



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

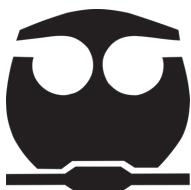
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
METALÚRGICA

ASIGNATURA PROYECTO

PROFESOR: ANTONIO HUERTA CERDÁN

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

ZAVALA HERNÁNDEZ IVAN WENCESLAO



Semestre 2021-1

Índice

1. Introducción	3
1.1. La separación sólido - líquido (filtración) en el beneficio de minerales	4
1.1.1. Equipos de filtrado empleados en el beneficio de minerales	5
1.1.2. Los medios de filtrado	8
1.2. Diseño del sistema de prueba	10
1.3. El proyecto arduino	12
1.3.1. Arduino UNO	12
1.3.2. Descripción de los pines	14
1.3.3. Consideraciones especiales	14
1.3.4. Programación y uso de la placa arduino	14
1.3.5. Shields arduino	15
1.4. Microcontroladores, sensores y transductores	17
1.4.1. Microcontroladores y microprocesadores	17
1.4.2. Sensores y transductores	18
1.4.3. Clasificación de los sensores y transductores	19
1.4.4. Características de los sensores	20
1.5. La presión y sus formas de medirla	21
1.6. Sensores de presión para arduino	22
2. Hipótesis	26
3. Objetivos	26
3.1. Objetivos generales	26
3.2. Objetivos particulares	26
4. Desarrollo experimental	26
4.1. Construcción de la bomba de vacío	26
4.2. Diseño y construcción del sistema de pruebas	29
4.3. Sistema de filtrado y contenedores	29
4.3.1. Componentes electrónicos	29
4.4. Escritura del código para el sistema arduino	29
4.5. Calibración del sensor	30
4.6. Evaluación de los medios filtrantes	30
5. Resultados	31
5.1. Sistema de pruebas	31
5.1.1. Componentes electrónicos	31
5.2. Código del programa	35
5.3. Calibración del sensor	37
5.4. Evaluación de los medios filtrantes	37
5.4.1. Mezclilla	38
5.4.2. Lona	43
5.4.3. Tergal	48
5.4.4. Comparación entre los medios filtrantes	53

6. Análisis de resultados	55
6.1. Sistema de pruebas	55
6.1.1. Sistema de filtrado	55
6.1.2. Componentes electrónicos	55
6.2. Código del programa	55
6.2.1. Datos producidos por el sistema Excel-Arduino	56
6.3. Evaluación de los medios filtrantes	57
6.3.1. Mezclilla	57
6.3.2. Lona	58
6.3.3. Tergal	58
6.3.4. Comparación entre los medios filtrantes	59
7. Conclusiones	59
A. Indicaciones de uso del sistema de pruebas	62
B. Código del programa	67

1. Introducción

La posibilidad de monitorear y adquirir los datos de alguna variable durante el estudio de un proceso, es de vital importancia, ya que, el adecuado tratamiento de esta información conlleva un gran número de ventajas como la posibilidad de realizar un estudio más profundo del proceso y un mejor entendimiento de cómo es afectado por esta variable, o, por ejemplo, es posible emplear y almacenar dichos datos para su posterior aprovechamiento en el desarrollo y validación de modelos que permitan simular estos procesos.

Un ejemplo de un proceso en el cual es necesario llevar a cabo un análisis constante de las variables de operación, es la separación líquido - sólido en el beneficio de minerales; en este proceso la evaluación de este método de separación es fundamental para la selección de los diferentes medios filtrantes, ya que, dependiendo de la etapa de procesamiento que provenga la mena, suelen variar las condiciones de esta, y con ello los diferentes medios filtrantes que pueden ser usados.

A pesar de la importancia que tienen los sistemas de registro y adquisición de datos, no siempre es posible contar con dispositivos de este tipo en los laboratorios, esta ausencia suele estar relacionada con el alto costo de los adquisidores de datos y los equipos de medición, además, algunos instrumentos de medición como los manómetros tipo "de mercurio, contienen sustancias que están prohibidas y pueden dañar la salud del ser humano, sin embargo, en la actualidad existe un proyecto conocido como Arduino, que dispone de una serie de tarjetas de desarrollo que incorporan microcontroladores. Estas tarjetas permiten la operación de diversos sensores de medición y actuadores, todo ello con la posibilidad de comunicación con una computadora. La principal ventaja de estas tarjetas de desarrollo y sensores es su amplia disponibilidad, su bajo costo y la gran comunidad de usuario que dan soporte a este proyecto.

Se propone la construcción de un sistema de medición de presión para evaluar el desempeño de diferentes medios filtrantes, todo esto basado en un sistema que incorpore un sensor de presión acoplado a una tarjeta arduino. Este sistema deberá permitir la evaluación del vacío en el proceso de separación líquido-sólido, además debe ser capaz de registrar los datos del proceso. Este dispositivo deberá de ser de bajo costo y de fácil manejo, permitiendo el registro y almacenamiento de los datos provenientes del sensor, además, estos deberán ser reproducirles.

La razón de proponer un dispositivo que permita monitorear la presión durante la operación de filtrado, es debida a que, en la actualidad en el Laboratorio de Procesamiento de Minerales, del Departamento de Ingeniería Metalúrgica, no se dispone de un sistema de medición de vacío que permita evaluar los diferentes medios filtrantes con los distintos tipos de menas que son procesados en las varias etapas de concentración de minerales.

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

Dentro del proceso de beneficio de minerales, uno de los pasos finales es el proceso de filtración, esta operación tiene como objetivo separar las fases de una mezcla sólido - líquido, empleando una membrana semipermeable que efectúe este trabajo, este elemento, es conocido como medio filtrante o de manera común, como filtro. En esta etapa, para establecer un flujo de filtrado, es necesario aplicar una diferencia de presión, llamada caída de presión, a través del medio filtrante [1].

Para asegurar la óptima operación y resultados de esta etapa, es de gran importancia la elección un medio filtrante adecuado para el tipo de mineral y proceso empleado (continuo o por lotes). Para ello es importante conocer a detalle el método de filtrado empleado y las etapas incluidas en esta operación; las características del mineral (tamaño de partícula y forma) así como las variables involucradas en este proceso.

En la filtración, la separación de las fases se producirá de diferentes formas, dependiendo de la fuerza motriz involucrada, estas pueden ser por gravedad, por vacío (presión negativa), aplicación de vacío y presión de manera combinada, fuerzas centrifugas y gradientes de saturación [1]. Cada una de estas fuerzas motrices, está asociada con un equipo de filtración distinto. De manera análoga, la forma en ocurre la filtración, puede clasificarse en tres clases: filtración a través de la torta, filtración sin formación de torta y la filtración profunda, siendo la primera, la más común en el procesamiento de minerales [2].

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 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 [3].

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[1].

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 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

Tabla 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

capacidad del filtro y consideraciones finales sobre los productos de la filtración; pero, además, existen variables de operación que repercuten en este proceso. En la tabla 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 manera. En general los diseños de 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, ya sea de manera continua o por lotes. En la figura 1.1, se muestra una clasificación de los procesos de filtración y los equipos empleados en cada uno de ellos.

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, podemos observar que predominan los equipos que operan, ya sea empleando presión o vacío. Los del primer tipo, han ganado popularidad en comparación con los de vacío, debido a distintos 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 $30 \mu\text{m}$ [2]. Otra de sus ventajas es su capacidad para generar tortas con hasta 8 % de humedad [1]. Sin embargo, presentan la desventaja de generalmente operar de manera intermitente. A pesar de estas ventajas, los equipos que operan con vacío suelen contar con diseño y operación más simple, pero suelen verse limitados para alcanzar ciertos rangos de vacío en operaciones a gran altitud.

Filtros de tambor rotatorio Este filtro consiste en un tambor horizontal que opera de manera continua. Por lo general un tercio del tambor se encuentra sumergido en el tanque que contiene la pulpa, la cual se mantiene en suspensión con el uso de agitado-

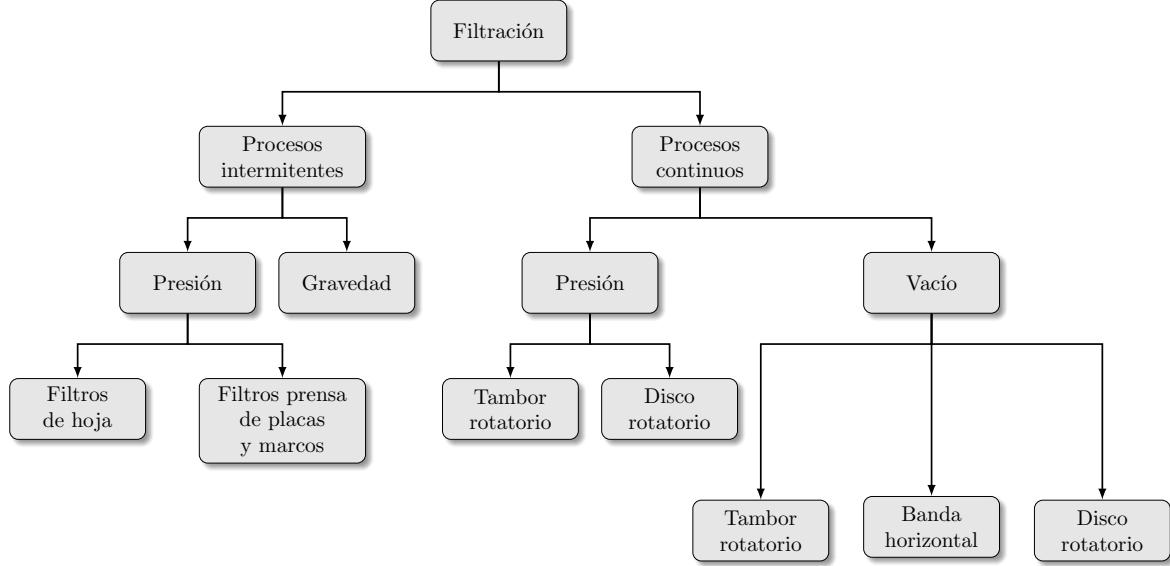


Figura 1.1: Clasificación de los procesos de filtración [3]

res. El medio filtrante se encuentra cubriendo toda la superficie del tambor. La forma mediante la cual se realiza la filtración es mediante la succión de la pulpa a través de los compartimientos del tambor. Cada uno de estos compartimientos del tambor se encuentra conectado a un sistema de válvulas conectadas a las líneas de vacío, aire comprimido y agua [3]. EL tambor suele girar a baja velocidad generalmente en el rango de 0.1 a 03 revoluciones por minuto, y puede llegar a operar hasta 3 revoluciones por minuto para materiales de filtrado rápido [2].

El ciclo normal de operaciones consiste en filtración, secado y descarga, pero es posible introducir otras operaciones en el ciclo básico, como lavado de tortas y limpieza de los filtros.

La descarga de la torta suele variar en función del material que se está filtrando. El método más común consiste en el uso de cuchillas que retiran la torta a medida que el tambor va girando. Es común encontrar otros métodos de descarga como bandas de descarga continua, o 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. 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, esta 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.

Estos filtros 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.

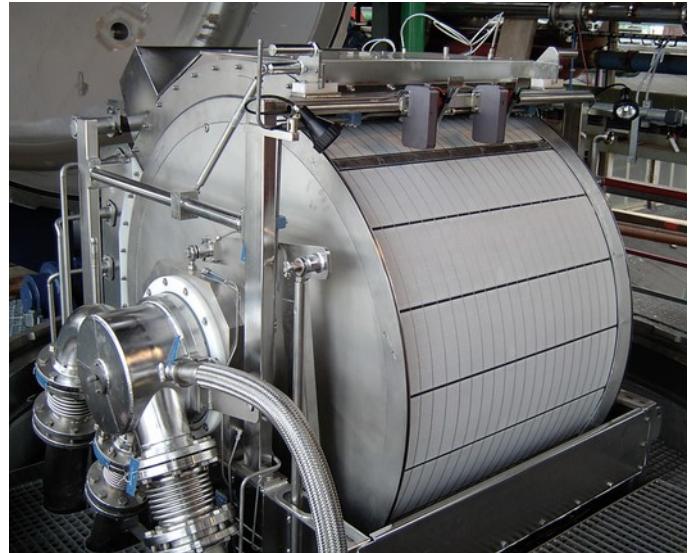


Figura 1.2: Filtro de tambor rotatorio [4]



Figura 1.3: Filtro de tambor rotatorio [5]



Figura 1.4: Filtro de banda al vacío [6]

Filtros de banda Este tipo de filtros, tienen la forma de una cinta continua de acero inoxidable, generalmente recubierta con un revestimiento de goma, sobre la cual se coloca el medio de filtrado. 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. La caja de vacío 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 [3]. Presentan la ventaja de poder elegir la duración de las etapas del ciclo de filtrado. Con este tipo de equipos es posible recuperarse hasta el 80 % del agua de los relaves mineros [1].

1.1.2. 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. De manera más exacta, 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 [7], 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 [8].

Es posible encontrar diversas formas de clasificar los medios filtrantes, estas incluyen propiedades químicas y mecánicas, por ejemplo, en función de su rigidez y su capacidad de retención de partículas. Otra manera de clasificarlos es en función de sus propiedades, en esta clasificación, se encuentran tres clases, propiedades orientadas a la maquinaria, propiedades orientadas a la aplicación y propiedades específicas de la filtración [7].

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 habilidad 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 reusó 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, principalmente debido a su bajo costo inicial y disponibilidad en una amplia variedad de tejidos.

En la filtración dentro del beneficio de minerales, es común encontrar medios filtrantes del tipo textil, generalmente, las características de construcción y filtración de una tela filtrante están determinadas por el tipo de hilo, el tejido o las propiedades de construcción y el acabado aplicado a la tela [8]. Por ejemplo, dentro del tipo de hilo es posible encontrar cuatro tipos diferentes, monofilamentos, multifilamentos, hilados de fibra e hilos de cinta fibrilada. 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 pren-

sa, pequeños filtros de banda horizontal, de disco y tambor rotatorio. Contrario a los monofilamentos, los multifilamentos 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 anterior.

Otra característica que afecta las propiedades de los medios filtrantes es el tipo de tejido con el que fueron construidos, tradicionalmente existen tres tipos de tejido, el liso, el de sarga y el satén. De manera general, puede decirse que, los tejidos lisos producen estructuras rígidas y ajustadas y proporcionan altas eficiencias de filtración. Los tejidos de sarga 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 óptimos o no 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 [7].

1.2. Diseño del sistema de prueba

En el diseño del equipo de prueba para evaluar los medios filtrantes se encontraron dos sistemas diferentes, ambos diseñados para pruebas de filtración al vacío. La diferencia principal entre ellos es la posición en la que se encuentra el embudo y que uno de ellos cuenta con un depósito con la pulpa. En la figura 1.5, se presenta el sistema en el cual el embudo se encuentra invertido, por otro lado, en la figura 1.6, se muestra el equipo en el cual el embudo se encuentra en la posición típica para realizar filtraciones, además, se le ha acoplado una probeta graduada para realizar la lectura del volumen de líquido filtrado, también se acopla un sistema de válvulas, la válvula marcada como B, tiene como objetivo regular la presión de vacío requerida, esto debe realizarse manteniendo la válvula A cerrada. En este tipo de sistema, el autor hace una serie de recomendaciones como el uso de un embudo con fondo poroso sinterizado en lugar de un embudo Buchner cerámico con fondo perforado y de preferencia, trabajar con una presión de vacío constante.

Sin importar cual sea el equipo empleado para obtener información del medio filtrante, se puede seguir una serie de pasos generales [9] como los que se describen a continuación, es importante resaltar que estos pueden ser modificados o adaptados al sistema que se esté empleando.

1. Determinar la concentración de sólidos en peso de la muestra antes de realizar las pruebas.
2. En caso de que el sistema cuente con válvulas, realizar el ajuste de la presión de vacío hasta el nivel requerido. Esto puede realizarse con un sistema como el

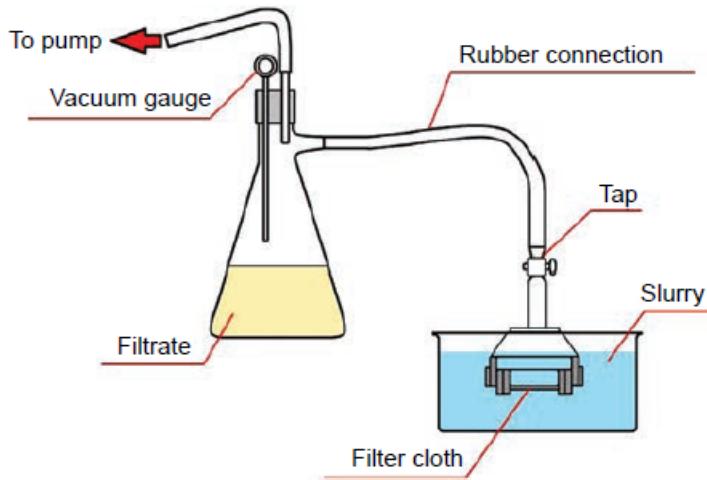


Figura 1.5: Sistema para la evaluación de medios filtrantes con embudo invertido y depósito de pulpa [2]

mostrado en la figura 1.6.

3. Se debe verter la muestra bien agitada en el embudo que contiene el material filtrante y abrir la válvula que conecta con la línea de vacío, hasta alcanzar el vacío previamente establecido. El autor recomienda que, de ser posible, no se debe verter la muestra directamente sobre el filtro. En su lugar se sugiere el uso de un alimentador colocado a dos o tres centímetros por encima del filtro. se debe procurar que el dispensador distribuya de manera homogénea la muestra, con el fin de generar un espesor uniforme.
4. El monitoreo de la prueba de filtración se debe realizar registrando el volumen del filtrado a diferentes intervalos de tiempo. El autor menciona que estos intervalos podrían no ser constantes.
5. Si la velocidad de formación de la torta es muy lenta, pueden ser empleados floculantes y en caso que el flujo del filtrado sea muy lento, se pueden emplear cilindros de medición más pequeños.
6. Si es posible, se debe medir el espesor de la torta.
7. Remover la mayor cantidad como sea posible de la torta y pesarla; secarla y pesarla nuevamente. Para evitar pérdidas de la muestra, previo a la prueba, se puede pesar el filtro seco.

