



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

TESIS

**“CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO DE RECUPERACIÓN DE
AGUA EN EL CONCENTRADOR GRAVIMÉTRICO “MESA WILFLEY”,
DEL LABORATORIO DE BENEFICIO DE MINERALES, F. Q. UNAM.”**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA**

PRESENTA

GABRIELA REYNA TORRES

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX

AÑO 2019





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: ANTONIO HUERTA CERDÁN
VOCAL: FAUSTINO JUÁREZ SÁNCHEZ
SECRETARIO: JUAN MANUEL DE LA ROSA CANALES
1er. SUPLENTE: SAMUEL KUPERSTAIN APORTELA
2° SUPLENTE: ANDRÉS VELA AVITUA

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

LABORATORIO 006 (BENEFICIO DE MINERALES), DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALURGICA, EDIFICIO D, FACULTAD DE QUÍMICA, CIUDAD UNIVERSITARIA, UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

JUAN MANUEL DE LA ROSA CANALES

SUSTENTANTE:

GABRIELA REYNA TORRES

ÍNDICE

RESUMEN.....	7
INTRODUCCIÓN.....	9
HIPÓTESIS.....	11
OBJETIVOS.....	11
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	13
1.1. USO DEL AGUA EN LA MINERÍA	13
1.2. BENEFICIO DE MINERALES	13
1.2.1. MÉTODOS DE CONCENTRACIÓN.....	14
1.3. MESA CONCENTRADORA.....	15
1.3.1. CONCENTRADOR GRAVIMÉTRICO MESA WILFLEY	15
1.3.1.1. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN	16
1.3.1.2. VARIABLES DE OPERACIÓN	17
1.4. ESCASEZ DE AGUA	18
1.5. USOS DEL AGUA EN PROCESOS INDUSTRIALES.....	18
1.5.1 DESECHOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA.....	19
1.6 SISTEMAS CERRADOS DE RECIRCULACIÓN DE AGUA.....	21
1.6.1 COMPONENTES BÁSICOS DEL SISTEMA.....	21
1.7 PRINCIPIOS BÁSICOS PARA EL CÁLCULO DE LAS BOMBAS.....	22
1.7.1 CARGAS EN EL SISTEMA	24
1.8 DIAGRAMA DE MOODY.....	25
1.9 RUGOSIDAD RELATIVA.....	26
1.10 POTENCIA DE LA BOMBA	26
CAPÍTULO 2	28
CAPÍTULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	29
2.1 ETAPA 1.....	30
2.1.1 RESTAURACIÓN DE LA MESA WILFLEY	30
2.1.2 PRUEBA DE CONCENTRACIÓN POR MESA WILFLEY	32
2.2 ETAPA 2.....	34
2.2.1	34
2.2.1 CÁLCULO DE POTENCIA REQUERIDA DE LA BOMBA	36
2.2.2 CONSTRUCCIÓN DE PARTES ESENCIALES DEL SISTEMA.....	38
2.2.3 CONEXIÓN DEL SISTEMA Y UNIÓN DE LOS COMPONENTES	44
CAPÍTULO 3	46

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	47
3.1 ETAPA 1 RESTAURACIÓN MESA WILFLEY	47
3.2 RESULTADOS ETAPA 1 PRUEBA DE CONCENTRACIÓN DE ARENA SIN UTILIZAR EL SISTEMA DE RECIRCULADO.....	48
3.3 ETAPA 2 CONSTRUCCIÓN DE PARTES ESENCIALES DEL SISTEMA Y UNIÓN DE TODOS LOS COMPONENTES	49
3.4 ETAPA 3. PRUEBA DE CONCENTRACIÓN DE ARENA UTILIZANDO EL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN.....	53
3.5 ETAPA 3. PRUBAS REALIZADAS A DIFERENTES FLUJOS EN EL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE AGUA Y EN EL PASO DE LLAVE PARA DETERMINAR EL AGUA UTILIZADA Y CONTINUIDAD DE FLUJO.	55
CONCLUSIONES.....	65
BIBLIOGRAFÍA Y MESOGRAFÍA	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la Mesa Wilfley [7].	16
Figura 2. Diferentes tipos de mesas concentradoras [7]	17
Figura 3. Diagrama de las diferentes secciones del sistema	24
Figura 4. Diagrama de Moody	25
Figura 5. Diagrama de flujo del desarrollo experimental	29
Figura 6. Estado inicial de la Mesa Wilfley	30
Figura 7. Llave de latón 3/8"	31
Figura 8. Distribución de concentrados en la mesa Wilfley	32
Figura 9. Esquema del dispositivo móvil de recuperación de agua.....	34
Figura 10. Diagrama Moody con trazas	36
Figura 11. Máquina de soldadura de arco	38
Figura 12. esquema del armazón con dimensiones	39
Figura 13. Llantas colocadas en la base inferior	40
Figura 14. Salida de agua del recipiente superior	41
Figura 15. Trampa de sólidos.....	41
Figura 16. Salida de agua con manguera (salida original del sistema)	42
Figura 17. Esquema del sistema dual	43
Figura 18. Basa del nivel 1 del dispositivo	44
Figura 19. Mesa Wilfley restaurada.....	47
Figura 20. Sistema con todas las uniones.....	50
Figura 21. Sistema dual de salida de agua de la mesa Wilfley	50
Figura 22. Entrada de agua dual a la mesa Wilfley	51
Figura 23. Sistema completo.....	52
Figura 24. Gráfica 1 prueba 3, flujo [L/min] vs tiempo, salida de agua directa de la tubería de Ciudad Universitaria.	56
Figura 25. Gráfica 2. Prueba 4, flujo [L/min] vs Tiempo salida de agua directa de la tubería de Ciudad Universitaria	58
Figura 26. Gráfica 3. Prueba 5, flujo [L/min] vs Tiempo salida de agua del sistema de recirculación.	60
Figura 27. Gráfica 4. Prueba 6 flujo [L/min] vs Tiempo salida de agua del sistema de recirculación	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones prueba inicial de concentración	32
Tabla 2. Rugosidad absoluta de materiales	36
Tabla 3. Valores del coeficiente K de aditamentos.....	37
Tabla 4. Dimensiones para la base del sistema.....	38
Tabla 5. Resultados de la Prueba1. Condiciones: inclinaciones de la mesa 1. 6°, velocidad de pulsación 244.3 rpm y un flujo de agua de 10.17 l/min	48
Tabla 6. Condiciones prueba de arena utilizando el sistema de recirculación	53
Tabla 7. Resultados de la prueba 3. Salida de agua directa Condiciones: flujo de agua medio, inclinación de la mesa 1.7°, 1 kg de Mineral.....	56
Tabla 8. Resultados de la prueba 4. Salida de agua directa. Condiciones: flujo de agua bajo, inclinación 2.21°, 1 kg de mineral.	57
Tabla 9. Resultados de la prueba 5. Salida de agua del sistema de recirculación.. Condiciones: flujo de agua bajo, inclinación 2.22. 1 kg de mineral.	59
Tabla 10. Resultados de la prueba 6. Salida de agua del sistema de recirculación. Condiciones: flujo de agua medio, inclinación 2.22, 1 kg de mineral.	61
Tabla 11. Costos del material.....	63
Tabla 12. Gastos del sistema.....	63
Tabla 13. Total del presupuesto del proyecto.....	64

RESUMEN.

En un planeta en el que la escasez de agua afecta a más del 40 % de la población mundial, reducir el gasto innecesario de agua es imprescindible para cumplir con el sexto de los objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [1].

La escasez y la dificultad de acceso al agua de calidad es un auténtico problema a nivel mundial. Aunque sea un recurso natural renovable, su mal uso puede llevarla a su limitación. Debido a la reducción del agua disponible para el consumo de los seres humanos y de los animales resulta importante usarla responsablemente, tomando conciencia de que no hay que malgastarla y evitar su contaminación.

Para el presente trabajo, se tuvo en cuenta la necesidad de reutilizar, ahorrar y evitar la pérdida del agua en el proceso gravimétrico de concentración con la Mesa Wilfley, en el laboratorio de Beneficio de Minerales de la Facultad de Química, UNAM, la cual emplea un promedio de 107 litros por cada prueba, realizándose al menos 3 experimentos por clase, con un total de 321 litros por sesión de un grupo de 8 laboratorios que se tienen por semestre, por lo que se tiene un consumo de 2,568 litros de agua para una sola sesión de laboratorio por semestre. Ahora bien, esta práctica se realiza en 2 sesiones, dando un gran total de 5, 136 litros utilizados para el uso de dicha mesa la cual es desperdiciada y se va directamente al drenaje de Ciudad Universitaria, sin la posibilidad de reutilizarla, por este motivo el presente trabajo tiene como objetivo diseñar y construir un dispositivo móvil de recirculación de agua.

