



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA ARDUINO
MEDIDOR DE VACÍO PARA LA EVALUACIÓN DE
DIFERENTES MEDIOS FILTRANTES

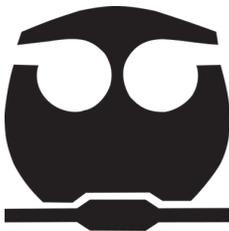
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA:

IVAN WENCESLAO ZAVALA HERNÁNDEZ



Ciudad Universitaria, CD. MX. 2021



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.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: HUERTA CERDÁN ANTONIO

VOCAL: JUÁREZ SÁNCHEZ FAUSTINO

SECRETARIO: DE LA ROSA CANALES JUAN MANUEL

1er. SUPLENTE: HERRERO TERAN MANUEL MARIANO

2° SUPLENTE: VELA AVITUA ANDRÉS

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: Laboratorio de Procesamiento de Minerales, edificio “D”. | San Lorenzo Totolinga, Edo. de México

ASESOR DEL TEMA:

M. en C. ANTONIO HUERTA CERDÁN

SUSTENTANTE:

IVAN WENCESLAO ZAVALA HERNÁNDEZ

Índice general

Resumen	1
Introducción	2
Hipótesis	3
Objetivos	3
1 Marco Teórico	4
1.1 La filtración en la separación líquido-sólido en el beneficio de minerales . . .	4
1.1.1 Equipos de filtrado empleados en el beneficio de minerales	8
1.2 Los medios de filtrado	11
1.3 Consideraciones sobre la evaluación del proceso de filtración	16
1.3.1 Equipos para pruebas de filtración a escala laboratorio	18
1.4 El proyecto arduino	20
1.4.1 Arduino UNO	21
1.4.2 Descripción de los pines	22
1.4.3 Consideraciones especiales	23
1.4.4 Programación y uso de la placa arduino	24
1.5 Consideraciones para la selección de un elemento sensor	27
1.5.1 Clasificación de los sensores y transductores	28
1.5.2 Sensores de presión	30
1.6 La presión y sus formas de medirla	32
1.7 Sensores de presión para arduino	33
1.7.1 BMP180	33
1.7.2 MPX2010DP	35
1.7.3 Sensor XGZP6867	36

2	Desarrollo experimental	37
2.1	Construcción de la bomba de vacío	37
2.2	Diseño y construcción del sistema de pruebas	40
2.2.1	Sistema de filtrado y contenedores	40
2.2.2	Elección del elemento sensor	41
2.2.3	Componentes electrónicos	43
2.3	Escritura del código para el sistema arduino	43
2.4	Calibración del sensor	44
2.5	Evaluación de los medios filtrantes	44
3	Resultados y Análisis de Resultados	47
3.1	Sistema de pruebas	47
3.1.1	Sistema de filtrado	47
3.1.2	Componentes electrónicos	48
3.2	Código del programa	50
3.2.1	Datos producidos por el sistema Excel-Arduino	52
3.3	Calibración del sensor	53
3.4	Evaluación de los medios filtrantes	54
3.4.1	Mezclilla	54
3.4.2	Lona	60
3.4.3	Tergal	65
3.4.4	Comparación entre los medios filtrantes	70
4	Conclusiones	73
A	Indicaciones de uso del sistema de pruebas	77
B	Diagramas	83
C	Lista de materiales y costos	85
D	Código del programa	86

Índice de figuras

1.1.1	Comparación de los tipos de filtración [14]	6
1.1.2	Etapas del proceso de filtración en un filtro de tambor rotatorio [7]	7
1.1.3	Clasificación de los procesos de filtración [22]	8
1.1.4	Filtro de tambor rotatorio [16]	9
1.1.5	Filtro de disco rotatorio [17]	10
1.1.6	Filtro de banda al vacío [23]	11
1.2.1	Comparación de los tipos de hilo empleados en la fabricación de medios filtrantes [21]	14
1.2.2	a) Micrografía (MEB) de un tejido liso fabricado con un hilo multifilamento [18] b) Vista general de una tela con tejido liso [10]	14
1.2.3	a) Micrografía (MEB) de un tejido de sarga fabricado con un hilado de fibra [18] b) Vista general de un medio filtrante con tejido de sarga [3]	15
1.2.4	a) Micrografía (MEB) de un tejido satén [18] b) Vista general de un medio filtrante con tejido satén [2]	15
1.3.1	Sistema para la evaluación de medios filtrantes con embudo invertido y depósito de pulpa [25]	19
1.3.2	Sistema para la evaluación de medios filtrantes [6]	19
1.4.1	Placa Arduino UNO [1]	22
1.4.2	Ejemplo típico de programación en el IDE de arduino	26
1.5.1	Diagrama de un sensor de presión que opera mediante la variación de resistencia [13]	30
1.5.2	Diagrama de una galga metálica [13]	31
1.7.1	Sensor BMP180 [9]	34
1.7.2	Sensor MPX2010DP [15]	35
1.7.3	Sensor XGZP6867 [4]	36

2.0.1	Diagrama de flujo del desarrollo experimental del proyecto	38
2.1.1	(a) Compresor de aire con carcasa (b) Compresor sin carcasa, empleado para la fabricación de la bomba de vacío	39
2.1.2	(a) Tapa metálica de la bomba de vacío con niples y cable de alimentación (b) Tapa de la bomba de vacío con el sello de silicón	39
2.1.3	(a) Compresor de aire montado sobre la base de madera (b) Bomba de vacío terminada	40
2.2.1	(a) Trampa de vacío (b) Receptor del filtrado	41
2.2.2	(a) Detalle del portafiltro del embudo de filtración (b) Embudo de filtración	41
2.5.1	Medios filtrantes empleados en las pruebas de filtración. Arriba, tergal. En medio, lona. Abajo, mezclilla.	45
2.5.2	Vasos con el mineral y el líquido a filtrar	46
3.1.1	Resultado final del sistema de pruebas	48
3.1.2	Componentes electrónicos y su conexión en la placa de pruebas	49
3.1.3	Detalle de las conexiones en la placa de pruebas y su conexión con la placa arduino	49
3.2.1	Captura de la hoja de cálculo con los datos registrados y la gráfica generada con estos	52
3.2.2	a) Representación gráfica de los datos del sensor que se registran en la hoja de cálculo b) Ejemplo de las zonas que se pueden identificar empleando los datos registrados por el sensor	52
3.2.3	Resultado después de realizar el tratamiento de los datos obtenidos en la hoja de cálculo en una prueba de filtrado	53
3.3.1	Curva de calibración del sensor BMP180	54
3.4.1	Curvas obtenidas en la prueba de filtración con la mezclilla a los 2 segundos	55
3.4.2	Curvas obtenidas en la prueba de filtración con la mezclilla a los 3 segundos	56
3.4.3	Curvas obtenidas en la prueba de filtración con la mezclilla a los 4 segundos	57
3.4.4	Curvas obtenidas en la prueba de filtración con la mezclilla a los 5 segundos	58

3.4.5	Volumen y porcentaje de filtrado recuperado en función del tiempo con mezclilla	59
3.4.6	Curvas obtenidas en la prueba de filtración con la lona a los 2 segundos .	61
3.4.7	Curvas obtenidas en la prueba de filtración con la lona a los 3 segundos .	61
3.4.8	Curvas obtenidas en la prueba de filtración con la lona a los 4 segundos .	62
3.4.9	Curvas obtenidas en la prueba de filtración con la lona a los 5 segundos .	63
3.4.10	Volumen y porcentaje de filtrado recuperado en función del tiempo con lona	64
3.4.11	Curvas obtenidas en la prueba de filtración con el tergal a los 2 segundos .	65
3.4.12	Curvas obtenidas en la prueba de filtración con el tergal a los 3 segundos .	66
3.4.13	Curvas obtenidas en la prueba de filtración con el tergal a los 4 segundos .	67
3.4.14	Curvas obtenidas en la prueba de filtración con el tergal a los 5 segundos .	68
3.4.15	Volumen y porcentaje de filtrado recuperado en función del tiempo con tergal	69
3.4.16	Comparación de la prueba de filtrado entre los medios filtrantes a 4 segundos	70
3.4.17	Comparación de la prueba de filtrado entre los medios filtrantes a 5 segundos	71
3.4.18	Comparación del porcentaje de filtrado recuperado obtenido con cada medio filtrante	71
A.0.1	Vista de la página de descarga del complemento <i>Parallax Data Acquisition tool (PLX-DAQ)</i>	78
A.0.2	Archivos contenidos en la carpeta PLX-DAQ	78
A.0.3	Archivos contenidos en la carpeta plx-daq-release2b.zip	79
A.0.4	Vista del contenido del archivo PLX-DAQ_R2	79
A.0.5	Detalle del panel PLX-DAQ Release 2.0	80
A.0.6	Pasos para encontrar el puerto de comunicación (COM) de la tarjeta arduino en el IDE	80
A.0.7	Vista de la hoja de cálculo después de conectar establecer la comunicación con la tarjeta arduino	81
A.0.8	Diagrama del sistema para la evaluación de los medios filtrantes	83
A.0.9	Diagrama de conexiones y componentes electrónicos	84

Índice de tablas

1.1	Variables de operación que afectan el proceso de filtración	7
1.2	Especificaciones técnicas de la placa arduino uno con microcontrolador ATmega328P	23
1.3	Especificaciones técnicas del sensor BMP180	34
1.4	Especificaciones técnicas del sensor MPX2010DP	36
3.1	Datos para la calibración del sensor BMP180	53
3.2	Resumen de las pruebas de filtración con mezclilla	54
3.3	Resultados de las pruebas de filtración con mezclilla a 2 segundos	55
3.4	Desviaciones estándar de los resultados de las pruebas de filtración con mezclilla a los 2 segundos	55
3.5	Resultados de las pruebas de filtración con mezclilla a 3 segundos	56
3.6	Desviaciones estándar de los resultados de las pruebas de filtración con mezclilla a los 3 segundos	56
3.7	Resultados de las pruebas de filtración con mezclilla a 4 segundos	57
3.8	Desviaciones estándar de los resultados de las pruebas de filtración con mezclilla a los 4 segundos	57
3.9	Resultados de las pruebas de filtración con mezclilla a 5 segundos	58
3.10	Desviaciones estándar de los resultados de las pruebas de filtración con mezclilla a los 5 segundos	58
3.11	Resumen de las pruebas de filtración con lona	60
3.12	Resultados de las pruebas de filtración con lona a 2 segundos	60
3.13	Desviaciones estándar de los resultados de las pruebas de filtración con lona a los 2 segundos	60
3.14	Resultados de las pruebas de filtración con lona a 3 segundos	62

3.15	Desviaciones estándar de los resultados de las pruebas de filtración con lona a los 3 segundos	62
3.16	Resultados de las pruebas de filtración con lona a 4 segundos	62
3.17	Desviaciones estándar de los resultados de las pruebas de filtración con lona a los 4 segundos	63
3.18	Resultados de las pruebas de filtración con lona a 5 segundos	63
3.19	Desviaciones estándar de los resultados de las pruebas de filtración con lona a los 5 segundos	63
3.20	Resumen de las pruebas de filtración con tergal	65
3.21	Resultados de las pruebas de filtración con tergal a 2 segundos	66
3.22	Desviaciones estándar de los resultados de las pruebas de filtración con tergal a los 2 segundos	66
3.23	Resultados de las pruebas de filtración con tergal a 3 segundos	67
3.24	Desviaciones estándar de los resultados de las pruebas de filtración con tergal a los 3 segundos	67
3.25	Resultados de las pruebas de filtración con tergal a 4 segundos	68
3.26	Desviaciones estándar de los resultados de las pruebas de filtración con tergal a los 4 segundos	68
3.27	Resultados de las pruebas de filtración con tergal a 5 segundos	69
3.28	Desviaciones estándar de los resultados de las pruebas de filtración con tergal a los 5 segundos	69
A.1	Lista de los materiales empleados en la construcción del sistema de pruebas. Se muestra el número de piezas empleadas y su costo	85

Resumen

Se realizó el diseño y construcción de un sistema de medición de vacío para la evaluación de medios filtrantes empleados en el beneficio de minerales. El equipo se basó en el uso de un sensor de presión controlado por una placa arduino, que en conjunto permiten el registro de los datos en una hoja de cálculo en Excel. Además, para facilitar el control del registro de datos y para permitir que el sistema muestre mensajes relacionados a su operación, se añadieron diferentes componentes electrónicos como botones, luces led y una pantalla LCD.

La propuesta para la construcción de un sistema de medición que hace uso de una placa arduino, se debe a la importancia que tienen en la actualidad los equipos de medición y registro de datos. Además, la incorporación de este equipo al Laboratorio de Procesamiento de Minerales de la Facultad de Química, permitirá que se realicen actividades de investigación relacionadas con la evaluación de medios filtrantes, tanto por profesores como alumnos, dando a estos últimos un acercamiento a los equipos que incorporan sensores y microcontroladores. Asimismo, se evita el uso de equipos que emplean sustancias que dañan el medio ambiente, como el mercurio en un manómetro tipo U.

El objetivo de este trabajo es construir un equipo que permita obtener datos reproducibles y confiables de la caída de presión en una prueba de filtración. La forma en la que se evaluó el desempeño de los medios filtrantes fue mediante la comparación del líquido recuperado a diferentes tiempos y a una misma presión de vacío en pruebas de filtración.

El uso de una tarjeta arduino permitió construir un equipo fácil de usar, de bajo costo, y capaz de generar datos reproducibles y confiables, ya que la desviación estándar en la caída de presión de las pruebas realizadas se encuentra en un rango de entre 0.07 0.33.

Introducción

Los constantes cambios en las condiciones de operación de un proceso nos obliga a monitorear y adquirir los datos de alguna variable dominante de este, ya que el adecuado tratamiento de esta información permite determinar cómo es que la variable influye en los resultados del proceso y de esta forma se puede lograr un adecuado control.

Un ejemplo de un proceso en constante cambio, es la etapa de separación líquido-sólido en el beneficio de minerales. En ella, las características de los materiales procesados, suelen modificar las condiciones de operación. Además, los objetivos de esta operación varían según el tipo de material procesado, es decir, en ocasiones se busca alcanzar un cierto porcentaje de humedad, o por el contrario se prefiere recuperar la mayor cantidad del líquido de la pulpa. Sin importar el caso, un elemento clave para lograr el objetivo, es el medio filtrante empleado, esto hace que la evaluación de este elemento sea vital.

En la práctica, existen muchas formas de evaluar un medio filtrante, por ejemplo, mediante la caída de presión en una prueba de filtración. A partir de esta variable se pueden cuantificar parámetros como la cantidad de líquido recuperado a una misma presión de vacío, o la resistencia del medio.

Actualmente, el Laboratorio de Procesamiento de Minerales del Departamento de Ingeniería Metalúrgica, de la Facultad de Química no cuenta con un equipo que permita evaluar medios filtrantes. Por esta razón se propuso la construcción de un equipo de medición basado en el uso de un sensor de presión controlado por una tarjeta arduino que permita la comunicación con una computadora.

Hipótesis

Es posible usar un sensor de presión controlado con una tarjeta arduino, para la construcción de un sistema que permita medir y registrar en una computadora, los datos del vacío generado durante la evaluación de medios filtrantes empleados en el beneficio de minerales.

Objetivos

Objetivos generales

- Construir un sistema de medición de vacío que permita evaluar medios filtrantes empleados en el beneficio de minerales, empleando una tarjeta de arduino acoplado un sensor de presión de bajo costo.
- Desarrollar un programa que permita adquirir los datos del sensor de presión e interactuar la comunicación serial entre una computadora y el sistema arduino.
- Evaluar diferentes medios filtrantes en función del líquido desalojado, empleando el sistema desarrollado.

Objetivos particulares

- Construir un sistema económico y de fácil manejo.
- Construir un sistema de medición que permita su uso en el Laboratorio de Beneficio de Minerales del Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Química de la UNAM.

Capítulo 1

Marco Teórico

1.1. La filtración en la separación líquido-sólido en el beneficio de minerales

Dentro del proceso de beneficio de minerales, una de las etapas finales de procesamiento es el proceso de filtración. La importancia de esta etapa se debe a que en ella se procesan tanto los materiales valiosos (concentrados) como aquellos que se convertirán en residuos mineros (estériles). Esto hace que sea imprescindible el análisis de esta operación, ya que, la correcta ejecución de esta etapa trae consigo beneficios medioambientales y económicos.

En el primer caso, se busca reducir el consumo de agua fresca, recuperando la mayor cantidad de líquido posible de una pulpa, para así reincorporarlo en alguna etapa previa de procesamiento. También se busca disminuir los riesgos ambientales asociados al transporte y disposición de estos materiales, esto se logra reduciendo su contenido de humedad ya que de esta forma se facilita su transporte y manejo.

Los beneficios económicos se derivan de los medioambientales, es decir, la reducción en el consumo de agua fresca se reflejará en la disminución de los costos asociados

al uso de este recurso. De igual forma, al aminorar el contenido de humedad en los concentrados, los costos del transporte pueden ser menores. Otro ejemplo de esto es la reducción del riesgo asociado al transporte de concentrados y relaves, ya que se evita una posible sanción económica asociada a un evento de contaminación ambiental.

Junto con los beneficios ambientales y económicos, la etapa de filtración, tiene como objetivo separar de manera eficiente las fases de una mezcla líquido-sólido, empleando una membrana semipermeable que efectúe este trabajo, este elemento es conocido como medio filtrante. En esta etapa, para establecer un flujo de filtrado a través del medio filtrante, es necesario aplicar una diferencia de presión, llamada caída de presión [7].

Para asegurar la óptima operación y resultados de esta etapa, es de gran importancia la elección de un medio filtrante adecuado para el tipo de mineral y proceso empleado, ya sea continuo o por lotes, ya que de estos factores dependen resultados como el tiempo de filtrado y la cantidad de líquido desalojado. Para ello es importante conocer a detalle el método de filtrado empleado, las etapas incluidas en esta operación, así como algunas características del mineral como tamaño y forma de las partículas.

En la filtración, la separación de las fases se producirá de diferentes formas dependiendo de la fuerza motriz involucrada. Esta puede ser por gravedad, por vacío (presión negativa), por aplicación de vacío y presión de manera combinada, por fuerzas centrífugas o por gradientes de saturación [7]. Cada una de estas fuerzas motrices, está asociada con un equipo de filtración distinto. De manera análoga, la forma en que ocurre la filtración, puede clasificarse en tres tipos: filtración a través de la torta, filtración sin formación de torta y la filtración profunda, siendo la primera, la más común en el beneficio de minerales [25]. Estos mecanismos se detallan a continuación y en la figura 1.1.1, se observa una comparación esquemática de ellos.

La filtración a través de la torta ocurre cuando el medio filtrante retiene al sólido de la pulpa en su superficie, formando una segunda capa semipermeable llamada torta

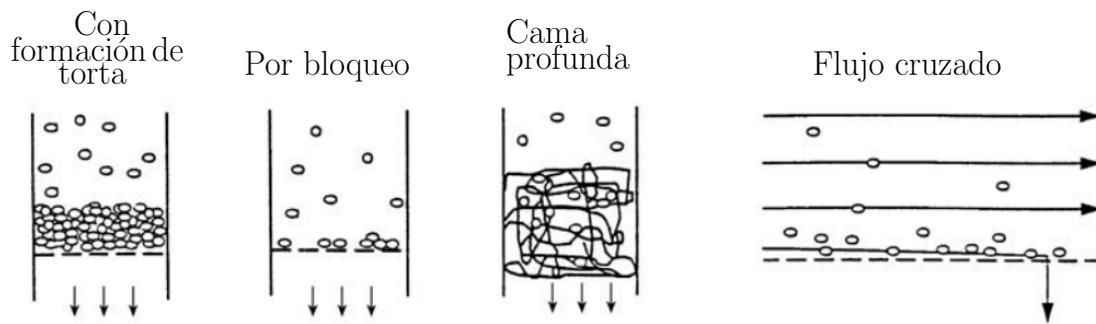


Figura 1.1.1: Comparación de los tipos de filtración [14]

filtrante. La formación de esta capa se debe a que las partículas sólidas tienen un tamaño mayor a los poros del medio filtrante. La estructura y propiedades de la torta filtrante cambian a medida que más partículas se depositan sobre ella, además, las propiedades cambiarán en función de la forma y tamaño de los sólidos, así como propiedades del líquido como su viscosidad [22].

La filtración sin formación de torta y la filtración profunda, por lo regular, se emplean en aplicaciones específicas como la separación sólido - gas y la filtración de partículas finas en suspensiones diluidas. En el primer caso, el flujo de la suspensión es paralelo a la superficie del medio filtrante, por otro lado, en la filtración profunda, se emplean medios filtrantes con poros de mayor tamaño que las partículas a retener, la retención de partículas ocurre debido a la profundidad de los filtros, ya que, las partículas penetran en el interior del medio filtrante y son capturadas por las fibras o partículas que forman el medio[7].

Las etapas que involucran el proceso típico de filtrado, generalmente incluyen una serie de pasos que pueden separarse en: formación de la torta, reducción de humedad, lavado de la torta, descarga de torta y lavado del medio filtrante. Dentro de estos pasos, el lavado de la torta podría señalarse como un paso opcional y esto dependerá de si durante el proceso se adicionó algún reactivo que facilite el filtrado (floculantes). La figura 1.1.2, muestra un ejemplo de las etapas del proceso de filtración en un filtro de tambor rotatorio.

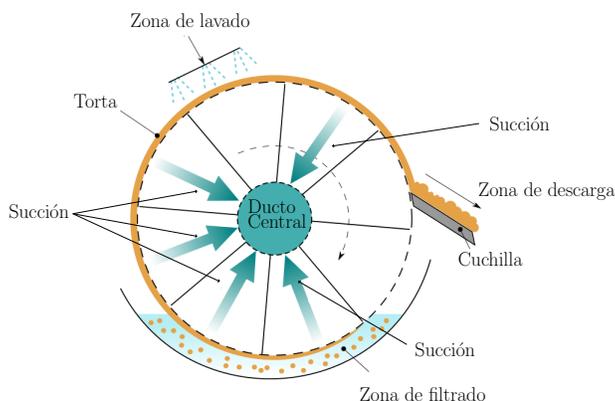


Figura 1.1.2: Etapas del proceso de filtración en un filtro de tambor rotatorio [7]

Tabla 1.1: Variables de operación que afectan el proceso de filtración

Variables de operación	
Variables de entrada	Flujo de la pulpa Porcentaje de sólidos
Variables de salida	Humedad de la torta Flujo másico de descarga
Variables de diseño	Área de filtrado Caída de presión (ΔP)
Variables de control	Tiempo de formación de la torta Tiempo de lavado
Parámetros	Porosidad, permeabilidad Compresibilidad Densidad del sólido y del filtrado Viscosidad, esfericidad
Perturbaciones	Tamaño de partícula Distribución de tamaños

La forma en la que se lleva a cabo la filtración está condicionada por diversas propiedades de las fases a separar, como las propiedades del fluido o del sólido, así como la capacidad del filtro y las consideraciones finales sobre los productos de la filtración, además, existen variables de operación que repercuten en este proceso. En la tabla 1.1 se detallan algunas de estas variables.

La variedad de condiciones y formas de operar de los equipos de filtrado hacen que sea posible clasificarlos de distintas maneras. En general los diseños de los filtros dependen del proceso de filtrado y los ciclos que intervienen en esta etapa. A grandes rasgos, los diferentes procesos utilizados en las operaciones metalúrgicas se pueden catalogar por

la forma en la que se lleva a cabo el proceso, es decir, de manera continua o por lotes. En la figura 1.1.3, se muestra una clasificación de los procesos de filtración y los equipos empleados en cada uno de ellos.