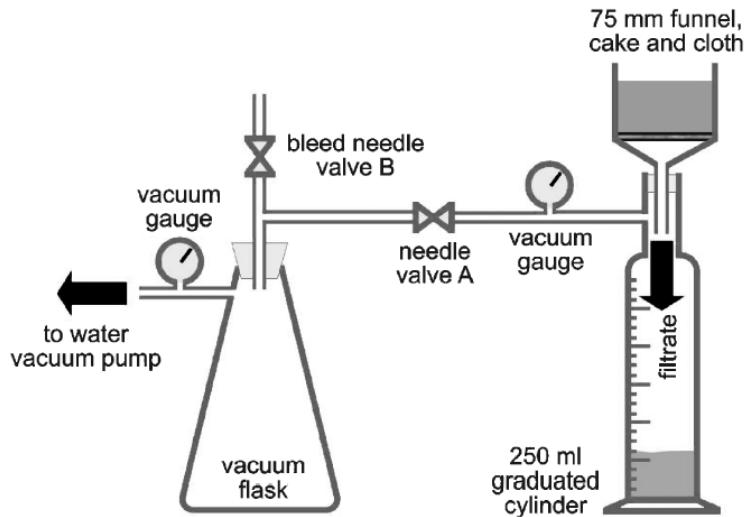


Figura 1.6: Sistema para la evaluación de medios filtrantes [9]

1.3. El proyecto arduino

Arduino es un proyecto basado en placas de desarrollo y un entorno de programación integrado (IDE); las placas incorporan microcontroladores que permiten el uso de sensores, actuadores y tarjetas de expansión, a través de un sistema de entradas y salidas (pines) analógicas y digitales, además, están equipadas con un sistema de conexión serial USB, que permite la comunicación con una computadora. Este sistema tiene la ventaja de ser un proyecto de código abierto (open source) de hardware libre, esta característica hace que sea de libre distribución y utilización. Este proyecto cuenta con una variedad de placas, estas se diferencian entre sí por diversos aspectos como su microcontrolador, capacidad de memoria (SRAM, RAM y EEPROM), número y tipo de pines que incorporan, así como las características eléctricas de operación. Una de sus placas con más amplia difusión es la Arduino UNO, la cual debe su popularidad a su bajo costo, amplias características de operación y al soporte dado por una amplia comunidad de usuarios.

1.3.1. Arduino UNO

La placa Arduino UNO, 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, el cual, se encuentra conectado a 16 pines digitales de entrada y salida (E/S o I/O), 6 de ellos cuentan con salida de modulación por ancho de pulsos (PMW, por sus siglas en inglés), y a 6 pines de entrada analógicos. Estos 20 pines permiten el uso de una variedad de sensores y actuadores, para emplearlos en una variedad de aplicaciones. La tabla 2 muestra una descripción más amplia de las características de esta placa.

Tabla 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 el gestor de arranque)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Velocidad de reloj	16 MHz
LED integrado (BUILTIN)	pin 13



Figura 1.7: Placa Arduino UNO [10]

1.3.2. Descripción de los pines

Como se menciona en la tabla 2, la placa arduino UNO cuenta con 20 pines de entrada y salida 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 \sim) 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 V / 1024). Además, los pines analógicos 4 y 5 pueden emplearse para comunicación mediante el protocolo I2C, mediante la librería WIRE, asignando el pin 4 a la conexión SDA (salida de datos) y al pin 5 la salida SCL (salida de reloj).

1.3.3. Consideraciones especiales

Existen aspectos de esta placa a los que hay que poner especial atención, como son el voltaje necesario para su operación; el fabricante menciona que, en 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 volt. 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. Si la placa se alimenta con valores mayores a 12 V, el regulador de voltaje podría sobrecalentarse y dañarse. Para alimentar la Arduino uno, se disponen de diferentes conexiones, el conector USB, el plug de alimentación (2.1 mm, con centro positivo) y el pin de voltaje de entrada (Vin), 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 se recomienda alimentar la placa de esta manera.

1.3.4. 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. Para realizar este paso, es necesario conectar la placa al entorno de desarrollo, a través de una computadora empleando el puerto USB tipo B. Un programa de arduino puede dividirse en 3 partes principales, las funciones, las variables y constantes y su estructura.

La figura 1.8, 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 los modos de trabajo de los pines. La segunda función, ejecutara 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 el lenguaje *C++*.

Al programar una placa arduino, suelen emplearse una serie de comandos 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 podremos hacer uso de la página de arduino <https://www.arduino.cc/reference/en/>.

1.3.5. Shields arduino

Aunado a las funcionalidades de software que pueden implementarse en una placa arduino, existe la posibilidad de extender sus capacidades mediante complementos de hardware, mejor conocidos como shields. Estos dispositivos son tarjetas que se unen por la parte superior de las tarjetas arduino, manteniendo la posibilidad de seguir empleando los pines de entrada y salida. Estas extensiones amplían las funciones de un arduino. Dentro de la página oficial del proyecto arduino es posible encontrar algunas shields con funcionalidades que permiten la comunicación inalámbrica entre tarjetas arduino (Xbee) o el control de motores de corriente continua, no obstante, en el mercado existe una gama completa de shields con diferentes propósitos, por ejemplo aquellas que permiten la conexión a internet mediante un cable ethernet o mediante una conexión inalámbrica, shields para la conexión de pantallas LCD, la disponibilidad es gigantesca y para más detalle es posible consultar la lista que presenta el proyecto arduino en su página de internet [11] (<https://playground.arduino.cc/Main/SimilarBoards/#goShie>); a pesar de esta gran lista, no es motivo de sorpresa encontrar shields no listadas, ya

```

Blink Arduino 1.8.13
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
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
}

```

1 Arduino Uno en COM9

Figura 1.8: Ejemplo típico de programación en el IDE de arduino

que cualquier persona puede diseñar e implementar una extensión necesaria para una aplicación específica.

En definitiva, las características del proyecto arduino (hardware libre) y en especial las de la placa UNO, han 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. La variedad de sensores disponibles en el mercado incluye los 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 controlados con una placa arduino. Existen diversos artículos que muestran la implementación de este tipo de sistemas empleando placas arduino, 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 [13]; la construcción de un calorímetro para su uso en laboratorios de química básica [14], o la automatización de un horno de tratamientos térmicos [15]. Las áreas de aplicación son enormes y las aplicaciones numerosas. Un aspecto importante a destacar es que en todos estos trabajos resaltan el bajo costo en comparación con equipos comerciales, la facilidad de construcción y una alta precisión de las mediciones.

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 baja capaci-

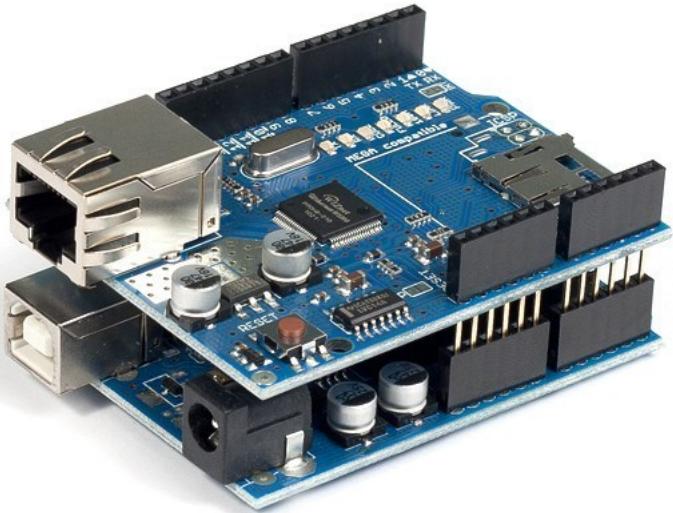


Figura 1.9: Vista de un ethernet shield conectada a una placa arduino [11]

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

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

1.4. Microcontroladores, sensores y transductores

Ya se han revisado a fondo las características y el funcionamiento de una placa arduino. Es claro que para aprovechar su potencial es necesario conocer el área de aplicación y los principios de funcionamiento del microcontrolador y sensores a utilizar.

1.4.1. Microcontroladores y microprocesadores

Como ya se ha mencionado antes, las placas arduino se basan en el uso de un microcontrolador programable a través de su IDE. En este punto es importante establecer que es un microcontrolador, cuáles son sus funciones y como se diferencia de circuitos similares como un microprocesador. El primero de estos se puede definir como: un circuito integrado que se aloja dentro del componente que lo utiliza para realizar las operaciones necesarias y que puede realizar una tarea en particular de forma cíclica, además, contiene un microprocesador, unidades de memoria e interfaces de entrada-salida, sistemas de conversión de analógico-digital (ADC), modulación de ancho de pulso (PWM) y varios

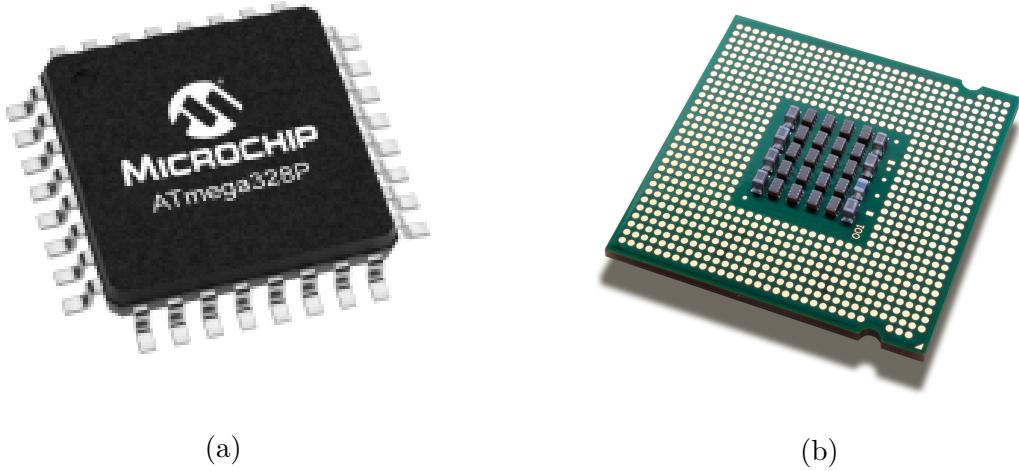


Figura 1.10: a) Microcontrolador ATmega328P [17] b) Vista general de un microprocesador

módulos de control y comunicación [16].

A diferencia de los microcontroladores, los microprocesadores son: circuitos integrados programables que pueden realizar operaciones matemáticas y lógicas en entradas digitales. Básicamente consisten en un solo chip que contiene las áreas de registro requeridas para las operaciones, así como las unidades de entrada/salida y las rutas de datos que proporcionan la comunicación entre ellas, así como una estructura basada en transistores [16]. De manera general puede establecerse una diferencia principal entre estos dos dispositivos, el microcontrolador está diseñado para efectuar una sola tarea de manera cíclica, en contraparte, el microprocesador puede realizar múltiples operaciones lógicas o matemáticas y, además, tiene la capacidad de transmitirlas a un microcontrolador.

1.4.2. Sensores y transductores

De manera más exacta, una tarjeta arduino incorpora un microcontrolador, el cual puede ser usado para operar, mediante los pines de E/S, una serie de sensores y actuadores. Un sensor es un dispositivo que recibe y responde a una señal o estímulo, esta definición puede ser tan amplia que podría abarcar casi todo, desde un ojo humano hasta el gatillo de una pistola [18]. También es posible definir de manera general, a los sensores como: dispositivos que permiten cuantificar una variable física mientras que a los actuadores como los dispositivos que: a partir de la variable física medida por el sensor, tienen la tarea de realizar una acción, como consecuencia de haber procesado la magnitud que tendrá dicha variable [19]. De estas dos ideas se desprende el concepto de transductor, estos son dispositivos que tienen como función transformar la señal generada por el sensor en una señal de otro tipo, que puede ser leída o mostrada por algún 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 podría transformar el flujo de algún líquido o la presión de un gas en el movimiento mecánico de algún indicador, por ejemplo, una aguja.

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, además, este último puede clasificarse según la función que realice, dicho de otra manera, si el transductor forma parte de un sistema de lectura de datos, se le considera de entrada, mientras que si este forma parte de algún sistema de actuación, se le considera de salida. Otra forma para distinguir a un sensor de un transductor es que el primero se encarga de convertir cualquier tipo de energía en energía, generalmente eléctrica, en cambio, el segundo convierte cualquier tipo de energía en otro diferente [18].

1.4.3. Clasificación de los sensores y transductores

A la hora de clasificar a los sensores y transductores, se suelen establecer diferentes criterios, ya sea en función de su aplicación, o su forma de operación. En el caso de los sensores, suelen categorizarse como activos o pasivos, según sus necesidades eléctricas, los primeros son 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. También suelen separarse dependiendo de la referencia que emplean, ya sea absoluta o relativa. Un sensor absoluto detecta un estímulo en referencia a una escala física absoluta que es independiente de las condiciones de medición, mientras que un sensor relativo produce una señal que se relaciona con algún caso especial [18]. Un ejemplo de ello son los sensores de presión. La presión absoluta utiliza el cero absoluto como presión de referencia, medida en relación con un vacío total (espacio exterior). Es posible encontrarse también clasificaciones basadas en las especificaciones de los sensores, los materiales empleados, las variables que detectan, los fenómenos de conversión y los campos de aplicación.

Clasificación de los transductores Al clasificar los principios mediante los que operan los transductores, es posible encontrarse con diversas formas de hacerlo, por ejemplo, a partir de su principio de transducción [19]. Adicionalmente los transductores eléctricos pueden clasificarse como pasivos, si es necesario una alimentación externa al sensor; o activos, si el sensor genera por sí mismo una fuerza electromotriz. Al enlistar los transductores por su principio transductivo, podemos encontrar los del tipo piezoresistivos, capacitivos, piezoeléctricos, ultrasónicos, magnéticos, térmicos, fotoeléctricos, quimioeléctricos y resistivos.

Sensores de presión Para fines de este trabajo haremos énfasis en los sensores y principios de transducción empleados en mediciones de presión. Si bien, es posible encontrar sensores del tipo mecánico (manómetros), actualmente estos sensores suelen ser del tipo eléctrico y emplean transductores de voltaje que miden la fuerza aplicada en un área determinada y generan 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. Generalmente, 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 cambiara 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 [19].

Otra 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 generalmente emplea materiales del tipo piezoresistivo. Las galgas extensométricas suelen ordenarse en configuraciones tipo puente y según sea su arreglo pueden clasificarse como: galgas metálicas, galgas basadas en películas delgadas, galgas basadas en microelectrónica y galgas de alambre tenso [19]. 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.

Gracias a la característica de un material piezoeléctrico de generar un voltaje a partir de un esfuerzo mecánico, es posible emplear esta propiedad en sensores 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 generen un voltaje demasiado bajo.

Existe otro tipo de sensores que incorporan una amplia gama de elementos, además de incorporar al dispositivo sensor, incorporan un acondicionador de señal, un convertidor, dispositivos de memoria y un microcontrolador. Estos dispositivos se conocen como Sensores inteligentes. El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE por sus siglas en inglés) define a un sensor inteligente como: aquel sensor que provee funciones más allá de las necesarias para generar una correcta representación de una cantidad censada o controlada. Esta función típicamente simplifica la integración del transductor en aplicaciones en un ambiente de red [19].

1.4.4. Características de los sensores

Existen características propias de cada sensor que los diferencian de los demás, estas son independientes de la variable física que miden o de su principio de transducción. Estas diferencias se denominan estáticas, en caso de variar con el tiempo; entre ellas podemos encontrar al intervalo de medición, intervalo dinámico, sensibilidad, precisión, exactitud, resolución; mientras que, aquellas que varían con el tiempo se denominan dinámicas, algunos ejemplos son: velocidad de respuesta, respuesta en frecuencia y estabilidad.

Algunas características dinámicas poseemos definirías de la siguiente manera:

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 de detecta el sensor

Resolución: De manera simple, nos indica cual 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 referencia. 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.

Algunas características dinámicas pueden definirse como:

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. La presión y sus formas de medirla

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

La unidad 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 $^{\circ}\text{C}$ y una aceleración gravitacional normal. 1 Pa puede convertirse en otras unidades mediante el uso de las siguientes relaciones:

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

Un Pa es una presión bastante baja. Para una estimación práctica, es útil recordar que 0.1 mm H_2O es aproximadamente igual a 1 Pa. En la industria, a menudo se usa otra unidad de presión, se define como la presión ejercida por una columna de mercurio de 1 mm a 0 $^{\circ}\text{C}$ a presión atmosférica normal y gravedad normal. Esta unidad lleva el nombre de Torricelli y se expresa como Torr: 1 Torr = 1 mmHg

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.

1.6. Sensores de presión para arduino

En función de lo planteado a lo largo de esta sección, en este punto resulta más claro abordar los sensores que existen en el mercado para medir la presión en conjunto con una placa arduino. A continuación, se muestra un análisis general de los dispositivos más conocidos.

BMP180 El BMP 180 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 hoja de datos (datasheet) la empresa BOSCH destaca su ultra bajo consumo de

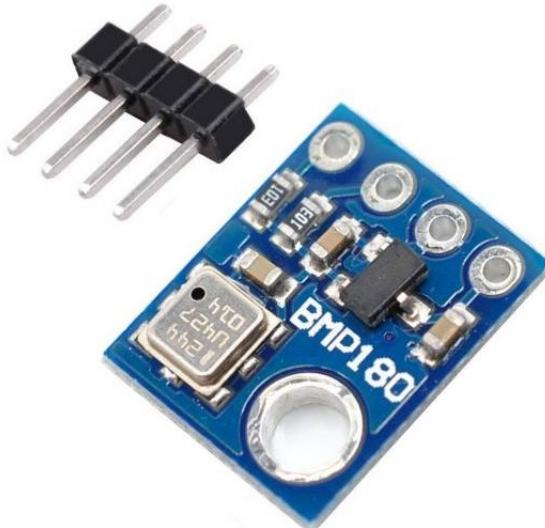


Figura 1.11: Sensor BMP180 [20]

Tabla 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	-	μ A
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

energía, su alta precisión y linealidad, y la conexión mediante el protocolo I2C. La tabla 3, detalla algunas de las características de operación del BMP180.

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

Algunas recomendaciones dadas por distribuidores para este sensor son:

- 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 exponga 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



Figura 1.12: Sensor MPX2010DP [21]

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 (según Sparkfun).