El diseño y construcción del dispositivo se basa en los principios básicos de zonas de succión y descarga de un sistema de bombeo. Como segundo punto se obtuvo información general sobre flujo de fluidos, pérdidas de carga utilizando la ecuación de Bernoulli y cálculo de la potencia de bomba necesaria.

El dispositivo diseñado operará como una planta de recuperación de agua para la mesa Wilfley, en el laboratorio de Beneficio de Minerales; consta de un armazón móvil de perfil de acero con 2 niveles. En cada nivel se encuentra un recipiente cilíndrico de diferente capacidad; uno de 120 litros y otro de 50 litros. El de mayor capacidad se encuentra en la parte superior, y el de menor capacidad se encuentra en la parte inferior. Estos están conectados entre sí por tubería de PVC, una bomba hidráulica, y entre la bomba y el recipiente de 120 litros, un electro-nivel. Conectado a la salida de agua de la mesa Wilfley, se encuentra un sistema de trampa de sólidos que permite filtrar el agua utilizada en la prueba.

INTRODUCCIÓN.

Cerca de 1,200 millones de personas, casi una quinta parte de la población mundial, vive en áreas de escasez física de agua, mientras que 500 millones se aproximan a esta situación. Otros 1,600 millones, alrededor de un cuarto de la población mundial, se enfrentan a situaciones de escasez económica de agua, donde los países carecen de la infraestructura necesaria para transportar el agua desde ríos y acuíferos.

La escasez de agua constituye uno de los principales desafíos del siglo XXI, al que se están enfrentando ya numerosas sociedades de todo el mundo. A lo largo del último siglo, el uso y consumo de agua creció a un ritmo dos veces superior al de la tasa de crecimiento de la población y, aunque no se puede hablar de escasez hídrica a nivel global, va en aumento el número de regiones con niveles crónicos de carencia de agua[2].

El uso del agua es crucial en la mayoría de los procesos industriales. La industria minera tiene uno de los mayores impactos en los recursos hídricos, ya que agota el suministro de agua con su alto uso y los contamina con descargas o infiltraciones de relaves o embalses de roca estéril. Actualmente es de alta importancia el poder recircular el agua en los proceso de beneficio de minerales[3].

Los métodos de concentración gravimétrica separan minerales de diferente densidad relativa, movimiento relativo, respondiendo a la gravedad y a algunas fuerzas que frecuentemente son la última resistencia al movimiento que ofrece un fluido viscoso, como el agua o el aire. A lo largo de la historia del procesamiento de minerales, se han desarrollado numerosos equipos para llevar a cabo la separación de los minerales por gravedad; sin embargo, actualmente sólo un grupo de dichos equipos ha permanecido en activo.

La Mesa Wilfley es un ejemplo de los procesos de concentración gravimétricos. Es utilizada para la separación de minerales de diferentes densidades utilizando la fuerza de gravedad. Este tipo de equipos gravimétricos requieren de elevadas cantidades de agua. En el laboratorio de Beneficio de Minerales de la Facultad de Química de la UNAM, se cuenta con un Mesa Wilfley, que está colocada de manera que el agua que se utiliza se envía directamente al drenaje de Ciudad Universitaria, sin tener la oportunidad de ser empleada para pruebas posteriores, siendo importante mencionar que emplear el agua reciclada resultante de este proceso, no afecta al concentrado obtenido. Es por este motivo que el presente trabajo tiene como objetivo diseñar y construir un dispositivo móvil de recirculación de agua, que a su vez sea construido con materiales de bajo costo.

HIPÓTESIS.

En el proceso de concentración por mesa Wilfley, el consumo de agua es alto. Si el agua empleada se recupera a partir de un dispositivo de recuperación y recirculación compuesto por depósitos y bomba de agua, se obtendrá un ahorro del 80-90% del agua empleada en el laboratorio de Beneficio de Minerales sin el sistema de recuperación.

OBJETIVOS

Diseñar y construir un dispositivo de recuperación y recirculación de agua, de bajo costo y de fácil operación a nivel laboratorio, para ser empleado en la concentración gravimétrica por Mesa Wilfley, en el laboratorio de Procesamiento de Minerales de la Facultad de Química, UNAM.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1. USO DEL AGUA EN LA MINERÍA

La industria minera tiene un gran impacto en los recursos hídricos, esto es debido al elevado consumo de esta en los procesos de extracción de minerales, por ejemplo el agua se utiliza en: la molienda de minerales, en los procesos de concentración de minerales, los procesos hidrometalúrgicos (lixiviación, extracción por solventes y electro-beneficio), en la electro-refinación , etc.

1.2. BENEFICIO DE MINERALES

Los procesos de beneficio de minerales o menas, son un conjunto de operaciones físicas, que tienen como objetivo liberar los valores de los materiales estériles y obtener un concentrado de valores con alta ley y recuperación de manera rentable.

De forma general, las operaciones más importantes con las cuales se cuenta en las plantas de beneficio son: Trituración, Clasificación por cribado, Molienda, Clasificación por ciclones, Concentración por flotación, Gravimétrica y Magnética, Espesamiento y Filtración.

1.2.1. MÉTODOS DE CONCENTRACIÓN

Concentración: Separación del mineral o metal útil de la ganga.

- **Gravimétrica:** La concentración por gravedad es un proceso en el que partículas de tamaños, formas y gravedad específicas mixtas son separados entre sí en un fluido por la fuerza de la gravedad o por la fuerza centrífuga. El proceso es diseñado para separar partículas por gravedad específica, pero hasta cierto punto también separa partículas en base al tamaño y la forma [4].
- **Flotación:** La separación de minerales mediante técnicas de flotación por espuma depende principalmente de las diferencias en la humectabilidad de partículas. Las partículas a flotar deben adherirse selectivamente a las burbujas de aire, por lo que deben ser hidrófobas. Algunos minerales, como el azufre, son naturalmente hidrófobos, por lo que pueden flotar directamente, pero la mayoría de los minerales son hidrófilos y deben hacerse hidrófobos añadiendo productos químicos de superficie activos seleccionados llamados “collectors”. Estos químicos cubren o adsorben selectivamente los minerales deseados, generalmente asistidos por cualquiera de una serie de reactivos auxiliares. La mayoría de los reactivos auxiliares ayudan a la flotación mediante la adsorción selectiva en las partículas o formando complejos con las muchas especies químicas [4].
- **Magnética:** Se vale de la atracción de ciertos minerales hacia un campo magnético. Todos los materiales pueden ser clasificados en función de sus propiedades magnéticas. Los minerales “paramagnéticos” son atraídos a lo largo de las líneas de fuerza magnética a puntos de mayor intensidad de campo [4].

1.3. MESA CONCENTRADORA

Una mesa concentradora es una máquina de gran ayuda para la pequeña minería, adicionalmente, contribuye con el medio ambiente por su tecnología de no utilizar ningún químico para la concentración del material.

Esta mesa se la puede describir como un plano rectangular o romboide que adicionada a su superficie contiene rifles. El mecanismo de esta mesa funciona mediante un movimiento longitudinal, a lo largo del eje axial, cuando el agua fluye en la dirección del eje más corto, son ejemplos de mesas concentradoras la Mesa Wilfley, Mesa Deister, y otras mesas.

1.3.1. CONCENTRADOR GRAVIMÉTRICO MESA WILFLEY

Las mesas tipo Wilfley son dispositivos de concentración gravimétrica, que separan el material con base en la diferencia de densidades de los materiales a concentrar. Son efectivos en concentrar minerales de alta densidad, tal como metales preciosos. Se ha usado en aplicaciones metalúrgicas, procesamiento de minerales, remediación de suelos y recuperación de minerales ligeros de densidad, tal como carbón al ser separado del material pesado que no tiene valor, a continuación, se presenta el esquema de la mesa Wilfley en la figura 1.

Las mesas Wilfley tienen dos diseños disponibles. Uno está diseñado para recuperar partículas menores a la malla 20 y mayores a la malla 200. El otro tipo está diseñado para partículas finas menores a la malla 200 y menores a la malla 325 [5].