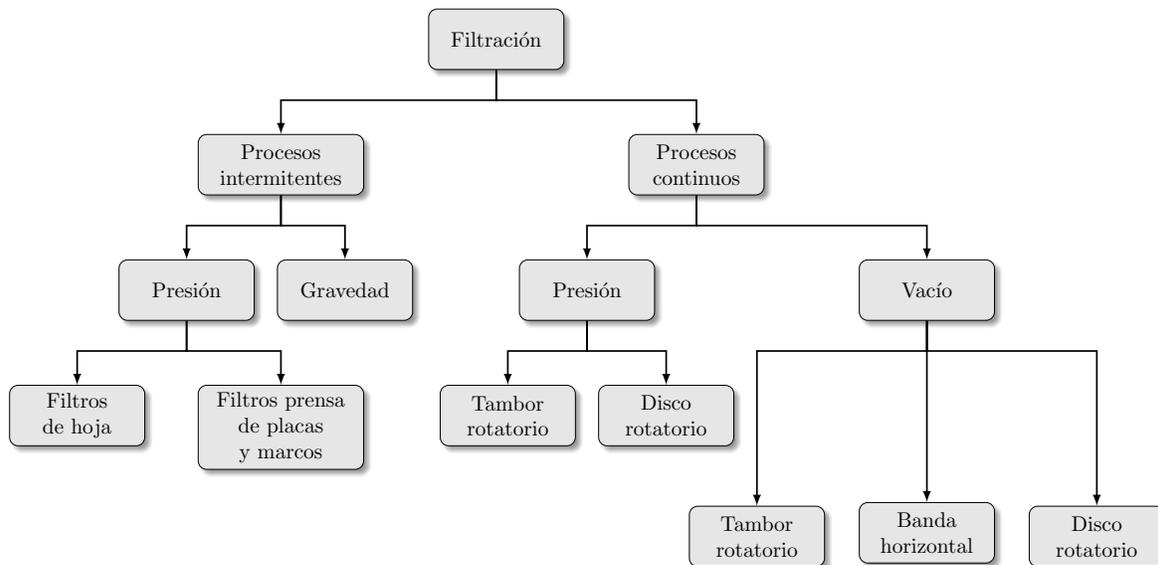


Figura 1.1.3: Clasificación de los procesos de filtración [22]

1.1.1. Equipos de filtrado empleados en el beneficio de minerales

Si bien, es posible clasificar los procesos de filtración según la continuidad de su operación, resulta útil analizarlos desde el punto de vista de la fuerza motriz que opera en ellos. En la figura 1.1.3, se presentan principalmente los equipos que operan ya sea empleando presión o vacío. Los del primer tipo han ganado popularidad en comparación con los de vacío, esto se debe a factores como el constante incremento de concentrados muy finos, por ejemplo, los de Pb y Zn donde es común encontrar hasta 80% de partículas menores a $30 \mu m$ [25]. Otra de sus ventajas es su capacidad para generar tortas con hasta 8% de humedad [7]. Sin embargo, presentan la desventaja de operar generalmente de manera intermitente. En contraparte, los equipos que operan con vacío suelen ser de diseño y operación más simple, pero se ven limitados para alcanzar ciertos rangos de vacío en operaciones a gran altitud. A continuación, se detallan algunas características de estos equipos.

Filtros de tambor rotatorio

Este filtro consiste en un tambor horizontal que opera de manera continua y por lo general un tercio del tambor se encuentra sumergido en el tanque que contiene la pulpa, esta se mantiene en suspensión con el uso de agitadores. En este equipo, el medio filtrante se encuentra cubriendo toda la superficie del tambor. En la figura 1.1.4, se muestra un ejemplo de un filtro de este tipo.

En este tipo de filtros, la filtración se realiza mediante la succión de la pulpa a través de compartimientos dentro del tambor, cada uno de estos se encuentra conectado a un sistema de válvulas conectadas a las líneas de vacío, aire comprimido y agua [22]. El tambor suele girar a baja velocidad, generalmente en el rango de 0.1 a 0.3 revoluciones por minuto, y puede llegar a operar hasta 3 revoluciones por minuto para materiales de filtrado rápido [25].

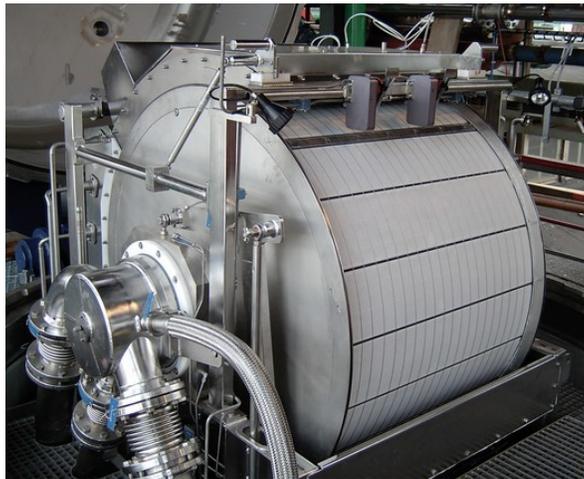


Figura 1.1.4: Filtro de tambor rotatorio [16]

El ciclo normal de operaciones de este equipo consiste en la filtración, el secado y la descarga de la torta, pero es posible introducir otras operaciones en el ciclo básico, como lavado de tortas y limpieza de los filtros. La descarga de la torta se puede realizar de diferentes formas y dependerá del material que se esté filtrando, por ejemplo, se suelen emplear cuchillas que retiran que retiran la torta a medida que el tambor va girando, bandas de descarga continua, o mediante el uso de una descarga de aire.

Filtros de disco rotatorio

La operación de este tipo de filtros es similar a la de un filtro de tambor. Como se observa en la figura 1.1.5, este equipo consta de un eje en el cual se encuentran montados una serie de discos divididos en varios sectores, sobre los que se monta el medio filtrante. Los discos se mantienen parcialmente sumergidos en un contenedor de pulpa que es succionada mediante la aplicación de vacío y la torta se forma sobre la superficie del disco. La forma en la que se realiza la descarga de la torta es mediante un golpe de aire pulsante.



Figura 1.1.5: Filtro de disco rotatorio [17]

Los filtros de disco rotatorio presentan la ventaja de aumentar el área superficial de filtrado, en comparación con uno de tambor rotatorio. Esto hace que los costos por unidad disminuyan considerablemente. Además, su estructura modular permite realizar el cambio del medio filtrante de sectores específicos donde se detecta un daño.

Filtros de banda

Los filtros de banda, tienen la forma de una cinta continua, generalmente fabricada en acero inoxidable con un recubrimiento de goma sobre la cual se coloca el medio de filtrante. El ancho de la banda de las unidades industriales suele ser de 1 a 4 m con un área de filtrado de hasta 120 m^2 para una cinta de $4 \text{ m} \times 30 \text{ m}$. Debajo de la banda y entre las poleas hay una caja de vacío que tiene compartimentos que se pueden ajustar a lo largo de la banda. La velocidad de la cinta se regula normalmente entre 5 y 100

mm por segundo. El grosor de la torta varía de 6 a 203 mm dependiendo de la velocidad de la cinta [22]. Algunas de las ventajas de estos equipos son la posibilidad de elegir la duración de las etapas del ciclo de filtrado y la capacidad para recuperar hasta el 80% del agua de los relaves mineros. En la figura [7] se presenta un filtro de este tipo.



Figura 1.1.6: Filtro de banda al vacío [23]

En definitiva, la forma en la que opera cada filtro tiene gran influencia en los resultados de esta operación, sin embargo, el medio filtrante empleado juega un papel muy importante en esta etapa. A continuación, se revisarán algunos aspectos importantes relacionados con las características y selección de estos componentes.

1.2. Los medios de filtrado

El éxito de todo sistema de filtración reside en el medio filtrante que este emplea por esta razón, puede señalarse al medio filtrante como un elemento crítico que determina si un filtro funciona o no de manera adecuada.

Dentro de la separación líquido - sólido, puede definirse a un medio filtrante como cualquier material que, bajo las condiciones de operación del filtro, es permeable a uno o más componentes de una mezcla, solución o suspensión, y es impermeable a los componentes restantes [5]. Centrando esta definición en el contexto del beneficio de minerales, puede decirse que, un medio filtrante es aquel material que retiene de manera eficiente los sólidos contenidos en la pulpa.

La elección del medio filtrante es a menudo la consideración más importante para asegurar el funcionamiento eficiente de un filtro. Su función generalmente es actuar como soporte de la torta de filtración, mientras que las capas iniciales de la torta proporcionan el verdadero filtro. El medio filtrante debe seleccionarse principalmente por su capacidad para retener sólidos sin llegar a obstruirse. Debe ser mecánicamente fuerte, resistente a la corrosión y ofrecer la menor resistencia posible al flujo de filtrado. Normalmente se utilizan materiales relativamente gruesos y no se obtiene un filtrado claro hasta que se forman las capas iniciales de torta, recirculando el filtrado turbio inicial.

Para lograr una adecuada selección del medio filtrante, es necesario prestar atención a las condiciones bajo las cuales opera nuestro proceso. Algunos de los criterios que pueden ser empleados para evaluar los medios filtrantes pueden ser la permeabilidad del medio limpio (nuevo), la capacidad que tienen para retener partículas y la permeabilidad del medio después de ser sometido a ciclos de trabajo [21].

Una forma para facilitar la elección de un medio filtrante adecuado para un proceso, es definiendo las propiedades que requiere este elemento en dicho proceso. Estas pueden hacer referencia a características químicas o mecánicas, por ejemplo, su rigidez y capacidad de retención de partículas. Existe otra forma de definir estas propiedades, estas se clasifican como orientadas a la maquinaria, orientadas a la aplicación o específicas de la filtración [5].

Dentro de las propiedades orientadas a la maquinaria, se encuentran la rigidez, fuerza, resistencia al rasgado, estiramiento y abrasión, estabilidad a las vibraciones; además de características como las dimensiones en las que es posible encontrar suministros y facilidad para ser fabricados. Es importante señalar que muchas de estas propiedades mecánicas están determinadas por la estructura del medio y sus métodos de fabricación. Gran parte de esta información suele ser de uso limitado y parte de ella puede no estar fácilmente disponible.

Las propiedades orientadas a la aplicación, hacen referencia a la compatibilidad que

tiene el medio filtrante con el ambiente o condiciones del proceso. Dentro de estas propiedades se encuentran la estabilidad química, térmica, biológica y dinámica; las características de absorción, adsorción y mojabilidad; los aspectos de salud y seguridad como características electrostáticas y de desecho del material, así como la capacidad de reúso que tiene el medio filtrante y su costo.

Las propiedades específicas de la filtración determinan la habilidad que tiene el medio filtrante para lograr un determinado objetivo en la filtración. En estas propiedades podemos encontrar el tamaño mínimo de partícula que es posible retener, la eficiencia de retención, la resistencia al flujo, la capacidad de retención de impurezas, la tendencia a la obstrucción y las características de descarga de la torta.

Los medios filtrantes se fabrican a partir de algodón, lana, lino, yute, seda, fibra de vidrio, carbono poroso, metales, rayón, nailon y otros sintéticos, cerámica y materiales diversos como el caucho poroso. Las telas de algodón se encuentran entre el tipo de medio más común, esto se debe a su bajo costo inicial y disponibilidad en una amplia variedad de tejidos.

En el beneficio de minerales es común encontrar medios filtrantes del tipo textil, generalmente las características de construcción y filtración de este tipo de materiales están determinadas por el tipo de hilo con el cual han sido fabricados, la forma en la que se han tejido o las propiedades de construcción y el acabado aplicado a la tela [21].

Entre los tipos de hilo con los que se fabrican los medios filtrantes del tipo textil se encuentran, los monofilamentos, los multifilamentos, los hilados de fibra y los hilos de cinta fibrilada; en la figura 1.2.1, se observa a detalle cada uno de estos hilos.

Las telas fabricadas a partir de monofilamentos, se caracterizan por su resistencia a la obstrucción y la facilidad con la que la torta puede ser descargada al final de la filtración, sin embargo, suelen fallar a la hora de retener partículas con tamaños muy pequeños. Este tipo de material suele emplearse para filtros de prensa, pequeños filtros de banda horizontal, de disco y tambor rotatorio. Contrario a los monofilamentos, los multifilamen-

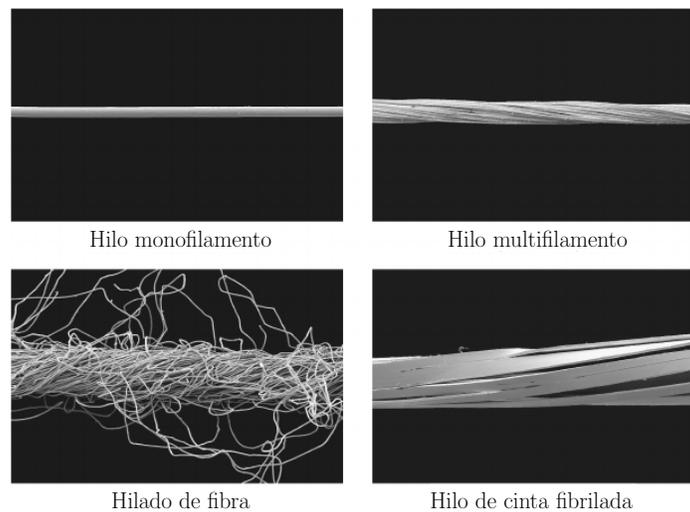


Figura 1.2.1: Comparación de los tipos de hilo empleados en la fabricación de medios filtrantes [21]

tos suelen presentar una mejor retención de partículas finas junto con mayor resistencia y flexibilidad que los anteriores, sin embargo, son más propensos a la obstrucción. Por otra parte, los hilados de fibra suelen presentar una menor tendencia a la obstrucción que los dos tipos de hilo anteriores.

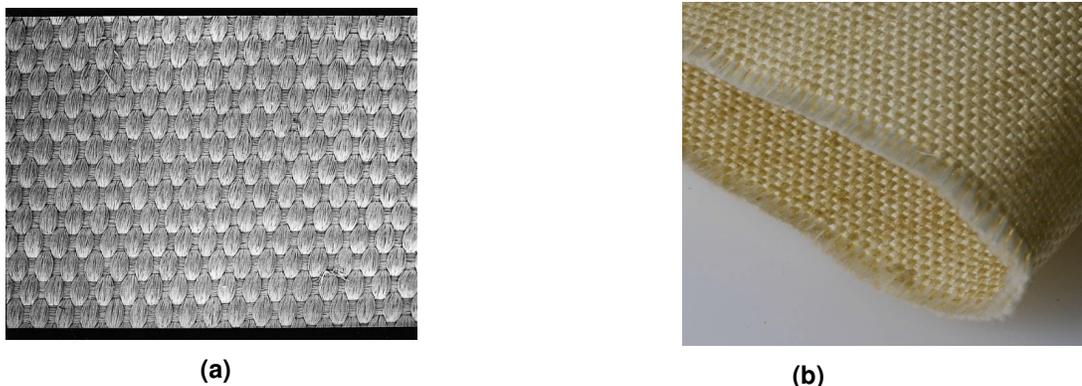
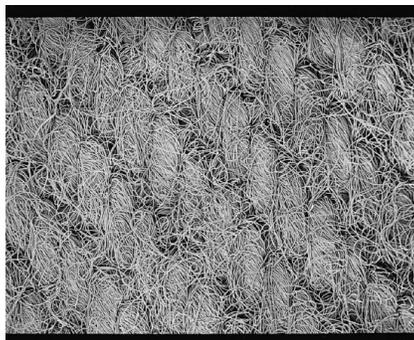
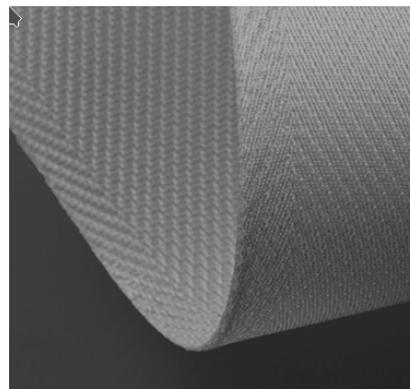


Figura 1.2.2: a) Micrografía (MEB) de un tejido liso fabricado con un hilo multifilamento [18] b) Vista general de una tela con tejido liso [10]

Otra característica que afecta las propiedades de los medios filtrantes es el tipo de tejido con el que fueron contruidos, tradicionalmente existen tres tipos o patrones de tejido, el liso, el de sarga y el satén, estos se observan en las figuras 1.2.2, 1.2.3 y 1.2.4, respectivamente. De manera general, puede decirse que, los tejidos lisos producen estructuras rígidas y ajustadas que proporcionan altas eficiencias de filtración. Los tejidos de sar-



(a)

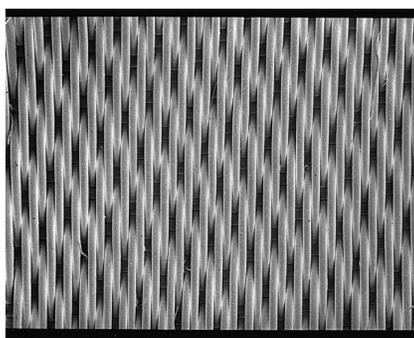


(b)

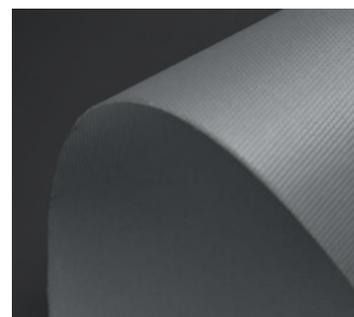
Figura 1.2.3: a) Micrografía (MEB) de un tejido de sarga fabricado con un hilado de fibra [18] b) Vista general de un medio filtrante con tejido de sarga [3]

ga crean medios voluminosos con buenas propiedades mecánicas y flexibilidad, pero la vellosidad de las fibras cortadas puede causar problemas de liberación de la torta, mientras que los tejidos satinados crean superficies de liberación suaves con flexibilidad y resistencia a la obstrucción.

Las características de cada medio filtrante hacen que sean o no óptimos para los distintos tipos de filtro empleados en la industria. En resumen, puede señalarse que: las telas de tejido liso tienden a emplearse cuando se requiere la máxima eficacia de filtración; los tejidos de sarga donde el mayor volumen y la durabilidad mecánica son una preocupación primordial; y los tejidos de satén (particularmente con monofilamentos) donde los requisitos principales son una buena resistencia a la descarga y a la obstrucción [5].



(a)



(b)

Figura 1.2.4: a) Micrografía (MEB) de un tejido satén [18] b) Vista general de un medio filtrante con tejido satén [2]

Hasta este punto se han analizado algunas características de operación de los filtros que suelen emplearse en el beneficio de minerales, así como características de diseño y construcción de los medios filtrantes que impactan en el resultado final del proceso. Además, se estableció que el medio filtrante es un elemento crítico en la filtración, por lo cual su evaluación es primordial.

A la hora de evaluar los medios filtrantes, existe una variedad de métodos que permiten conocer diferentes aspectos de estos materiales, estos suelen variar según el tipo de industria o aplicación en la que será empleado el medio filtrante. Algunos de estos métodos se enfocan en evaluar las propiedades enfocadas a maquinaria, proceso o específicas de la filtración, mencionadas anteriormente. Las del primer tipo, suelen ser analizadas por los fabricantes o distribuidores, mientras que, la evaluación de las dos restantes, suele ser de interés para los usuarios finales de estos materiales, siendo las últimas las de mayor importancia en el beneficio de minerales.

A continuación, se analizarán algunas consideraciones sobre la teoría de la filtración, las pruebas que permiten evaluar este proceso a escala laboratorio y los equipos con los que es posible efectuar esta tarea.

1.3. Consideraciones sobre la evaluación del proceso de filtración

En general, el estudio del fenómeno de la filtración suele efectuarse a través de la ley de flujo de fluidos de Poiseuille y es aplicable tanto a la torta de filtrado como al medio filtrante. Esta ley establece que la tasa de filtración por unidad de área del lecho del filtro es igual a la relación entre la fuerza motriz y el producto de las fuerzas resistivas totales y la viscosidad del fluido [22]. En otras palabras, puede entenderse como la velocidad del flujo a través del filtro (velocidad de filtración), expresada en función del volumen del filtrado, por unidad de tiempo (dV/dt), y puede expresarse de la siguiente forma:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\text{Fuerza impulsora}}{\text{Resistencia al flujo}} \quad (1.1)$$

Donde:

Fuerza impulsora = ΔP

Resistencia al flujo = μR

La resistencia al flujo se expresa como la fuerza resistiva total, R_T , esta se define como la suma de las fuerzas resistivas del medio, R_M , y de la torta, R_C . Es decir:

$$R_T = R_C + R_M \quad (1.2)$$

Por lo que la ecuación 1.1, queda como:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A\Delta P}{\mu R_T} \quad (1.3)$$

Donde:

V = Volumen

t = Tiempo

A = Área

ΔP = Caída de presión

μ = Viscosidad del líquido

R_t = Fuerza resistiva total

A partir de esta ecuación, es posible realizar cálculos que permiten evaluar propiedades como la resistencia del medio, la resistencia específica de la torta, la presión necesaria para mantener un flujo estable de filtrado en una operación efectuada a volumen de filtración constante, la compresibilidad de la torta depositada, o parámetros para optimizar la operación de los filtros como el tiempo de filtrado y realizar el dimensionamiento de equipos.

La evaluación de los medios filtrantes se realiza siguiendo una serie de pasos que incluyen el establecimiento de los objetivos del proceso, la obtención de muestras repre-

sentativas, la ejecución de un programa de pruebas y el análisis e interpretación de los datos obtenidos.

Los requerimientos y objetivos del proceso, pueden incluir el desaguado de la pulpa, su lavado, requerimientos de claridad del filtrado, porcentaje de humedad objetivo en la torta, facilitar el transporte de la torta o una tasa específica de producción en el filtro [19].

Una vez que se conocen los objetivos del proceso, es posible plantear un plan para su evaluación. Algunos de los parámetros que se deben tomar en cuenta en este análisis son, los efectos de la variación de las condiciones de la alimentación de la pulpa, como el contenido de sólidos, temperatura, mineralogía de la muestra, condiciones de precipitación de los sólidos, etc [19]. Además, las pruebas deben ser efectuadas de forma tal que sea posible recabar datos sobre el nivel de vacío aplicado, el espesor de la torta, la humedad de la torta, etc.

Es posible correlacionar los datos obtenidos en las pruebas para obtener información como el peso de la torta en función de su espesor, o la tasa de formación de la torta vs el peso de esta. Si bien en estos datos no se evalúa de forma directa la caída de presión, es importante garantizar que las pruebas se realicen a un mismo nivel de vacío.

Además de conocer y entender los puntos clave en el proceso de filtración, es importante contar con un equipo que permita adquirir los datos de los parámetros que se han mencionado. A continuación, se describen algunos equipos que permiten realizar estas pruebas.

1.3.1. Equipos para pruebas de filtración a escala laboratorio

Los equipos empleados para realizar pruebas de filtración a escala laboratorio, emplean el mismo tipo de fuerza motriz que los filtros empleados a escala industrial que se pretende estudiar, es decir, si se busca analizar un filtro que opera bajo el uso de vacío, se deberá usar un equipo de pruebas que opere de la misma forma.

En las figuras 1.3.1 y 1.3.2, se muestran dos equipos que permiten realizar pruebas de filtración al vacío, la diferencia principal entre ellos, es la posición en la que se encuentra el medio filtrante. En la primera figura, el embudo que sostiene el medio filtrante se encuentra invertido, dando la posibilidad de emular un filtro de tambor rotatorio. Otra diferencia importante es la forma en la que se mide el volumen del filtrado, en el primer caso, no se detalla de qué forma se realiza esta acción, por otra parte, para realizar esta tarea, en la figura 1.3.2 se hace uso de una especie de probeta graduada.

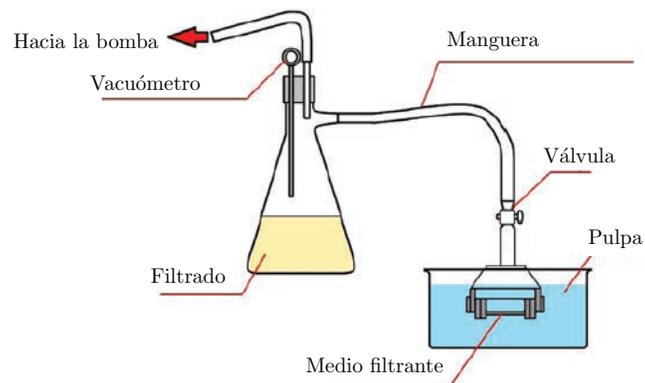


Figura 1.3.1: Sistema para la evaluación de medios filtrantes con embudo invertido y depósito de pulpa [25]

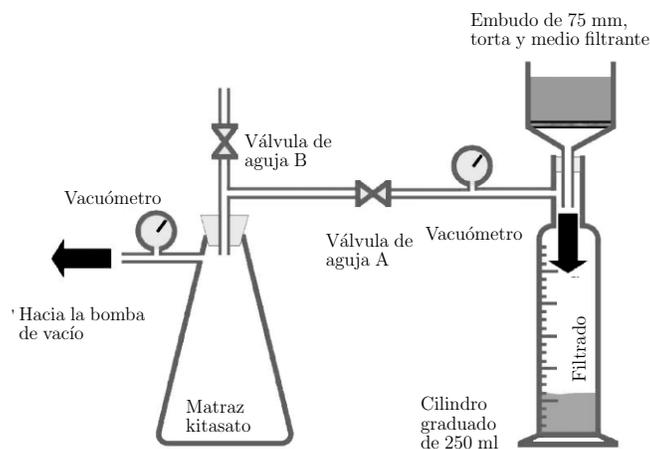


Figura 1.3.2: Sistema para la evaluación de medios filtrantes [6]

En ambos equipos se observa que estos emplean dispositivos analógicos para medir la caída de presión. En este punto, es importante señalar algunas desventajas que presentan este tipo de dispositivos, como el hecho de tener que registrar los datos de forma

manual, ya que esto puede derivar en errores humanos al momento de registrar dicha información. Una forma de solucionar este inconveniente, es usando dispositivos electrónicos que automaticen este proceso. Si bien, existen equipos que permiten realizar y registrar los datos en este tipo de pruebas, en ocasiones, su alto costo limita su presencia en algunos laboratorios.

Una forma de solucionar el problema anterior, es hacer uso de plataformas de hardware libre que permitan la construcción y adaptación de equipos de medición. Un ejemplo de una plataforma de este tipo es el proyecto arduino. A continuación, se detallarán algunos aspectos de este proyecto, de igual forma, se describirán algunas características de las herramientas que lo componen.