MPX2010DP La serie de transductores piezoresistivos MPX2010 son sensores integrados de silicio de alta precisión que miden presión de aire. Provee una salida de voltaje analógico lineal que varía proporcionalmente con la presión aplicada. Esta serie de sensores es posible encontrarlos para mediciones diferenciales y manométricas. En la tabla 4 se resumen algunas de las características técnicas de este sensor.

Tabla 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 este solamente suministra 5 V.



Figura 1.13: Sensor XGZP6867 [22]

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.

2. Hipótesis

Es posible diseñar y construir un sistema que permita medir el vacío a través de un dispositivo que incorpore una tarjeta arduino y un sensor de presión, acoplados a un ordenador, para su posterior aplicación en la evaluación de medios filtrantes.

3. Objetivos

3.1. Objetivos generales

- Construir un sistema de medición de vacío para la evaluación de diferentes medios filtrantes, empleando una tarjeta de desarrollo arduino acoplando un elemento de medición (sensor) de bajo costo.
- Desarrollar el programa que permita interactuar la comunicación serial entre el computador y el sistema arduino con sensor para la variable en estudio.
- Evaluar diferentes medios filtrantes con el sistema desarrollado

3.2. Objetivos particulares

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

4. Desarrollo experimental

El desarrollo de este proyecto consistió 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 4.1 se muestra un diagrama de flujo con los pasos generales seguidos a lo largo del proyecto. Más adelante, se detallan algunos de estos pasos.

4.1. 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 4.3a), la primera de ellas para permitir 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

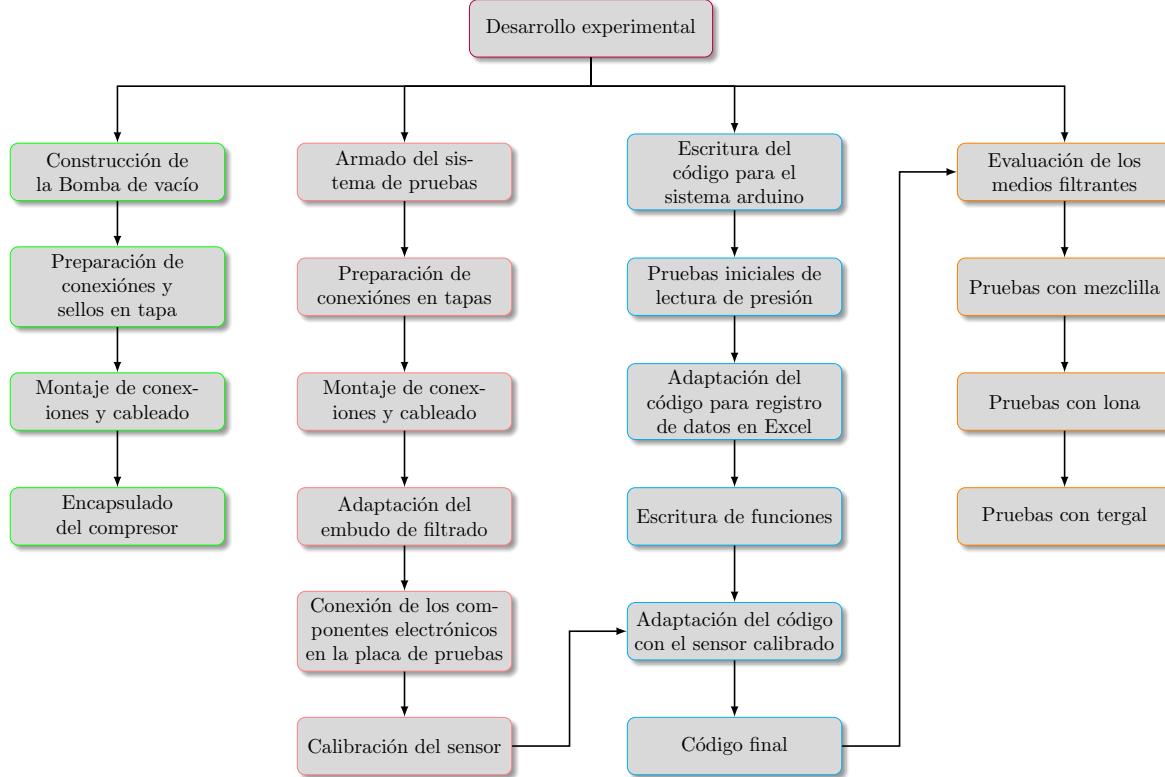


Figura 4.1: Diagrama de flujo del desarrollo experimental del proyecto

para permitir la conexión de alguna manguera. Cada conexión fue soldada a la tapa para evitar alguna filtración de aire.

Debido a que la tapa metálica del contenedor de vidrio no contaba con algún sello para prevenir fugas, se decidió fabricar y adaptar uno a partir de una mezcla de silicona para ventanas y fécula de maíz, esta mezcla permite manipular el silicona de manera más fácil, además de acortar el tiempo de curado del silicona, logrando que sea más sencillo moldearlo y adaptarlo a la tapa (figura 4.3b).

El compresor de aire se montó sobre una base de madera (figura 4.4a) adherida al fondo del contenedor, con el propósito de evitar que, debido al movimiento y vibración del motor, este golpeara con el contenedor de vidrio. También, se añadieron unas terminales tipo faston en los cables del motor, para facilitar el mantenimiento de la bomba. Es importante señalar que el compresor de aire requiere de una fuente de alimentación de 12 V capaz de proporcionar 10 A.



(a)

(b)

Figura 4.2: (a) Compresor de aire con carcasa (b) Compresor sin carcasa empleado para la fabricación de la bomba de vacío



(a)

(b)

Figura 4.3: (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 silicon



(a)



(b)

Figura 4.4: (a) Compresor de aire montado sobre la base de madera (b) Bomba de vacío terminada

4.2. 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.

4.3. Sistema de filtrado y contenedores

Se emplearon dos contenedores de vidrio con tapa metálica. El primero de estos, funciona como una trampa de vacío, mientras que el otro sirve de receptor del filtrado. En cada una de las tapas se realizaron perforaciones para realizar 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.

4.3.1. Componentes electrónicos

Se empleó una tarjeta arduino UNO, a la cual se le conectó un sensor de presión BMP180. Adicionalmente, y 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. También se emplearon dos botones, para ejecutar funciones del programa, así como dos leds para indicar el estado 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.

4.4. Escritura del código para el sistema arduino

La escritura del código del programa se realizó empleando el IDE de arduino. Dentro del código se hizo uso de algunas librerías para facilitar 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*.

4.5. 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. En la figura 5.11 se muestra la gráfica de calibración y la ecuación obtenida.

4.6. 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, a partir de un mineral titanífero de una playa mexicana.

Se cortaron círculos de 10.1 cm de cada medio filtrante. Las pruebas de filtración se realizaron a dos, tres, cuatro y cinco segundos, cada prueba se realizó cinco veces. Este procedimiento consistió en los siguientes pasos:

1. Se pesaron 200 gramos de mineral y 200 ml de agua, respectivamente, asumiendo 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, procurando que este se distribuyera de manera uniforme.
4. Con ayuda de un embudo se agregó el agua sobre el mineral. Antes de adicionar el agua es importante verificar que la válvula D, se encuentre 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.
7. Se retiró la torta del portafiltro y se midió el filtrado.

5. Resultados

5.1. Sistema de pruebas

En la figura 5.1, se muestra un diagrama general de las partes que componen este dispositivo. Todas los aditamentos colocados en las tapas, se soldaron, con la finalidad de evitar fugas. También se detallan las conexiones y los dispositivos empleados en conjunto con la tarjeta arduino. En las figuras 5.2a Y 5.2b, se observa a detalle la disposición de los elementos colocados en los contenedores A y B, respectivamente. El arreglo final del equipo de pruebas se muestra en la figura 5.3, en esta última, se observa la tarjeta arduino junto con la placa de pruebas y los componentes electrónicos, además de la bomba de vacío. En la figura 5.4a se observa de manera más clara el resultado final de la adaptación del embudo de filtración y un detalle del portafiltro, puede observarse en la figura 5.4b.

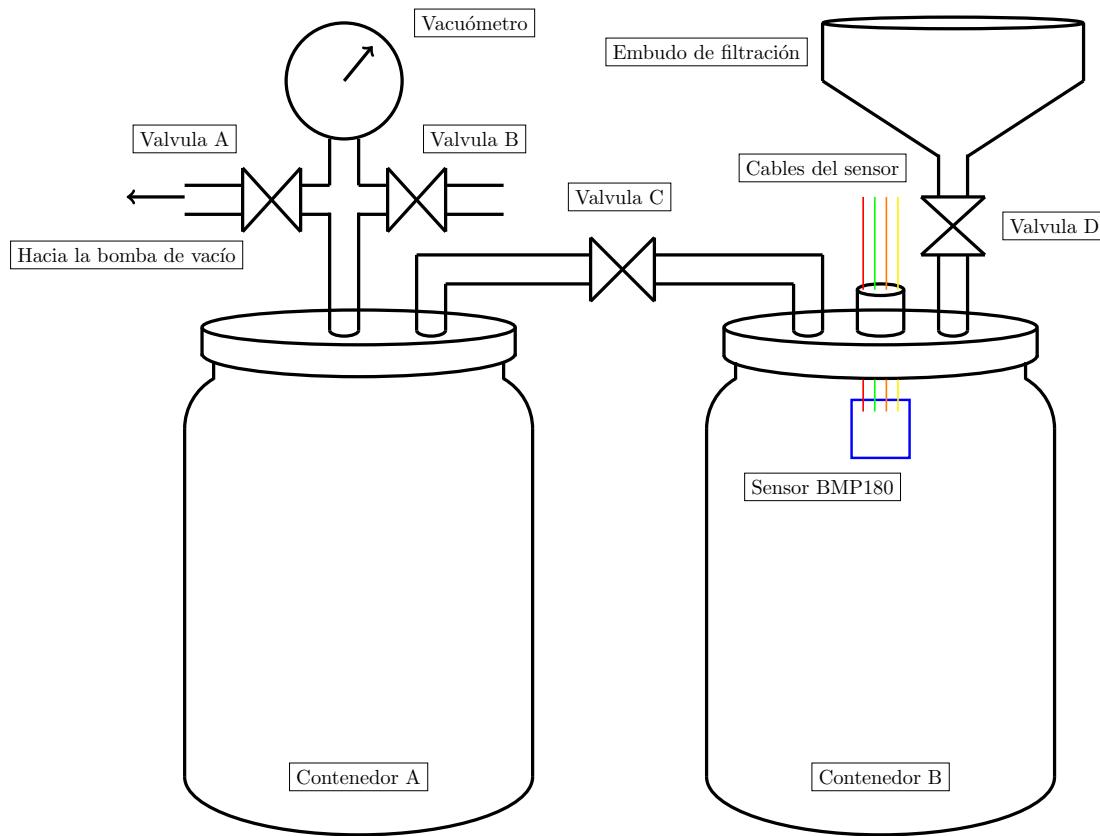


Figura 5.1: Diagrama del sistema para la evaluación de los medios filtrantes

5.1.1. Componentes electrónicos

En la figura 5.6 se observa un diagrama de las conexiones de cada componente electrónico, todos ellos, salvo el sensor BMP180, fueron montados sobre una placa de pruebas (protoboard). En la figura 5.5a se aprecia a detalle la disposición final de los componentes sobre la tarjeta de pruebas, la conexión entre esta última y la tarjeta arduino se encuentra en la figura 5.5b.



(a)



(b)

Figura 5.2: (a) Contenedor A (b) Contenedor B



Figura 5.3: Resultado final del sistema de pruebas



Figura 5.4: (a) Embudo de filtración (b) Detalle del portafiltro del embudo de filtración

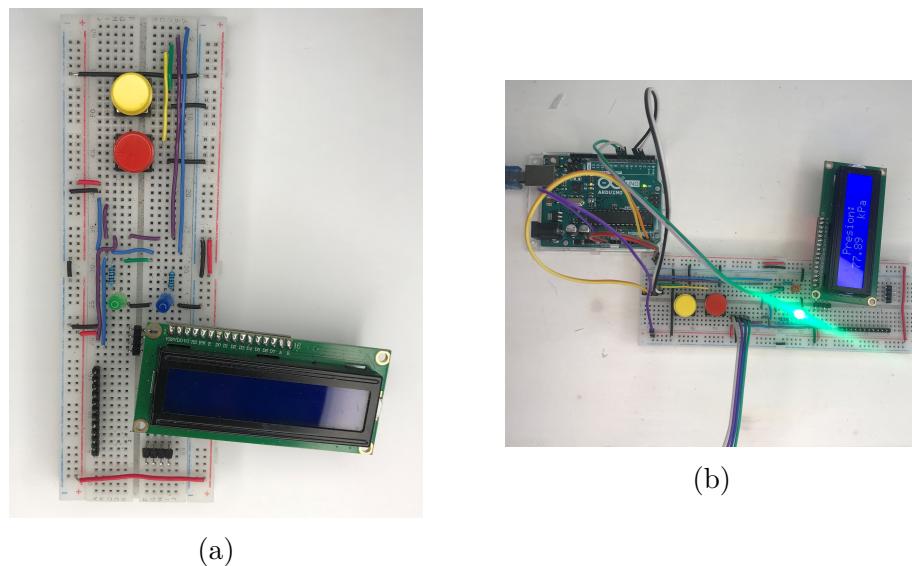


Figura 5.5: (a) Detalle de las conexiones en la placa de pruebas (b) Detalle de las conexiones en la placa de pruebas y su conexión con la placa arduino

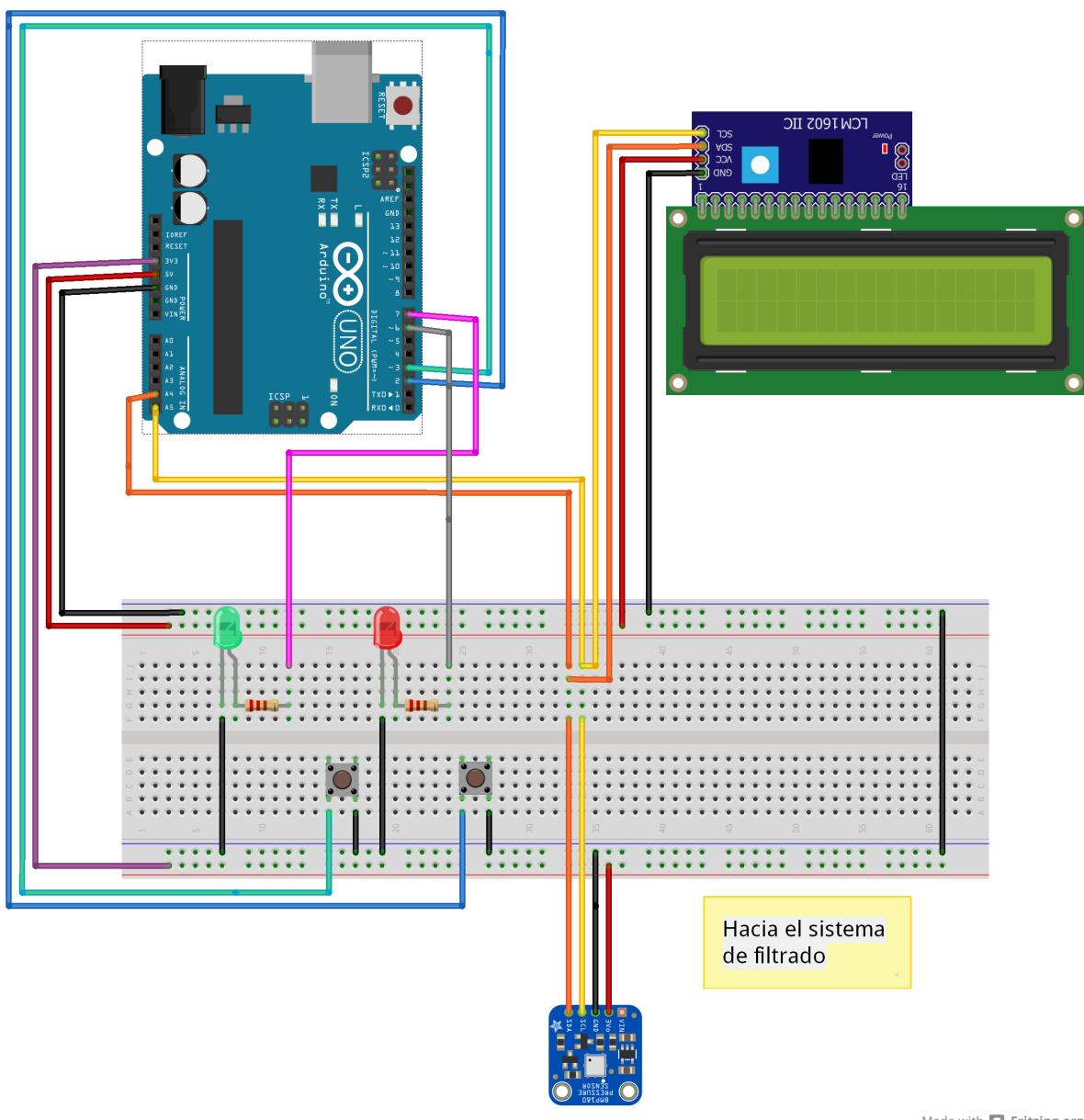


Figura 5.6: Diagrama de conexiones y componentes electrónicos

Made with Fritzing.org

5.2. Código del programa

En esta sección, se muestran los resultados obtenidos por medio de la comunicación serial entre la tarjeta arduino y una hoja de cálculo en Excel. La forma en la cual se ha implementado esta característica, se puede analizar en el código del programa, este se encuentra en el anexo B. En la Figura 5.7, se observa una captura de la hoja de cálculo y los datos que se registran en ella, un versión más clara del gráfico que se aprecia en esta captura, se encuentra en la figura 5.8. Las figuras 5.9 y 5.10, muestran detalles de el mismo gráfico al realizar un tratamiento de los datos generados por la tarjeta arduino.