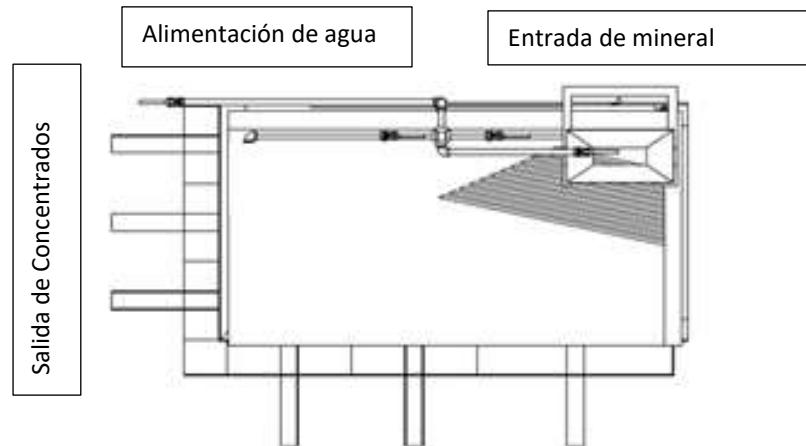


Figura 1. Esquema de la Mesa Wilfley [6(editada)].

1.3.1.1. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN

La mesa Wilfley dispone de un mecanismo que proporciona un movimiento de vibración lateral diferenciado en sentido transversal del flujo de la pulpa, que causa el desplazamiento de las partículas a lo largo de la mesa.

La secuencia final sobre la cubierta inclinada es la siguiente: las partículas finas pesadas en la parte superior de la mesa o cubierta inclinada, y las partículas ligeras gruesas en la zona inferior. Esta secuencia difiere de lo que ocurre en proceso de sedimentación en un clasificador. Es práctica común tener mesas de concentración gravimétrica separadas, cada una con diferentes parámetros operativos, y tratar los diferentes productos de un clasificador [6].

1.3.1.2. VARIABLES DE OPERACIÓN

Entre las más importantes se mencionan:

- Granulometría de la alimentación
- Densidad de la pulpa
- Frecuencia de golpe
- Inclinación de la mesa
- Caudal del agua de lavado.

A causa de que los separadores gravimétricos utilizan el agua, será importante controlar la densidad de la pulpa, la recirculación del agua, aprovechamiento y gestión del agua, por lo que se requieren dispositivos que permitan recircular el agua al sistema, razón por la cual se realizará este trabajo con un sistema de recirculación de agua.

Existen otro tipo de mesas (Fig. 2) que no son tan conocidas en el medio, pero tienen la misma funcionalidad, la única diferencia es la inclinación y ubicación de sus rifles.

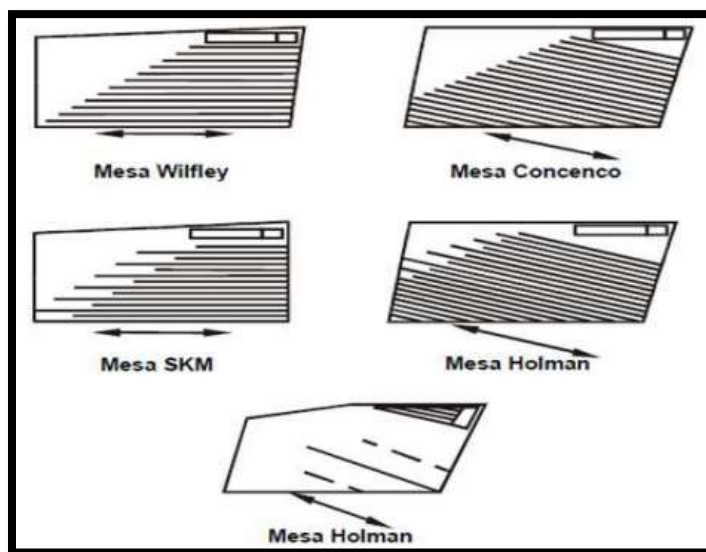


Figura 2. Diferentes tipos de mesas concentradoras [7]

1.4. ESCASEZ DE AGUA

La demanda mundial de agua se ha estimado en alrededor de 4.600 kilómetros cúbicos al año y se prevé que aumente entre un 20% y un 30%, es decir, entre 5,500 y 6,000 kilómetros cúbicos al año para el 2050, según el Informe Mundial de Naciones Unidas sobre desarrollo de Recursos Hídricos 2018 .

El uso global del agua se ha multiplicado por seis en los últimos 100 años y continúa creciendo de manera constante a una tasa aproximada del 1% anual. Se prevé que el uso de agua siga aumentando a nivel mundial, en función del aumento de población, el desarrollo económico y los patrones de consumo cambiantes, entre otros factores .

La escasez de agua es un fenómeno no solo natural, sino también es causado por la acción del ser humano al usarla en forma doméstica o industrial. El uso del agua por parte de la industria representa aproximadamente el 20% de las extracciones globales [8].

1.5. USOS DEL AGUA EN PROCESOS INDUSTRIALES

El control de la emisión de aguas industriales requiere conocimiento del volumen de agua utilizada por unidad de tiempo y de su calidad. Además, implica el conocimiento de las normas de calidad del agua que recibe la industria y la que desecha.

1.5.1 DESECHOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA

Algunas industrias necesitan realizar un tratamiento al agua que reciben, con el fin de obtener la calidad requerida para cada uso. A continuación, se mencionan varios tipos de aguas residuales de diferentes procesos utilizados.

- **Sedimentación**

Generalmente utiliza coagulantes como aluminio o sales de hierro. El material sedimentado y removido del fondo del tanque de sedimentación (lodo), contiene aproximadamente 8% de sólidos y 92% de agua. Esto se puede observar también en el proceso de separación gravimétrica. El agua resultante de este proceso puede recircularse a la operación inicial. La única pérdida de agua es la que contiene finalmente la torta de lodos, usualmente de 50 a 75% de su peso.

- **Ablandamiento**

Consiste en la remoción de iones de calcio y magnesio, que contiene el agua en un intercambiador de cationes o por tratamiento con cal y soda. El lodo sedimentado resultante contiene carbonato de calcio e hidróxido de magnesio. El material final después de reciclar el lodo puede tener una concentración de 25% de sólidos y 75% de agua.

- **Filtración**

El lavado de filtros con corriente de agua limpia origina agua de desecho, que contiene los sólidos retenidos en el filtro. Los filtros se utilizan también para separar el hierro precipitado del agua de pozo, la cual ha sido aireada para oxidar el ion ferroso o férrico. El agua utilizada para el lavado de estos filtros puede usarse nuevamente en esta operación.

- **Intercambio iónico**

Utilizado para aguas blandas mediante un material de intercambio catiónico que remueve el calcio y el magnesio, y los reemplaza con sodio. El material intercambiador generalmente es NaCl y el agua de desecho después de este proceso contiene CaCl_2 , MgCl_2 y el exceso de NaCl empleado.

- **Desmineralización**

Emplea intercambiadores catiónicos y aniónicos que produce agua de calidad similar a la destilada. Los intercambiadores pueden ser de hidróxido de amonio, cáustico, ácido sulfúrico o ácido clorhídrico. El intercambiador catiónico reemplaza los cationes con hidrógeno; así se obtiene un agua ácida que requiere ser desgasificada para retirar el CO_2 y SO_2 [3].

1.5.2 AGUAS DE PROCESOS

El agua en contacto con materias primas, productos intermedios, subproductos o productos finales se denomina agua de proceso, por ejemplo:

- **Limpieza de materia prima**

Algunas materias primas se transportan por agua y se necesita su lavado y retiro.

- **Limpieza de recipientes**

Las aguas utilizadas para recipientes donde se efectúan los concentrados, que se descargan intermitentemente y que requieren de un manejo especial.

- **Refinados**

La extracción de solventes de materiales que contienen agua, es un proceso industrial frecuente. El agua remanente después de la extracción generalmente contiene concentraciones altas de subproductos, y cantidades menores de productos y de solvente.

- **Lavadores de gas**

Los gases que se desprenden de un proceso, usualmente son lavados con agua. Si el gas es de valor, como hidrógeno, este debe lavarse para remover las impurezas y reutilizarlo. Los gases como cloro, cianuro de hidrógeno, sulfuro de hidrógeno o fosgeno son peligrosos, y deberán ser removidos mediante un equipo de lavado eficiente. Una manera de evaluar la eficiencia de este control consiste en el análisis del agua de desecho [4].

1.6 SISTEMAS CERRADOS DE RECIRCULACIÓN DE AGUA

Los sistemas cerrados con tratamiento y recirculación de agua son utilizados comúnmente en los laboratorios de investigación [9]. Los componentes básicos para este sistema de recirculación se mencionan a continuación:

1.6.1 COMPONENTES BÁSICOS DEL SISTEMA

- Sistema de filtración o remoción de sólidos: facilitan la concentración de residuos sólidos para removerlos del sistema.
- Tanques contenedores de agua: facilitan la recolección y concentración de agua para su posterior retorno al sistema.