1.4. El proyecto arduino

Arduino es un proyecto basado en placas de desarrollo y un entorno de programación integrado (IDE); las placas incorporan microcontroladores que a través de un sistema de entradas y salidas (pines) analógicas y digitales, permiten el uso de sensores, actuadores y tarjetas de expansión. Además, las placas están equipadas con un sistema de conexión serial USB que permite la comunicación con una computadora.

Su principal ventaja es que es un proyecto de código abierto (open source) de hardware libre, esta característica hace que sea de libre distribución y utilización, por lo que su costo es muy bajo, además, facilita la construcción, adaptación y modificación de diferentes dispositivos electrónicos, dando a las personas no especializadas en el área electrónica la posibilidad de desarrollar distintos proyectos.

La popularidad del proyecto ha motivado el desarrollo de una variedad de placas basadas en la original, al mismo tiempo que han surgido un sinnúmero de sensores y transductores, ambos de bajo costo y en algunos casos, de amplia disponibilidad, por ejemplo, es posible encontrar sensores de presión, temperatura, humedad, movimiento, luz y sonido, entre otros.

Esta amplia disponibilidad ha hecho de los sistemas arduino una opción para el desarrollo de proyectos científicos o educativos, basados en sistemas de medición y adquisición de datos. Existen diversos proyectos que muestran la implementación de este tipo de sistemas, por ejemplo, un equipo de adquisición de datos de 12 canales para medir la temperatura de un intercambiador de calor [12]; un dispositivo portable para la medición del contenido de metano en biogás [26]; la construcción de un calorímetro para su uso en laboratorios de química básica [24]; o la automatización de un horno de tratamientos térmicos [11].

Es claro que los campos de aplicación son enormes y las formas de uso son casi ilimitadas. Un aspecto importante a destacar es que en todos estos trabajos se resalta el bajo costo en comparación con equipos comerciales, la facilidad de construcción y una alta precisión de las mediciones. Sumado a esto, existe la posibilidad de modificar y mejorar los equipos, añadiendo funcionalidades o modificando las existentes, según se modifiquen los requerimientos de los usuarios.

A continuación, se abordan las consideraciones mínimas que un usuario podría requerir para entender la forma en la cual opera una placa arduino, además de aspectos básicos de su programación, ya que, si los usuarios de algún equipo basado en una placa arduino conocen esta información, es posible que en alguna etapa del ciclo de vida del equipo propongan o realicen alguna modificación que permita mejorar o extender las funciones de este.

1.4.1. Arduino UNO

La placa Arduino UNO (figura 1.4.1), es sin duda la más conocida del proyecto Arduino, esto se debe a su sencillez, bajo costo y facilidad de uso. Esta placa cuenta con un gran número de características que la hacen ser la primera elección para el desarrollo o prototipado de proyectos, siendo en muchos casos el primer contacto que tienen las personas o estudiantes con este tipo de sistemas. Entre las características de esta placa

que la hacen ser la más popular se encuentran, el procesador ATmega328P y sus pines de entrada y salida de propósito general (*GPIO*, por sus siglas en inglés). En la tabla 1.2 se muestran las especificaciones técnicas de la placa arduino uno.



Figura 1.4.1: Placa Arduino UNO [1]

1.4.2. Descripción de los pines

La placa arduino UNO cuenta con 20 pines de entrada y salida (E/S o I/O), 14 de ellos digitales y los 6 restantes, analógicos. Algunos de los pines de esta placa cuentan con funciones especializadas, por ejemplo:

Pines digitales Este tipo de pines pueden ser usados en diferentes modos según la aplicación deseada, ya sea asignar un estado lógico alto o bajo (5 V o 0 V), modo lectura y modo escritura; además, cuentan con una resistencia del tipo pull-up (puede activarse en caso de necesitarla), con un valor de entre 20 y 50 kohm.

Se cuenta también con los pines 1 (TX) y 2 (RX), dedicados a la comunicación serial, estos se emplean para la transmisión y recepción de datos, respectivamente. Asimismo, los pines digitales 2 y 3, pueden emplearse para efectuar interrupciones del programa. Adicionalmente, los pines 3,5,6,9,10, y 11 (marcados con el símbolo ~) proporcionan una salida PWM de 8 bits (256 valores diferentes, de 0 a 255) de modulación por ancho de pulsos.

Pines analógicos Los 6 pines de entrada analógicos cuentan con una resolución de 10 bits, estos pines pueden ser usados para realizar lecturas de entre 0 y 5 V, las cuales son transformadas por un convertidor analógico digital (ADC) a un valor digital de 10 bits que va de 0 a 1023. Al manejar un rango de lectura de 5 V, se tiene como resultado una resolución de aproximadamente 5mV ($5\text{ V} / 1024$). Además, haciendo uso de la librería *WIRE*, los pines analógicos 4 y 5 pueden emplearse para comunicación mediante el protocolo *I2C*, asignando el pin 4 a la conexión *SDA* (señal de datos) y al pin 5 la salida *SCL* (señal de reloj).

Tabla 1.2: Especificaciones técnicas de la placa arduino uno con microcontrolador ATmega328P

Microcontrolador	ATmega328P
Voltaje de operación	5 V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12 V
Voltaje de entrada (límite)	6-20 V
Pines de E / S digitales	14 (de los cuales 6 proporcionan salida PWM)
Pines de E / S digitales PWM	6
Pines de entrada analógica	6
Corriente suministrada (CC) por los pines de E/S	20 mA
Corriente suministrada (CC) para el pin de 3.3V	50 mA
Memoria Flash	32 KB (0.5 KB destinados para el gestor de arranque)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Frecuencia de trabajo	16 MHz
LED integrado (BUILTIN)	pin 13

1.4.3. Consideraciones especiales

Existen aspectos de esta placa a los que hay que poner especial atención, por ejemplo, el voltaje necesario para su operación. Respecto a este tema el fabricante menciona que la placa puede conectarse a una fuente de alimentación externa que proporcione un voltaje de entre 6 y 20 V, sin embargo, es recomendable trabajar en un rango de 7 a 12 V. En caso de alimentar la placa con un valor inferior a los 7 V, los pines de salida podrían llegar a suministrar menos de 5 V y generar inestabilidad en la placa. Por otra

parte, si la placa se alimenta con valores mayores a 12 V, el regulador de voltaje podría sobrecalentarse y dañarse.

La placa dispone de tres conexiones diferentes para su alimentación, el conector USB, el plug de alimentación (2.1 mm, con centro positivo) y el pin de voltaje de entrada (V_{in}), al usar esta última opción se debe tener en cuenta que el voltaje suministrado no pasa a través del regulador de corriente y cualquier variación en su valor, podría dañar la placa, por lo cual no se recomienda alimentar la placa de esta manera.

Además de conocer las especificaciones de los pines y de la placa arduino, un paso fundamental en el diseño, construcción o modificación de algún dispositivo de medición o de cualquier tipo, es el conocimiento y dominio de los aspectos clave de la programación de la placa arduino, ya que la placa por si sola no realiza ninguna función, siendo su programación el paso clave que permitirá que el dispositivo construido lleve a cabo las tareas para las que ha sido diseñado. Por esta razón, a continuación, se hará una revisión de los aspectos más importantes a tomar en cuenta a la hora de realizar este paso.

1.4.4. Programación y uso de la placa arduino

Para comenzar a usar la placa arduino es necesario hacer uso de la plataforma de desarrollo proporcionada por arduino. El IDE de arduino permite al usuario escribir y cargar el código con las instrucciones necesarias para desarrollar la función deseada. Este paso se realiza conectando la placa al entorno de desarrollo a través de una computadora mediante el puerto USB tipo B.

Un programa de arduino suele dividirse en 3 partes principales, las funciones, las variables y constantes, y su estructura. La figura 1.4.2, muestra un ejemplo típico de programación de la placa arduino, en ella se observan dos funciones esenciales para la ejecución de un programa en la placa; la función ***setup()***, y la función ***loop()***, la primera de estas ejecuta el código incluido en ella una sola vez al inicializar la placa, en ella suelen incluirse variables importantes para la ejecución del programa o instrucciones sobre

el modo de trabajo de los pines. La segunda función ejecutará el código incluido en ella de manera cíclica mientras se mantenga encendida la placa. Cabe destacar que cada vez que se encienda o reinicie la placa, el código se ejecutará desde su inicio. Hay que señalar que para programar las placas arduino dentro de su IDE, se emplea un lenguaje basado en *C++*.

Al programar una placa arduino, suelen emplearse una serie de funciones esenciales que permiten el uso de la placa y los pines, por ejemplo:

Serial.begin() Inicializa el monitor serial, este permite visualizar los datos registrados por alguno de los pines o enviar información a la placa.

pinMode() Establece el modo de operación del pin elegido (INPUT (entrada), OUTPUT (salida)).

digital.Write() Asigna un valor lógico alto o bajo (HIGH 5 V o LOW 0 V) a un pin digital.

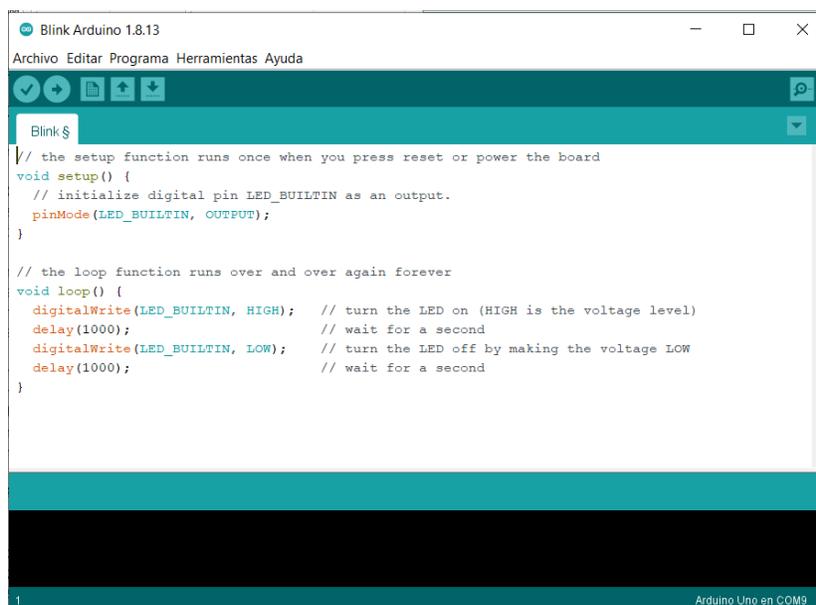
digital.Read() Lee el valor lógico del pin digital especificado (HIGH 5 V o LOW 0 V).

analogRead() Lee el valor del pin analógico especificado.

delay() Pausa el programa durante el tiempo especificado (en milisegundos).

Indiscutiblemente, estas nos son las únicas funciones que pueden encontrarse y usarse en un programa de arduino, sin embargo, estas son algunas de las que se emplean con más frecuencia. En caso de necesitar conocer el uso o funcionamiento de alguna función, siempre es posible encontrar información sobre ella en la página oficial de arduino <https://www.arduino.cc/reference/en/> o en diversos foros en internet.

Hasta este punto se han remarcado las cualidades que presenta una tarjeta arduino, sin embargo, es necesario aclarar que algunas de las especificaciones técnicas de la tarjeta UNO podrían ser una restricción o desventaja a la hora de desarrollar un dispositivo complejo o con una funcionalidad extendida. Esta limitación reside en la limitada capacidad de almacenamiento de algunos dispositivos arduino, hay que recordar que la tarjeta UNO cuenta con una capacidad de almacenamiento en memoria flash de 32 kb

The image shows a screenshot of the Arduino IDE interface. The window title is "Blink Arduino 1.8.13". The menu bar includes "Archivo", "Editar", "Programa", "Herramientas", and "Ayuda". The toolbar contains icons for saving, running, and other functions. The main editor area displays the following C++ code for the Blink program:

```
Blink $
// the setup function runs once when you press reset or power the board
void setup() {
  // initialize digital pin LED_BUILTIN as an output.
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
}

// the loop function runs over and over again forever
void loop() {
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
  delay(1000); // wait for a second
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW); // turn the LED off by making the voltage LOW
  delay(1000); // wait for a second
}
```

The status bar at the bottom indicates "1" and "Arduino Uno en COM9".

Figura 1.4.2: Ejemplo típico de programación en el IDE de arduino

(sin contar los 0.5 kb destinados al gestor de arranque), esto nos obliga, en caso de ser necesario, a limitar la funcionalidad de los dispositivos diseñados, así como a desarrollar habilidades de programación que permitan la escritura de código de manera tal que se optimice el uso de la memoria.

Claramente, son más las ventajas que presentan las tarjetas de arduino, no obstante, existe un requisito clave para lograr un óptimo desarrollo de alguna aplicación, se trata de un amplio conocimiento del área o proceso de interés, las variables involucradas en este, así como la forma y principios de operación no solo de la tarjeta arduino, sino de su microprocesador y los sensores a utilizar.

Por lo anterior, a continuación se hace una revisión general de los principios de operación de los sensores y transductores, así como de algunos aspectos importantes a tomar en cuenta a la hora de elegir el sensor adecuado para alguna aplicación. Se hace énfasis en los sensores de presión, especialmente en los más comunes en el ecosistema arduino.

1.5. Consideraciones para la selección de un elemento sensor

A la hora de elegir un elemento sensor resulta importante conocer la forma en que se clasifican, sus principios de operación y la forma en la que interactúan con la placa arduino, ya que esto ayudará a seleccionar el elemento que mejor se adapte a nuestro sistema o solución de mejor manera el problema que se pretende resolver.

Un sensor se define como un dispositivo que recibe y responde a una señal o estímulo, esta definición es tan amplia que podría abarcar casi todo, desde un ojo humano hasta el gatillo de una pistola [8]. Otra forma de definirlos es como dispositivos que permiten cuantificar una variable física. Generalmente, un sensor suele estar asociado a otro elemento conocido como actuador, este tiene la tarea de ejecutar una acción, como consecuencia de haber recibido la información de la variable física registrada por el sensor.

Existe otro elemento clave que interactúa con los dos anteriores, se trata de los transductores, estos dispositivos tienen como función transformar la señal generada por el sensor en una señal de otro tipo para que pueda ser leída o mostrada por algún otro dispositivo. Por ejemplo, en los sistemas electrónicos, los transductores suelen transformar un valor de corriente o resistencia en alguna variable como peso, presión o fuerza; en el caso de un sistema mecánico, el transductor transforma el flujo de algún líquido o la presión de un gas en el movimiento mecánico de algún indicador como una aguja en un manómetro.

Es importante no confundir los términos sensor y transductor, ya que, aunque pareciera que ambos efectúan la misma función, el sensor es quien capta o detecta la variación de alguna magnitud física en el medio o sistema empleado; mientras que, el transductor convierte esa señal en alguna magnitud de utilidad.

1.5.1. Clasificación de los sensores y transductores

A la hora de clasificar a los sensores y transductores, se suelen emplear diferentes criterios, ya sea en función de su aplicación o su principio de operación. Por ejemplo, los sensores pueden categorizarse como activos o pasivos, según sus necesidades eléctricas, siendo los primeros aquellos que necesitan de una fuente de alimentación externa para operar, en contraste, los pasivos no requieren de este complemento ya que tienen la capacidad de generar alguna señal eléctrica por sí mismos al recibir un estímulo externo. Por otra parte, los transductores suelen agruparse según su principio transductivo, ya sea piezoresistivo, capacitivo, piezoeléctrico, ultrasónico, magnético, térmico, fotoeléctrico, quimioeléctrico y resistivo.

Además, a la hora de elegir un elemento sensor es importante tomar en cuenta no solo las características de operación de estos elementos si no también aquellas que son independientes de la variable física a medir o de su principio de operación, estas se clasifican como estáticas o dinámicas según su estabilidad a lo largo del tiempo. Las del primer tipo son aquellas que no cambian con el tiempo, entre ellas se encuentran, el intervalo de medición, el intervalo dinámico, la sensibilidad, la precisión, la exactitud y la resolución; en contraparte, se encuentran las dinámicas, algunos ejemplos son: la velocidad de respuesta, la respuesta en frecuencia y la estabilidad. Ambos tipos se resumen de la siguiente manera:

Características estáticas

Rango de medida Comprende el conjunto de valores de entrada y salida que se encuentran entre el valor máximo y mínimo de la variable física que detecta el sensor

Resolución: De manera simple, nos indica cuál es el cambio más pequeño en la señal que puede leer o detectar el sensor.

Precisión Esta característica define la variación máxima entre la salida real obtenida y la salida teórica que el sensor debería mostrar en función de un patrón de refe-

rencia. Puede entenderse también como la medida de la repetitividad que tiene el sensor.

Linealidad Se dice que un sensor muestra una respuesta lineal cuando existe una constante de proporcionalidad entre los cambios en la señal de entrada y la de salida. En otras palabras, la linealidad de un sensor se determina en que tanto se asemeja su curva de calibración con una línea recta.

Sensibilidad Esta característica nos indica cual es la señal o perturbación mínima necesaria para que el sensor genere una señal de salida. Generalmente se reporta como la mínima perturbación por unidad de magnitud de salida, por ejemplo, mV/-Pa. Un sensor con una alta sensibilidad, es aquel que produce una señal de salida muy grande con mínimas variaciones de entrada.

Ruido Son las perturbaciones aleatorias que afectan la señal que se desea medir. Estas suelen estar asociadas a características propias del sistema de medida, como vibraciones o cambios en la temperatura.

Características dinámicas

Velocidad de respuesta Esta es un parámetro clave a la hora de considerar aplicaciones que requieran un registro de datos en intervalos cortos de tiempo, nos indica como es el intervalo que transcurre entre la señal de entrada y la de salida. Esta característica suele variar dependiendo de la variable física que se esté midiendo.

Estabilidad Nos indica como es la desviación de la señal salida del sensor con respecto al valor teórico de la señal de salida, cuando las condiciones exteriores (condiciones ambientales, temperatura voltaje de alimentación, etc.) son distintas a las que la señal teórica fue reportada.

1.5.2. Sensores de presión

Para fines de este trabajo, se hará énfasis en los sensores y principios de transducción empleados en la medición de la presión. Si bien, existen sensores del tipo mecánico (manómetros), actualmente estos suelen ser del tipo electrónico y emplean transductores de voltaje que miden la fuerza aplicada en un área determinada, generando así una señal eléctrica. En general, pueden encontrarse sensores que trabajan bajo principios de variación de resistencia, galgas extensométricas, variación de reluctancia, piezoeléctricos, basados en osciladores y de variación de capacitancia.

Los sensores que emplean la variación de la resistencia como principio de transducción, se conocen como sensores resistivos, estos emplean la energía mecánica generada al aplicar presión sobre un elemento móvil que transfiere la energía a un tubo de Bourdon que mueve un diafragma. Este desplazamiento se puede medir al mover un elemento de resistencia variable, conocido como potenciómetro. En este último elemento, el voltaje entre sus terminales cambia de manera proporcional al cambio de presión. Este tipo de sensores presentan la ventaja de ser de bajo costo, además de no requerir amplificadores adicionales, sin embargo, suelen ser sensibles a las vibraciones [13]. En la figura 1.5.1 se muestra un ejemplo de un sensor de este tipo.

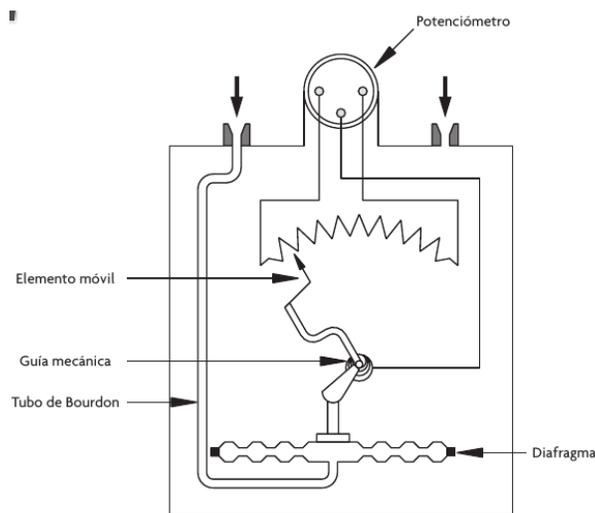


Figura 1.5.1: Diagrama de un sensor de presión que opera mediante la variación de resistencia [13]

Otro tipo de sensores, son aquellos que miden la expansión o contracción de algún material debido a la aplicación de presión, estos son conocidos como galgas extensométricas. Este tipo de sensores emplea materiales del tipo piezoresistivo. Estos dispositivos suelen ordenarse en configuraciones tipo puente y según sea su arreglo se clasifican como galgas metálicas, galgas basadas en películas delgadas, galgas basadas en microelectrónica y galgas de alambre tenso [13]. La figura 1.5.2 muestra una galga del tipo metálica. En general, el voltaje de salida del puente de una galga varía en función del cambio de resistencia provocado por los cambios en las dimensiones del material debido a su contracción o expansión.

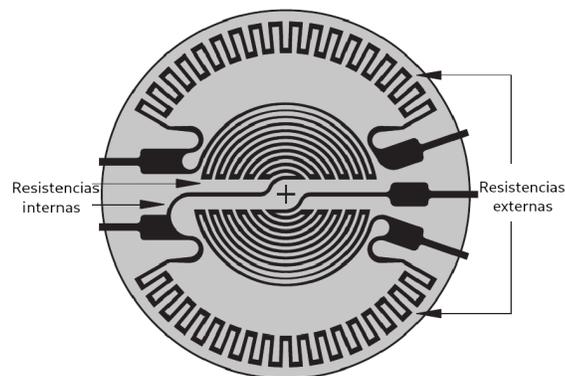


Figura 1.5.2: Diagrama de una galga metálica [13]

Existen también los sensores basados en materiales piezoeléctricos, estos son capaces de generar un voltaje a partir de un esfuerzo mecánico, esta propiedad se emplea para medir el desplazamiento generado en un cristal debido a la aplicación de presión sobre una placa o dispositivo de área conocida. La señal generada por el material piezoeléctrico es proporcional a la compresión o extensión de esta placa. Este tipo de sensores son de fácil miniaturización, sin embargo, suelen necesitar de elementos amplificadores, debido a que generan un voltaje demasiado bajo.

También es posible encontrar sensores que incorporan en un solo dispositivo una amplia gama de elementos además del dispositivo sensor, estos suelen contar con un acondicionador de señal, un convertidor, dispositivos de memoria y un microcontrolador. Estos se conocen como sensores inteligentes. El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrón-

nicos (IEEE por sus siglas en inglés) los define como: sensores que proveen funciones más allá de las necesarias para generar una correcta representación de una cantidad censada o controlada [13].

1.6. La presión y sus formas de medirla

Una vez que hemos definido qué son los sensores, cómo podemos clasificarlos y cuáles son sus características, es importante conocer la variable de interés a medir.

La unidad del SI de presión es el pascal: $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$. Es decir, un pascal es igual a 1 N fuerza distribuida uniformemente sobre 1m^2 de superficie. A veces, en sistemas técnicos, se utiliza la atmósfera, que se denota 1atm . Una atmósfera es la presión ejercida sobre 1cm^2 por una columna de agua que tiene una altura de 1 m a una temperatura de 4°C y una aceleración gravitacional normal. 1 Pa puede convertirse en otras unidades mediante el uso de las siguientes relaciones:

$$1\text{Pa} = 1.45 \times 10^{-4}\text{lb} = \text{in}^2 = 9.869 \times 10^{-6}\text{atm} = 7.5 \times 10^{-4}\text{cmHg}$$

De manera práctica, un Pa equivale a un valor muy pequeño, de tan solo 0.1 mm de H_2O . Es por ello que a menudo la presión se expresa en Torricelli, esta unidad, se define como la presión ejercida por una columna de 1 mm mercurio a 0°C ($1 \text{ Torr} = 1 \text{ mmHg}$) a presión atmosférica y gravedad normal.

Existen tres métodos para medir presión: absoluta, manométrica y diferencial. La presión absoluta está relacionada con la presión en forma aislada, en tanto que las presiones manométrica y diferencial están relacionadas con otra presión como la atmosférica ambiental o la presión en un contenedor adyacente. Algunas definiciones más formales de esta propiedad son:

Presión absoluta: Es la diferencia entre la presión de un fluido y el valor de cero absoluto de presión

Presión Manométrica: Esta describe la diferencia entre la presión de un fluido y la presión atmosférica. Por lo tanto, las presiones absoluta y manométrica se relacionan mediante la siguiente expresión:

$$\text{Presión absoluta} = \text{Presión manométrica} + \text{Presión atmosférica}$$

La presión ideal de la atmósfera de la Tierra es 760 Torr (mmHg) y se llama atmósfera física a:

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ Torr} = 101,325 \text{ Pa}$$

Presión Diferencial: Esta forma de medir la presión, se usa para describir la diferencia de presión entre dos valores de presión absolutos. Suele ser útil, por ejemplo, para describir la presión de un fluido en dos diferentes puntos de un sistema.

1.7. Sensores de presión para arduino

Si bien, con una tarjeta arduino es posible controlar casi cualquier sensor o actuador, resulta más fácil, si la aplicación así lo permite, emplear un sensor conocido y para el cual existan librerías o soporte por parte la comunidad de usuarios de esta plataforma. Por esta razón, se revisarán los sensores que existen en el mercado diseñados para medir la presión y que suelen ser usados en conjunto con una placa arduino. A continuación, se muestra un análisis general de los sensores más conocidos.