Figura 5.7: Captura de la hoja de cálculo con los datos registrados y la gráfica generada con estos

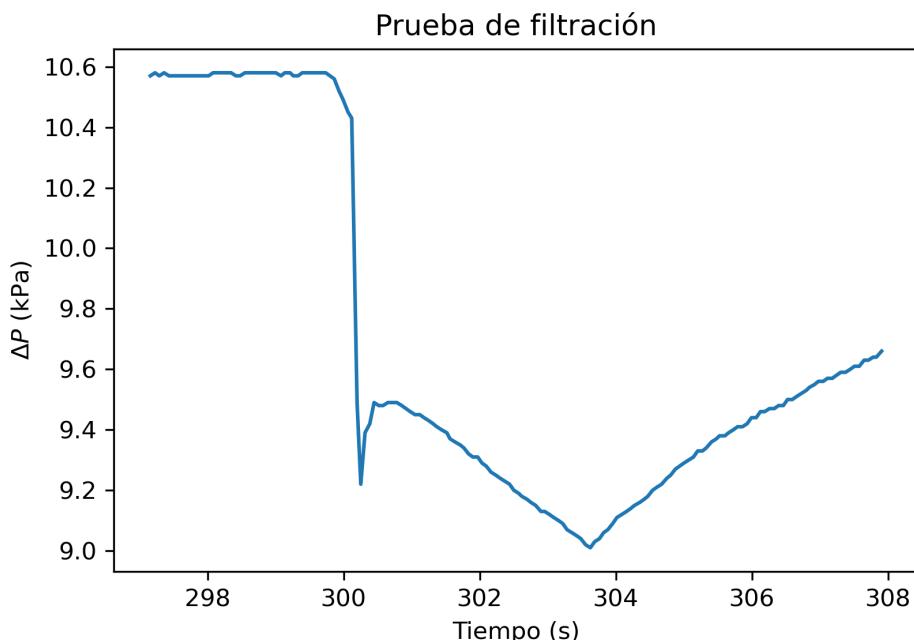


Figura 5.8: Representación gráfica de los datos del sensor que se registran mediante hoja de cálculo

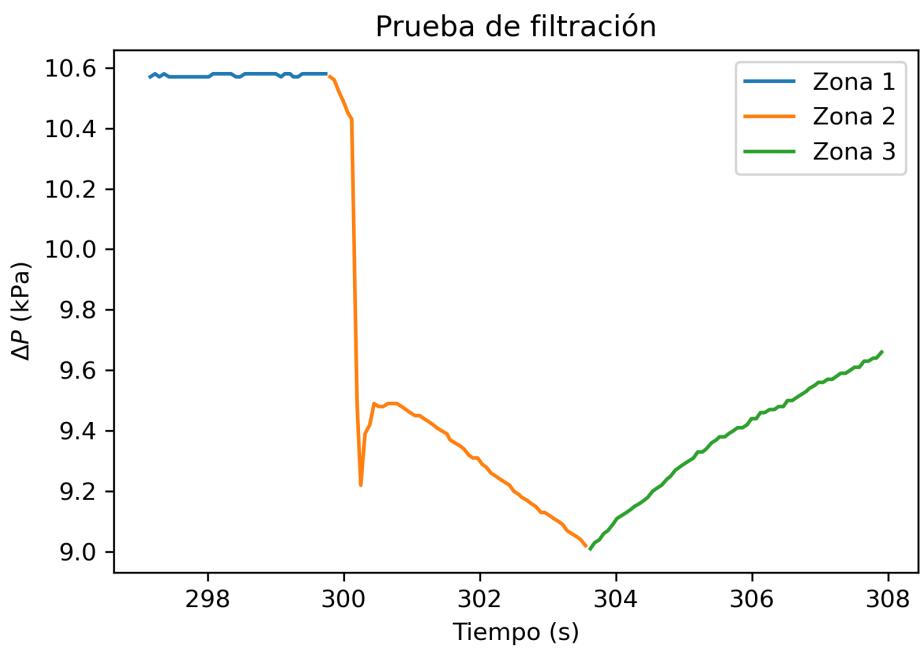


Figura 5.9: Ejemplo de las zonas que se pueden identificar empleando los datos registrados en la hoja de cálculo

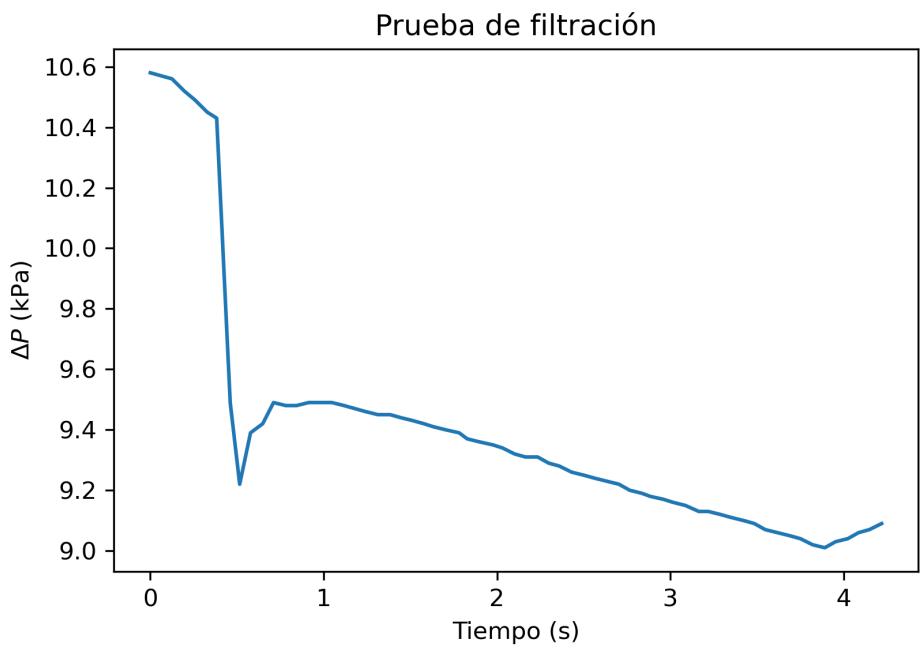


Figura 5.10: Resultado después de realizar el tratamiento de los datos obtenidos en la hoja de cálculo en una prueba de filtrado

5.3. Calibración del sensor

En la tabla 2, se muestran los datos empleados para la calibración del sensor, estos se representan en la figura 5.11

Tabla 5: 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

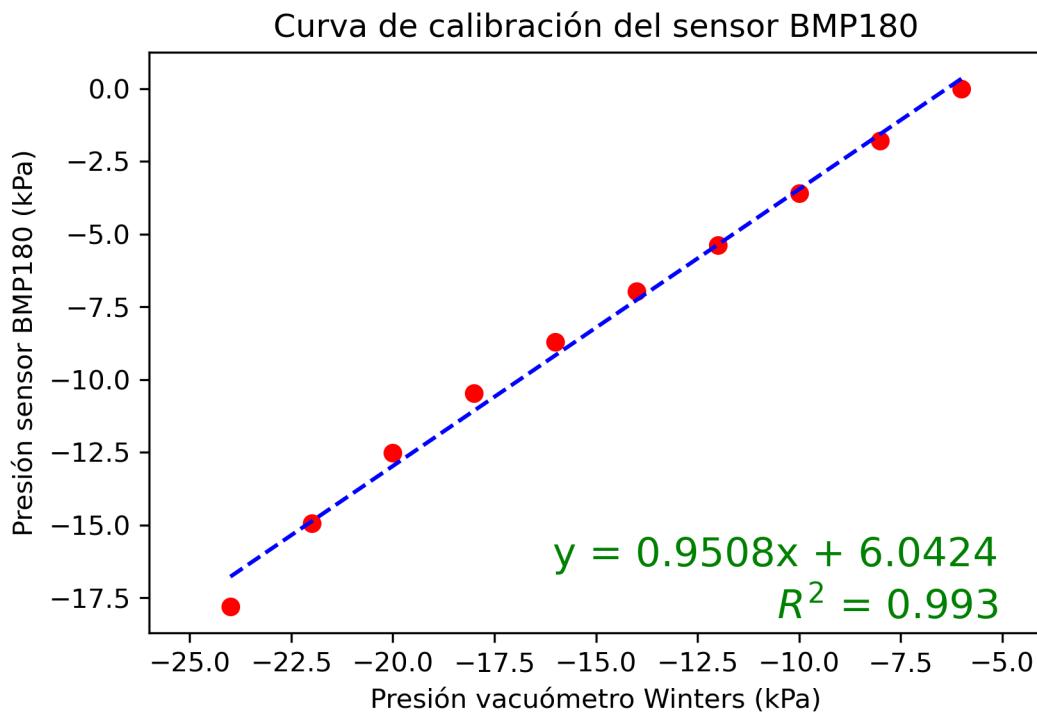


Figura 5.11: Curva de calibración del sensor BMP180

5.4. 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.

5.4.1. Mezclilla

Tabla 6: 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

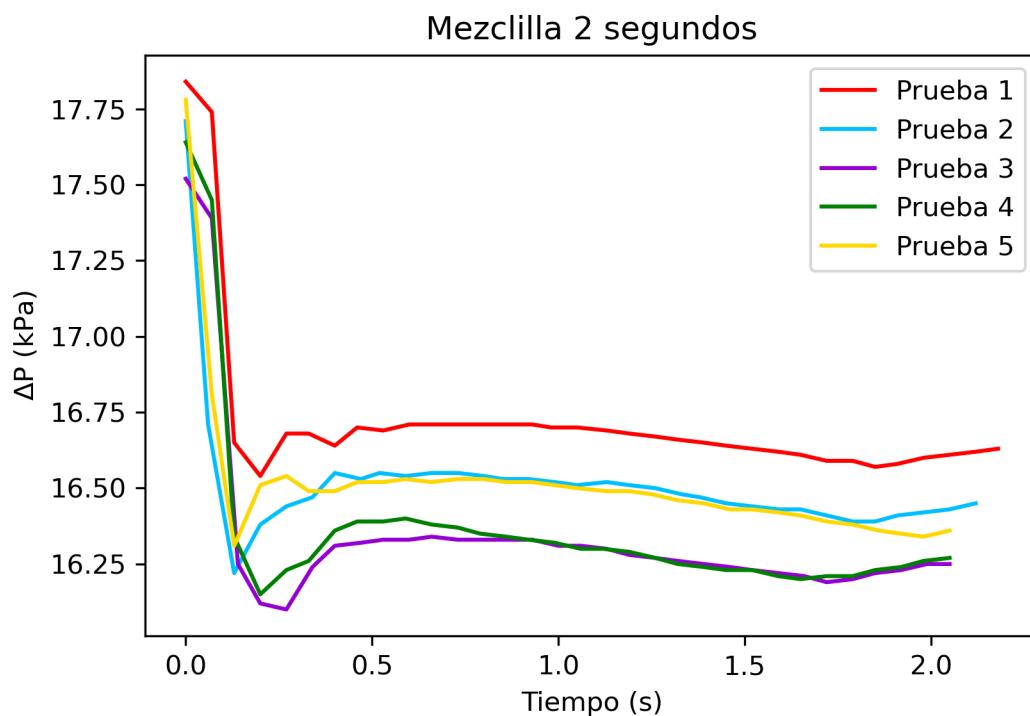


Figura 5.12: Curvas obtenidas en la prueba de filtración con la mezclilla a los 2 segundos

Tabla 7: 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/m²)	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 8: Desviaciones estándar de los resultados de las pruebas de filtración con mezclilla a los segundos

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

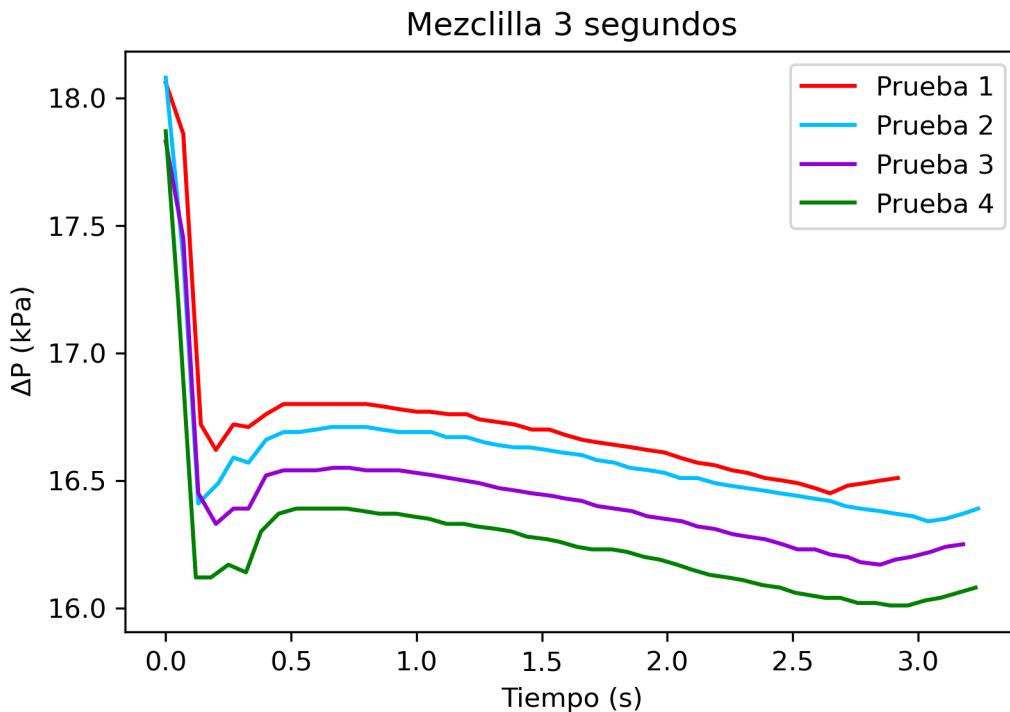


Figura 5.13: Curvas obtenidas en la prueba de filtración con la mezclilla a los 3 segundos

Tabla 9: 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/m²)	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 10: 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

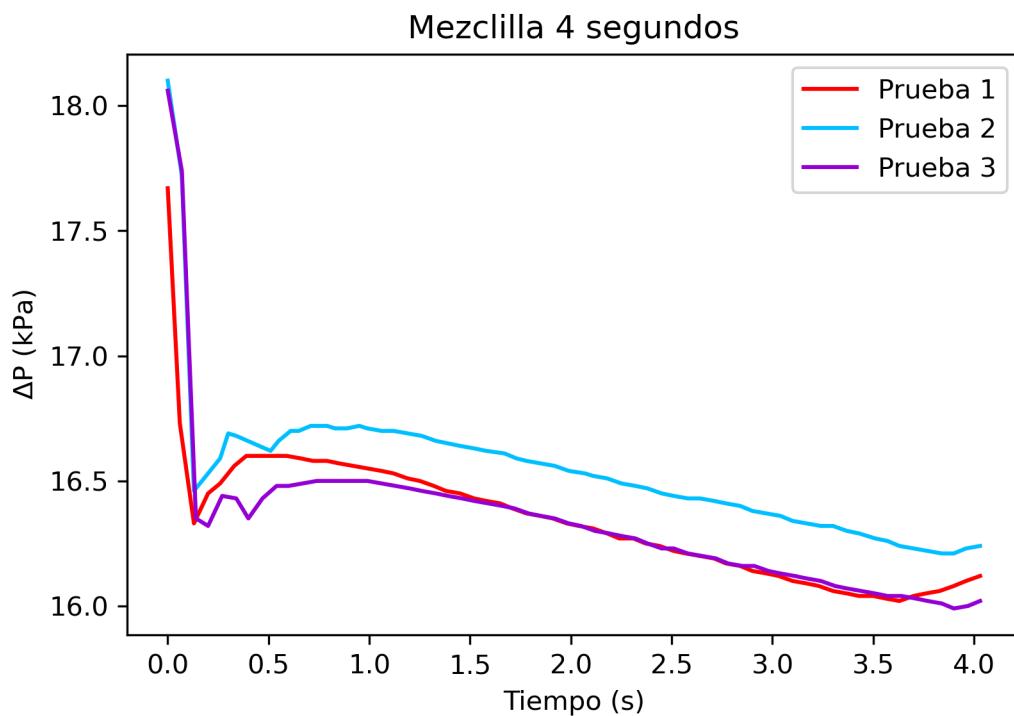


Figura 5.14: Curvas obtenidas en la prueba de filtración con la mezclilla a los 4 segundos

Tabla 11: 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	142.90	34.79	3661.0	71.4

Tabla 12: 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

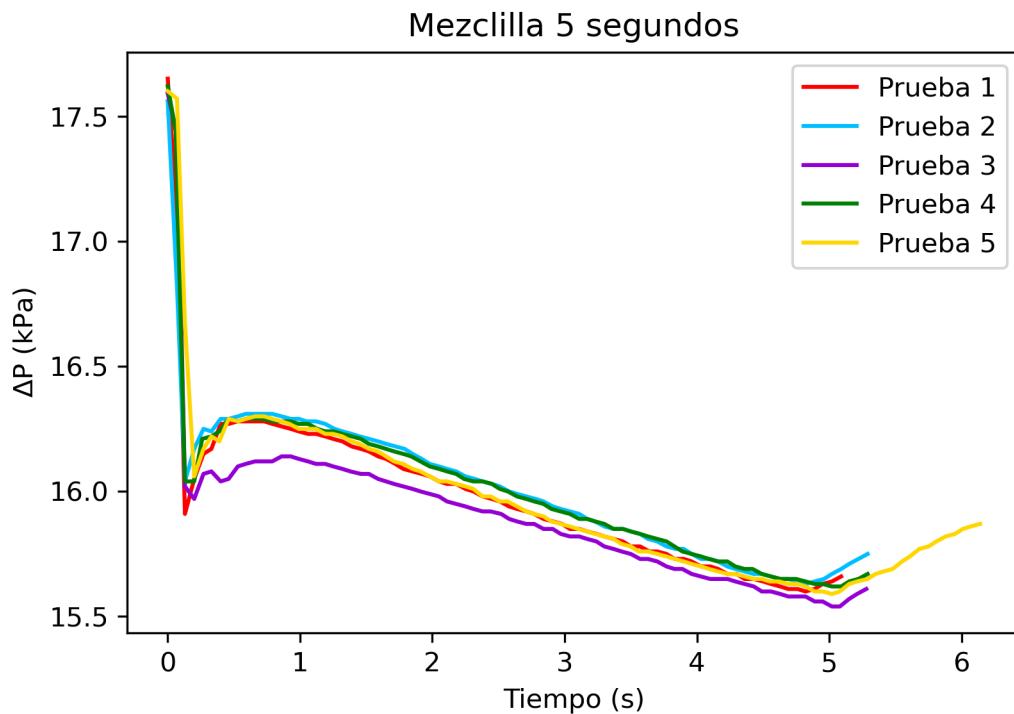


Figura 5.15: Curvas obtenidas en la prueba de filtración con la mezclilla a los 5 segundos