- Conducción del flujo de agua: el flujo de agua a través del sistema se produce en gran parte por gravedad y en parte por bombeo. La posición de las bombas en el sistema depende de la distribución vertical de los componentes de este y de los tipos de filtro.
- Sistema de bombeo y tabulaciones de drenaje y retorno: en algún punto del sistema es necesario instalar bombas para retornar el agua tratada y hacia los tanques de concentradores de agua. Las dimensiones de las bombas y las tabulaciones deberán efectuarse matemáticamente con buen conocimiento de hidráulica, para evitar sub o super dimensionar el sistema hidráulico [9].

1.7 PRINCIPIOS BÁSICOS PARA EL CÁLCULO DE LAS BOMBAS

- Caudal: Se define como caudal o gasto al volumen de líquido que fluye (es decir que pasa por una sección transversal) en un determinado tiempo. Podemos calcular al caudal como el producto de la sección por la velocidad

$$Q = S \cdot v \quad (1)$$

Donde:

Q: caudal [m³/s]

S: sección [m²]

V: velocidad [m/s]

La sección puede calcularse como:

$$S = \pi \cdot r^2 \quad (2)$$

- **Altura total de aspiración:** Representa la presión a la entrada de la bomba. Es la suma algebraica de la altura estática de aspiración (distancia de la superficie libre del líquido al eje de la bomba), presión existente sobre el líquido y pérdidas de carga por rozamiento de la tubería de aspiración. Los dos primeros sumandos pueden ser positivos o negativos, pero el tercero es siempre negativo.
- **Altura total de impulsión:** Es la suma algebraica de la altura estática de impulsión, pérdida de carga en la impulsión y presión sobre el líquido en el punto de recepción. La diferencia entre las alturas totales de impulsión y de aspiración es la carga de la bomba; es decir, la energía que ha de ser conferida al fluido.
- **Carga neta positiva de succión disponible (NPSH_D):** Es la energía disponible en la succión de la bomba menos la presión de vapor para la temperatura a la cual el fluido es bombeado .
- **Carga Neta Positiva de Succión Requerida (NPSH_R):** Es la energía requerida en la succión de la bomba para forzar al líquido a penetrar en ella.
- **Número de codos, válvulas de retención y demás piezas especiales que supongan una pérdida de carga suplementaria[10].**

Cuando se utilizan accesorios (válvulas, codos, uniones, etc.) es necesario calcular el flujo de agua en los accesorios y la fricción que esta ocasiona.

1.7.1 CARGAS EN EL SISTEMA

La figura 3 describe un sistema básico de bombeo

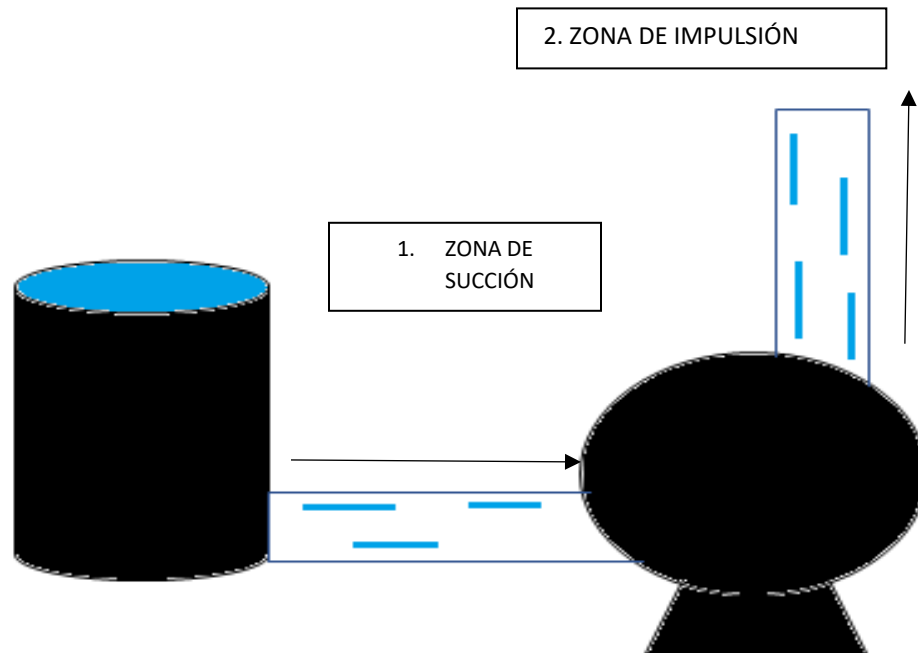


Figura 3. Diagrama de las diferentes secciones del sistema

- La zona de aspiración-succión: es la comprendida entre el tanque desde donde se bombeará el líquido y la bomba.[10]
- La zona de impulsión: es el tramo situado a la salida de la bomba. La energía que la bomba confiere al fluido se mide en términos de presión y es lo que se conoce como carga de la bomba.[10]

1.8 DIAGRAMA DE MOODY

El diagrama de Moody, permite determinar el valor del factor de fricción f a partir de Re y E/D de forma directa ver Figura 4. Es una representación log - log del factor de fricción f frente al Re (número de Reynolds), tomando como parámetro E/D (rugosidad relativa).

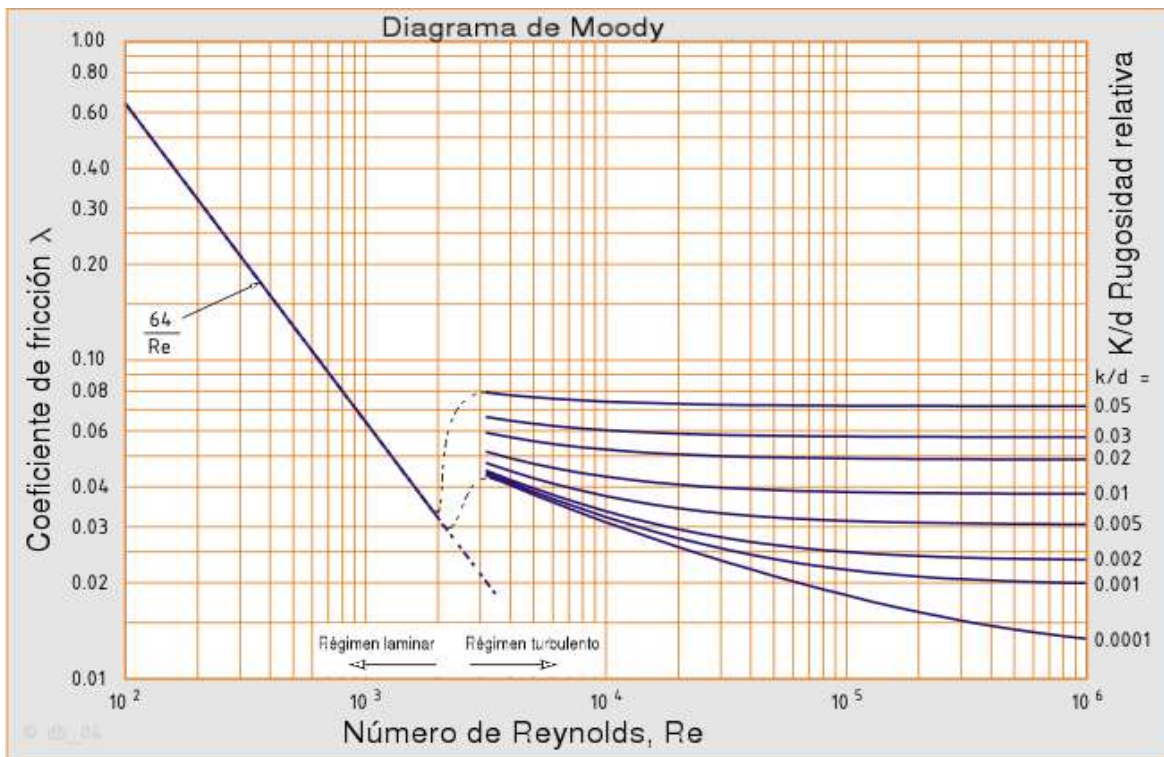


Figura 4. Diagrama de Moody

1.9 RUGOSIDAD RELATIVA

En el interior de los tubos comerciales existen protuberancias o irregularidades de diferentes formas y tamaños cuyo valor medio se conoce como rugosidad absoluta (K), y que puede definirse como la variación media del radio interno de la tubería.