1.7.1. BMP180

El BMP180 (ver figura 1.7.1) es sin duda uno de los sensores de presión más conocidos y usados dentro del ecosistema arduino. Este dispositivo fabricado por la empresa BOSCH está diseñado para medir la presión barométrica (de ahí sus siglas BMP, por barometric pressure) y la temperatura.

Se trata de un sensor digital de presión que trabaja bajo el principio piezoresistivo. En su

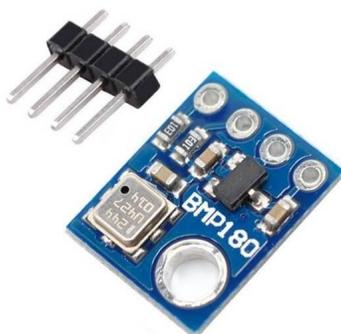


Figura 1.7.1: Sensor BMP180 [9]

Tabla 1.3: Especificaciones técnicas del sensor BMP180

Parámetro	Min	Típico	Máx.	Unidades
Temperatura de operación	-40	-	85	C
Voltaje de alimentación	1.8	2.5	3.6	V
Corriente de alimentación	-	5	-	μA
Precisión absoluta (presión)	-	1.2	-	Pa
Precisión relativa (presión)	-40	-1	20	Pa
Resolución (presión)	-	1	-	Pa
Resolución (temperatura)	-	0.1	-	C
Ruido en presión	-	6	-	Pa

hoja de datos (datashet), la empresa BOSCH destaca su ultra bajo consumo de energía, su alta precisión y linealidad. Una característica clave en este sensor es que se comunica mediante el protocolo I2C. La tabla 1.3, detalla algunas de las características de operación del BMP180.

Es importante mencionar que el BMP180 es un dispositivo que incorpora un elemento sensor, un convertidor analógico digital (ADC), una unidad de control y una memoria en un solo dispositivo. Con este sensor es posible obtener como datos de salida la presión barométrica, la temperatura y la altitud, estos valores son calculados por su unidad de control a partir de factores de calibración establecidos por el fabricante.

Algunas recomendaciones dadas por distribuidores [20] para este sensor son las siguientes:

- El BMP180 debe estar en contacto con el aire ambiente para realizar las mediciones. Si necesita integrar el sensor en una carcasa, no olvide proporcionar orificios

para la circulación del aire.

- No exponer el BMP180 excesivamente al flujo de aire de un ventilador, ya que esto puede resultar en mediciones erróneas o muy fluctuantes.
- La medición de la presión atmosférica depende de la temperatura. Evite colocar el BMP180 frente a una fuente de calor, menos aún frente a una fuente que produzca cambios rápidos (calefacción o ventanas a pleno sol).
- El BMP180 es sensible a la humedad y no está diseñado para el contacto directo con el agua.
- También es sensible a la luz. Debe protegerse tanto como sea posible de la luz ambiental. No coloque el sensor frente al orificio de ventilación de su carcasa, por ejemplo.
- El BMP180 acepta una tensión de alimentación de entre 1,8 y 3,6 voltios. La mejor manera es usar la salida de 3.3V del Arduino sin exceder los 3.6V.

1.7.2. MPX2010DP

Estos sensores se basan en el uso de transductores piezoresistivos MPX2010. Son sensores integrados de silicio de alta precisión que miden presión de aire. Proveen una salida de voltaje análogo lineal que varía proporcionalmente con la presión aplicada. Esta serie de sensores es posible encontrarlos para mediciones diferenciales y manométricas. En la tabla 1.4 se resumen algunas de las características técnicas de este sensor y en la figura 1.7.2, se observa a detalle este sensor.



Figura 1.7.2: Sensor MPX2010DP [15]

Tabla 1.4: Especificaciones técnicas del sensor MPX2010DP

Parámetro	Mín.	típico	Máx.	Unidades
Rango de presión	0	-	10	kPa
Voltaje de alimentación	-	10	16	V
Corriente de alimentación	-	6	-	μ A
Span	24	25	26	mV
Resolución	-	2.5	-	mV/kPa

Este sensor presenta la desventaja de proporcionar una señal de salida muy pequeña por lo que es necesario conectarlo a un amplificador de señal para lograr registrar de manera adecuada las señales, además, es necesario aplicar 10 V en la alimentación, lo cual resulta en una gran desventaja debido a que la necesidad de una fuente de alimentación adicional a la placa arduino, ya que esta solamente suministra 5 o 3.3 V.

1.7.3. Sensor XGZP6867

Es un sensor incorporado en un módulo que permite la comunicación I2C. Este sensor trabaja bajo el principio piezoresistivo, e incorpora un circuito que proporciona una salida de datos de 24 bits. Además, es posible encontrarlo configurado en un amplio rango de presiones. En la figura 1.7.3, se observa este sensor.

Si bien es posible encontrar este sensor en una amplia gama de configuraciones y rangos de medida, la documentación proporcionada por el fabricante es escasa, lo cual podría dificultar la configuración del dispositivo.

**Figura 1.7.3:** Sensor XGZP6867 [4]

Capítulo 2

Desarrollo experimental

El desarrollo de este proyecto se efectuó en 4 etapas:

1. Construcción de la bomba de vacío
2. Diseño y construcción del sistema de pruebas
3. Escritura del código para el sistema arduino
4. Evaluación de los medios filtrantes

En la figura 2.0.1 se muestra un diagrama de flujo con los pasos generales seguidos a lo largo del proyecto. Más adelante, se detallan algunos de estos pasos.

2.1. Construcción de la bomba de vacío

La construcción de la bomba de vacío se realizó a partir de la adaptación de un mini compresor de aire para inflado de neumáticos. Este dispositivo se encapsuló dentro de un contenedor de vidrio, en la tapa de este se realizaron 3 perforaciones (figura 2.1.2b), la primera, permite la entrada de un cable de alimentación; las dos restantes, son las encargadas de la entrada y salida de aire. En cada perforación se colocó un niple que permite la conexión de alguna manguera. Cada conexión fue soldada a la tapa para evitar filtraciones de aire.

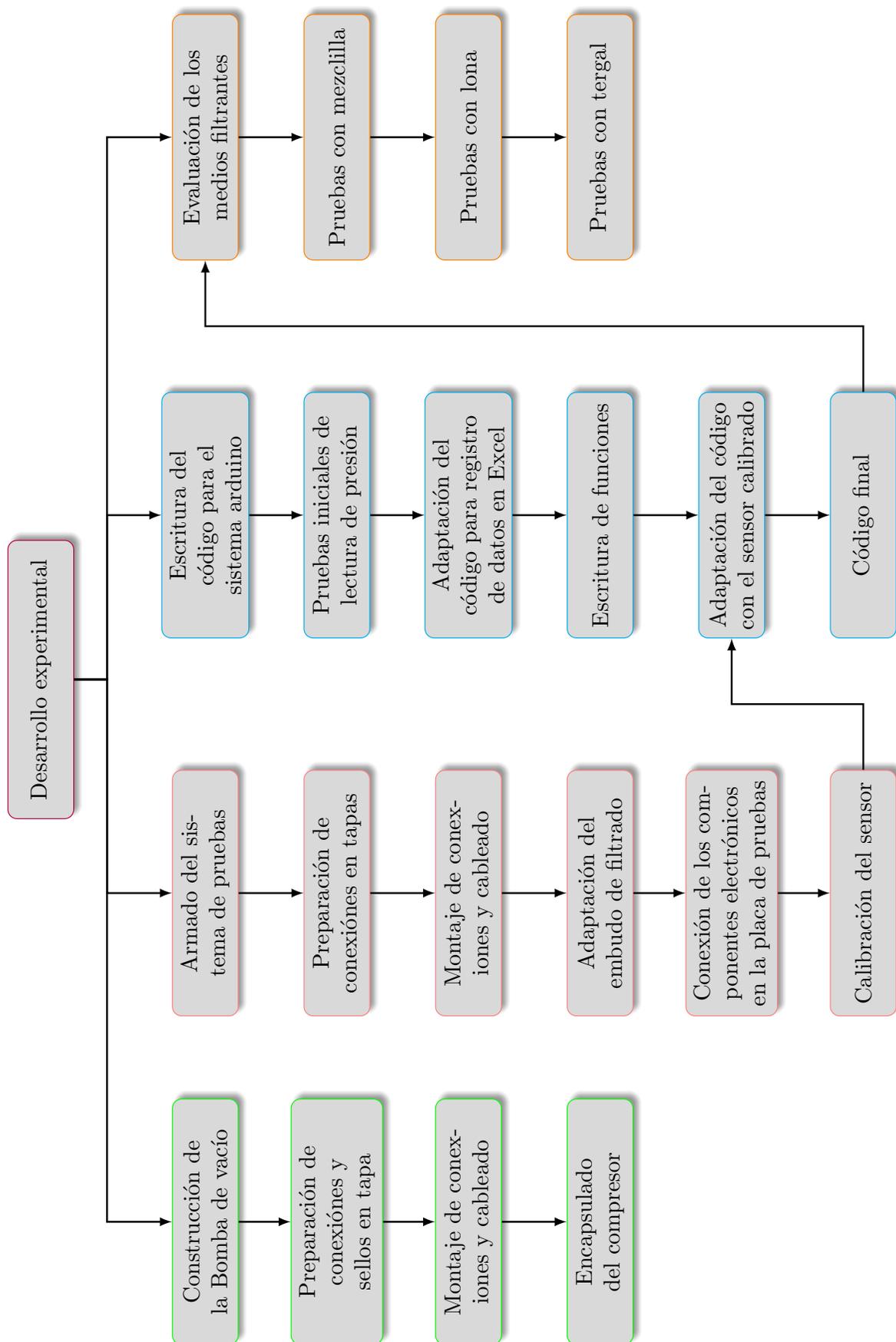


Figura 2.0.1: Diagrama de flujo del desarrollo experimental del proyecto



(a)



(b)

Figura 2.1.1: (a) Compresor de aire con carcasa (b) Compresor sin carcasa, empleado para la fabricación de la bomba de vacío

Debido a que la tapa metálica del contenedor de vidrio no contaba con un sello para prevenir fugas, se decidió fabricar y adaptar uno a partir de una mezcla de silicón para ventanas y fécula de maíz. Esta mezcla permitió manipular el silicón de manera más fácil, ya que acorta el tiempo de curado del silicón, por lo cual fue más sencillo de moldear y adaptar a la tapa (figura 2.1.2a).



(a)



(b)

Figura 2.1.2: (a) Tapa metálica de la bomba de vacío con niples y cable de alimentación (b) Tapa de la bomba de vacío con el sello de silicón

El compresor de aire se montó sobre una base de madera (figura 2.1.3a) y, para evitar movimiento y golpeo en las paredes del contenedor, esta se fijó al fondo del contenedor. También, para facilitar el mantenimiento de la bomba, se añadieron unas terminales tipo faston en los cables del motor. El resultado final se observa en la figura 2.1.3b. Es importante señalar que el compresor de aire requiere de una fuente de alimentación de corriente continua (CC) de 12 V capaz de proporcionar 10 A. Para fines de este trabajo, se empleó una fuente de alimentación de 12 V y 20 A.



(a)



(b)

Figura 2.1.3: (a) Compresor de aire montado sobre la base de madera (b) Bomba de vacío terminada

2.2. Diseño y construcción del sistema de pruebas

En este apartado se detallan los componentes empleados en la construcción del sistema de pruebas empleado para evaluar los medios filtrantes. Para fines prácticos, se describen primero los elementos asociados al sistema de filtración y, en segundo lugar, los componentes electrónicos.

2.2.1. Sistema de filtrado y contenedores

Se emplearon dos contenedores de vidrio con tapa metálica. El primero de estos sirvió como una trampa de vacío, el segundo como receptor del filtrado. En cada una de las tapas se realizaron perforaciones que facilitan la conexión de diversos dispositivos como cables, válvulas y espigas, que permitieron la comunicación entre los contenedores y la bomba de vacío, además de colocar el embudo de filtración. En la figura 2.2.1, se muestran ambos frascos con los diferentes elementos que se les instalaron.

El embudo de filtración se construyó adaptando una tapa para tubo de PVC de 4 pulgadas a un embudo de plástico. A la tapa, se le realizaron las perforaciones que se observan en la figura 2.2.2b. Para garantizar que la tapa se ajustara al embudo, se fabri-

có un sello con el mismo material del sello de la tapa de la bomba. El resultado final de la adaptación del embudo de filtración, se muestra en la figura 2.2.2b.



(a)



(b)

Figura 2.2.1: (a) Trampa de vacío (b) Receptor del filtrado



(a)



(b)

Figura 2.2.2: (a) Detalle del portafiltro del embudo de filtración (b) Embudo de filtración

Todos los materiales empleados fueron seleccionados bajo la condición de presentar una resistencia suficiente para soportar el vacío sin llegar a deformarse, además, se buscó que el costo del equipo fuera bajo.

2.2.2. Elección del elemento sensor

Para la elección del sensor empleado en el sistema de medición se establecieron tres criterios clave. El primero fue que el sensor fuera económico y fácil de conseguir en el mercado, ya que esto permitirá que se pueda reemplazar el sensor rápidamente en caso

de falla. El segundo que no requiriera de elementos adicionales como amplificadores, filtros de ruido o una fuente de alimentación externa, ya que esto reduce los costos de fabricación y mantenimiento del sistema. Por último, el sensor deberá ser conocido en la comunidad arduino y de ser posible, contar con alguna librería que facilite su uso y programación ya que de esta forma además de facilitar el desarrollo del equipo de medición, se promueve que en un futuro los usuarios finales puedan realizar modificaciones al programa, según su conveniencia, de una manera fácil y sin necesidad de contar con un profundo conocimiento en programación.

De los 3 sensores ya analizados, el BMP180 cumplió perfectamente con las características planteadas, este sensor se eligió debido a que es de amplia disponibilidad y bajo costo, ya que es posible encontrarlo desde los \$30, además, se puede alimentar desde la placa arduino ya que solamente requiere de 3.3 V y una corriente de $3\mu A$. Por último, es uno de los sensores de presión más conocidos en el ecosistema arduino y existe una librería con la que es posible operar este sensor de una manera sumamente fácil.

Este sensor, a diferencia de los dos restantes, presenta la desventaja de tener que instalarlo dentro del contenedor del cual se requiere conocer la presión, por lo que se encuentra propenso a daño por humedad.

El sensor MXP2010DP presenta la desventaja de necesitar de una fuente de alimentación externa y un amplificador de señal, en comparación con el BMP180 y el XGZP6867. Sin embargo, al tratarse de un sensor con salida analógica lineal, la implementación del programa para su control con la placa arduino es sencilla, lo cual lo hace ser la segunda opción como elemento sensor de este sistema.

El último de los sensores, el XGZP6867, resultó ser el menos indicado para el sistema de medición, esto se debió a que es un sensor no muy conocido, su costo es alto y su disponibilidad es baja, además, no existe alguna librería que facilite su programación y la documentación proporcionada por el fabricante no es clara.

2.2.3. Componentes electrónicos

Se empleó una tarjeta arduino UNO a la cual se conectó un sensor de presión BMP180. Adicionalmente, con la finalidad de contar con un sistema más amigable con el usuario y de forma que se aprovechará el potencial de la tarjeta arduino, se colocó una pantalla LCD. Esta última, utiliza un módulo PCF8574 que permite comunicar la pantalla con la placa mediante el protocolo I2C, por lo que se reduce el número de conexiones con la placa.

También se emplearon dos botones que ejecutan funciones del programa, así como dos leds que indican el estado de ejecución del programa. Las conexiones entre los componentes electrónicos se realizaron sobre una placa de pruebas (protoboard); las conexiones entre los pines de la tarjeta arduino y la placa de pruebas, así como el sensor, se realizaron empleando cables tipo dupont.

2.3. Escritura del código para el sistema arduino

La escritura del código del programa se realizó empleando el IDE de arduino. Dentro del código se emplearon algunas librerías que facilitaron la escritura del mismo. Estas librerías son: *Wire*, *Adafruit_bmp085* y *LiquidCrystal_I2C*. La primera de ellas permite la comunicación mediante el protocolo I2C, la segunda nos proporciona funciones que facilitan el uso del sensor BMP180, y la última permite usar la pantalla LCD. Para la comunicación serial entre la tarjeta arduino y la computadora, se empleó el programa *Parallax Data Acquisition tool (PLX-DAQ)*, en conjunto con una laptop *Dell Inspiron 3583* con procesador *Intel Core i7-8565U*.

La elección del método para establecer la comunicación entre la tarjeta arduino y la computadora se dio priorizando la facilidad para implementar esta característica, además de que pudiera ser usada en cualquier computadora sin la necesidad de instalar algún complemento y el hecho de no requerir algún software con costo o licencia. Se analizaron

opciones como el programa LabVIEW para crear una interfaz que permita controlar el sistema y adquirir los datos del sensor, un complemento de la versión 2016 de Excel de la suite Office 365 y Parallax Data Acquisition tool (PLX-DAQ).

La primera opción se descartó por la necesidad de instalación del programa, la segunda opción se desechó basándose en la suposición de que los usuarios no siempre cuentan con esta versión del programa. Por último, se eligió el programa Parallax Data Acquisition tool (PLX-DAQ) ya que es de uso libre, es compatible con cualquier versión de Excel y bajo la suposición de que es común que cualquier usuario cuente con Excel en su computadora, además basta con descargar y abrir la hoja de cálculo para poder establecer la comunicación arduino-hoja de cálculo.

2.4. Calibración del sensor

A pesar de que el manual del sensor BMP180 indica que este devuelve valores de presión y temperatura calibrados, se realizó una calibración empleando un vacuómetro de la marca Winters. La calibración se realizó graficando las lecturas entregadas por el sensor y las leídas en el vacuómetro. Esto se realizó generando diferentes niveles de vacío en el sistema, mediante el uso de la válvula reguladora; una vez que el vacío del sistema se estabilizó y alcanzó alguna de las marcas del vacuómetro, se registró la lectura del sensor. En la figura 3.3.1 se muestra la gráfica de calibración y la ecuación de la recta que se obtuvo.

2.5. Evaluación de los medios filtrantes

Se evaluaron 3 diferentes medios filtrantes, mezclilla, lona y tergal. Para ello, se realizaron pruebas de filtración de una pulpa con 50% en peso de sólidos, siendo esta una concentración típica en la alimentación a un proceso de filtración. Se empleó un mineral ferrotitanífero de una playa mexicana.

Para las pruebas, se emplearon círculos de 10.1 cm de diámetro, de cada medio filtrante, estos se muestran en la figura 2.5.1. Las pruebas de filtración se realizaron a dos, tres, cuatro y cinco segundos, cada prueba se realizó por quintuplicado. Los tiempos de filtrado se establecieron tomando en cuenta la capacidad del embudo de filtración.



Figura 2.5.1: Medios filtrantes empleados en las pruebas de filtración. Arriba, tergal. En medio, lona. Abajo, mezclilla.

El procedimiento para realizar las pruebas se describe en los siguientes pasos:

1. Se pesaron 200 gramos de mineral y 200 ml de agua (ver figura 2.5.2). Se asumió la densidad del agua igual a $1g/mL$.
2. Se encendió la bomba de vacío hasta la presión deseada (aproximadamente -17 kPa).
3. Una vez que se alcanzó la presión deseada, se colocó el medio filtrante en el portafiltro y se agregó el mineral, asegurándose que este se distribuya de manera uniforme.
4. Con ayuda de un embudo se agregó el agua sobre el mineral. Antes de adicionar el agua, se verificó que la válvula D, se encontrara cerrada.
5. Una vez listo el cronómetro, se presionó el botón de inicio de registro de datos y

se abrió la válvula D. Al pasar el tiempo de la prueba, se cerró de manera rápida la válvula D y se detuvo el registro de datos.

6. Con ayuda de una jeringa se retiró el líquido remanente de la pulpa.



Figura 2.5.2: Vasos con el mineral y el líquido a filtrar

Capítulo 3

Resultados y Análisis de Resultados

3.1. Sistema de pruebas

En esta sección se muestran los resultados del diseño y construcción del sistema de pruebas, en primer lugar, se presenta el sistema de filtrado construido, seguido de este, se detalla el funcionamiento de los componentes electrónicos que se incorporaron al sistema.

3.1.1. Sistema de filtrado

En la figura 3.1.1, se muestra el arreglo final del sistema en conjunto con la bomba de vacío, la tarjeta arduino y los componentes electrónicos.

En la figura A.0.8, del anexo A, puede consultarse un diagrama con los elementos que componen al sistema de filtrado, en esta figura, la trampa de vacío y el receptor de filtrado, se nombraron como contenedores A y B, respectivamente.

Las válvulas de paso que se instalaron en el contenedor A permitieron regular el nivel de vacío generado en el sistema, esto se pudo observar al realizar la calibración del sensor de presión. En la figura A.0.8, en el contenedor A, pueden observarse los elementos que se montaron en este contenedor.



Figura 3.1.1: Resultado final del sistema de pruebas

En el anexo A, se muestra una tabla con los precios de cada componente, en este anexo se observa que, el costo final del equipo ronda los \$1950, lo cual es un costo muy bajo para un equipo que será empleado en un laboratorio y que además su funcionalidad puede ser mejorada o modificada según cambien las necesidades y requerimientos del laboratorio.

3.1.2. Componentes electrónicos

En la figura 3.1.2, se aprecia la disposición final de los componentes electrónicos, todos ellos, excepto el sensor BMP180, fueron montados sobre una placa de pruebas (proto-board). La conexión entre la placa de pruebas y la tarjeta arduino se observa en la figura 3.1.3.

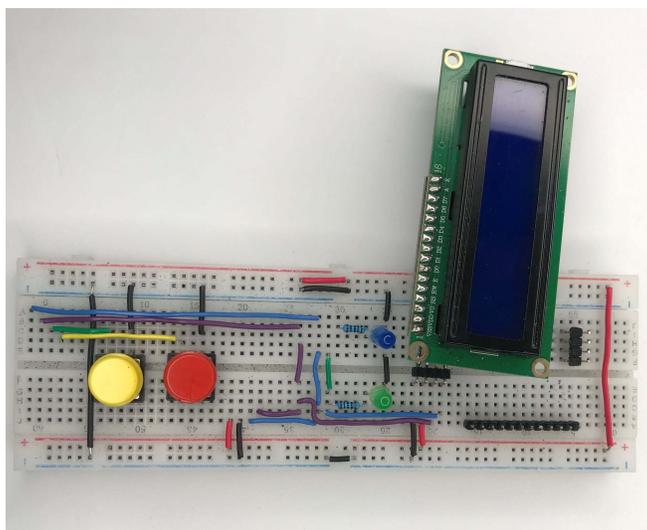


Figura 3.1.2: Componentes electrónicos y su conexión en la placa de pruebas

En la figura A.0.9, se muestra un diagrama para facilitar al usuario la conexión de estos componentes, sin embargo, la disposición de las conexiones en la placa de pruebas mostradas en el diagrama puede variar y dependerá de los materiales disponibles como se observa en la figura 3.1.2.

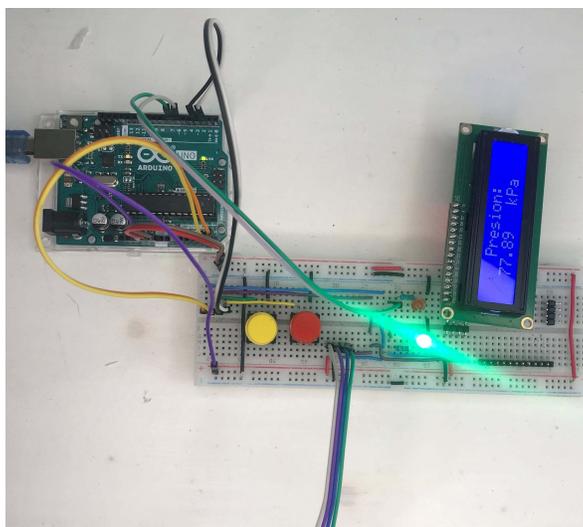


Figura 3.1.3: Detalle de las conexiones en la placa de pruebas y su conexión con la placa arduino

Entre los componentes electrónicos que se incorporaron, se encuentra una pantalla LCD que muestra mensajes relacionados con la ejecución de las funciones del programa y los valores de presión del sistema.

Con la incorporación del botón amarillo se logró implementar la ejecución de la función

que controla el inicio del registro de datos, en contraparte, con el rojo se implementó la acción inversa. Pueden observarse también 2 leds que indican el estado de registro de datos, al estar encendido el de color rojo, el sistema no está registrando la información del sensor, mientras que, si el de color verde se encuentra encendido, los datos se transfieren a la hoja de cálculo.

La forma en la que operan e interactúan estos componentes, así como una descripción de las funciones que componen al código del programa se detallan a continuación.

3.2. Código del programa

En esta sección, se detallan algunas funcionalidades del sistema de pruebas, así como particularidades del código del programa que permiten efectuar estas acciones. En primer lugar, se describen las características de operación del sistema y la forma en la que se establece la comunicación serial entre la placa y la hoja de cálculo en Excel, en segundo lugar, se muestran los resultados obtenidos mediante esta interacción. La forma en la cual se han implementado estas características, se puede analizar en el código del programa, este se encuentra en el anexo A.