Tabla 13: 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 14: 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

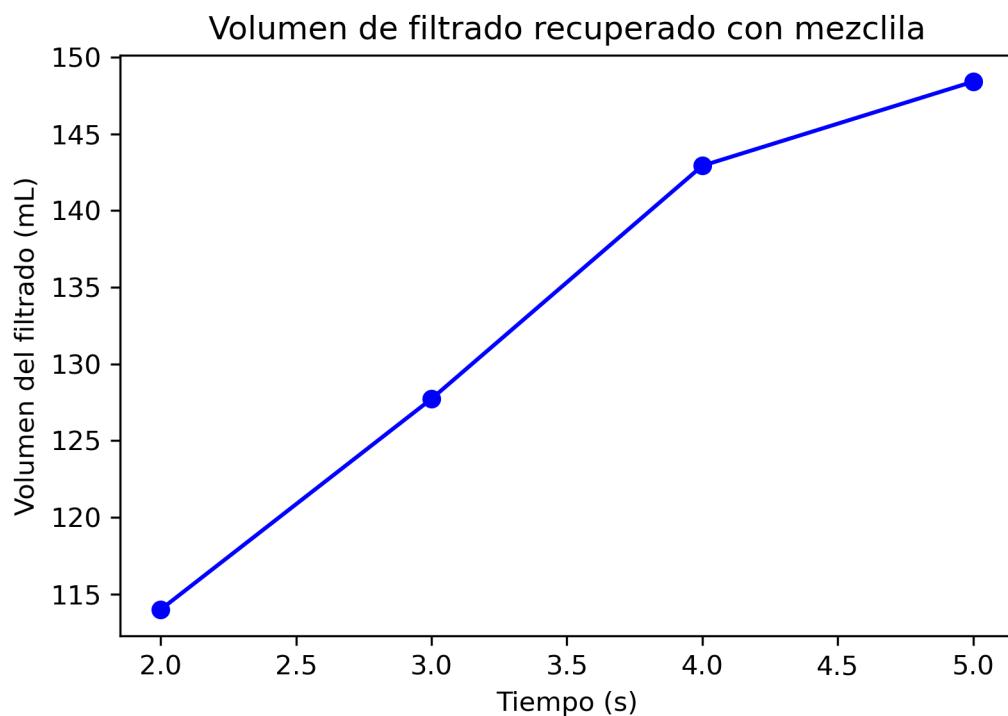


Figura 5.16: Volumen de filtrado recuperado en función del tiempo con mezclilla

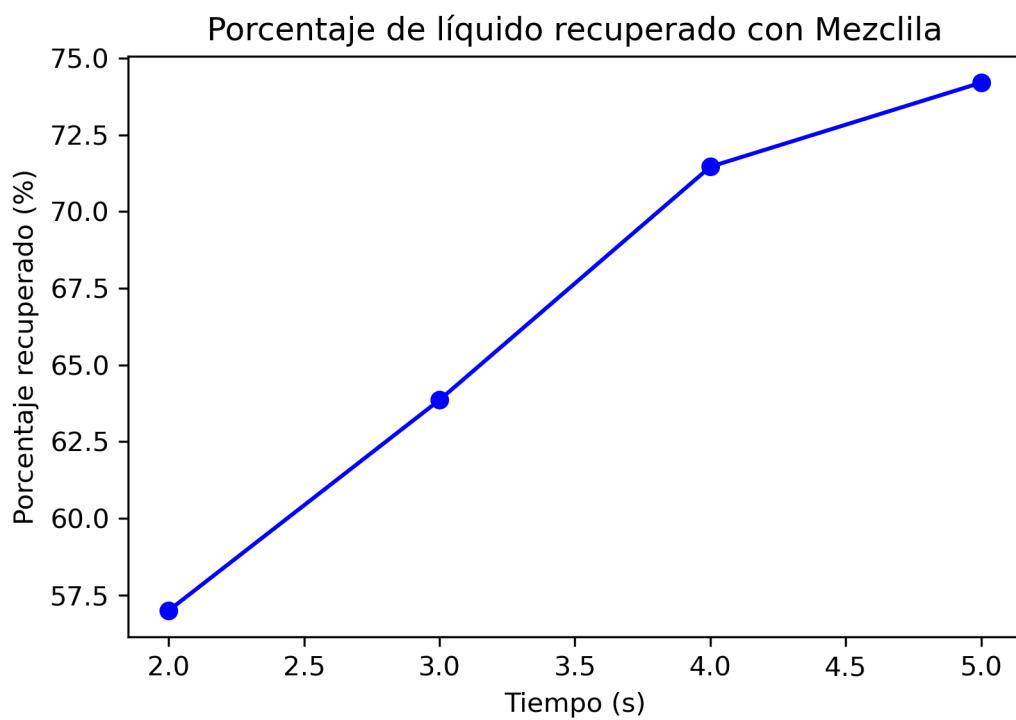


Figura 5.17: Porcentaje de líquido recuperado en función del tiempo con mezclilla

5.4.2. Lona

Tabla 15: 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
Aqua (mL)	200 mL	200 mL	200 mL	200 mL
P vacío promedio (kPa)	17.22	17.29	17.58	17.30

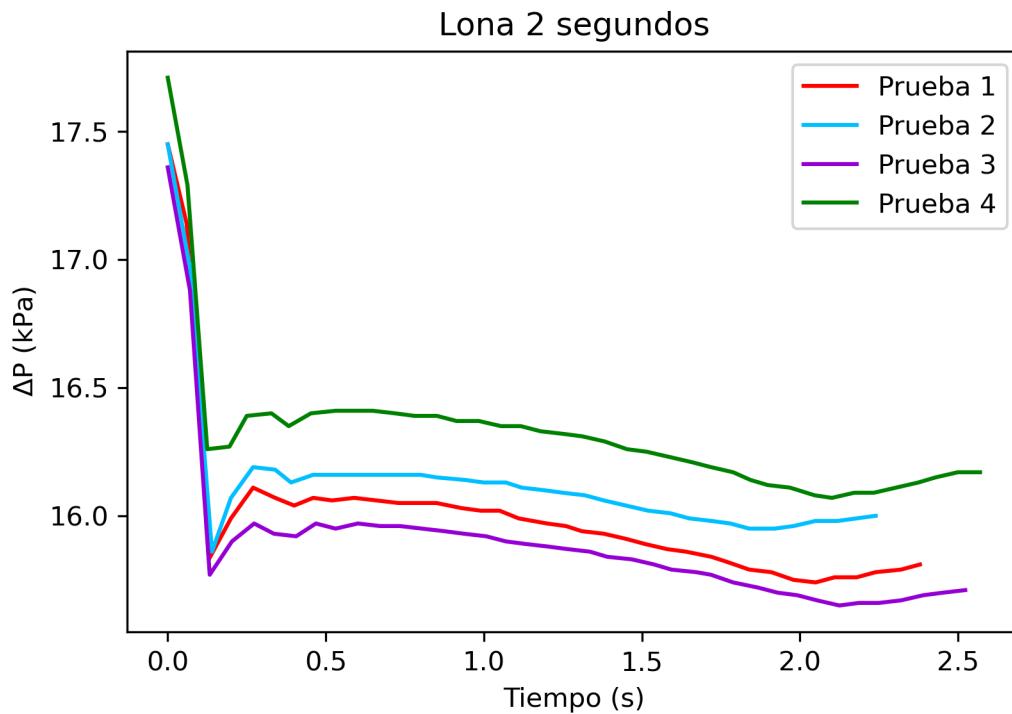


Figura 5.18: Curvas obtenidas en la prueba de filtración con la lona a los 2 segundos

Tabla 16: 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/m²)	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 17: 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

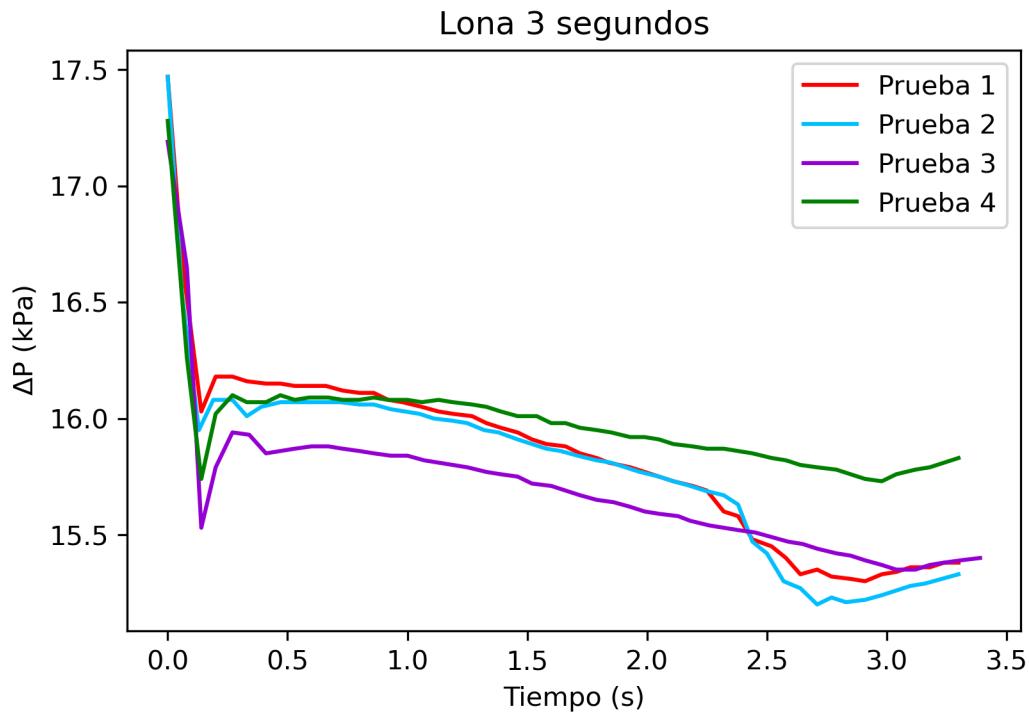


Figura 5.19: Curvas obtenidas en la prueba de filtración con la lona a los 3 segundos

Tabla 18: 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 19: 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

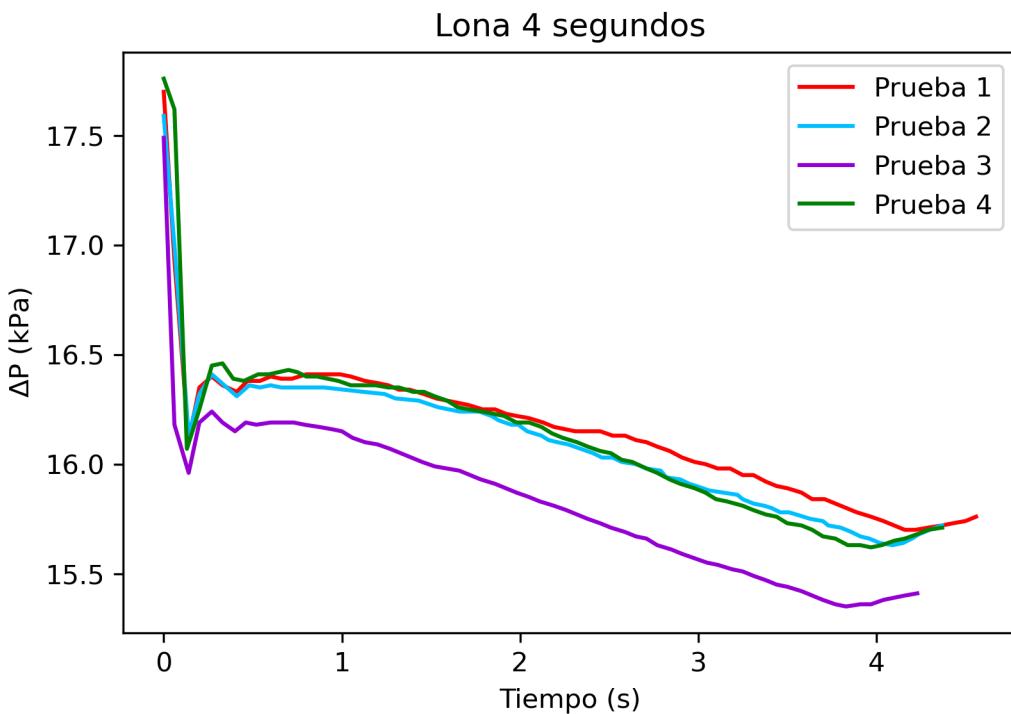


Figura 5.20: Curvas obtenidas en la prueba de filtración con la lona a los 4 segundos

Tabla 20: 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 21: 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

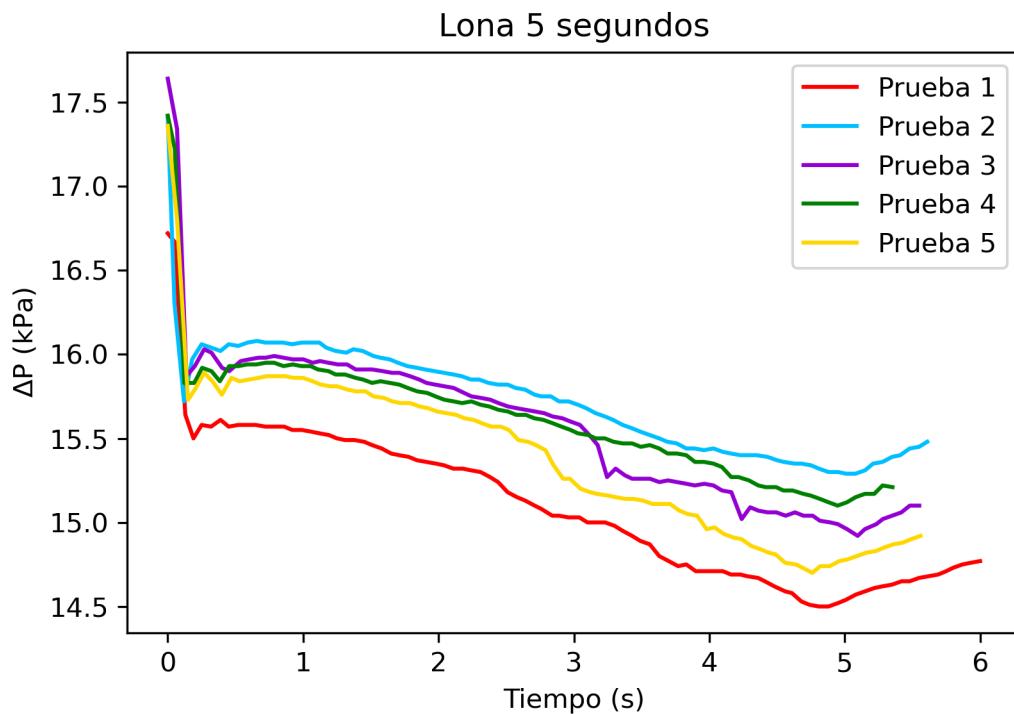


Figura 5.21: Curvas obtenidas en la prueba de filtración con la lona a los 5 segundos

Tabla 22: 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 23: 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

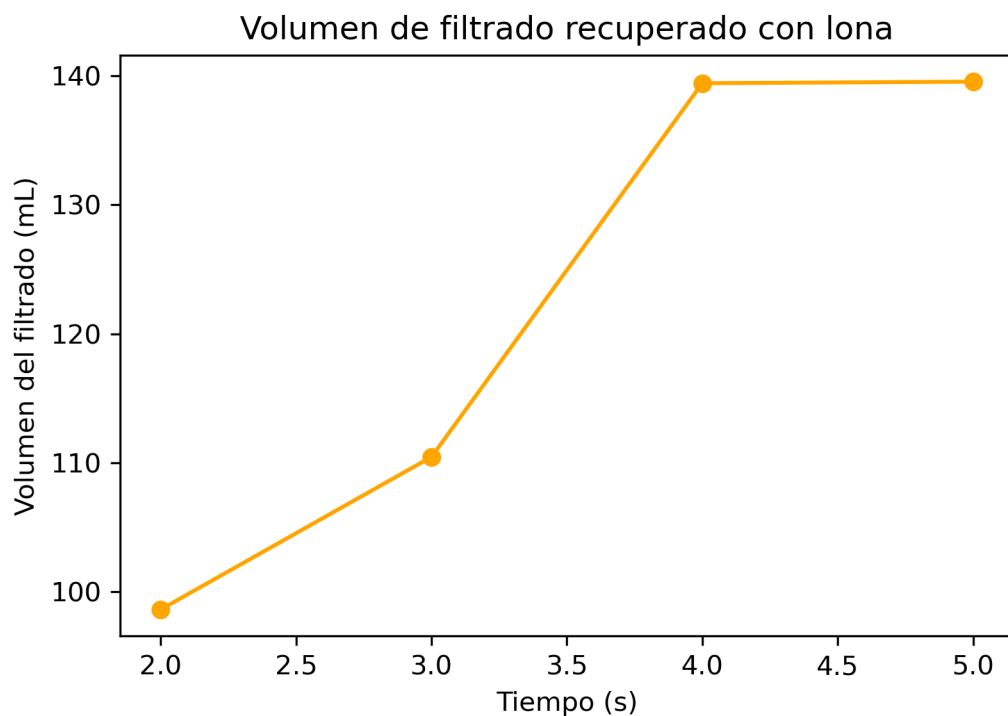


Figura 5.22: Volumen de filtrado recuperado en función del tiempo con lona

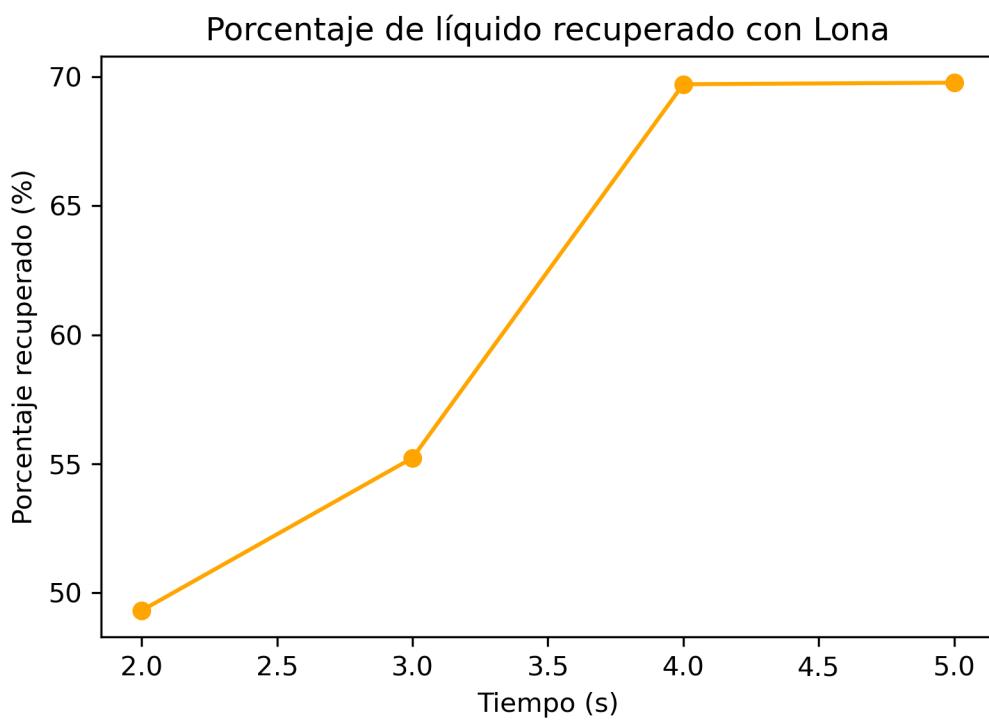


Figura 5.23: Porcentaje de líquido recuperado en función del tiempo con lona

5.4.3. Tergal

Tabla 24: 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
Aqua (mL)	200 mL	200 mL	200 mL	200 mL
P vacío promedio (kPa)	17.34	17.33	17.50	17.53

