 4 = 4.8mA$$

$$R_{bs} = \frac{5 - 0.7}{4.8mA} = 895.83\Omega$$

donde:

$R_{bs} = 1 k\Omega$
----------------------

P01: Pin digital DAQ.

$\beta_{120}$ : Ganancia Transistor Tip 120.

$I_{cs}$ : Corriente de base solenoide.

$I_{bs}$ : Corriente de base solenoide.

$I_{b_{maxs}}$ : Máxima corriente base solenoide.

$R_{bs}$ : Resistencia de base solenoide.

## ANEXO 5. ACONDICIONAMIENTO BOMBA

Se utilizó el amplificador LM358 como amplificador no inversor para amplificar la señal de la bomba de desplazamiento positivo. Ver figura A5.

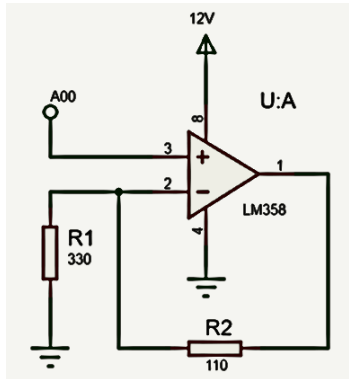


Figura A5. Circuito de amplificación bomba

donde A00: Salida analógica DAQ

Cálculo:

$$V_o = V_i \left( \frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)$$

$$R_2 = R_1 \left( \frac{V_o}{V_i} - 1 \right)$$

Sí:

$$V_o = 6.6 \text{ V}$$

$$V_i = 5 \text{ V}$$

$$R_1 = 330 \ \Omega$$

$$R_2 = 330 \left( \frac{6.6}{5} - 1 \right) = 105.6$$

$$R_2 = 110 \ \Omega$$

## ANEXO 6. BITACORA DE EXPERIMENTACIÓN

1	Time	Time*	Presi0n 1 [Bar]	Presi0n 2[Bar]	Presi0n3 [Bar]	Presi0n TMP [Bar]	masa0 [g]
2	03/03/2017 02:06:31.029 PM	0	0.080743411	0.079106043	0.028038663	0.051886064	0
3	03/03/2017 02:07:12.795 PM	1	0.187486361	0.135783662	0.077378833	0.084256178	0
4	03/03/2017 02:07:13.797 PM	2	0.187486361	0.135783662	0.078712351	0.08292266	0
5	03/03/2017 02:07:14.799 PM	3	0.187486361	0.137450651	0.07937911	0.083089396	0
6	03/03/2017 02:07:15.793 PM	4	0.187486361	0.134116674	0.080379249	0.080422268	0
7	03/03/2017 02:07:16.796 PM	5	0.187486361	0.135783662	0.081379388	0.080255624	0
8	03/03/2017 02:07:17.796 PM	6	0.187486361	0.135783662	0.082379526	0.079255485	0
9	03/03/2017 02:07:18.796 PM	7	0.190822078	0.134116674	0.083379665	0.079089711	0
10	03/03/2017 02:07:19.798 PM	8	0.187486361	0.135783662	0.084379803	0.077255208	0
11	03/03/2017 02:07:20.799 PM	9	0.187486361	0.135783662	0.085379942	0.07625507	0
12	03/03/2017 02:07:21.801 PM	10	0.187486361	0.135783662	0.086046701	0.075588311	0
13	03/03/2017 02:07:22.797 PM	11	0.187486361	0.134116674	0.08671346	0.074088057	0.2
14	03/03/2017 02:07:23.800 PM	12	0.187486361	0.135783662	0.088046978	0.073588033	0.3
15	03/03/2017 02:07:24.798 PM	13	0.190822078	0.135783662	0.088713737	0.074589133	0.2
16	03/03/2017 02:07:25.800 PM	14	0.187486361	0.135783662	0.090047255	0.071587756	0.3
17	03/03/2017 02:07:26.798 PM	15	0.190822078	0.137450651	0.090714014	0.07342235	0.3
18	03/03/2017 02:07:27.799 PM	16	0.190822078	0.135783662	0.091047394	0.072255476	0.3
19	03/03/2017 02:07:28.799 PM	17	0.190822078	0.135783662	0.092047532	0.071255338	0.2
20	03/03/2017 02:07:29.799 PM	18	0.190822078	0.137450651	0.093047671	0.071088694	0.3
21	03/03/2017 02:07:30.798 PM	19	0.190822078	0.137450651	0.09371443	0.070421935	0.3
22	03/03/2017 02:07:31.799 PM	20	0.187486361	0.135783662	0.094381189	0.067253822	0.3
23	03/03/2017 02:07:32.800 PM	21	0.184150644	0.135783662	0.095047948	0.064919205	0.3

Figura A6. Datos experimentales