Algunas de las funcionalidades que se implementaron en el sistema electrónico, fueron las de indicar mediante el encendido de los leds, si se está o no realizando el registro de datos, asimismo, la pantalla LCD muestra diversos mensajes relacionados con la ejecución del programa. Estas funciones, se ejecutan de la siguiente forma:

Al iniciar la operación de la tarjeta arduino, esta mostrará en la pantalla LCD un mensaje de bienvenida; a continuación, se mostrará otro mensaje, este indicará si se ha detectado correctamente el sensor BMP180, en caso contrario, el mensaje pedirá revisar las conexiones.

Una vez que se detectó el correcto funcionamiento del sensor de presión, se mostrarán en la pantalla los valores de presión de manera continua. El led rojo se encenderá

cuando no sé lleve a cabo el registro de datos en Excel. Al oprimir el botón amarillo, de manera automática comenzará el envío de datos hacia la hoja de cálculo, además se encenderá el LED verde indicando que está ejecutando esta acción. Para finalizar esta operación se debe oprimir el botón rojo, de inmediato se encenderá el LED que indica que el registro de datos se ha detenido. Es importante mencionar que, durante el registro de datos, es posible monitorear la lectura del sensor tanto en la pantalla LCD como en la hoja de cálculo.

Las tareas ejecutadas por la tarjeta arduino anteriormente descritas se basan en 7 funciones que se detallan a continuación. El código completo se encuentra en el anexo A.

inicio_lcd Inicializa la pantalla LCD y muestra un mensaje de inicio.

comprobar_bmp Comprueba si existe un sensor válido conectado a la tarjeta arduino. En caso de existir uno, muestra un mensaje que indica que este es correcto, en caso contrario, muestra un mensaje que pide revisar las conexiones.

leer_presion Inicializa la lectura de datos por parte del sensor

registro_presion Inicializa la lectura y registro de datos del sensor en una hoja de Excel, además de mostrar el valor leído en la pantalla LCD.

leds_lectura Enciende el LED verde y apaga el rojo. Esto indica que los datos se registran en la hoja de Excel

leds_no_lectura Apaga el LED verde y enciende el rojo, Esto indica que no se están registrando los datos en la hoja de Excel.

3.2.1. Datos producidos por el sistema Excel-Arduino

El programa además de realizar la lectura de datos del sensor, permite adquirir y almacenar los datos provenientes del sensor en una hoja de cálculo en Excel (figura 3.2.1). De igual forma, mediante el uso de los botones de la placa de pruebas, es posible tener control de en qué momento se realiza, o se detiene el registro de datos en la hoja de Excel.



Figura 3.2.1: Captura de la hoja de cálculo con los datos registrados y la gráfica generada con estos

En la Figura 3.2.1, se observa una captura de la hoja de cálculo y los datos que se registran en ella, una versión más clara del gráfico que se aprecia en esta captura, se encuentra en la figura 3.2.2a. Las figuras 3.2.2b y 3.2.3, muestran detalles del mismo gráfico al realizar un tratamiento de los datos generados por la tarjeta arduino.

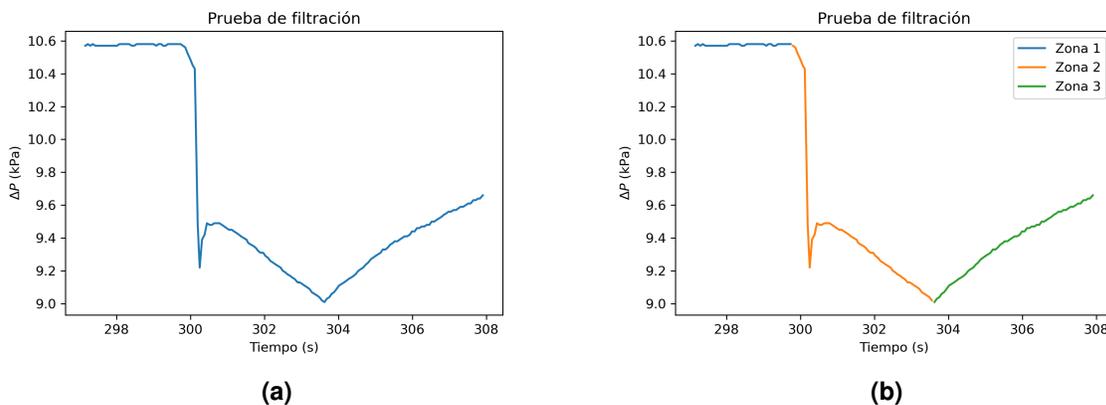


Figura 3.2.2: a) Representación gráfica de los datos del sensor que se registran en la hoja de cálculo b) Ejemplo de las zonas que se pueden identificar empleando los datos registrados por el sensor

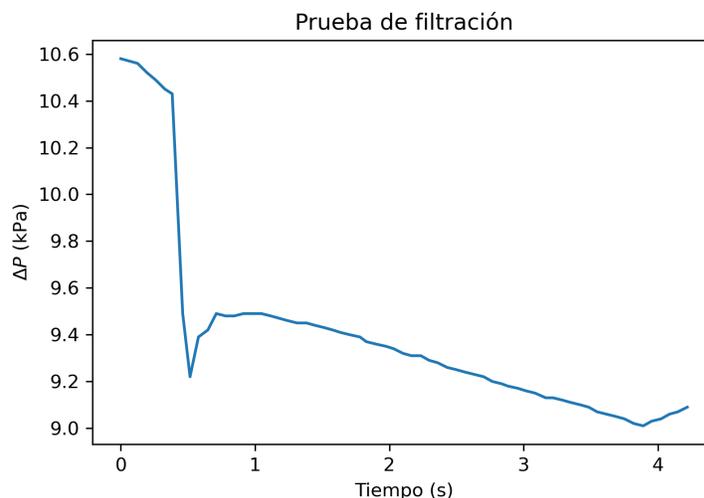


Figura 3.2.3: Resultado después de realizar el tratamiento de los datos obtenidos en la hoja de cálculo en una prueba de filtrado

3.3. Calibración del sensor

En la tabla 1.2, se muestran los datos empleados para la calibración del sensor, estos se representan en la figura 3.3.1, en esta, se observa que el sensor de presión BMP180 mostró una respuesta lineal con respecto a los valores del vacuómetro winters, con un coeficiente de correlación de 0.993.

Tabla 3.1: Datos para la calibración del sensor BMP180

Lectura en vacuómetro (kPa)	Lectura en sensor BMP180 (kPa)
-6	0
-8	-1.80
-10	-3.60
-12	-5.38
-14	-6.98
-16	-8.71
-18	-10.46
-20	-12.52
-22	-14.94
-24	-17.80

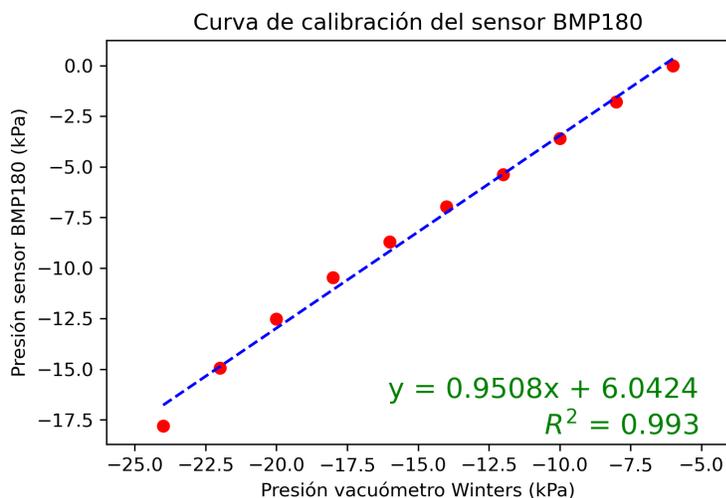


Figura 3.3.1: Curva de calibración del sensor BMP180

3.4. Evaluación de los medios filtrantes

Los resultados de la evaluación de los medios filtrantes se presentan en primer lugar, de manera individual para cada medio filtrante, después de ello se realiza una comparación del desempeño de los medios filtrantes. Se presenta el resumen de las pruebas de cada material a diferentes tiempos, los gráficos obtenidos y valores de desviación estándar de algunas variables analizadas.

3.4.1. Mezclilla

Tabla 3.2: Resumen de las pruebas de filtración con mezclilla

Tiempo	2 segundos	3 segundos	4 segundos	5 segundos
Mineral (g)	200	200	200	200
Agua (mL)	200	200	200	200
P vacío promedio (kPa)	17.34	17.24	17.68	17.49

En la tabla 3.2, se muestra el resumen de las pruebas realizadas con la mezclilla, en esta se observan las presiones de vacío promedio de cada grupo de pruebas y las cantidades de mineral y agua empleados. Analizando todo el conjunto de pruebas para este medio filtrante, el valor promedio de presión de vacío a la que estas se realizaron, es de 17.43 kPa con una desviación estándar de 0.27.

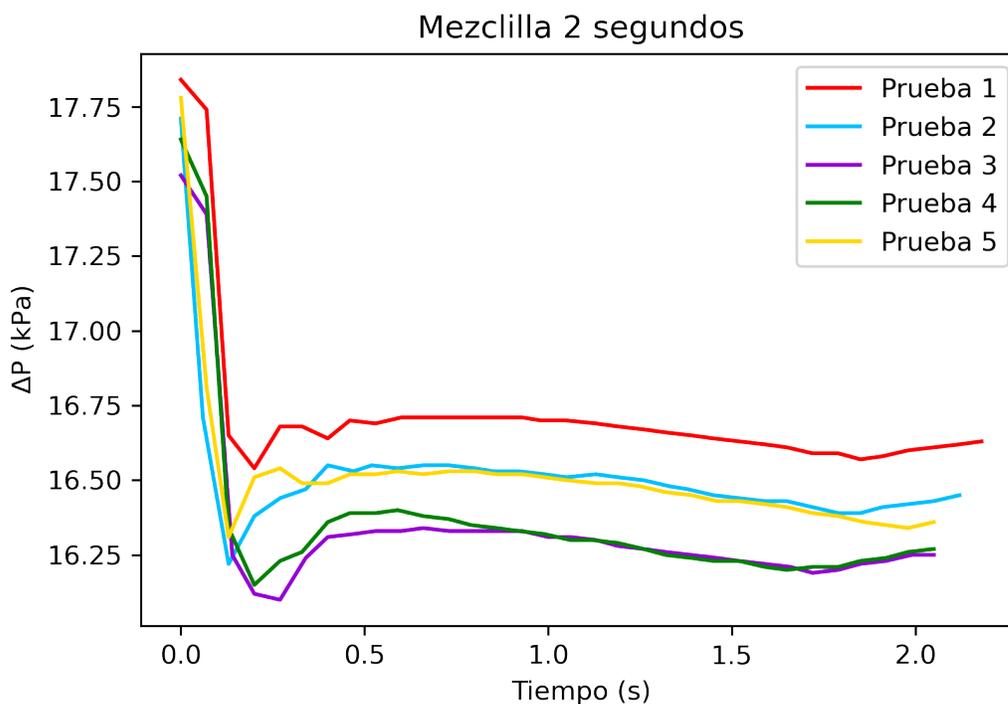


Figura 3.4.1: Curvas obtenidas en la prueba de filtración con la mezclilla a los 2 segundos

Tabla 3.3: Resultados de las pruebas de filtración con mezclilla a 2 segundos

Prueba	Presión de vacío (kPa)	Tiempo de filtrado (s)	Volumen del filtrado (mL)	Flujo del filtrado (mL/s)	Flujo/área (L/m^2)	Líquido recuperado (%)
1	17.45	2.11	130.0	61.6	6483.1	65.0
2	17.45	1.92	127.0	66.1	6960.3	63.5
3	16.75	2.17	106.0	48.8	5140.1	53.0
4	17.36	2.19	107.3	49.0	5155.6	53.7
5	17.71	2.23	99.7	44.7	4704.5	49.9
Promedio	17.34	2.12	114.0	54.1	5688.7	57.0

Tabla 3.4: Desviaciones estándar de los resultados de las pruebas de filtración con mezclilla a los 2 segundos

Presión	Tiempo	Volumen de filtrado	Flujo de filtrado
0.32	0.11	12.15	8.29

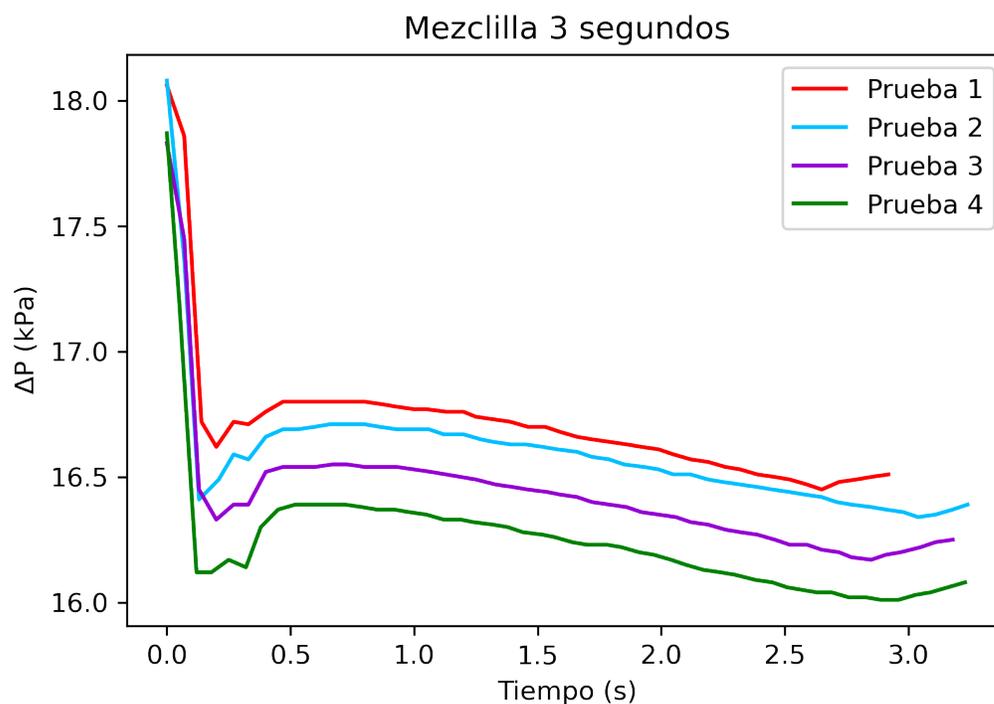


Figura 3.4.2: Curvas obtenidas en la prueba de filtración con la mezclilla a los 3 segundos

Tabla 3.5: Resultados de las pruebas de filtración con mezclilla a 3 segundos

Prueba	Presión vacío (kPa)	Tiempo de filtrado (s)	Volumen del filtrado (mL)	Flujo del filtrado (mL/s)	Flujo/área (L/m ²)	Líquido recuperado (%)
1	17.51	2.83	124.6	44.0	4632.9	62.3
2	17.19	3.11	132.6	42.6	4486.5	66.3
3	17.27	2.98	128.7	43.2	4544.5	64.4
4	16.97	3.43	125.0	36.4	3834.8	62.5
Promedio	17.24	3.09	127.7	41.6	4374.7	63.9

Tabla 3.6: Desviaciones estándar de los resultados de las pruebas de filtración con mezclilla a los 3 segundos

Presión	Tiempo	Volumen de filtrado	Flujo de filtrado
0.19	0.22	3.24	3.0

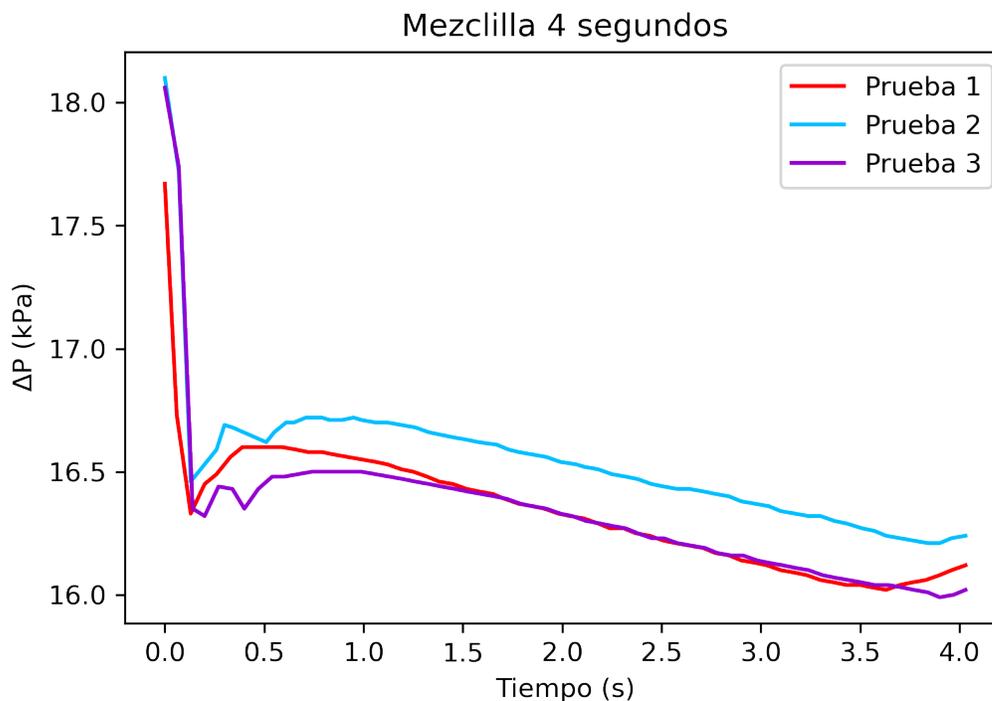


Figura 3.4.3: Curvas obtenidas en la prueba de filtración con la mezclilla a los 4 segundos

Tabla 3.7: Resultados de las pruebas de filtración con mezclilla a 4 segundos

Prueba	Presión vacío (kPa)	Tiempo de filtrado (s)	Volumen del filtrado (mL)	Flujo del filtrado (mL/s)	Flujo/área (L/m ²)	Líquido recuperado (%)
1	17.7	4.22	138.4	32.8	3451.0	69.2
2	17.59	4.15	141.3	34.0	3582.8	70.7
3	17.76	3.97	149.0	37.5	3949.3	74.5
Promedio	17.68	4.11	142.9	34.79	3661.0	71.4

Tabla 3.8: Desviaciones estándar de los resultados de las pruebas de filtración con mezclilla a los 4 segundos

Presión	Tiempo	Volumen de filtrado	Flujo de filtrado
0.07	0.08	4.47	2.0

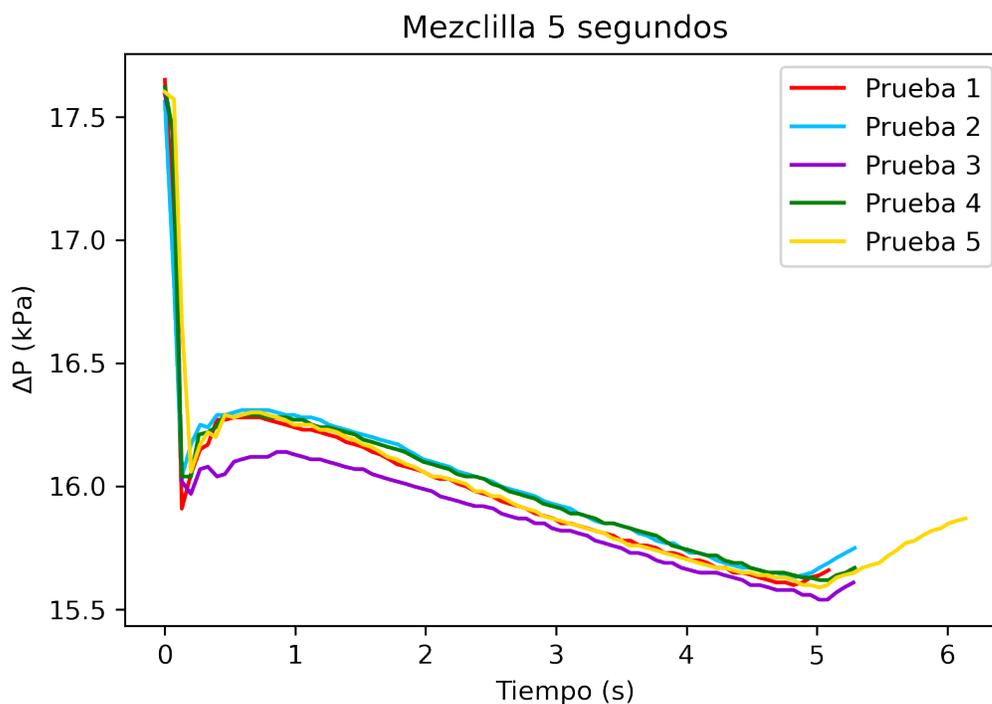


Figura 3.4.4: Curvas obtenidas en la prueba de filtración con la mezclilla a los 5 segundos

Tabla 3.9: Resultados de las pruebas de filtración con mezclilla a 5 segundos

Prueba	Presión vacío (kPa)	Tiempo de filtrado (s)	Volumen del filtrado (mL)	Flujo del filtrado (mL/s)	Flujo/área (L/m^2)	Líquido recuperado (%)
1	17.10	4.83	149.0	30.8	3246.1	74.5
2	17.56	5.08	149.0	29.3	3086.4	74.5
3	17.59	5.10	150.0	29.4	3096.9	75.0
4	17.67	5.02	146.0	29.1	3060.4	73.0
5	17.57	4.76	148.0	31.1	3271.7	74.0
Promedio	17.49	4.96	148.4	30.0	3151.9	74.2

Tabla 3.10: Desviaciones estándar de los resultados de las pruebas de filtración con mezclilla a los 5 segundos

Presión	Tiempo	Volumen de filtrado	Flujo de filtrado
0.20	0.14	1.36	0.84

Las figuras 3.4.1 a la 3.4.4, muestran el cambio en el ΔP en función del tiempo. En los primeros segundos de la gráfica se observa un marcado descenso en el ΔP , este está asociado al volumen de aire contenido en el embudo de filtración. Posterior a este descenso, se observa un incremento y estabilización del ΔP . En pruebas efectuadas a un mayor tiempo, por ejemplo, a cinco segundos, se aprecia un nuevo descenso del ΔP , este puede estar asociado al incremento del volumen del filtrado en el contenedor.

Al analizar los datos de la tabla 3.3 y 3.4, se observa una marcada diferencia en los volúmenes de filtrado obtenidos con una desviación estándar de 12.15, esta diferencia puede estar asociada a el corto periodo de la prueba, debido a la operación manual del equipo de pruebas, sin embargo, esta diferencia tiende a disminuir en los siguientes grupos de pruebas, siendo el de las pruebas a 5 segundos, el grupo en el que se presenta la menor desviación estándar en los volúmenes recuperados.

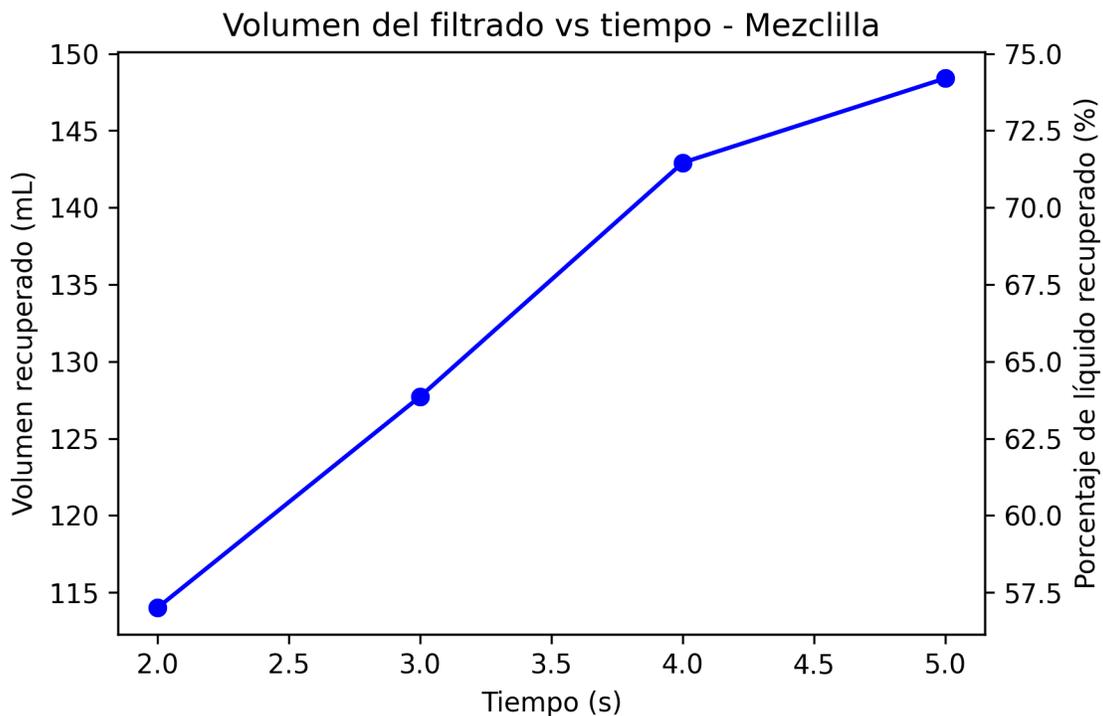


Figura 3.4.5: Volumen y porcentaje de filtrado recuperado en función del tiempo con mezclilla

En la figura 3.4.5, se presenta la variación del volumen de filtrado recuperado en función del tiempo, se observa un aumento constante del volumen entre los dos y los cuatro

segundos; a partir de este último punto, se observa una disminución del volumen del filtrado obtenido. Estos valores nos indican que en los primeros dos segundos de tiempo se recupera cerca del 57% de líquido, teniendo una disminución del volumen recuperado cuando el porcentaje recuperado es cerca del 72%, a partir de este punto, el incremento en el volumen de filtrado fue de 2.7% a diferencia de los otros puntos donde se observan un incremento de entre 6.8% y 7.5%.