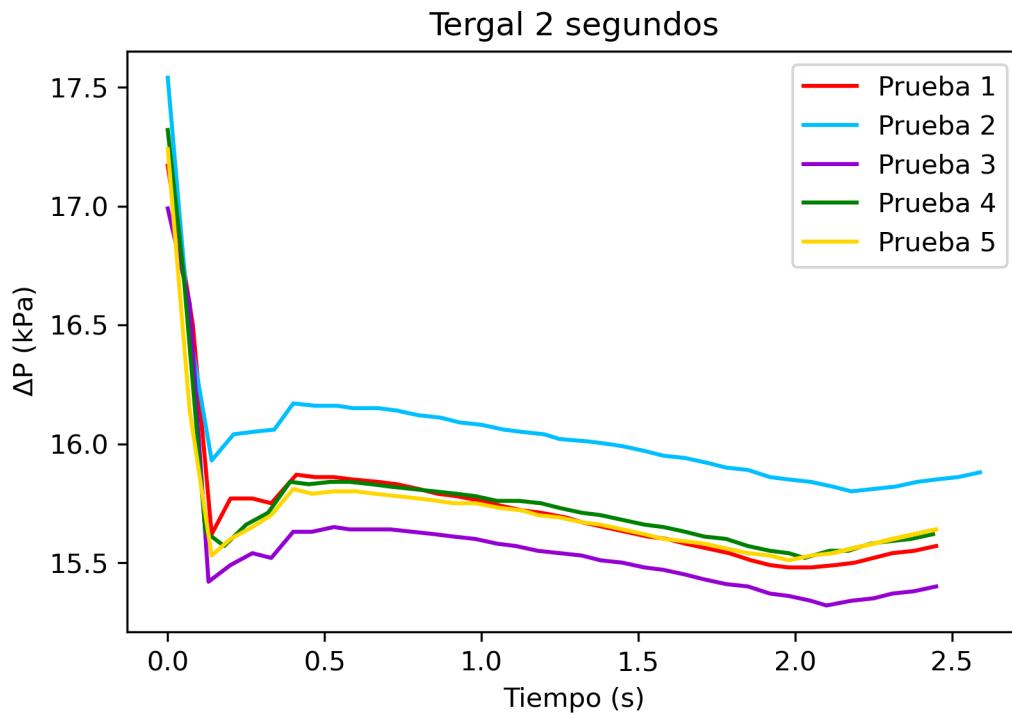


Figura 5.24: Curvas obtenidas en la prueba de filtración con el tergal a los 2 segundos

Tabla 25: 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 26: 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

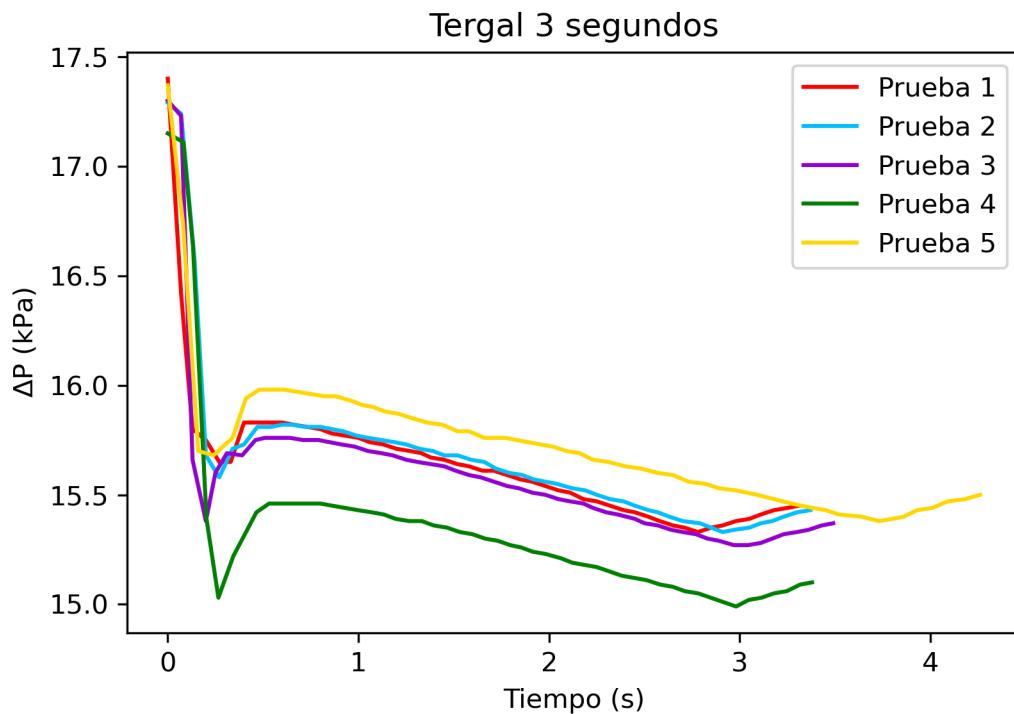


Figura 5.25: Curvas obtenidas en la prueba de filtración con el tergal a los 3 segundos

Tabla 27: 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 28: 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

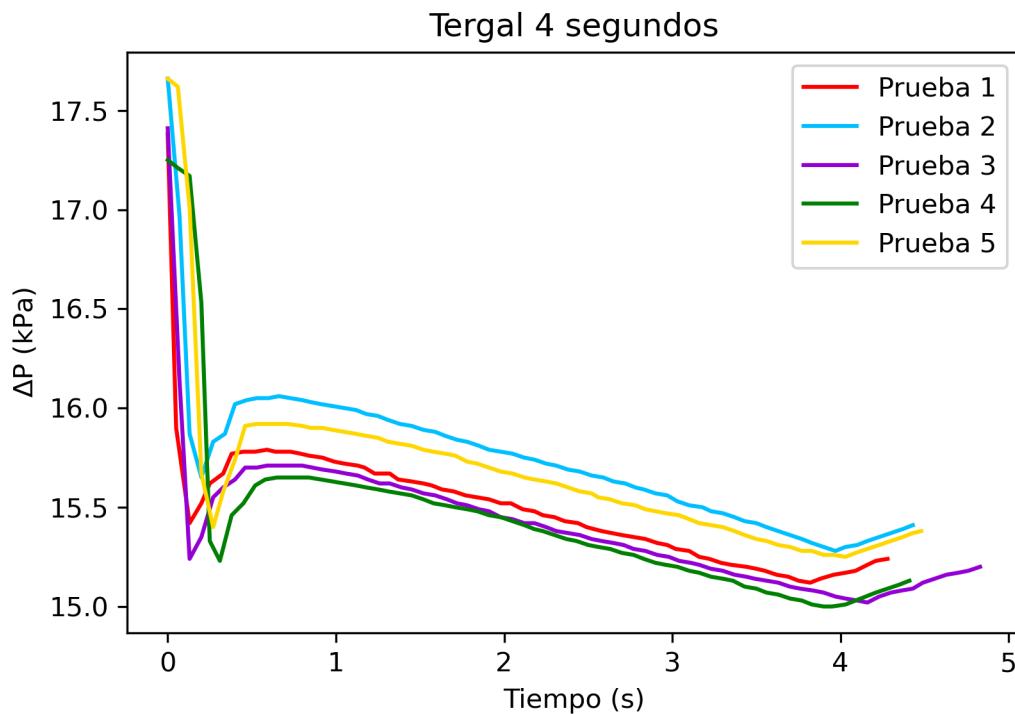


Figura 5.26: Curvas obtenidas en la prueba de filtración con el tergal a los 4 segundos

Tabla 29: 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 30: 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

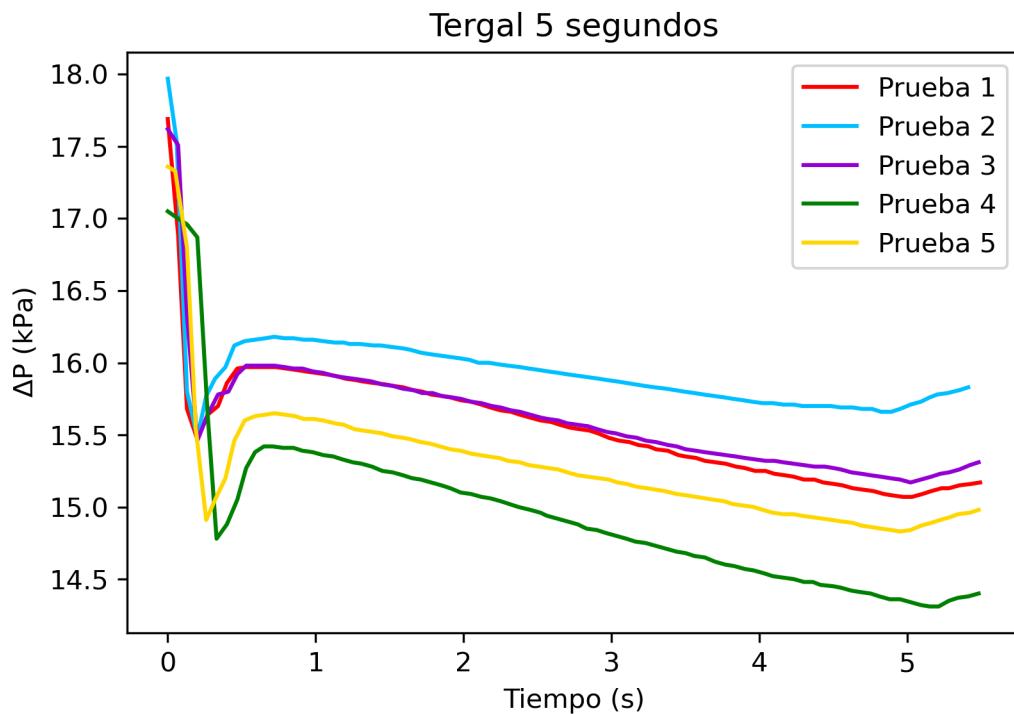


Figura 5.27: Curvas obtenidas en la prueba de filtración con el tergal a los 5 segundos

Tabla 31: 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	7.8
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 32: 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

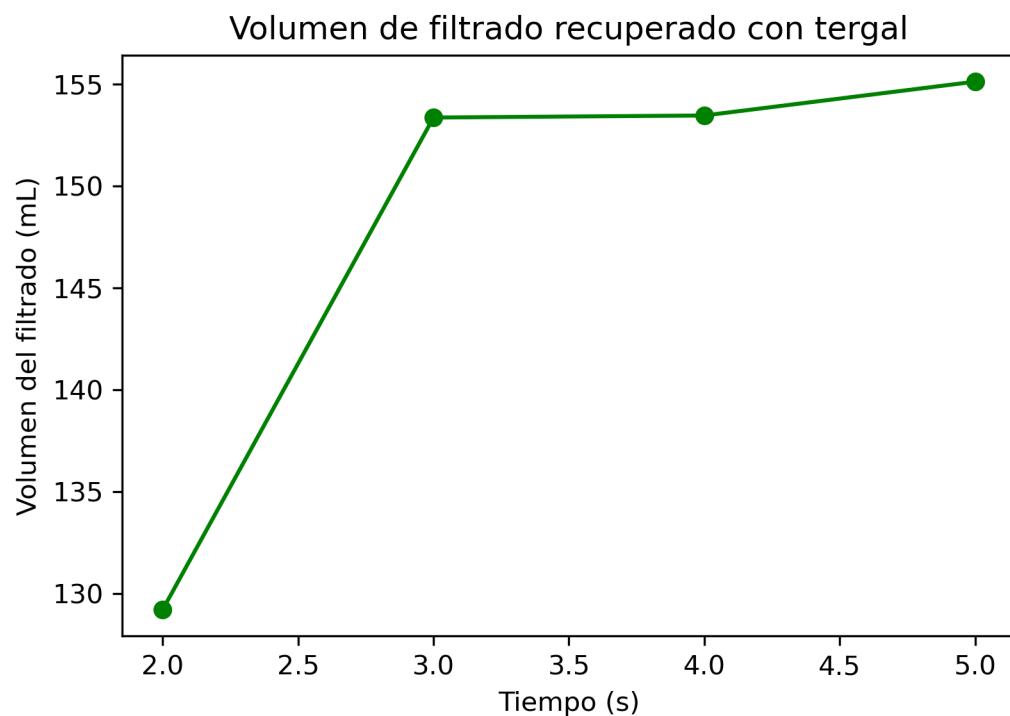


Figura 5.28: Volumen de filtrado recuperado en función del tiempo con tergal

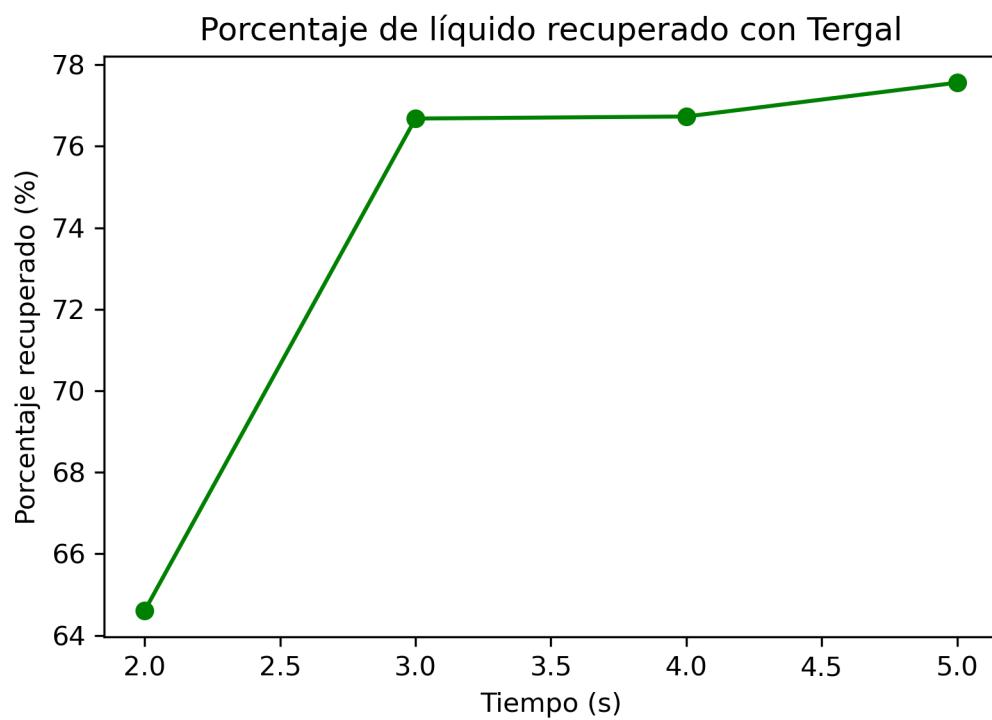


Figura 5.29: Porcentaje de líquido recuperado en función del tiempo con tergal

5.4.4. Comparación entre los medios filtrantes

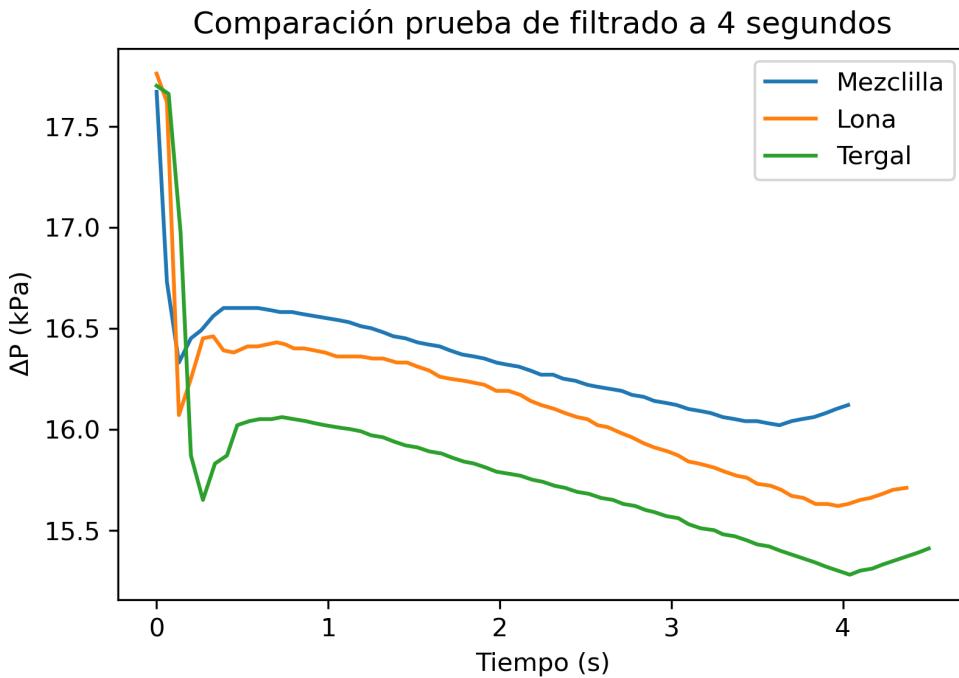


Figura 5.30: Comparación de la prueba de filtrado entre los medios filtrantes a 4 segundos