Un mismo valor de rugosidad absoluta puede ser muy importante en tubos de pequeño diámetro y ser insignificante en un tubo de gran diámetro, es decir, la influencia de la rugosidad absoluta depende del tamaño del tubo. Por ello, para caracterizar un tubo por su rugosidad resulta más adecuado utilizar la rugosidad relativa (ϵ), que se define como el cociente entre la rugosidad absoluta y el diámetro de la tubería [10]. Para realizar ese cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$\epsilon = \frac{K}{D} \quad (3)[10]$$

1.10 POTENCIA DE LA BOMBA

Para calcular la potencia que debe comunicarse al fluido, se aplica un balance de energía mecánica entre los puntos 1 y 2 (ver figura 3.); por lo tanto obtenemos la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{v_2^2}{2\alpha_2} - \frac{v_1^2}{2\alpha_1} \right) + g(z_2 - z_1) + \left(\frac{P_2 - P_1}{\rho} \right) + \sum F = W \quad (3)$$

De donde se deduce el valor de W : energía por unidad de masa (J/kg) que precisa el líquido. Sin embargo, la potencia real que consume la bomba será mayor porque al comunicar esta energía al fluido en las partes móviles de la bomba se pierde energía; también hay una pérdida al comunicar el motor eléctrico a las partes móviles y asimismo el motor no aprovecha toda la energía que consume de

la red. De aquí que el consumo real de energía es bastante superior al que se ha deducido de la ecuación anterior (al que se denomina "teórico") [13].

Con el cálculo de la energía (W) y el caudal másico de flujo que se desee (m) se obtiene la potencia teórica necesaria para el flujo deseado:

$$P = W(\text{J/kg}) \cdot m(\text{kg/s}) \quad (4)$$

Para calcular la potencia real que se va a consumir, es necesario conocer el rendimiento total de la bomba.

En ocasiones, los fabricantes proporcionan los rendimientos totales de las bombas, que es el que interesa para el cálculo de la potencia real de la bomba. Para los efectos del cálculo teórico se estima en 75%.

La potencia de la bomba podrá calcularse entonces por la siguiente fórmula

$$P_{(hp)} = \frac{\rho \cdot g \cdot h_b \cdot Q}{746 \cdot \eta} \quad (5)[12]$$

Donde:

ρ : densidad

h_b : cabeza neta de la bomba

h : altura

g : gravedad

η : eficiencia

CAPÍTULO 2

DESARROLLO EXPERIMENTAL

CAPÍTULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El desarrollo experimental del presente trabajo está dividido en 3 etapas, las cuales son: a) Restauración de la Mesa Wilfley y Prueba de concentración gravimétrica por Mesa Wilfley de una arena de playa, b) Diseño y construcción del dispositivo de recirculación de agua para la Mesa Wilfley y c) Prueba de concentración gravimétrica por Mesa Wilfley de arena de playa utilizando el sistema de recirculación construido en la presente tesis, Fig. 6.

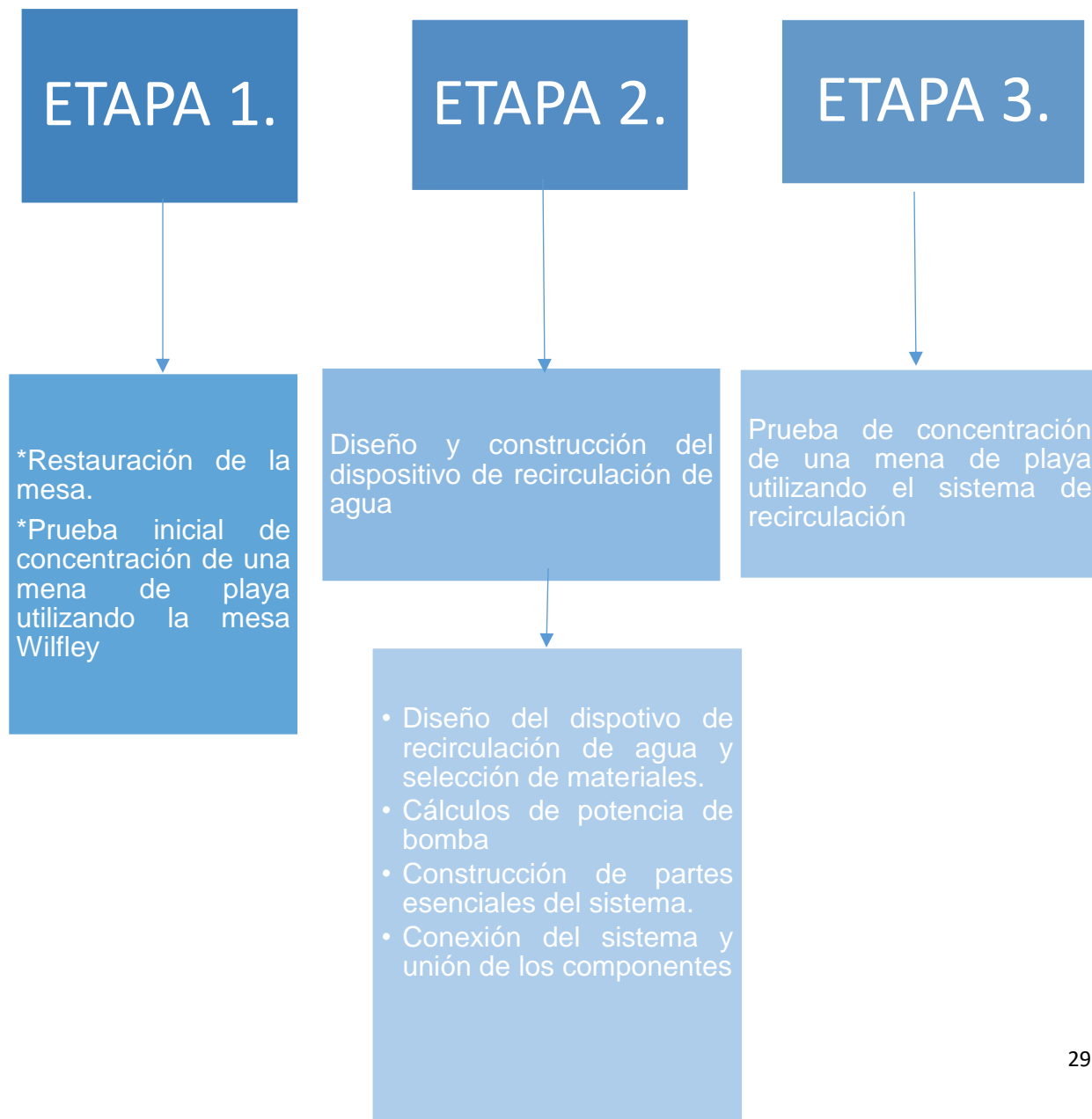


Figura 5. Diagrama de flujo del desarrollo experimental

2.1 ETAPA 1.

2.1.1 RESTAURACIÓN DE LA MESA WILFLEY

Como punto inicial de esta tesis y para tener una Mesa Wilfley funcional fue necesario realizar una restauración con respecto a la apariencia de la mesa y al sistema de alimentación del flujo de agua. Como se puede apreciar en la figura 6, se observa que en la zona de recolección de productos se tienen materiales derivados por la corrosión. Para tener una superficie sin estos productos se realizaron las siguientes mejoras: para la restauración, se realizó un lijado con una lija no. 80 para remover el óxido y asperezas, después con una lija 120 para unificar la superficie y finalmente se pintó la zona de recolección de concentrados con pintura negra base aceite.



Figura 6. Estado inicial de la Mesa Wilfley

Con respecto al sistema de alimentación de agua de la mesa Wilfley, se observó que las llaves de alimentación presentaban óxido, no se abrían o bien algunas presentaban fugas, esto es debido a que no se habían cambiado en años y por lo tanto no se podría tener una alimentación de agua homogénea en toda la mesa, por esta razón se realizó el cambio en las llaves de alimentación de agua por unas llaves de paso de latón de 3/8 de pulgada, como se pueden observar en la figura 7.



Figura 7. Llave de latón 3/8"

Después de realizar la restauración de la mesa se realizó una prueba inicial de concentración gravimétrica en la Mesa Wilfley, esto con la finalidad de conocer el funcionamiento de la mesa y poder tener los puntos donde se alimenta y se desecha el agua de la Mesa Wilfley.

2.1.2 PRUEBA DE CONCENTRACIÓN POR MESA WILFLEY

Para conocer el funcionamiento del equipo de concentración gravimétrica por mesa Wilfley, se realizó una prueba de concentración utilizando arena de playa que contiene un mineral magnético llamada magnetita, para realizar esta prueba se tuvieron las condiciones mostradas en la tabla 1.

Tabla 1. Condiciones prueba inicial de concentración

Masa del mineral	1 kg
Inclinación de la mesa	1.6 °
Velocidad de pulsación	244.3 rpm
Flujo de agua	10.17 l/min
Flujo de alimentación	159.3 g/min

Para realizar la prueba se colocaron las condiciones experimentales en la mesa, se alimentó el mineral en la tolva, se realizó la prueba hasta que ya no había alimentación de mineral en la mesa, en la figura 9 podemos observar la distribución de concentrados de este equipo.