3.4.2. Lona

Tabla 3.11: Resumen de las pruebas de filtración con lona

Tiempo	2 segundos	3 segundos	4 segundos	5 segundos
Mineral (g)	200 g	200 g	200 g	200 g
Agua (mL)	200 mL	200 mL	200 mL	200 mL
P vacío promedio (kPa)	17.22	17.29	17.58	17.30

El análisis de este medio filtrante es similar al anterior. La tabla 3.11 presenta un resumen general de las cantidades de mineral y agua empleadas, así como las presiones de vacío a la que se efectuó cada grupo de prueba. En general, la presión de vacío promedio de todas las pruebas de este medio filtrante, fue de 17.41 kPa, con una desviación estándar de 0.26.

Tabla 3.12: Resultados de las pruebas de filtración con lona a 2 segundos

Prueba	Presión vacío (kPa)	Tiempo de filtrado (s)	Volumen del filtrado (mL)	Flujo del filtrado (mL/s)	Flujo/área (L/m ²)	Líquido recuperado (%)
1	17.45	2.11	121.2	57.4	6044.3	60.6
2	17.45	1.92	112.8	58.8	6182.1	56.4
3	17.36	2.19	123.0	56.2	5910.0	61.5
4	17.71	2.23	132.0	59.2	6228.6	66.0
Promedio	17.49	2.11	122.3	57.9	6091.2	61.1

Tabla 3.13: Desviaciones estándar de los resultados de las pruebas de filtración con lona a los 2 segundos

Presión	Tiempo	Volumen de filtrado	Flujo de filtrado
0.13	0.19	6.82	1.18

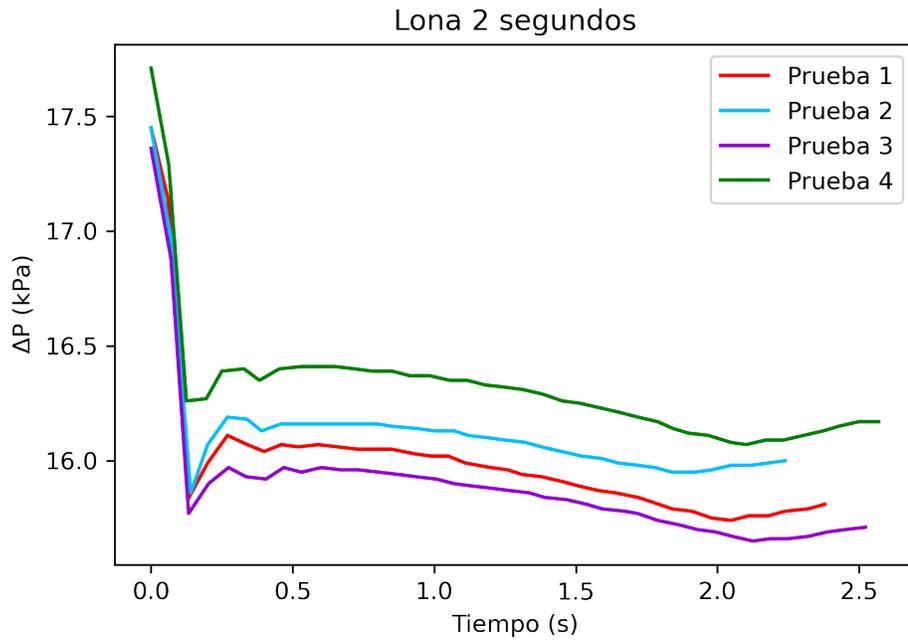


Figura 3.4.6: Curvas obtenidas en la prueba de filtración con la lona a los 2 segundos

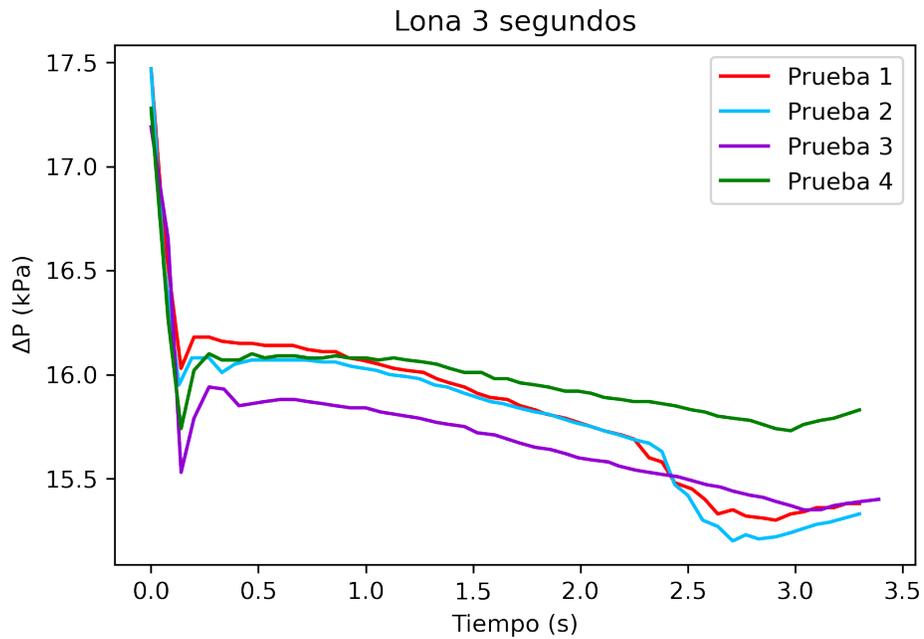


Figura 3.4.7: Curvas obtenidas en la prueba de filtración con la lona a los 3 segundos

Tabla 3.14: Resultados de las pruebas de filtración con lona a 3 segundos

Prueba	Presión vacío (kPa)	Tiempo de filtrado (s)	Volumen del filtrado (mL)	Flujo del filtrado (mL/s)	Flujo/área (L/m^2)	Líquido recuperado (%)
1	17.53	3.37	101.4	34.8	3666.7	50.7
2	17.51	2.51	103.9	41.4	4355.8	52.0
3	17.19	3.11	110.9	35.7	3752.3	55.5
4	17.27	2.98	109.0	36.6	3848.9	54.5
5	16.97	3.43	127.0	37.0	3896.1	63.5
Promedio	17.29	2.99	110.4	37.1	3903.9	55.2

Tabla 3.15: Desviaciones estándar de los resultados de las pruebas de filtración con lona a los 3 segundos

Presión	Tiempo	Volumen de filtrado	Flujo de filtrado
0.15	0.22	3.82	2.54

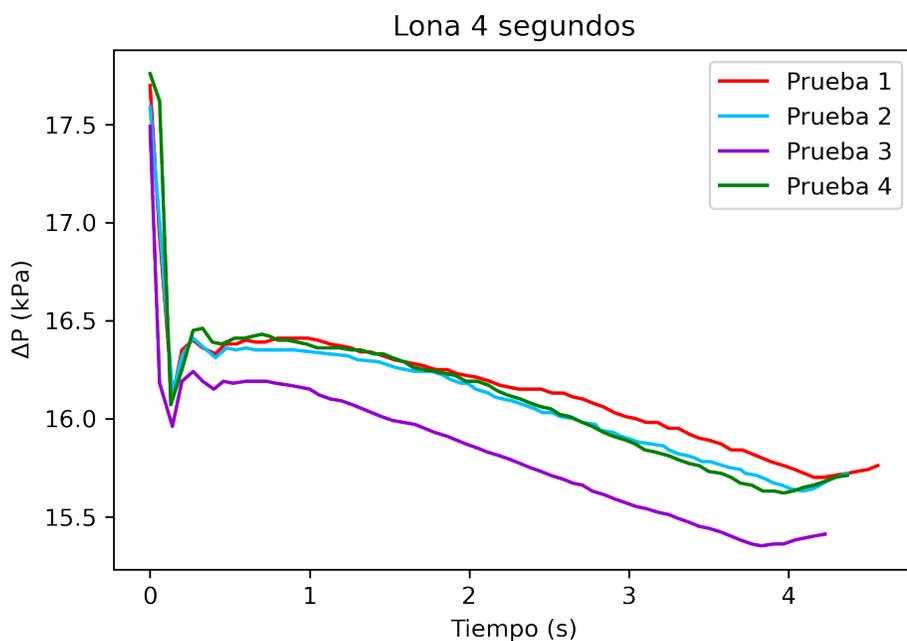


Figura 3.4.8: Curvas obtenidas en la prueba de filtración con la lona a los 4 segundos

Tabla 3.16: Resultados de las pruebas de filtración con lona a 4 segundos

Prueba	Presión vacío (kPa)	Tiempo de filtrado (s)	Volumen del filtrado (mL)	Flujo del filtrado (mL/s)	Flujo/área (L/m^2)	Líquido recuperado (%)
1	17.70	4.22	145.0	34.4	3615.6	72.5
2	17.59	4.15	138.0	33.3	3499.1	69.0
3	17.49	3.91	139.0	35.5	3740.8	69.5
4	17.76	3.97	144.0	36.3	3816.8	72.0
Promedio	17.64	4.06	141.5	35.0	3668.1	70.8

Tabla 3.17: Desviaciones estándar de los resultados de las pruebas de filtración con lona a los 4 segundos

Presión	Tiempo	Volumen de filtrado	Flujo de filtrado
0.10	0.13	3.04	1.15

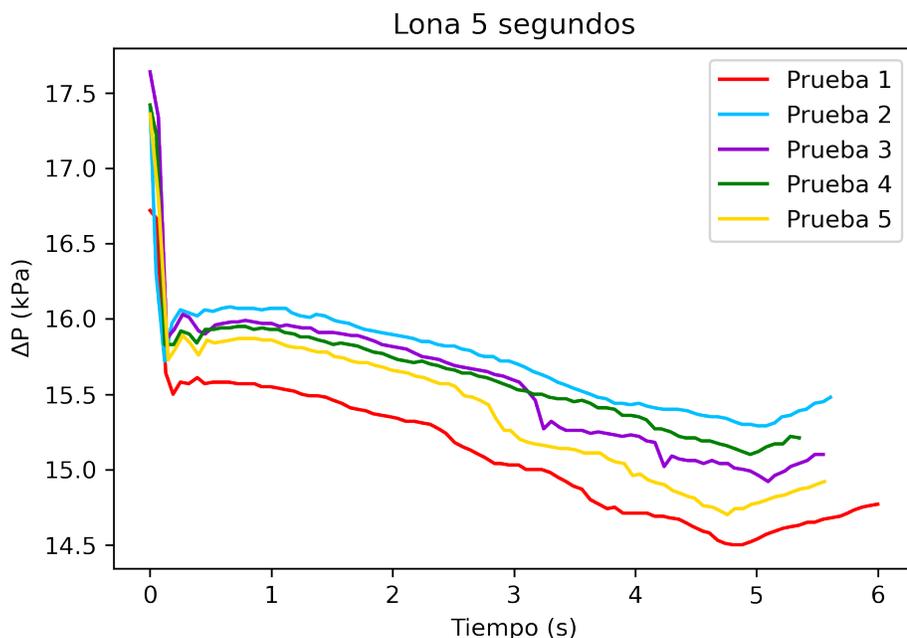


Figura 3.4.9: Curvas obtenidas en la prueba de filtración con la lona a los 5 segundos

Tabla 3.18: Resultados de las pruebas de filtración con lona a 5 segundos

Prueba	Presión vacío (kPa)	Tiempo de filtrado (s)	Volumen del filtrado (mL)	Flujo del filtrado (mL/s)	Flujo/área (L/m^2)	Líquido recuperado (%)
1	16.67	4.83	130.0	26.9	2832.2	65.0
2	17.41	5.08	145.0	28.5	3003.5	72.5
3	17.64	5.10	141.6	27.8	2921.6	70.8
4	17.42	5.02	144.6	28.8	3031.0	72.3
5	17.36	4.76	136.6	28.7	3019.7	68.3
Promedio	17.30	4.96	139.6	28.1	2961.6	69.8

Tabla 3.19: Desviaciones estándar de los resultados de las pruebas de filtración con lona a los 5 segundos

Presión	Tiempo	Volumen de filtrado	Flujo de filtrado
0.33	0.14	5.64	0.72

El comportamiento de las curvas de filtración de este material (figuras 3.4.6 a 3.4.9) es similar al mencionado en el material anterior; se observa un descenso inicial del ΔP , seguido de una zona de incremento y su posterior descenso.

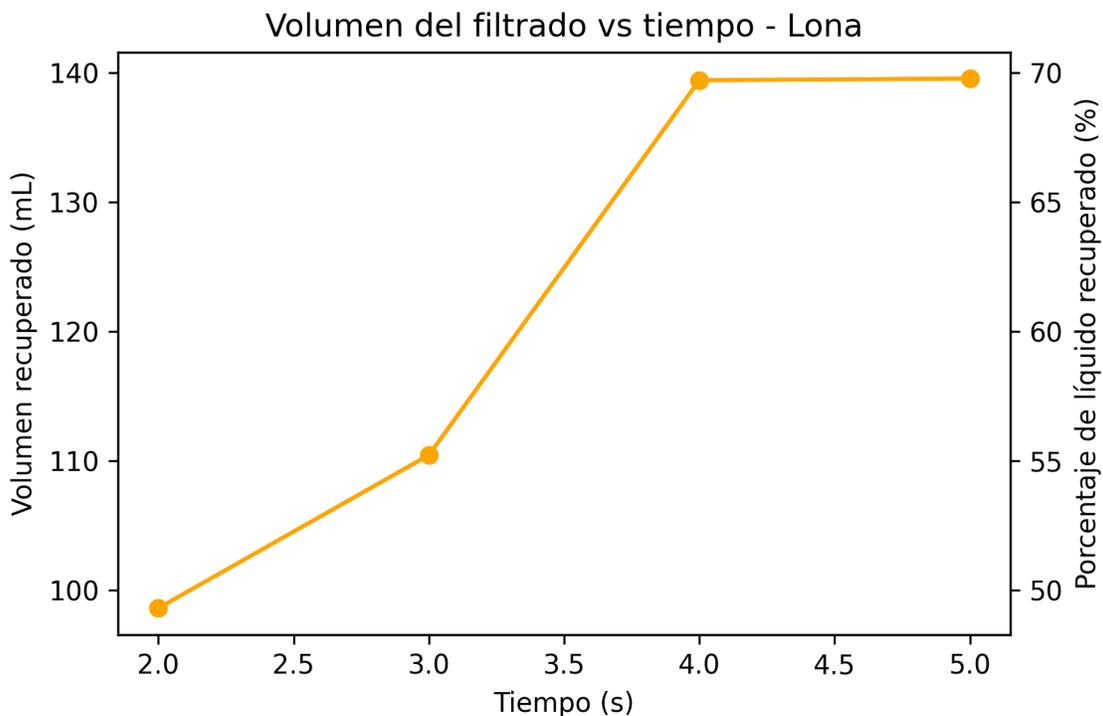


Figura 3.4.10: Volumen y porcentaje de filtrado recuperado en función del tiempo con lona

La figura 3.4.10 muestra un análisis en función del tiempo del volumen de filtrado recuperado y el porcentaje que este representa. Analizando esta figura se observa que, empleando lona se recuperaron cerca de 100 mL de filtrado en los primeros dos segundos y a partir de los cuatro segundos se observa una disminución del volumen del filtrado, alcanzando un máximo de 140 mL. Estos valores corresponden a cerca del 50% y 70% de líquido recuperado, respectivamente.

También es posible observar que a partir de los 4 segundos solo se recuperó un 0.06% más que en el punto anterior, en comparación, con los puntos anteriores donde se observó un aumento de 5.9 y 14.5 por ciento en el punto dos y tres, respectivamente.

3.4.3. Tergal

Al igual que con los materiales anteriores, se realiza un resumen de los grupos de pruebas realizados con tergal. Esta información se presenta en la tabla 3.20, en esta se observa que el valor promedio de presión de vacío al que se realizaron las pruebas con este material fue de 17.28 kPa con una desviación estándar de 0.22, quedando en un rango similar al de los materiales anteriores.

Tabla 3.20: Resumen de las pruebas de filtración con tergal

Tiempo	2 segundos	3 segundos	4 segundos	5 segundos
Mineral (g)	200 g	200 g	200 g	200 g
Agua (mL)	200 mL	200 mL	200 mL	200 mL
P vacío promedio (kPa)	17.34	17.33	17.50	17.53

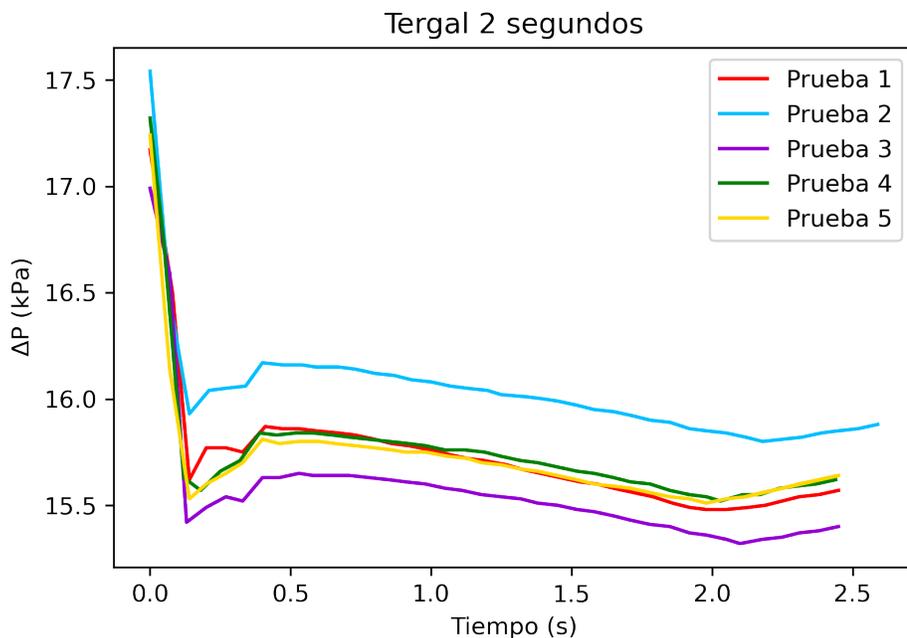


Figura 3.4.11: Curvas obtenidas en la prueba de filtración con el tergal a los 2 segundos

En las tablas, 3.22 a la 3.28, se observa que en general, los valores de las desviaciones estándar de las pruebas con este material son muy bajas, teniendo la mayor dispersión de presión de vacío en la prueba 5, mientras que, la mayor dispersión en los valores de tiempo se observaron en la prueba 3 y la de volumen de filtrado en la prueba 2, con un valor de 9.14.

Tabla 3.21: Resultados de las pruebas de filtración con tergal a 2 segundos

Prueba	Presión de vacío (kPa)	Tiempo de filtrado (s)	Volumen del filtrado (mL)	Flujo del filtrado (mL/s)	Flujo/área (L/m^2)	Líquido recuperado (%)
1	17.17	2.05	117.7	57.4	6041.5	58.9
2	17.41	2.25	128.4	57.1	6004.9	64.2
3	17.56	2.10	127.2	60.6	6373.7	63.6
4	17.33	2.03	145.8	71.8	7557.6	72.9
5	17.24	1.98	127.0	64.1	6749.4	63.5
Promedio	17.34	2.08	129.2	62.2	6545.4	64.6

Tabla 3.22: Desviaciones estándar de los resultados de las pruebas de filtración con tergal a los 2 segundos

Presión	Tiempo	Volumen de filtrado	Flujo de filtrado
0.14	0.09	9.14	5.45

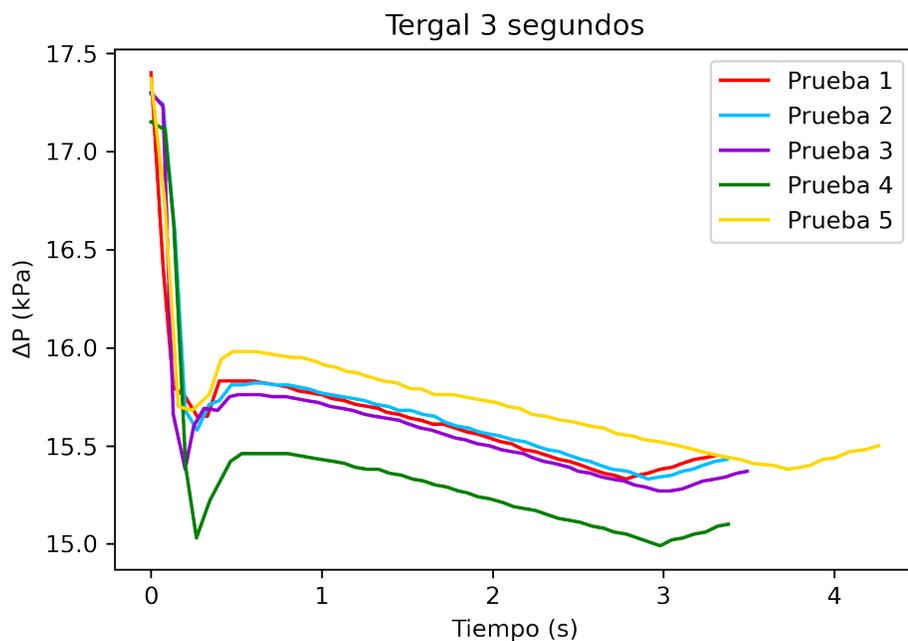


Figura 3.4.12: Curvas obtenidas en la prueba de filtración con el tergal a los 3 segundos

Tabla 3.23: Resultados de las pruebas de filtración con tergal a 3 segundos

Prueba	Presión de vacío (kPa)	Tiempo de filtrado (s)	Volumen del filtrado (mL)	Flujo del filtrado (mL/s)	Flujo/área (L/m^2)	Líquido recuperado (%)
1	17.46	2.85	152.0	53.3	5612.1	76.0
2	17.30	2.90	154.0	53.1	5587.9	77.0
3	17.30	2.97	156.0	52.5	5527.0	78.0
4	17.16	2.90	152.7	52.7	5540.7	76.4
5	17.43	3.74	152.1	40.7	4279.4	76.1
Promedio	17.33	3.10	153.4	50.5	5309.4	76.7

Tabla 3.24: Desviaciones estándar de los resultados de las pruebas de filtración con tergal a los 3 segundos

Presión	Tiempo	Volumen de filtrado	Flujo de filtrado
0.11	0.34	1.50	4.90

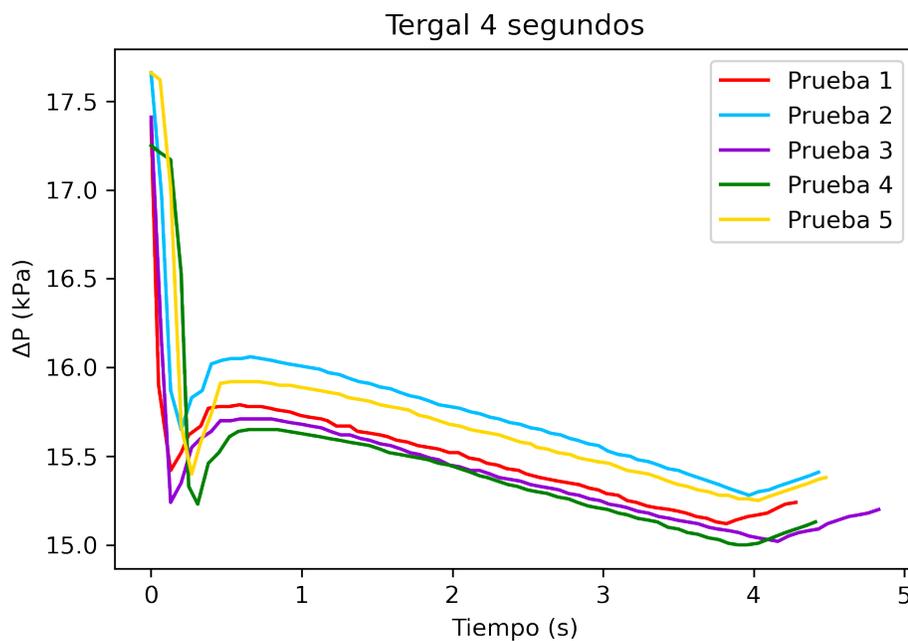


Figura 3.4.13: Curvas obtenidas en la prueba de filtración con el tergal a los 4 segundos