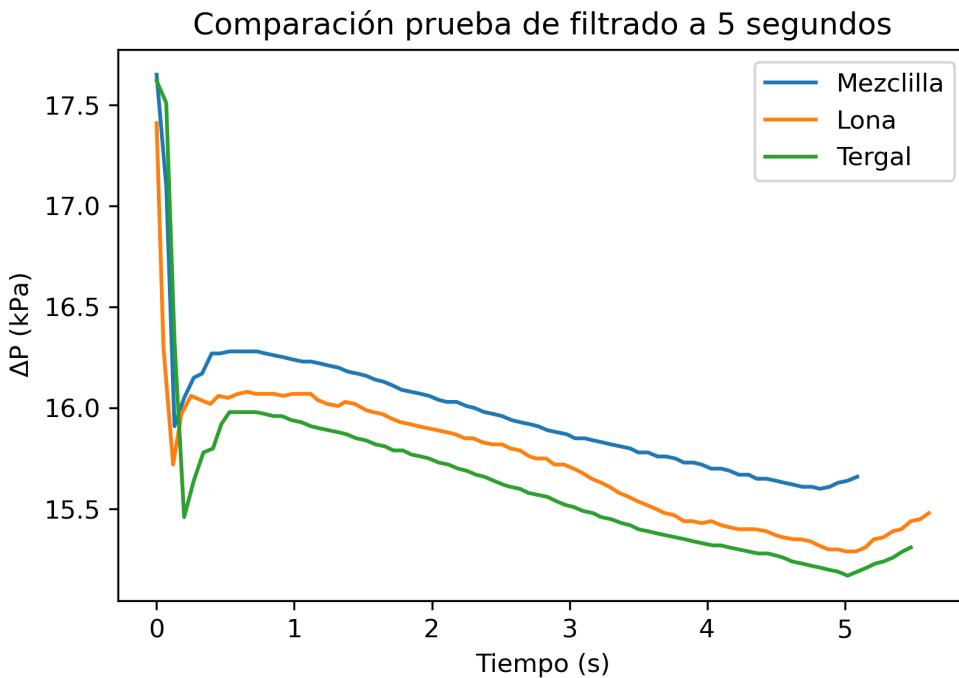


Figura 5.31: Comparación de la prueba de filtrado entre los medios filtrantes a 5 segundos

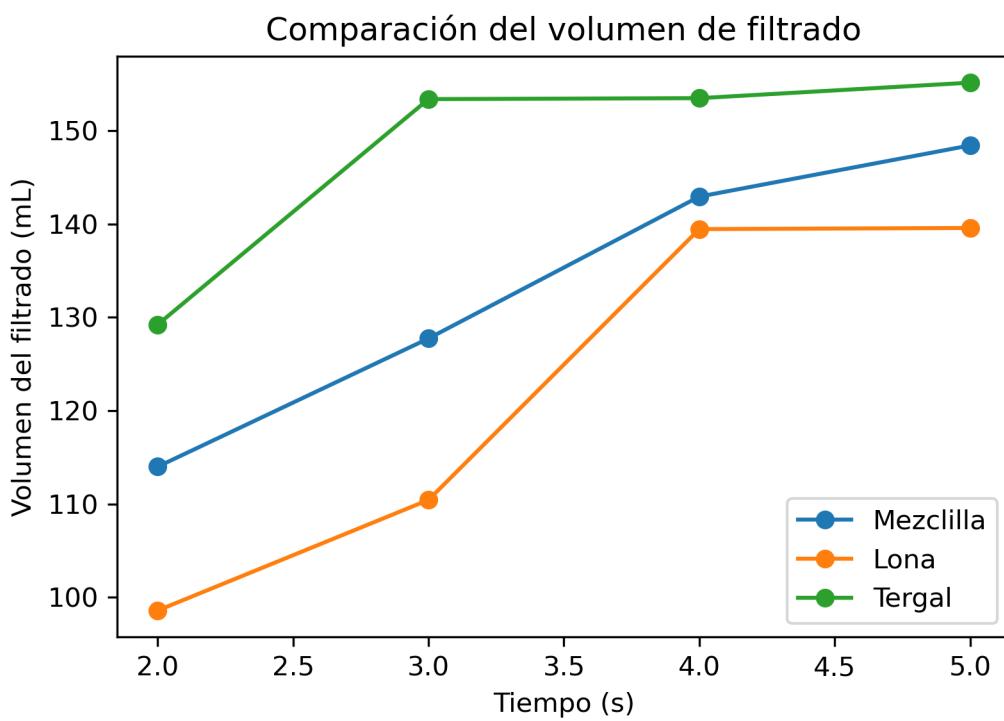


Figura 5.32: Comparación del volumen de filtrado obtenido con cada medio filtrante

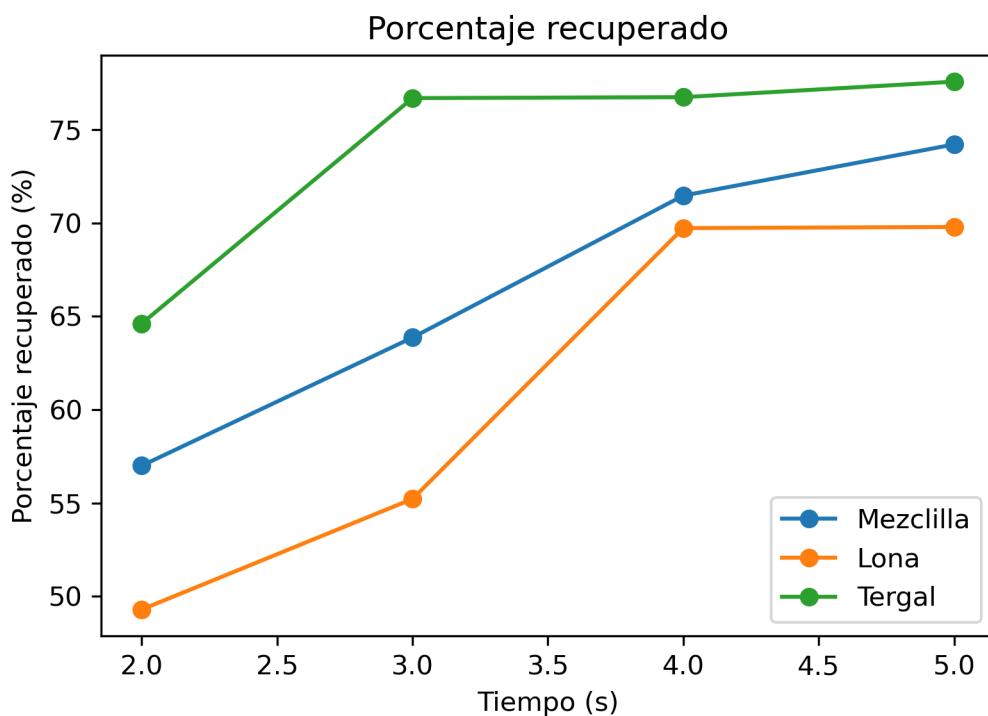


Figura 5.33: Comparación del porcentaje de filtrado recuperado obtenido con cada medio filtrante

6. Análisis de resultados

6.1. Sistema de pruebas

6.1.1. Sistema de filtrado

El sistema de pruebas propuesto, consistió en dos contenedores de vidrio conectados entre sí, El primero de ellos, el contenedor A, tiene como función ser una trampa de vacío, el segundo, el contenedor B, funciona como receptor del filtrado.

En el contenedor B (figura 5.2b), se colocaron dos válvulas, las marcadas como C y la D, así como un niple que permite la entrada de los cables del sensor. La válvula C, permite interrumpir la comunicación con el contenedor A, mientras que la válvula D, regula el paso del filtrado proveniente del embudo de filtración. El niple en el que se colocaron los cables del sensor se selló con silicón para eliminar las fugas.

Al contenedor A (figura 5.2a), se le realizaron dos perforaciones con el objetivo de conectar válvulas de paso y espigas que comuniquen este contenedor con la bomba de vacío y el contenedor B, así como un vacuómetro que permitió la calibración del sensor de presión. En La figura 5.1, en el contenedor A, pueden observarse los elementos montados en este contenedor. La válvula A, tiene como función comunicar al contenedor A con la bomba de vacío, mientras que con la válvula B, es posible regular el vacío generado.

Adicionalmente, se adaptó una tapa de tuvo de PVC, como un portafiltro. A este, se le colocó un sello de silicón para que se ajustara mejor al embudo de plástico y no existieran fugas.

6.1.2. Componentes electrónicos

Se incorporaron diversos componentes electrónicos para hacer del sistema de pruebas un equipo más completo y que su empleo hiciera que este fuera amigable con el usuario. En la figura 5.6, se muestra un diagrama para facilitar al usuario la conexión de los componentes electrónicos, sin embargo, la disposición de las conexiones en la placa de pruebas mostradas en el diagrama puede variar como se observa en la figura 5.5a.

Se ha incluido una pantalla LCD que muestra mensajes relacionados con la ejecución de las funciones del programa y los valores de presión del sistema. También se incluyeron 2 botones, que se encargan de activar o detener el registro de datos en Excel. El primero de estos (amarillo), se encarga iniciar el registro de datos, en contraparte, el rojo detiene esta operación. Pueden observarse también 2 leds que indican el estado de registro de datos, al estar encendido el rojo, el sistema no está registrando la información del sensor, mientras que si el verde está encendido, los datos se transfieren a la hoja de cálculo. En la siguiente sección se menciona con mayor detalle la operación de estos componentes.

6.2. Código del programa

El programa además de realizar la lectura de datos del sensor, permite la adquisición de los datos registrados y su almacenamiento en una hoja de Excel (figura 5.7). 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.

Otras características del sistema electrónico, son 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 detecte correctamente un sensor valido, en la pantalla se mostrará de manera continua la presión del sistema y se encenderá el LED rojo, indicando que no se está llevando a cabo el registro de datos en Excel. Al oprimir el botón amarillo, de manera automática comenzará el almacenamiento de datos en la hoja de cálculo, además se encenderá el LED verde para indicar que está ejecutando esta acción. Para finalizar esta operación se debe oprimir el botón rojo, de inmediato se encenderá el LED rojo que indica que la el registro se 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 B.

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

comprobar_bmp Comprueba si existe un sensor valido 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 lo hoja de Excel.

6.2.1. Datos producidos por el sistema Excel-Arduino

La comunicación serial mediante la tarjeta arduino y una hoja de cálculo en Excel, permite que se registren los datos de presión del sistema de filtrado. En general, el sistema registra los datos de presión en promedio cada 0.07 segundos. En la figura 5.7, se presenta un ejemplo de la captura de estos datos, en esta figura, en la columna

A ("Hora") de la hoja de cálculo, se almacena la hora en la que se registró el dato proveniente del sensor. En la columna B ("tiempo"), se muestra el tiempo en segundos al que se registró el dato proveniente del sensor, este valor puede no iniciar en cero, ya que el programa toma el tiempo desde el encendido de la tarjeta arduino. En la Columna C ("presion"), se registra el valor de presión registrado por el sensor. El gráfico que se observa en la hoja de cálculo, se actualiza en tiempo real, por lo que es posible monitorear la prueba en la computadora.

Con los datos obtenidos en la hoja de cálculo, es posible generar el gráfico mostrado en la figura 5.8. En este, se pueden identificar fácilmente tres zonas. La primera de estas, corresponde a la etapa en la que aún no se inicia la prueba de filtrado. Una vez que se comienza la prueba, al abrir la válvula que permite el paso del filtrado, se observa una segunda zona en la gráfica en la cual existe un marcado descenso en el ΔP . Una tercera zona comienza al cerrar la válvula del embudo de filtrado, dando paso a un incremento en el ΔP , siendo este el punto exacto donde finaliza la prueba. En la figura 5.9, es posible observar con mayor detalle estas zonas, siendo la intersección entre la zona uno y dos, el inicio de la prueba y la intersección entre la zona dos y tres, el final de la misma.

Al realizar un tratamiento de los datos obtenidos a través del sensor, es posible visualizar el tiempo exacto que tomo la prueba de filtración. Un ejemplo de esto se observa en la figura 5.10, siendo esta un ejemplo de la información que se puede obtener a través del sistema de comunicación Arduino-Excel.

6.3. Evaluación de los medios filtrantes

6.3.1. Mezclilla

En la tabla 15, 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.

Las figuras 5.12 a la 5.15, 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 7 y 8, 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.

En la tabla 5.16, 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. La figura 5.17, se desprende de un análisis similar al de la figura anterior, sin embargo en esta se presenta el porcentaje de líquido recuperado, se observa 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%.

6.3.2. Lona

El análisis de este medio filtrante es similar al anterior, la tabla 15, presenta un resumen general de las cantidades de mineral y agua, 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.

El comportamiento de las curvas de filtración de este material (figuras 5.18 a 5.21) 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.

Las figuras 5.22 y 5.23, muestran un análisis en función del tiempo, del volumen de filtrado recuperado y el porcentaje que este representa, respectivamente. Analizando estas figuras se observa que, empleando lona como medio de filtrado, se recuperaron cerca de 100 mL de filtrado en los primeros dos segundos; 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 de un 50% de líquido recuperado en los dos primeros segundos y a partir de que se ha recuperado el 70% de líquido, se observa una disminución del porcentaje recuperado, siendo esta solo del 0.06%, a diferencia de los dos puntos anteriores donde se observó un aumento de 5.9 y 14.5 por ciento en el punto dos y tres, respectivamente.

6.3.3. Tergal

Al igual que con los materiales anteriores, se realiza un resumen de los grupos de pruebas realizados con tergal, separados por tiempo 24. 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.

De las tablas, 26 a la 32, 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, la de tiempo en la prueba 3 y la de volumen de filtrado en la prueba 2, con un valor de 9.14. Las variables restantes de estas tablas, pueden evaluarse de mejor manera, analizando las figuras 5.28 y 5.29, en ellas se observa que en los primeros dos segundos de la prueba se recuperó en promedio, 64.61% del líquido, correspondiente 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%.

6.3.4. 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 5.30 y 5.30, respectivamente. En ambas figuras se observa 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 las figuras 5.32 y 5.32, 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 empleando 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, estas tienen relación con la cantidad de hilos por unidad lineal de tejido.

7. Conclusiones

- Es posible medir el vacío en una prueba de filtración empleando un sistema arduino acoplado con un sensor de presión
- Es posible emplear el sistema arduino-medidor como un equipo adquisidor de datos de una prueba de filtración
- Es posible evaluar medios filtrantes empleando un sistema arduino-medidor de vacío
- El tergal mostró un mejor desempeño en términos de volumen de filtrado en función del tiempo
- Empleando tergal es posible recuperar un mayor volumen de filtrado en menor tiempo en comparación con la mezclilla y la lona
- Empleando mezclilla es posible recuperar una mayor cantidad de filtrado en comparación con la lona

Referencias

- [1] Fernando Concha A. Filtration. In *Solid-Liquid Separation in the Mining Industry*, pages 281–340. Springer International Publishing, dec 2013.
- [2] Barry A. Wills and James A. Finch. Dewatering. In *Wills' Mineral Processing Technology*, pages 417–438. Elsevier, 2016.
- [3] E.S. Tarleton and R.J. Wakeman. Solid Liquid Separation – Filtration. In *Mineral Processing Design and Operations*, pages 507–561. Elsevier, 2016.
- [4] SEFAR. Filtro de tambor rotatorio. <https://www.sefar.mx/data/docs/es/13190/FS-Equipment-Drum-filter08.jpg?variant=38256&v=1.0>. Consultado el 17/01/2021.
- [5] SEFAR. Filtros de disco rotatorio. <https://www.sefar.mx/data/docs/es/11168/FS-IF-Equipment-Disc-filter-07.jpg?variant=39780&v=1.0>. Consultado el 17/01/2021.
- [6] TEFSA. Filtros de vacío. https://gruptefsa.com/filtros_de_vacio/3.jpg. Consultado el 17/01/2021.
- [7] Derek B Purchas and Ken Sutherland. An Introduction to Filter Media. In *Handbook of Filter Media*, pages 1–34. Elsevier, 2002.
- [8] E.S. Tarleton and R.J. Wakeman. Filter media. In *Solid/Liquid Separation*, pages 78–125. Elsevier, 2007.
- [9] E.S. Tarleton and R.J. Wakeman. Data acquisition, analysis and scale-up. In *Solid/Liquid Separation*, pages 152–200. Elsevier, 2007.
- [10] Arduino. Arduino Uno Rev3. <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>. Consultado el 12/10/2020.
- [11] Hardware and Related Initiatives. <https://playground.arduino.cc/Main/SimilarBoards/#goShie>. Consultado el 13-10-2020.
- [12] Sandeep P. Nalavade, Abhishek D. Patange, Chandrakant L. Prabhune, Sharad S. Mulik, and Mahesh S. Shewale. Development of 12 Channel Temperature Acquisition System for Heat Exchanger Using MAX6675 and Arduino Interface. In *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pages 119–125. Springer Singapore, dec 2018.
- [13] Shunchang Yang, Yikan Liu, Na Wu, Yingxiu Zhang, Spyros Svoronos, and Pratap Pullammanappallil. Low-cost, Arduino-based, portable device for measurement of methane composition in biogas. *Renewable Energy*, 138:224–229, aug 2019.
- [14] William Vallejo, Carlos Diaz-Uribe, and Catalina Fajardo. Do-it-yourself methodology for calorimeter construction based in Arduino data acquisition device for introductory chemical laboratories. *Heliyon*, 6(3):e03591, mar 2020.
- [15] Gustavo (2018) Meléndez Valentín. Automatización de hornos para tratamiento térmicos con tecnología arduino. (Tesis de Licenciatura). *Uni-*

versidad Nacional Autónoma de México, 2. México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/344281>.