Figura 8. Distribución de concentrados en la mesa Wilfley

Terminada la prueba se filtraron los concentrados, los medios y los estériles, posteriormente se secaron en una estufa de industrias Figursa y se pesaron cada uno de estos productos en una balanza Marca OHAUS modelo CP413. Después de pesar los productos se tomó una muestra representativa de un gramo para ser llevadas a análisis químico por espectrometría de absorción atómica (AA) en un espectrómetro de absorción atómica Pelkin Elmer. Finalmente, con los resultados de AA y peso de los productos se realizó un balance metalúrgico.

Es importante señalar que para la realización de la prueba se recolecto el agua utilizada, con el fin de obtener una aproximación de la cantidad de gasto de agua en una sola prueba.

Una vez realizada la prueba se recolectó la información necesaria para empezar a realizar el diseño del sistema de recirculación de agua.

2.2 ETAPA 2.

2.2.1 DISEÑO DEL DISPOSITIVO DE RECIRCULACIÓN DE AGUA Y SELECCIÓN DE MATERIALES

Para realizar el diseño del equipo de recirculación de agua, se realizó un esquema a computadora. Este diseño se basó en los principios básicos de zonas de succión e impulsión de un sistema de bombeo y en las necesidades de tener un sistema de recirculación que sea funcional y de bajo costo. A continuación, se presenta, el esquema del diseño del dispositivo móvil de recuperación de agua para el concentrador gravimétrico Mesa Wilfley del laboratorio de beneficio de minerales, de la Facultad de Química, UNAM.

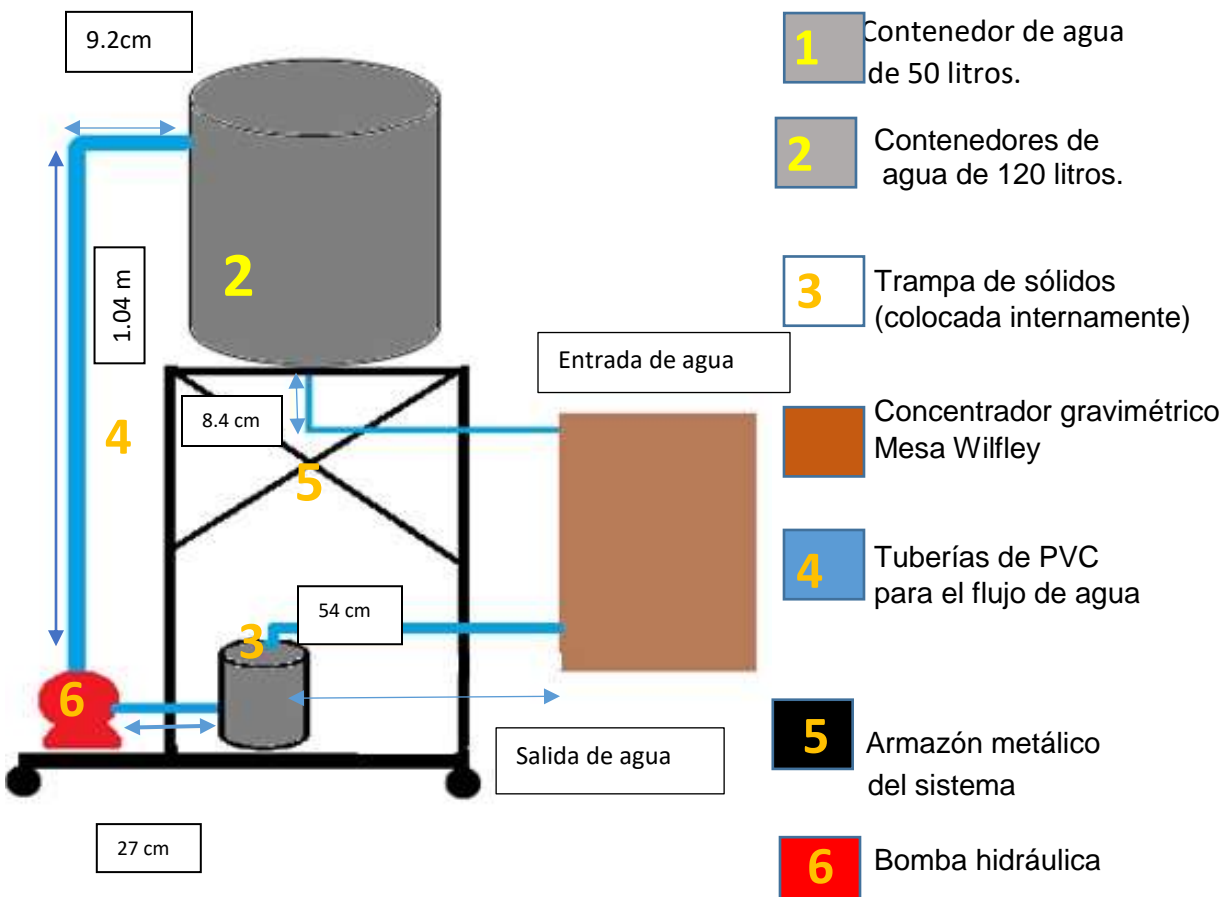


Figura 9. Esquema del dispositivo móvil de recuperación de agua

En la figura 9. Podemos observar el diseño del sistema. El diseño ayudó para poder seleccionar los materiales más adecuados para la construcción del sistema y sus componentes, las selecciones fueron las siguientes:

- 1. Un recipiente cilíndrico inferior, este recipiente al ser la zona de impulsión del sistema no requiere una gran capacidad de almacenaje, por lo tanto, se seleccionó un tambo de polietileno alta densidad de 50 litros.
- 2. Un recipiente cilíndrico superior, este recipiente al ser el recipiente de abastecimiento de agua para la mesa Wilfley necesita de ser de alta capacidad de almacenaje, por lo tanto, se seleccionó un tambo de polietileno alta densidad de 120 litros.
- 3. Trampa de sólidos, la trampa de sólidos tiene como objetivo evitar que parte del material estéril que se va con el flujo de agua sea recirculado al tanque de almacenamiento, el material sólido puede dañar a la bomba y perjudicar los resultados de las prácticas.
- 4. Tuberías y accesorios de PVC, se seleccionó como material para la tubería el PVC por su bajo costo y facilidad de ensamblaje, el material comprado fue : 3 codos de $\frac{1}{2}$ pulgada, 1 codo de $\frac{3}{4}$ de pulgada, 2 tubos de 1 metro con diámetro de $\frac{1}{2}$ pulgada , 2 tubos de 1 metro con diámetro de $\frac{3}{4}$ de pulgada, 1 tuerca unión de $\frac{1}{2}$ pulgada, 1 unión de $\frac{1}{2}$ pulgada, 1 conector macho de $\frac{3}{4}$ de pulgada, 1 conector macho de $\frac{1}{2}$ pulgada,
- 5. El armazón está formado por ángulos de acero comercial, con las siguientes características: espesor por ancho .109" x 1 pulgadas 2.8 x 25.4.
- 6. Una bomba hidráulica, para que la selección de la bomba fuera la adecuada se obtuvo información general sobre flujo de fluidos, pérdidas de carga utilizando la ecuación de Bernoulli y cálculo de la potencia de bomba necesaria y se realizaron los cálculos correspondientes.

2.2.1 CÁLCULO DE POTENCIA REQUERIDA DE LA BOMBA

Para calcular la potencia de la bomba se necesita conocer la cabeza neta de la bomba.

Se tomó el valor de la rugosidad absoluta del PVC de la siguiente tabla [2].

Tabla 2. Rugosidad absoluta de materiales

Material	ε (mm)
Acero comercial	0.0460
Fundición asfaltada	0.1220
Hierro forjado	0.0500
Hierro fundido	0.2500
Hierro galvanizado	0.1500
Madera ensamblada	0.3050
PVC, plástico, cobre, latón, vidrio	0.0015

De la ecuación [3] obtenemos la rugosidad absoluta

Diámetro tubería: 25.4mm

$$\varepsilon = \frac{0.0015 \text{ mm}}{25.4 \text{ mm}} = 0.00005906$$

Con el valor de la rugosidad relativa del PVC y el número de Reynolds se obtuvo el valor de f a través del diagrama de Moody.