Tabla 3.25: Resultados de las pruebas de filtración con tergal a 4 segundos

Prueba	Presión de vacío (kPa)	Tiempo de filtrado (s)	Volumen del filtrado (mL)	Flujo del filtrado (mL/s)	Flujo/área (L/m ²)	Líquido recuperado (%)
1	17.45	3.97	153.5	38.7	4068.6	76.8
2	17.70	4.03	153.2	38.0	4000.2	76.6
3	17.42	4.17	154.6	37.1	3901.2	77.3
4	17.26	3.97	154.7	39.0	4100.4	77.4
5	17.66	3.96	151.3	38.2	4020.4	75.7
Promedio	17.50	4.02	153.5	38.2	4018.1	76.7

Tabla 3.26: Desviaciones estándar de los resultados de las pruebas de filtración con tergal a los 4 segundos

Presión	Tiempo	Volumen de filtrado	Flujo de filtrado
0.16	0.08	1.23	0.65

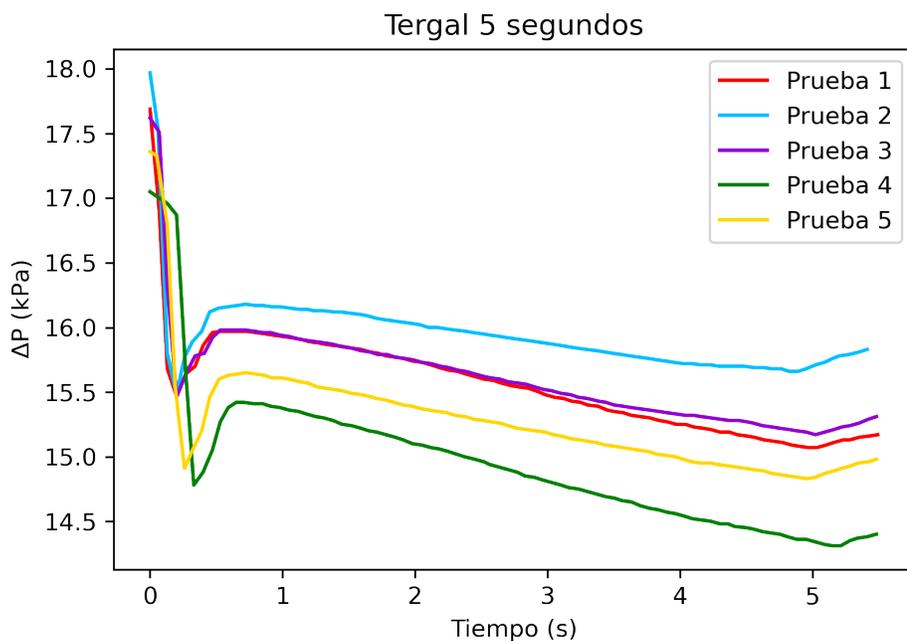


Figura 3.4.14: Curvas obtenidas en la prueba de filtración con el tergal a los 5 segundos

Tabla 3.27: Resultados de las pruebas de filtración con tergal a 5 segundos

Prueba	Presión de vacío (kPa)	Tiempo de filtrado (s)	Volumen del filtrado (mL)	Flujo del filtrado (mL/s)	Flujo/área (L/m ²)	Líquido recuperado (%)
1	17.69	5.03	154.5	30.7	3232.1	77.3
2	17.96	4.89	156.6	32.0	3369.8	78.3
3	17.65	5.02	155.5	31.0	3259.5	77.8
4	17.0	5.01	155.5	31.0	3266.0	77.8
5	17.37	4.90	153.5	31.3	3296.4	76.8
Promedio	17.53	4.97	155.1	31.2	3284.8	77.6

Tabla 3.28: Desviaciones estándar de los resultados de las pruebas de filtración con tergal a los 5 segundos

Presión	Tiempo	Volumen de filtrado	Flujo de filtrado
0.33	0.06	1.05	0.45

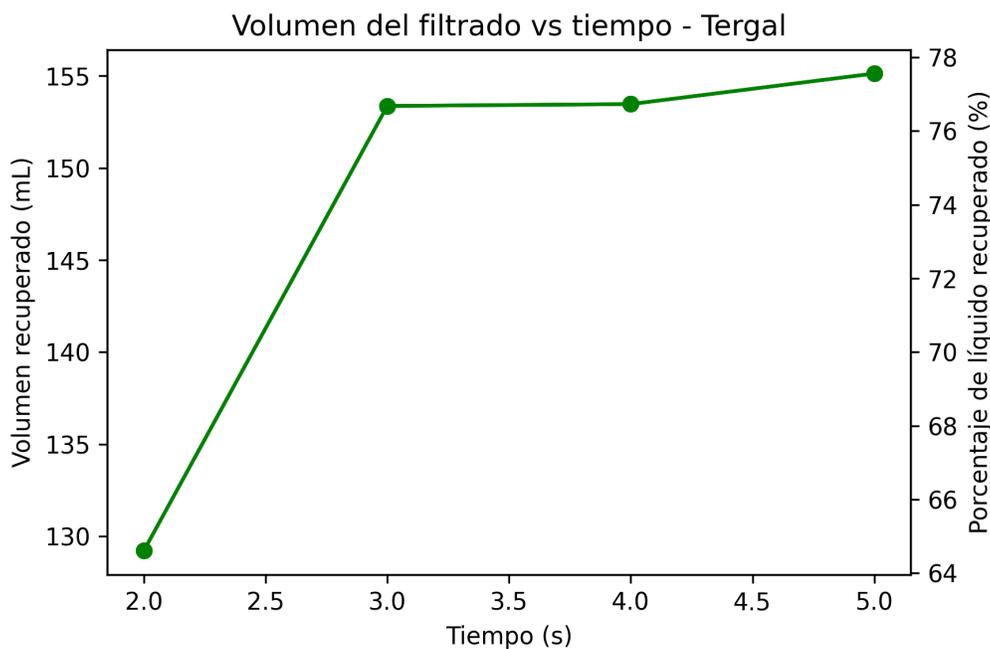


Figura 3.4.15: Volumen y porcentaje de filtrado recuperado en función del tiempo con tergal

Las variables restantes de las tablas anteriores pueden evaluarse de mejor manera analizando la figura 3.4.15, donde se observa que en los primeros dos segundos de la prueba se recuperó en promedio 64.61 % del líquido, equivalente a 129 mL de filtrado. El punto a partir del cual disminuye el volumen recuperado es a los tres segundos, en donde se recuperó un 76.68% de líquido, a partir de este punto el incremento en los porcentajes de volumen de filtrado fue menor a 1 %.

3.4.4. Comparación entre los medios filtrantes

Para realizar una comparación entre los medios filtrantes, se colocaron en conjunto las curvas obtenidas en pruebas de filtrado con los 3 medios. Se buscó comparar pruebas realizadas a presiones de vacío similares; se realizaron comparaciones a cuatro y cinco segundos, estas se muestran en las figuras 3.4.16 y 3.4.17, respectivamente.

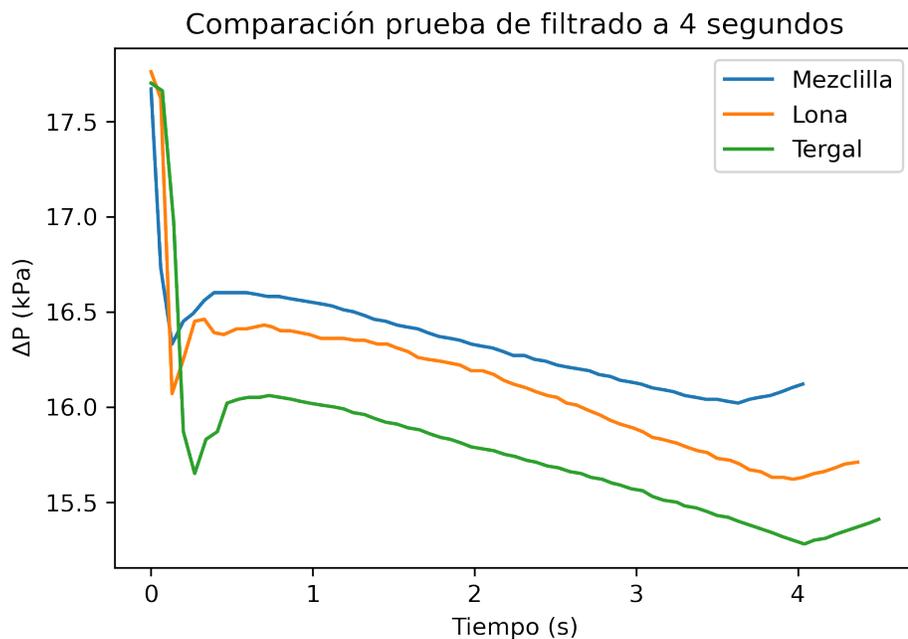


Figura 3.4.16: Comparación de la prueba de filtrado entre los medios filtrantes a 4 segundos

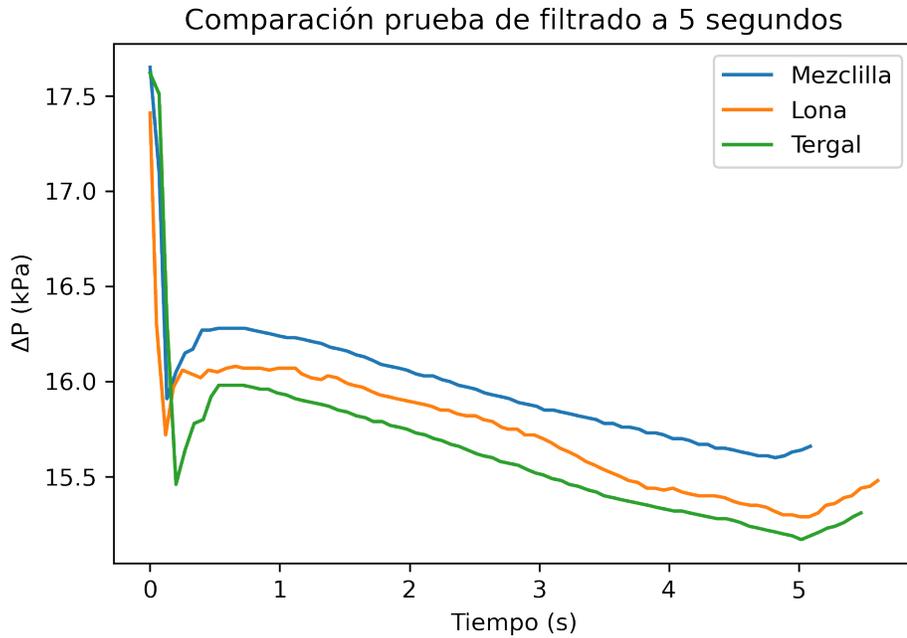


Figura 3.4.17: Comparación de la prueba de filtrado entre los medios filtrantes a 5 segundos

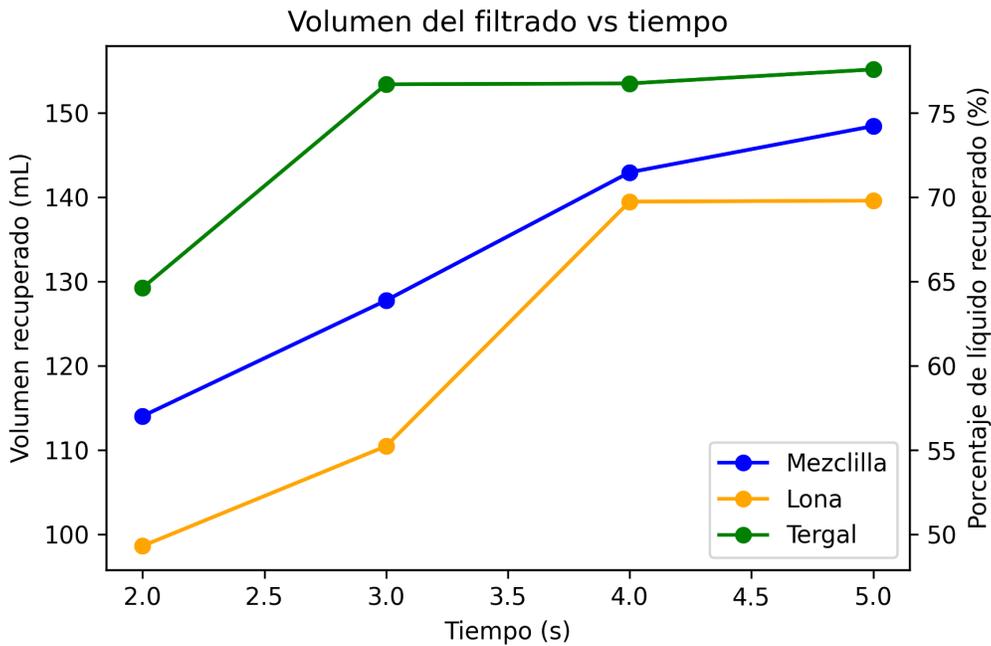


Figura 3.4.18: Comparación del porcentaje de filtrado recuperado obtenido con cada medio filtrante

Se observó que la diferencia de presión a la que se efectúa la filtración es diferente para cada medio filtrante, quedando de la siguiente forma $tergal < lona < mezclilla$. Esta información coincide con los datos que se presentan en la figura 3.4.18, en donde se observa

que empleando tergal es posible recuperar un mayor volumen de filtrado en los primeros segundos de la prueba y en general durante toda ella. Este comportamiento se debe a que al emplear una menor diferencia de presión los sólidos de la torta se comprimen en menor medida, por lo que permiten que el líquido pase con mayor facilidad.

Del análisis anterior se desprende que, empleando tergal es posible recuperar hasta 7.6% más líquido en los primeros 2 segundos de la prueba en comparación con la mezclilla, y hasta 15.31% más en comparación con la lona; además, empleando tergal es posible recuperar una mayor cantidad de filtrado en menor tiempo, siendo 12.82% mayor que con la mezclilla y 21.46% que con la lona. De igual forma, empleando mezclilla se puede recuperar hasta un 15% más líquido que usando lona.

Si bien, el comportamiento entre la lona y la mezclilla difiere al comparar la diferencia de presión y el volumen recuperado, es posible establecer que el comportamiento de cada medio filtrante en las pruebas de filtración está asociado a parámetros estructurales propios de cada material como la densidad de trama y urdimbre.

Capítulo 4

Conclusiones

- Se construyó un sistema para la evaluación de medios filtrantes, en conjunto con un sistema generador de vacío. El primero, se equipó con un sensor de presión BMP180 y diversos accesorios que dotan al sistema de múltiples funcionalidades. La interacción de los componentes electrónicos se realizó mediante el código del programa por medio de una tarjeta arduino.
- El equipo cumplió con la característica de ser un dispositivo de bajo costo y su operación resultó amigable para el usuario.
- El código del programa permitió que el sistema efectuó registro y almacenamiento de las lecturas del sensor en una hoja de cálculo en Excel, además es posible monitorear en tiempo real las pruebas. A partir de esta característica, se consiguió realizar la evaluación directa de 3 medios filtrantes.
- El tergal mostró un mejor desempeño en términos del líquido recuperado, además, es posible recuperar un mayor porcentaje de filtrado en menor tiempo, en comparación con la mezclilla y la lona.

Bibliografía y Mesografía

- [1] Arduino (2020). Arduino Uno Rev3. [Imagen]. Recuperado el 12/10/2020 de <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>.
- [2] BONFILT (2021a). Filter Press Cloth Frame Filter Cloth for Press Filters. Imagen. Recuperado el 6/07/2021 de <https://www.bonfilt.com/product/filter-press-cloth>.
- [3] BONFILT (2021b). Tela de filtro de correa de tejido de doble capa para HVBF | Medios de correa de filtro tejida. Imagen. Recuperado el 6/07/2021 de <https://www.bonfilt.com/es/product/belt-filter-cloth/>.
- [4] CFSensors (2020). Sensors. [Imagen]. Recuperado el 12/10/2020 de <http://cfsensor.com/proinfo/9.html>.
- [5] Derek B Purchas and Ken Sutherland (2002). An Introduction to Filter Media. En *Handbook of Filter Media*, pp. 1–34. Elsevier.
- [6] E.S. Tarleton and R.J. Wakeman (2007). Data acquisition, analysis and scale-up. En *Solid/Liquid Separation*, pp. 152–200. Elsevier.
- [7] Fernando Concha A. (2013). Filtration. En *Solid-Liquid Separation in the Mining Industry*, pp. 281–340. Springer International Publishing.
- [8] Fraden, J. (2010). *Handbook of Modern Sensors*. Springer New York.
- [9] Geek factory (2020). BMP180 Sensor de presión atmosférica. [Imagen]. Recuperado el 12/10/2020 de https://www.geekfactory.mx/wp-content/uploads/2015/12/bmp180_sensor_de_presion_atmosferica.jpg.
- [10] Jiangnan (2021). High temperature fiberglass cloth, vermiculite coated cloth plain weave. [Imagen]. Recuperado el 6/07/2021 de <https://www.jnglassfiber.com/>

sale-12084256-2025-high-temperature-fiberglass-cloth-vermiculite-coated-cloth-plai
html.

- [11] Meléndez Valentín, G. (2018). Automatización de hornos para tratamiento térmicos con tecnología arduino. (Tesis de Licenciatura). *Universidad Nacional Autónoma de México*. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/344281>.
- [12] Nalavade, S. P., Patange, A. D., Prabhune, C. L., Mulik, S. S., y Shewale, M. S. (2018). Development of 12 Channel Temperature Acquisition System for Heat Exchanger Using MAX6675 and Arduino Interface. En *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 119–125. Springer Singapore.
- [13] Ramírez, L. (2014). *Sensores y actuadores aplicaciones con Arduino*. Larousse Grupo Editorial Patria, México.
- [14] Ripperger, S., Gösele, W., Alt, C., y Loewe, T. (2013). *Filtration, 1. Fundamentals*. American Cancer Society.
- [15] rsdelivers (2020). Sensor de Presión Diferencial Montaje en PCB para Aire 10 V dc. [Imagen]. Recuperado el 12/10/2020 de <https://cl.rsdelivers.com/product/nxp/mpx2010dp/sensor-de-presi%3fb3n-diferencial-montaje-en-pcb-para/9227308>.
- [16] SEFAR (2020a). Filtro de tambor rotatorio. [Imagen]. Recuperado el 17/01/2021 de <https://www.sefar.mx/data/docs/es/13190/FS-Equipment-Drum-filter08.jpg?variant=38256&v=1.0>.
- [17] SEFAR (2020b). Filtros de disco rotatorio. [Imagen]. Recuperado el 17/01/2021 de <https://www.sefar.mx/data/docs/es/11168/FS-IF-Equipment-Disc-filter-07.jpg?variant=39780&v=1.0>.
- [18] Shah, T. y Rawal, A. (2016). Textiles in filtration. En *Handbook of Technical Textiles*. Elsevier.

- [19] Smith Cory B, Townsend Ian. (2002). *Testing, Sizing And Specifying Of Filtration Equipment*, volumen 1.
- [20] sparkfun (2020). BMP180 Barometric Pressure Sensor Hookup. [Imagen]. Recuperado el 13/10/2020 de <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf>.
- [21] Tarleton, E. y Wakeman, R. (2007). Filter media. En *Solid/Liquid Separation*, pp. 78–125. Elsevier.
- [22] Tarleton, E. y Wakeman, R. (2016). Solid Liquid Separation – Filtration. En *Mineral Processing Design and Operations*, pp. 507–561. Elsevier.
- [23] TEFSA (2020). Filtros de vacío. [Imagen]. Recuperado el 17/01/2021 de https://gruptefsa.com/filtros_de_vacio/3.jpg.
- [24] Vallejo, W., Diaz-Uribe, C., y Fajardo, C. (2020). Do-it-yourself methodology for calorimeter construction based in Arduino data acquisition device for introductory chemical laboratories. *Heliyon*, 6(3):e03591.
- [25] Wills, B. A. y Finch, J. A. (2016). Dewatering. En *Wills' Mineral Processing Technology*, pp. 417–438. Elsevier.
- [26] Yang, S., Liu, Y., Wu, N., Zhang, Y., Svoronos, S., y Pullammanappallil, P. (2019). Low-cost, Arduino-based, portable device for measurement of methane composition in biogas. *Renewable Energy*, 138:224–229.

Apéndice A

Indicaciones de uso del sistema de pruebas

La operación del sistema de pruebas se divide en dos etapas. La primera de ellas es el uso del sistema electrónico y su comunicación con una computadora, la segunda corresponde al manejo del sistema de filtrado. Este apartado detalla los pasos a seguir para realizar estas acciones.

Uso de los componentes electrónicos y la comunicación arduino-Excel

Para permitir la comunicación entre la tarjeta arduino y una hoja de cálculo en Excel, es necesario descargar los archivos del programa *Parallax Data Acquisition tool (PLX-DAQ)*, estos pueden obtenerse desde la página <https://www.parallax.com/package/plx-daq/>.

Una vez que se ha realizado la descarga, se obtiene un archivo con extensión .ZIP con nombre *PLX-DAQ*. Al descomprimir este archivo, se encontrarán dos archivos .ZIP como se observa en la figura A.0.2. Es necesario descomprimir el archivo nombrado como *plx-daq-release2b.zip*, dentro de este se encuentran una serie de archivos, entre ellos, una

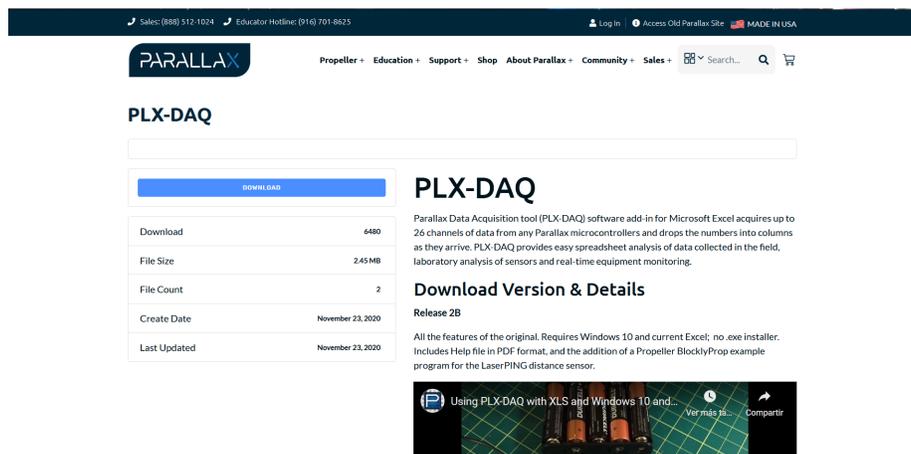


Figura A.0.1: Vista de la página de descarga del complemento *Parallax Data Acquisition tool (PLX-DAQ)*

hoja de cálculo de Excel A.0.3. Esta hoja es el archivo que permitirá la comunicación Arduino-Excel.

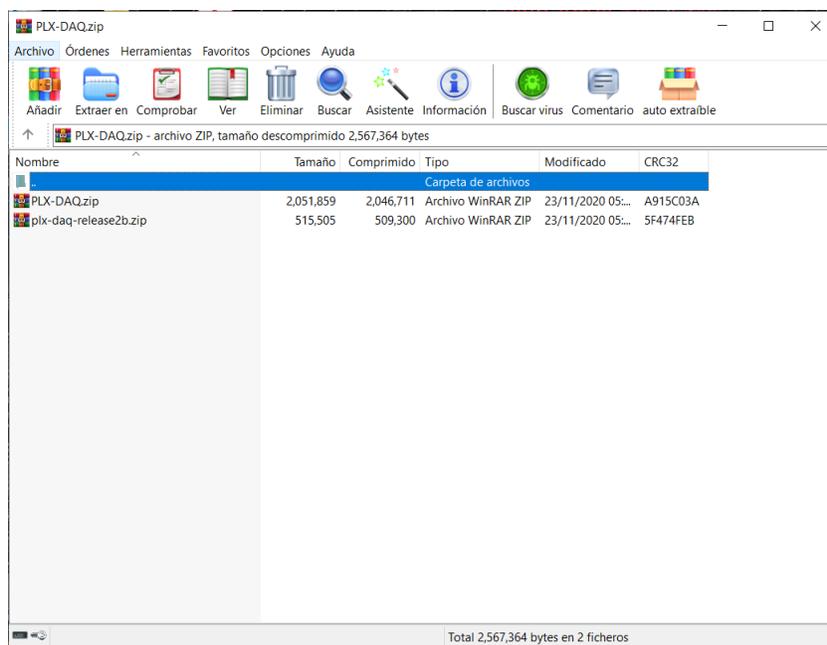


Figura A.0.2: Archivos contenidos en la carpeta PLX-DAQ

Al abrir la hoja de cálculo, esta muestra los elementos que se observan en la figura A.0.4, esta consta de 3 hojas con diferentes funciones, pero solamente la que lleva por nombre *Simple Data* es la que se emplea. una vista del panel verde de la hoja puede observarse en la figura A.0.5. En este panel, en la ventana nombrada como *Port*, se coloca el puerto de comunicación asignado a la tarjeta arduino, si se desconoce el número del puerto,

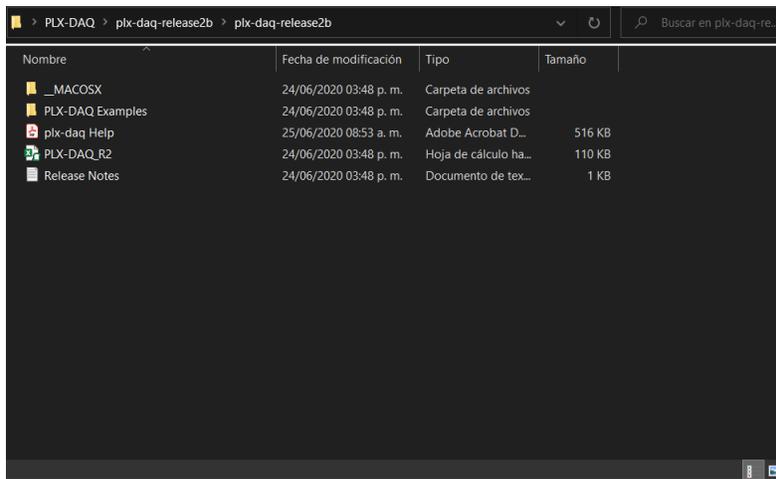


Figura A.0.3: Archivos contenidos en la carpeta plx-daq-release2b.zip

este se puede consultar como se muestra en la figura A.0.6.