- [16] Yilmaz Güven, Ercan Coşgun, Sıtkı Kocaoğlu, Harun Gezici, and Eray Yilmazlar. Understanding the Concept of Microcontroller Based Systems To Choose The Best Hardware For Applications. *Research Invenyt: International Journal of Engineering And Science*, 7:38, 12 2017.
- [17] MICROCHIP. ATmega328P. <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328p>. Consultado el 12/10/2020.
- [18] Jacob Fraden. *Handbook of Modern Sensors*. Springer New York, 2010.
- [19] Leonel Ramírez. *Sensores y actuadores aplicaciones con Arduino*. Larousse Grupo Editorial Patria, México, 2014.
- [20] Geek factory. BMP180 Sensor de presión atmosférica. https://www.geekfactory.mx/wp-content/uploads/2015/12/bmp180_sensor_de_presion_atmosferica.jpg. Consultado el 12/10/2020.
- [21] Sensor de Presión Diferencial Montaje en PCB para Aire 10 V dc. <https://cl.rsdelivers.com/product/nxp/mpx2010dp/sensor-de-presi%c3%b3n-diferencial-montaje-en-pcb-para/9227308>. Consultado el 12/10/2020.
- [22] CFSensors. Sensors. <http://cfsensor.com/proinfo/9.html>. Consultado el 12/10/2020.

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.

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/>.

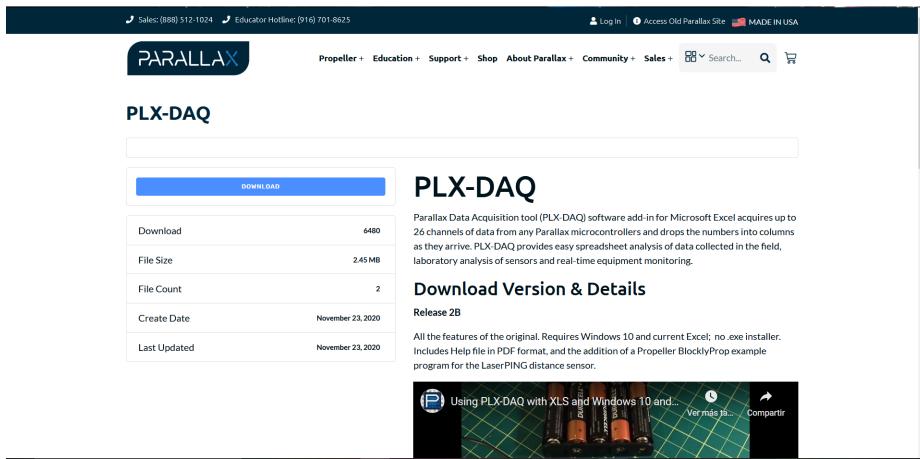


Figura A.1: Vista de la página de descarga del complemento *Parallax Data Acquisition tool (PLX-DAQ)*

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.2. Es necesario descomprimir el archivo nombrado como *plx-daq-release2b.zip*, dentro de este se encuentran una serie de archivos, entre ellos, una hoja de cálculo de Excel A.3. Esta hoja es el archivo que permitirá la comunicación Arduino-Excel.

Al abrir la hoja de cálculo, esta muestra los elementos que se observan en la figura A.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.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, este se puede consultar como se muestra en la figura A.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

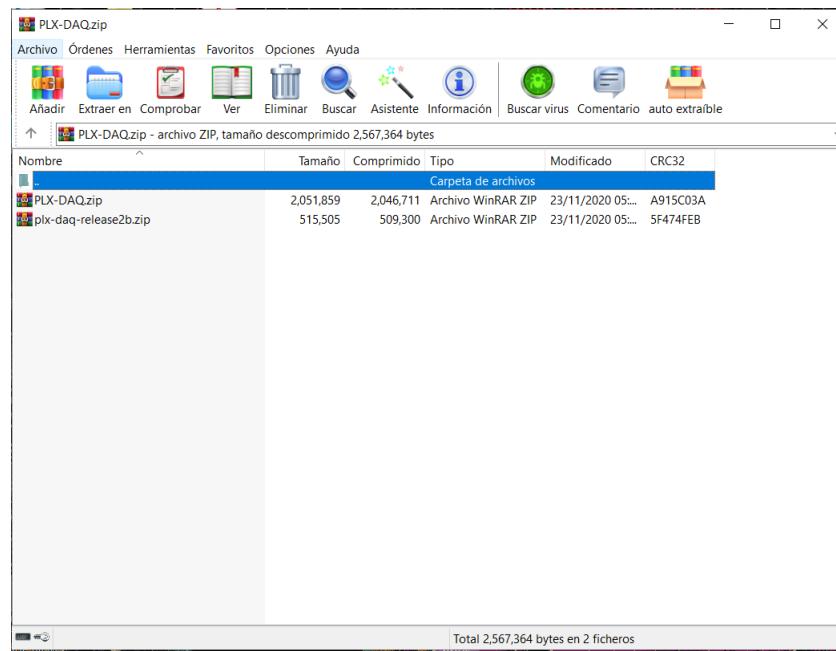


Figura A.2: Archivos contenidos en la carpeta PLX-DAQ

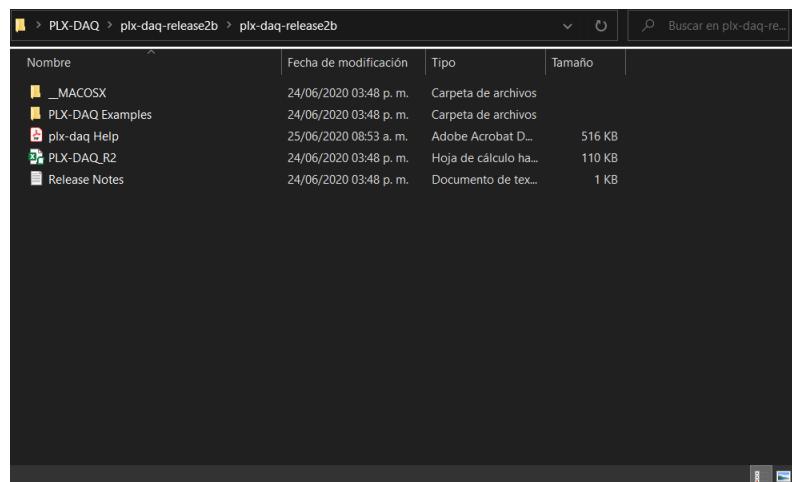


Figura A.3: Archivos contenidos en la carpeta plx-daq-release2b.zip

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.7. Para mostrar un gráfico en tiempo real, es necesario seleccionar las columnas B y C para generar el tipo de gráfico deseado.

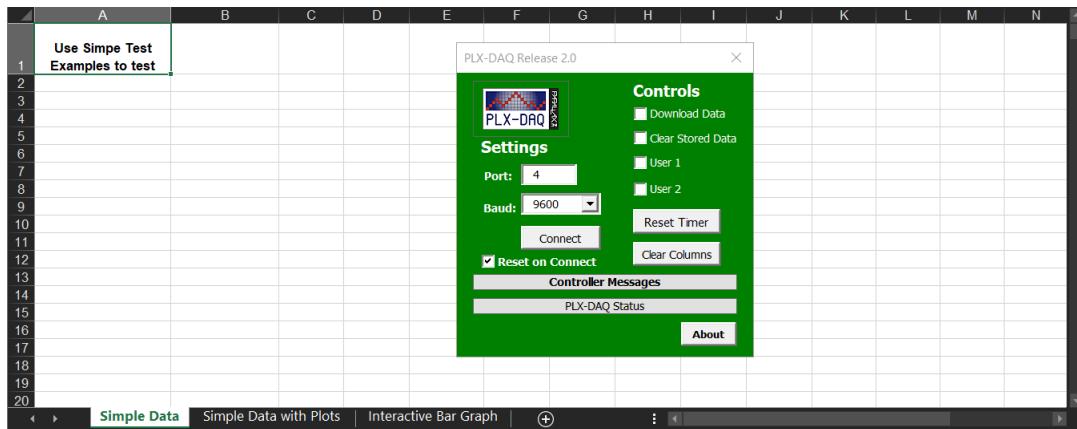


Figura A.4: Vista del contenido del archivo PLX-DAQ_R2

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 5.1. Al encender la bomba de vacío es necesario verificar que la válvula A se encuentre abierta, para iniciar la generación de vacío en los contenedores. Por medio de la válvula B es posible regular el vacío generado en el sistema.

Una vez que se ha colocado el medio filtrante sobre el portafiltro, se colocan los sólidos y se corrobora que se haya alcanzado el vacío inicial deseado. Es importante verificar que la válvula C se encuentre abierta.

Posteriormente, se agrega el líquido en el embudo de filtración, y mediante el botón amarillo de la tarjeta de pruebas, se inicia el registro de datos en la hoja de cálculo. Se procederá a abrir en su totalidad la válvula D, esto se debe realizar de forma rápida; una vez que ha transcurrido el tiempo de la prueba, se cierra por completo la válvula D, realizándolo nuevamente de manera rápida. Para detener el registro de datos, se presiona el botón rojo. El líquido remanente que pudiera quedar sobre la torta de filtrado, se deberá retirar con una pipeta.

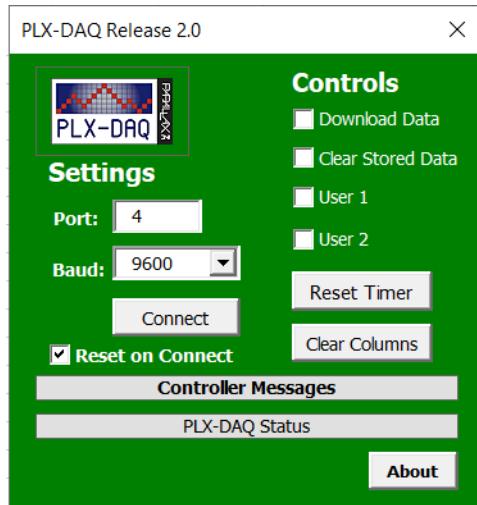


Figura A.5: Detalle del panel PLX-DAQ Release 2.0

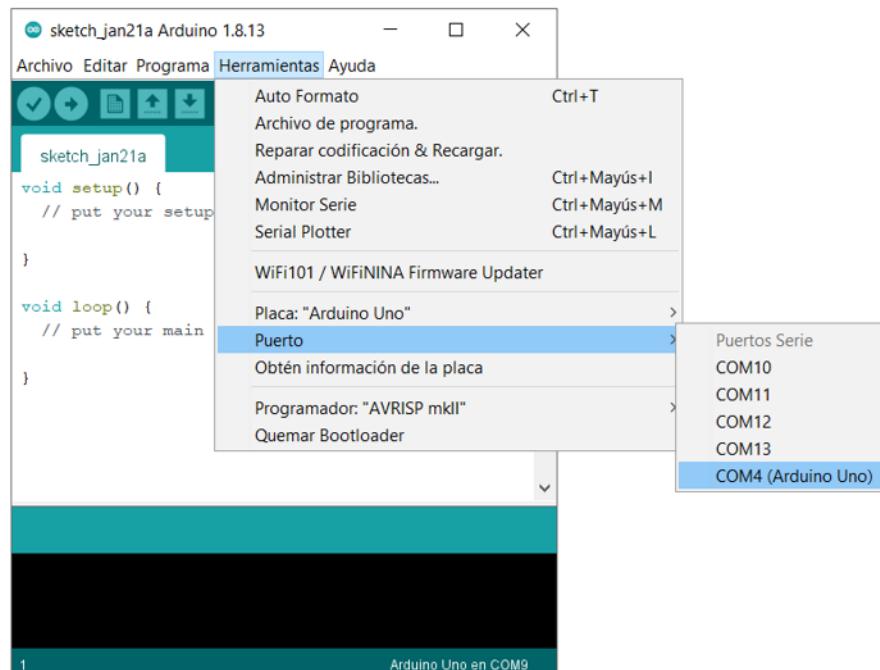


Figura A.6: Pasos para encontrar el puerto de comunicación (COM) de la tarjeta arduino en el IDE

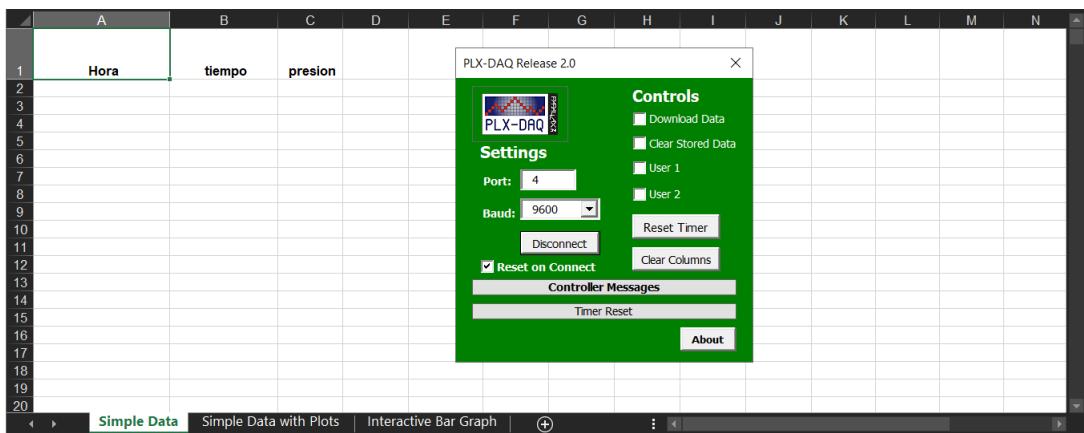


Figura A.7: Vista de la hoja de cálculo después de conectar establecer la comunicación con la tarjeta arduino

B. 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 tarta 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 verde(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 ( 
43   registro de datos) como un pin de salida
44 pinMode(led_rojo, OUTPUT); // Habilita el pin del led rojo (no hay
45   registro de datos) como un pin de salida
46
47
48 estado_anterior_boton_inicio = digitalRead(boton_inicio);
49 estado_anterior_boton_final = digitalRead(boton_final);
50 tiempo_actual = millis();
51
52 inicio_lcd();
53 comprobar_bmp();
54 leds_no_lectura();
55 presion_inicial = bmp.readPressure();
56 }
57
58 void loop() {
59
60   if( millis() - tiempo_bmp >= tiempo_lectura){
61     lectura_continua();
62   }
63
64   int estado_actual_boton_inicio = digitalRead(boton_inicio);
65   int estado_actual_boton_final = digitalRead(boton_final);
66
67   if (estado_actual_boton_inicio == LOW &&
68     estado_anterior_boton_inicio == HIGH ) {
69     while(estado_actual_boton_final == HIGH){
70       registro_presion();
71       estado_actual_boton_final = digitalRead(boton_final);
72     }
73     Serial.println("Hemos pulsado el boton");
74     registro_presion();
75   }
76
77   void inicio_lcd(){
78     lcd.init();
79     lcd.backlight();           // Activar luz de fondo
80     lcd.clear();              // Borrar LCD
81
82     lcd.setCursor(6,0);
83     lcd.print("UNAM");
84     delay(1500);
85
86     lcd.clear();
87     lcd.setCursor(1,0);        // coordenadas LCD (x,y)
88     lcd.print("Facultad");    // Mensaje de inicio
89     lcd.setCursor(5,1);
90     lcd.print("de Quimica");
91     delay(1500);
92     lcd.clear();
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 conexiones!");
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 BMP180");
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 void leer_presion(){
127     presion = bmp.readPressure();
128     presion = presion_inicial - presion;
129     presion = presion / 1000;
130     presion = (0.9508 * presion) + 6.0424;
131 }
132
133 void registro_presion(){
134     leds_lectura();
135     tiempo_actual = 0;
136
137     Serial.println("Voy a leer la presion");
138
139     if (millis() - tiempo_actual >= intervalo_lectura){
140         presion = bmp.readPressure();
141         presion = presion_inicial - presion;
142         presion = presion / 1000;
143         presion = (0.9508 * presion) + 6.0424;
144         dtostrf(presion, 5, 2, p_char);
145
146         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 }
```

Comentarios finales

El haber realizado este proyecto, resultó una actividad sumamente enriquecedora, no solo por haber empleado nuevas herramientas, si no, también por el hecho de realizarlo desde casa. Incorporar herramientas que no son típicas de la carrera, me permitió reforzar mis habilidades en programación, además de acercarme a nuevas áreas de conocimiento, como la instrumentación, los sensores, los microcontroladores y los sistemas de adquisición de datos; todo esto con un enfoque especialmente dirigido al área del beneficio de minerales.

Destaco también que, proponer o realizar adaptaciones basadas en el sistema arduino implica un ejercicio de creatividad basado en los aprendizajes de la carrera. El hecho de trabajar desde casa, implica un reto debido a que es necesaria una combinación entre organización y orden extra, en comparación con un laboratorio en la universidad.

Al desarrollar este proyecto, me di cuenta que su área de aplicación puede extenderse más allá de una mejora al laboratorio de Beneficio de Minerales, ya que actualmente en la industria y específicamente hablando de la de beneficio de minerales, existe un constante monitoreo de cada etapa del proceso. Es común observar en cada equipo la presencia de diversos sensores conectados a un sistema de adquisición de datos, para realizar un monitoreo en tiempo real, ademas estos datos se almacenan para posteriores análisis. Por esta razón, conocer estas herramientas abre un gran vínculo entre el trabajo de laboratorio y las aplicaciones en la industria. Es posible emplear un sistema basado en arduino, para equipar o prototipar equipo empleado en pruebas de beneficio de minerales, para analizar si será viable instalar algún sistema de medición.

El profesor Antonio Huerta Cerdán, me apoyó y supervisó en todo momento. Desde el inicio de la estancia estudiantil, mantuvimos contacto y él estuvo disponible en todo momento para resolver mis dudas. El profesor me propuso un plan de trabajo apenas inicio el semestre, en este, se detallaron las etapas y plazos para cumplir de manera óptima el proyecto. Cada semana realizamos una reunión en la cual revisamos el trabajo realizado durante los días previos.

Los materiales necesarios para la construcción del sistema de pruebas me fueron proporcionados por el profesor, y estos me los hizo llegar hasta mi casa por medio de mensajería. Es importante para mí señalar que tuve disponibles todos los materiales de forma tal que pude desarrollar todas las actividades planeadas en los tiempos y formas establecidas en el plan de trabajo.