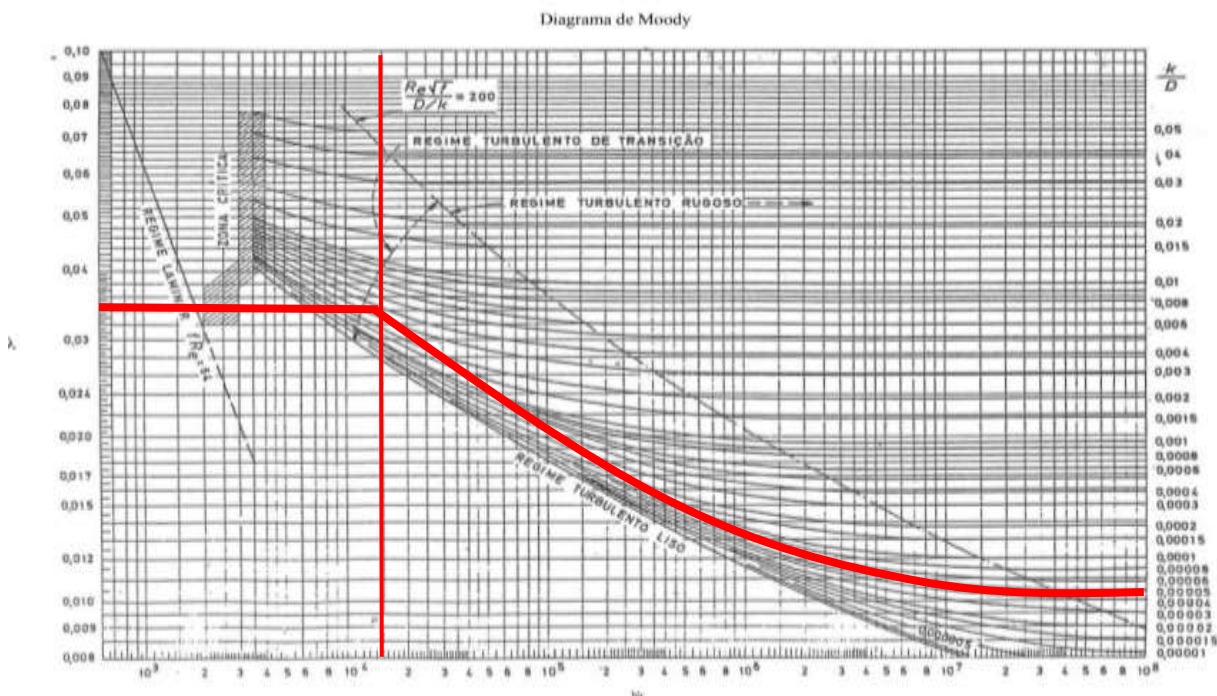


Figura 10. Diagrama Moody con trazas

Como tenemos accesorios; un codo en la zona de descarga, una válvula de globo abierta. Para los coeficientes de pérdida de carga de los accesorios se consultó la bibliografía [14].

Tabla 3. Valores del coeficiente K de aditamentos

ADITAMIENTO	VALOR DE COEFICIENTE (K)
Boquilla	2.8
Codo de 45°	0.4
Codo de 90°	0.9
Codo de retorno	2.2
Entrada de borda	1.0
Te paso directo	0.6
Te salida bilateral	1.8
Te salida lateral	1.3
Válvula de ángulo vierta	5.0
Válvula de globo abierta	10.0
Válvula de compuerta abierta	0.2

Con estos datos se pudo calcular la cabeza neta de la bomba, los cálculos completos se pueden encontrar en el apéndice A .

Por último, se obtuvo la potencia requerida.

$$P_{(hp)} = \left(\frac{1000 \frac{kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * 2.108829616m * 0.0000945 \frac{m^3}{s}}{746 * (.75)} \right) = 0.0019hp$$

Con el valor obtenido se decidió colocar una bomba de .25 hp, ya que es la más pequeña que existe actualmente en el mercado. Con esta última selección se empezó a construir las partes esenciales del sistema.

2.2.2 CONSTRUCCIÓN DE PARTES ESENCIALES DEL SISTEMA

Para la construcción de la base que soporta al sistema de recirculación se utilizaron los ángulos de acero comercial descritos previamente, dichos perfiles estructurales se cortaron en 4 secciones de acuerdo a la tabla 2.

Tabla 4. Dimensiones para la base del sistema

Número de piezas	Dimensiones
4	1.34m
4	46 cm
4	84 cm
4	36 cm

Después de cortar los ángulos para que no quedara filo en ninguna de las esquinas se desbastaron las esquinas con una maquina esmeriladora. Posteriormente se soldaron los ángulos con una máquina para soldadura de arco marca DIMSA, Fig 11.



Figura 11. Máquina de soldadura de arco

Los ángulos se soldaron de manera que se formara un prisma rectangular colocado de manera vertical con dos soportes en dos de los lados , así creamos un armazón de dos niveles como se puede ver en la figura 12. Una vez que el armazón se terminó de soldar, se pintaron los ángulos con pintura negra base aceite para darle un mejor acabado superficial y al mismo tiempo protegerlos de la corrosión.

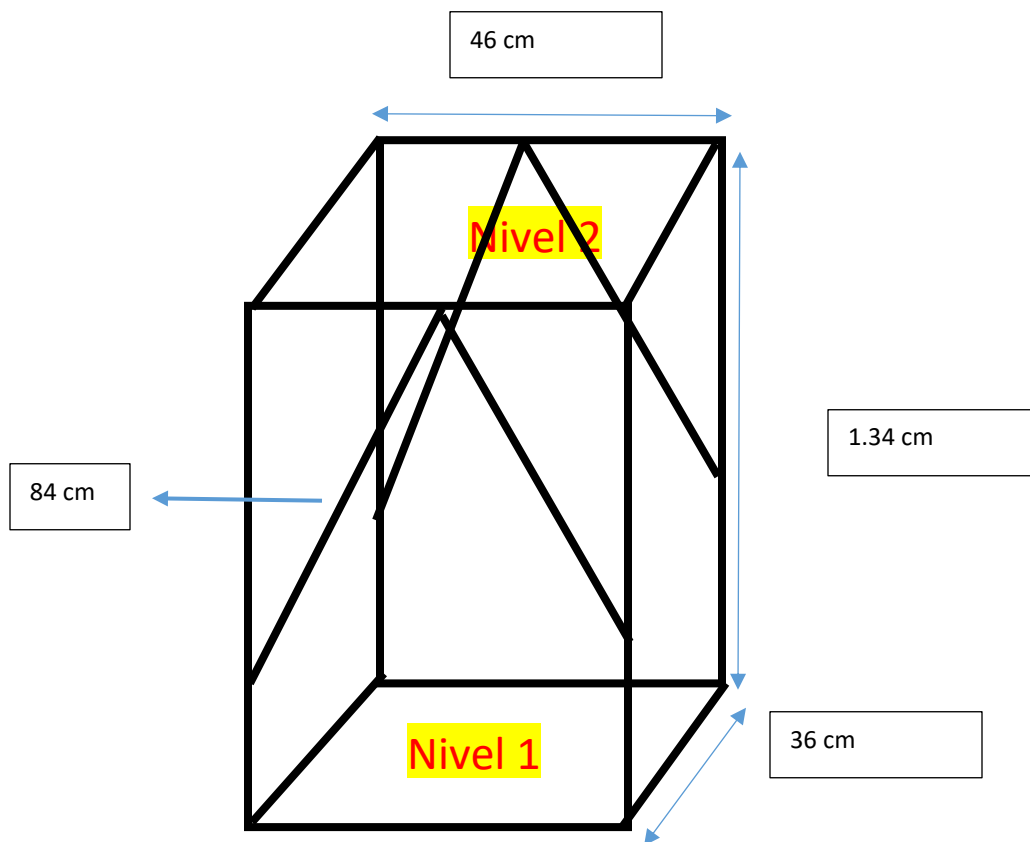


Figura 12. esquema del armazón con dimensiones

En la parte inferior del armazón (nivel 1), se colocó una tabla de madera como base para la posterior colocación de la bomba y el recipiente cilíndrico de 50 lts. La tabla de madera se lijó con una lija 150 para madera con la finalidad de eliminar

asperezas, posteriormente se lijó con una lija 100 para madera con el objetivo de mejorar el acabado superficial y facilitar la adherencia del forro. La base de madera se forró con estoperol negro para protegerla de la humedad, el estoperol se pegó a la madera con Resistol 5000. De igual manera se colocó una tabla de madera forrada con estoperol negro en la base superior con el fin de sostener el recipiente cilíndrico grande. En la base de madera del nivel 1 se colocaron 4 ruedas de caucho Estándar - Giratoria, 4 x 1 1/4" (figura 13)para tener facilidad en mover el armazón hasta la posición deseada.



Figura 13. Ruedas colocadas en la base inferior

En cada nivel se colocó un recipiente cilíndrico de diferente capacidad; en la parte superior uno de 120 litros y en la parte inferior de 50 litros.