En la pestaña *Baud*, se selecciona la velocidad de transferencia de información en bits por segundo (baudio) del monitor serie de la tarjeta arduino. Es importante que se introduzca el puerto de comunicación serial correcto, además de que el baudio coincida con el establecido en el código del programa (9600). Una vez que estos parámetros se hayan introducido de manera correcta, se presiona el botón *Connect*, si todo es correcto, se actualizará la vista de la hoja de cálculo mostrando la que se observa en la figura A.0.7. Para mostrar un gráfico en tiempo real, es necesario seleccionar las columnas B y C para generar el tipo de gráfico deseado.

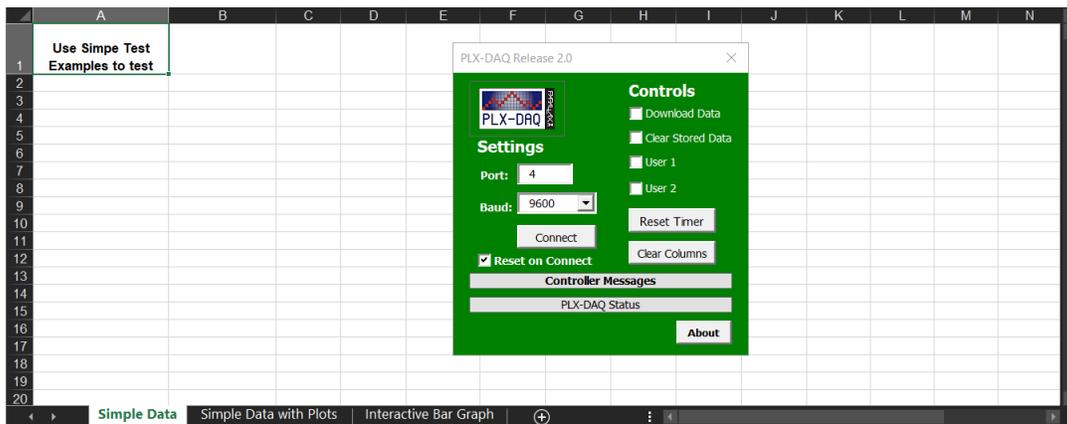


Figura A.0.4: Vista del contenido del archivo PLX-DAQ_R2

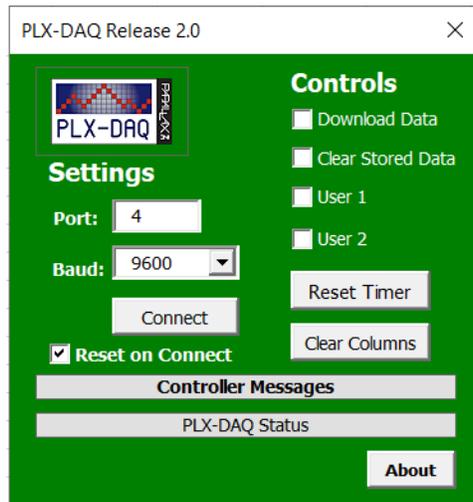


Figura A.0.5: Detalle del panel PLX-DAQ Release 2.0

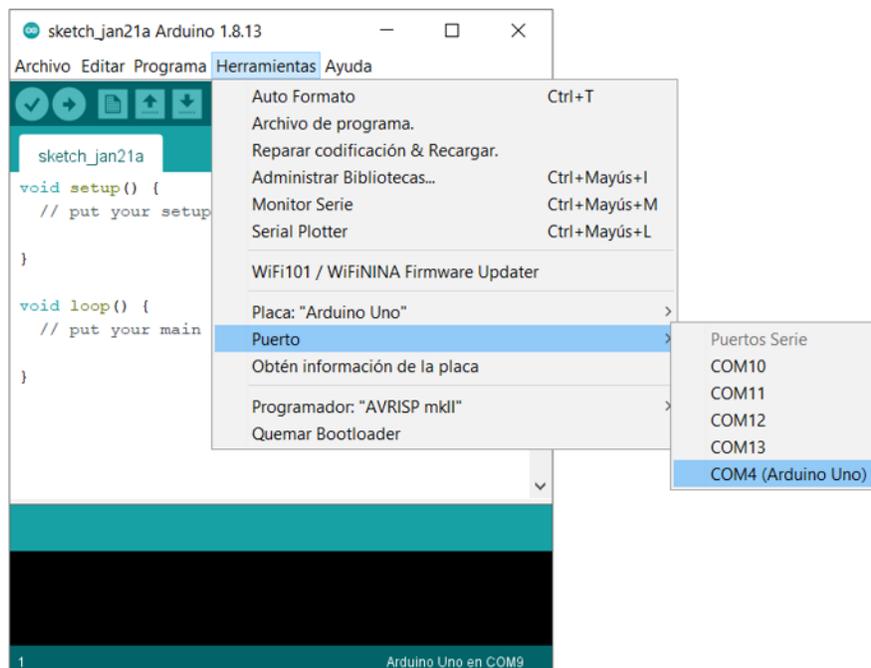


Figura A.0.6: Pasos para encontrar el puerto de comunicación (COM) de la tarjeta arduino en el IDE

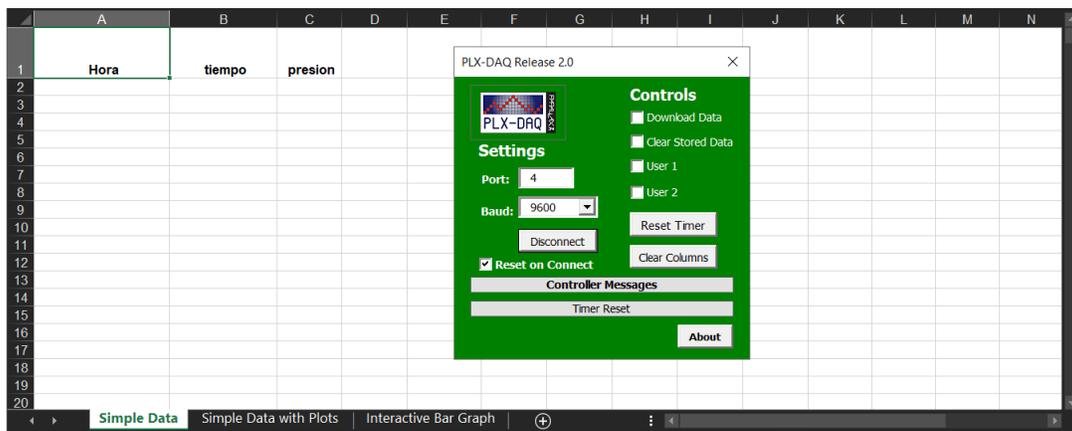


Figura A.0.7: Vista de la hoja de cálculo después de conectar establecer la comunicación con la tarjeta arduino

Uso del sistema de filtrado

Una vez que se tienen todos los componentes electrónicos y se ha verificado que la tarjeta arduino se encuentre conectada a la hoja de cálculo, se procederá a operar el equipo de pruebas.

Como referencia para describir la operación del equipo, se emplea el diagrama que se muestra en la figura A.0.8. Los pasos para la operación se describen a continuación.

1. Verificar que todos los componentes electrónicos se encuentren debidamente conectados y se haya establecido la comunicación entre la tarjeta arduino y la hoja de cálculo.
2. Determinar la concentración en porcentaje de sólidos en la pulpa a filtrar.
3. Verificar que la válvula A se encuentre abierta y, las válvulas B y D se encuentren cerradas.
4. Encender la bomba de vacío y en caso de ser necesario ajustar el nivel de vacío deseado con la válvula B.
5. Colocar el medio filtrante sobre el portafiltro.

6. Colocar los sólidos sobre el medio filtrante y verificar que este se distribuya de manera uniforme.
7. Previo a iniciar la prueba tener listo un cronometro para medir el tiempo de la prueba.
8. Agregar de manera cuidadosa el líquido en el embudo de filtración.
9. Iniciar el registro de los datos presionando el botón amarillo en la tarjeta de pruebas.
10. Abrir completamente y de manera rápida la válvula D.
11. Una vez transcurrido el tiempo de la prueba, se deberá cerrar completamente la válvula D.
12. Detener el registro de los datos oprimiendo el botón rojo.
13. Retirar el líquido remanente que pudiera quedar sobre la torta con ayuda de una pipeta o jeringa.
14. Medir el volumen de filtrado obtenido junto con el que pudiera haber sido retirado con la pipeta.

Apéndice B

Diagramas

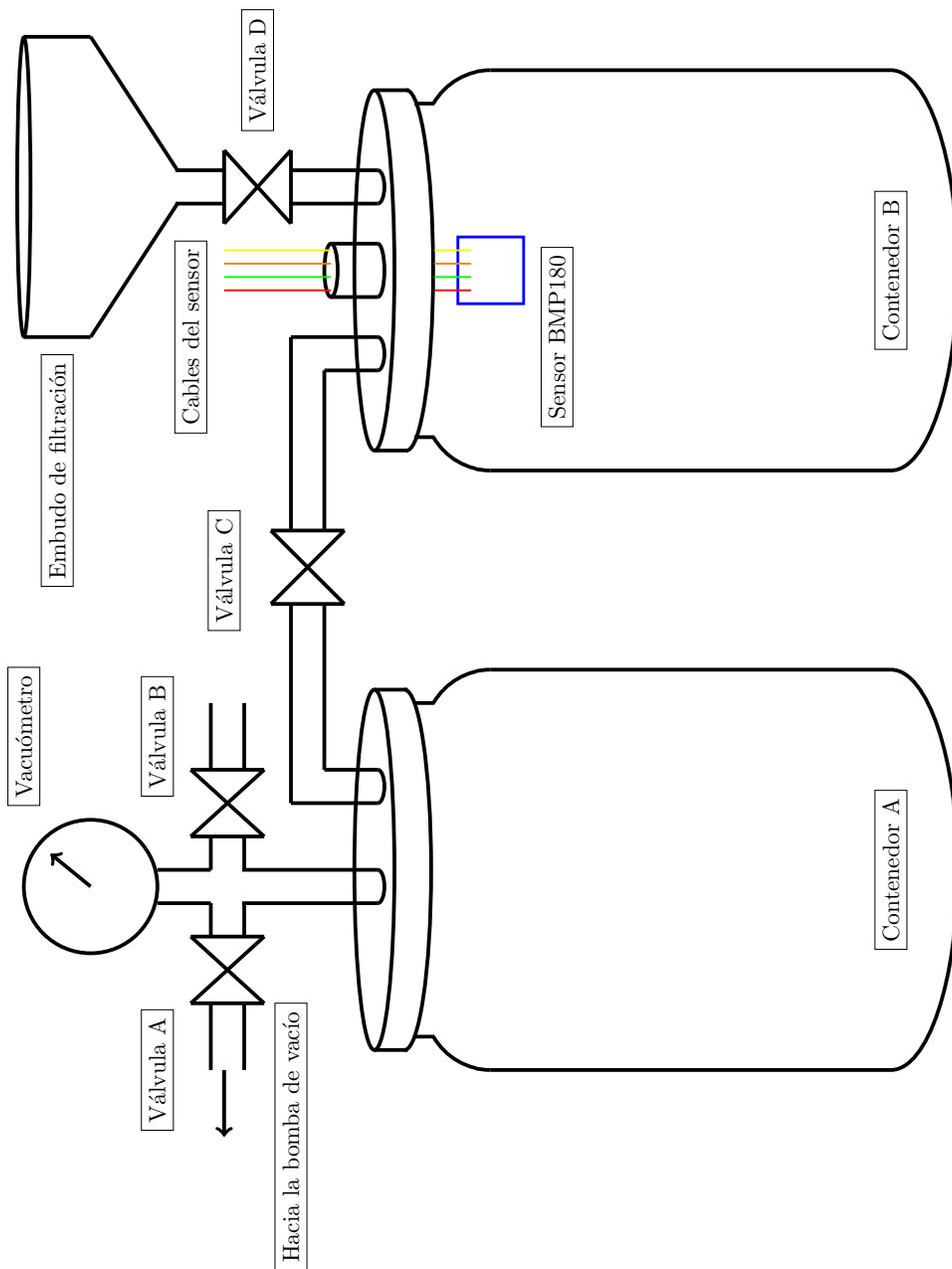
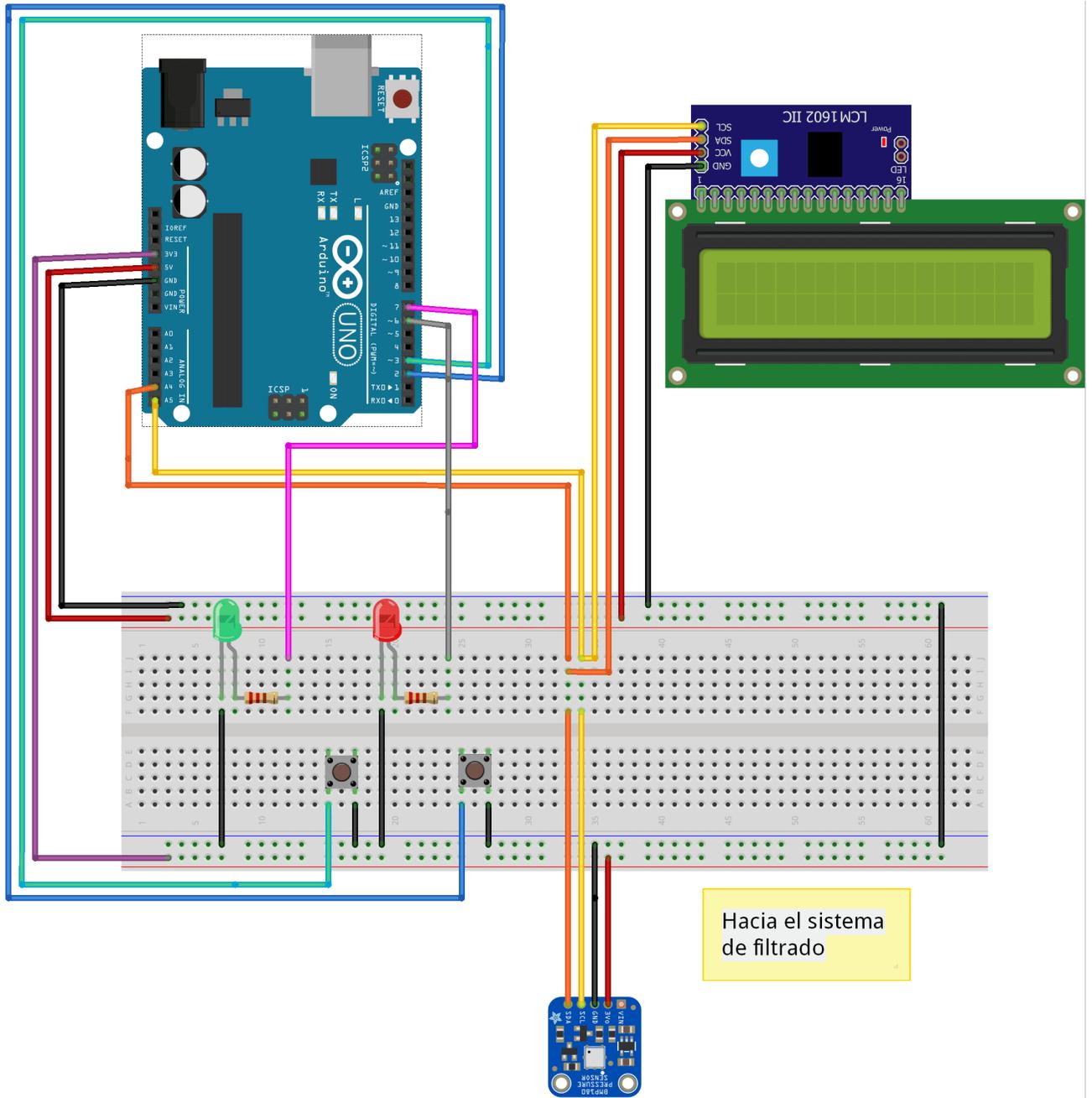


Figura A.0.8: Diagrama del sistema para la evaluación de los medios filtrantes



Made with Fritzing.org

Figura A.0.9: Diagrama de conexiones y componentes electrónicos

Apéndice C

Lista de materiales y costos

Tabla A.1: Lista de los materiales empleados en la construcción del sistema de pruebas. Se muestra el número de piezas empleadas y su costo

Artículo	Costo unitario (MXP)	Piezas empleadas	Costo total (MXP)
Tarjeta Arduino Uno	\$468	1	\$468
Sensor BMP180	\$32	1	\$32
Válvulas Plateadas	\$200	1	\$200
Válvulas de bronce	\$80	2	\$160
Vacuómetro	\$196	1	\$196
Compresor	\$238	1	\$238
Contenedor de bomba	\$99	1	\$99
Contenedor A	\$80	1	\$80
Contenedor B	\$80	1	\$80
Niples	\$15	6	\$90
Campanas	\$15	4	\$60
Espigas	\$15	6	\$90
Manguera	\$10	2	\$20
Protoboard	\$31	1	\$31
Pantalla LCD	\$71	1	\$71
Botones	\$5	2	\$10
LEDS	\$1	2	\$2
Cables dupont	\$17	1	\$17
Embudo	\$10	1	\$10
Tapa de PVC	\$15	1	\$15
TOTAL			\$1954

Apéndice D

Código del programa

```
1 #include <Wire.h>
2 #include <Adafruit_BMP085.h>
3 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
4
5 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2); // Se indica la direccion I2C de la
   pantalla LCD y que se trata de una pantalla de 16x2
6
7
8 int boton_inicio = 2; // Pin del boton amarillo (inicia la lectura de
   datos)
9 int boton_final = 3; // Pin del boton rojo (finaliza la lectura de datos
   )
10 int led_verde = 6; // led verde(indica registro de datos)
11 int led_rojo = 7; // led rojo(indica que no hay registro de datos)
12
13 unsigned long tiempo_lectura = 1000; // intervalo de lectura general (
   sin ejecutar funcion de registro de datos)
14 unsigned long intervalo_lectura = 50; // intervalo de lectura para el
   registro de datos
15 unsigned long tiempo_actual;
16 unsigned long tiempo_bmp;
17 int estado_boton_inicio;
18 int estado_boton_final;
19
20 int estado_anterior_boton_inicio;
21 int estado_anterior_boton_final;
22
23 float presion_inicial;
24 float presion;
25 char p_char[10];
26
27
28 Adafruit_BMP085 bmp;
29
30 void setup() {
31     Serial.begin(9600); // Inicializa el monitor serial
32
33     Serial.println("CLEARDATA"); //limpia los datos previos
34     Serial.println("LABEL, Hora, tiempo, presion"); // string necesario
   para el registro de datos en excel
35     Serial.println("RESETTIMER");
36
37     pinMode(boton_inicio, INPUT_PULLUP); //Habilita el pin asignado al
   boton de inicio de registro de datos en el modo de entrada y activa
   la resistencia Pullup
38     pinMode(boton_final, INPUT_PULLUP); //Habilita el pin asignado al
   boton para finalizar el registro de datos en el modo de entrada y
   activa la resistencia Pullup
39     digitalWrite(boton_inicio,HIGH); // Aplica un estado logico alto en el
   boton de inicio de registro de datos
```

```

40  digitalWrite(boton_final,HIGH); // Aplica un estado logico alto en el
    boton de finalizacion de registro de datos
41
42  pinMode(led_verde, OUTPUT); // Habilita el pin del led verde (registro
    de datos) como un pin de salida
43  pinMode(led_rojo, OUTPUT); // Habilita el pin del led rojo (no hay
    registro de datos) como un pin de salida
44
45
46  estado_anterior_boton_inicio = digitalRead(boton_inicio);
47  estado_anterior_boton_final = digitalRead(boton_final);
48  tiempo_actual = millis();
49
50  inicio_lcd();
51  comprobar_bmp();
52  leds_no_lectura();
53  presion_inicial = bmp.readPressure();
54
55 }
56
57 void loop() {
58
59  if (millis() - tiempo_bmp >= tiempo_lectura){
60    lectura_continua();
61  }
62
63  int estado_actual_boton_inicio = digitalRead(boton_inicio);
64  int estado_actual_boton_final = digitalRead(boton_final);
65
66  if (estado_actual_boton_inicio == LOW && estado_anterior_boton_inicio
    == HIGH ) {
67    while(estado_actual_boton_final == HIGH){
68      registro_presion();
69      estado_actual_boton_final = digitalRead(boton_final);
70    }
71  }
72  Serial.println("Hemos pulsado el boton");
73  registro_presion();
74  }
75
76 void inicio_lcd(){
77  lcd.init();
78  lcd.backlight(); // Activar luz de fondo
79  lcd.clear(); // Borrar LCD
80
81  lcd.setCursor(6,0);
82  lcd.print("UNAM");
83  delay(1500);
84
85  lcd.clear();
86  lcd.setCursor(1,0); // coordenadas LCD (x,y)
87  lcd.print("Facultad"); // Mensaje de inicio
88  lcd.setCursor(5,1);
89  lcd.print("de Quimica");
90  delay(1500);
91  lcd.clear();

```

```
92 }
93
94
95 void comprobar_bmp() {
96
97     if (!bmp.begin()) {
98
99         Serial.println("No se ha detectado un sensor valido (BMP180). Por
100 favor checa las conecciones!");
101         lcd.clear();
102         lcd.setCursor(2,0);          // coordenadas LCD (x,y)
103         lcd.print("BMP180 Fallo");
104         lcd.setCursor(1,1);         // coordenadas LCD (x,y)
105         lcd.print("Revisar cables");
106         delay(3000);
107         while (1) {}
108     } else {
109         Serial.println("Se ha detectado correctamente el sensor BMP185");
110         lcd.clear();
111         lcd.setCursor(6,0);         // coordenadas LCD (x,y)
112         lcd.print("BMP180");
113         lcd.setCursor(2,1);         // coordenadas LCD (x,y)
114         lcd.print("CORRECTO");
115         delay(2000);
116
117         lcd.clear();
118         lcd.setCursor(0,0);         // coordenadas LCD (x,y)
119         lcd.print("Iniciando lectura");
120         lcd.setCursor(2,1);         // coordenadas LCD (x,y)
121         lcd.print("de presion");
122         delay(2000);
123         lcd.clear();
124     }
125 }
126
127 void leer_presion() {
128     presion = bmp.readPressure();
129     presion = presion_inicial - presion;
130     presion = presion / 1000;
131     presion = (0.9508 * presion) + 6.0424;
132 }
133
134 void registro_presion() {
135     leds_lectura();
136     tiempo_actual = 0;
137
138     Serial.println("Voy a leer la presion");
139
140     if (millis() - tiempo_actual >= intervalo_lectura) {
141         presion = bmp.readPressure();
142         presion = presion_inicial - presion;
143         presion = presion / 1000;
144         presion = (0.9508 * presion) + 6.0424;
145         dtostrf(presion, 5, 2, p_char);
146
147         Serial.print("DATA, TIME, TIMER,");
```

```
147     Serial.println(p_char);
148 }
149
150
151
152 lcd.setCursor(4,0);
153 lcd.print(" Presion:");
154 lcd.setCursor(2,1);
155 lcd.print(String(presion , 2) + ("  kPa"));
156
157 leds_no_lectura();
158 }
159
160 void lectura_continua(){
161     leer_presion();
162     Serial.println("lectura de bmp180: " + String(presion) + " kPa");
163
164     lcd.setCursor(4,0);
165     lcd.print(" Presion:");
166     lcd.setCursor(2,1);
167     lcd.print(String(presion , 2) + ("  kPa"));
168     tiempo_bmp = millis();
169 }
170
171
172 void leds_lectura(){
173     digitalWrite(led_rojo , LOW);
174     digitalWrite(led_verde , HIGH);
175 }
176
177 void leds_no_lectura(){
178     digitalWrite(led_rojo , HIGH);
179     digitalWrite(led_verde , LOW);
180 }
```