En la base del recipiente cilíndrico superior, se realizó una perforación para colocar una brida de 3/4 de pulgada, se selló los bordes entre la brida y el recipiente cilíndrico con plastilina epóxica kola loka para evitar fugas. Por medio de un reductor PVC de 3/4 a 1/2 la brida se conectó a una tubería de PVC de 1/2 de pulgada, en esta tubería se colocó una válvula de globo de metal (Fig. 14) de manera que se pueda controlar el flujo de agua saliente del recipiente cilíndrico.



Figura 14. Salida de agua del recipiente superior

Para la trampa de sólidos se utilizaron dos aros de madera; uno de 23 cm de diámetro, y uno de 21 cm de diámetro, se les aplicó un sellador de nitrocelulosa para madera con el objetivo de para prolongar su vida ya que estarán en contacto con el agua. Se colocó una franela entre los dos aros de manera que estos ejercieran tensión en la franela creando una especie de filtro. Por último, se acondiciono la tapa del recipiente cilíndrico inferior para que la trampa de sólidos pudiera ser colocada y descolocada fácilmente para su limpieza. La trampa de sólidos se muestra en la Figura 15.



Figura 15. Trampa de sólidos

Como parte final de la construcción de las partes esenciales para el sistema de recirculación se realizó un cambio en la salida de agua de la mesa Wilfley. La salida original era una salida con manguera que desembocaba en una trampa de sólidos, y el agua salía de la trampa directo hacia el drenaje de Ciudad Universitaria, como se muestra en la figura 16.



Figura 16. Salida de agua con manguera (salida original del sistema)

Con la finalidad de crear una salida de agua con un sistema dual; por una parte abrir o cerrar una de las llaves para que el flujo de agua se dirija a la trampa del drenaje de Ciudad Universitaria como estaba al inicio o bien, sea enviada al equipo de recirculación de agua como se muestra en la figura 9. Se reemplazó la salida de manguera por una instalación de PVC, utilizando una tubería de $\frac{1}{2}$ pulgada. Para la colocación de la tubería de PVC se limpió y lijó la salida de agua, en esta salida se colocó un adaptador hembra de $\frac{3}{4}$ de pulgada, como la unión de estos dos componentes era metal- PVC, se utilizó silicón industrial para que no existieran fugas. En el adaptador hembra se colocó un reductor de $\frac{3}{4}$ " a $\frac{1}{2}$ " para colocar una tubería vertical, en la tubería vertical se colocó una té PVC de $\frac{1}{2}$ pulgada para conectar una tubería horizontal por la cual pase el agua hacia el sistema de recirculación. Para poder controlar el paso del agua que desembocaba en el drenaje de Ciudad Universitaria y la que es mandada al sistema de

recirculación se colocaron dos válvula esfera de PVC en cada tubería (horizontal y vertical) como se puede observar en la figura 17. Ahora la mesa tiene una doble dualidad .

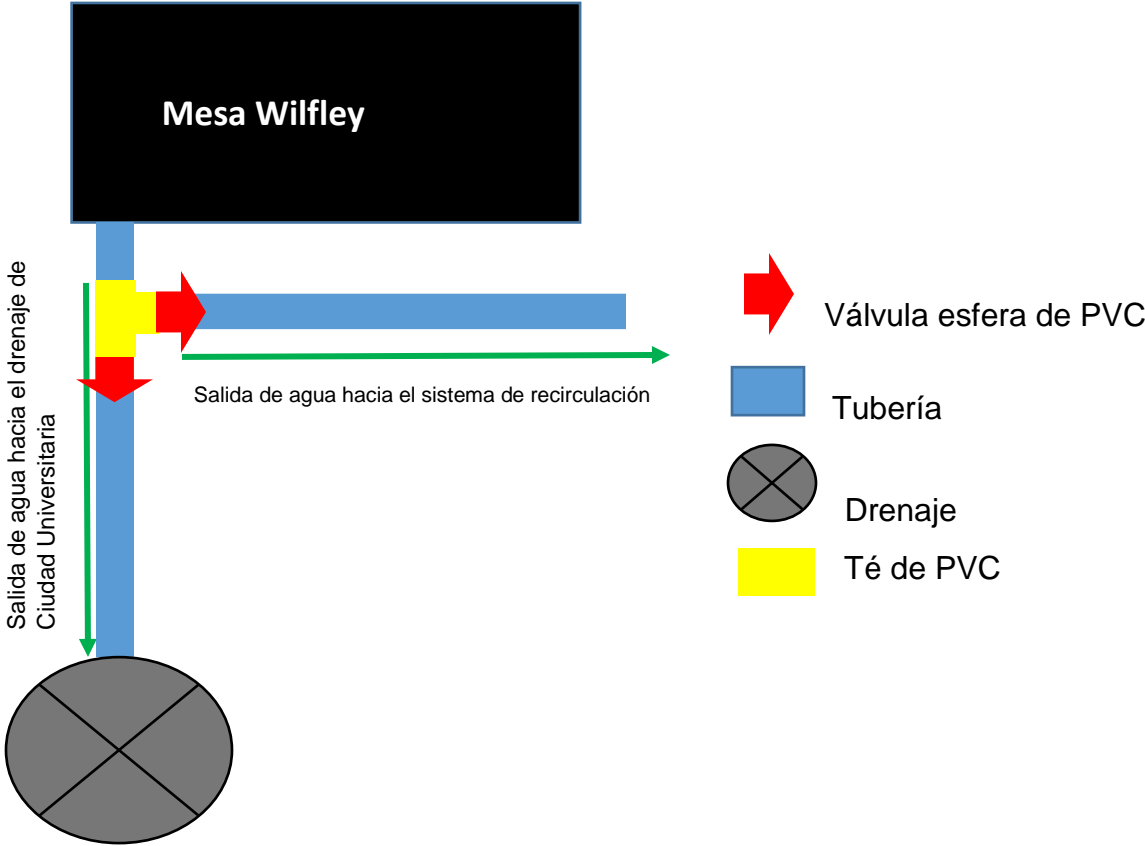


Figura 17. Esquema del sistema dual

Una vez terminado el ensamble del armazón, el cambio en la salida de agua y la construcción de la trampa de sólidos, el siguiente paso es la conexión entre todos los componentes del sistema.

2.2.3 CONEXIÓN DEL SISTEMA Y UNIÓN DE LOS COMPONENTES

Como parte final de la construcción del dispositivo de recirculación de agua se realizaron las conexiones y uniones de todo el sistema. Se colocó la bomba y el recipiente cilíndrico de 50 lts en la base del primer nivel. En la parte baja del recipiente cilíndrico de 50 lts se realizó una perforación, se colocó una brida de $\frac{1}{2}$ pulgada para colocar una tubería de PVC de $\frac{1}{2}$ pulgada y así unir el recipiente cilíndrico a la bomba hidráulica como se muestra en la figura 18. Se sellaron las uniones con pegamento para PVC viscosidad media.



Figura 18. Base del nivel 1 del dispositivo

Para unir el recipiente cilíndrico de 120 lts que se encuentra en el nivel dos y la bomba hidráulica que se encuentra en el nivel uno, se utilizaron unió 2 tubos de 1m de largo y $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro, estos se unieron a través de una unión de PVC de $\frac{3}{4}$. Se colocaron dos electro-niveles; uno en el recipiente superior de 120 lts y el otro en el recipiente inferior de 50 lts, con el objetivo de que el sistema de bombeo sea automático para facilitar su uso, disminuir el consumo de electricidad evitando que la bomba esté prendida por más tiempo del necesario y a su vez evitar que se dañe esta bomba.

Para poder tener el sistema de recirculación de agua en funcionamiento para la realización de las pruebas finales, la salida de agua del sistema de recirculación, que se encuentra en el nivel 2, se conectó a la entrada de agua directa de la mesa Wilfley. Como se reemplazó la tubería de acero por una de PVC de $\frac{1}{2}$ pulgada, para este procedimiento se contactó con un profesional.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 ETAPA 1 RESTAURACIÓN MESA WILFLEY

En la figura 19, se observa la mesa Wilfley restaurada; lijada, pintada y con el cambio de llaves realizado, esto se realizó para tener un mejor control en el sistema de dosificación de agua y una mejor apariencia de la Mesa, de tal forma que se pueda realizar un adecuado manejo en la Mesa Wilfley.



Figura 19. Mesa Wilfley restaurada

3.2 RESULTADOS ETAPA 1 PRUEBA DE CONCENTRACIÓN DE ARENA SIN UTILIZAR EL SISTEMA DE RECIRCULADO

En la tabla no. 5 se observa el balance metalúrgico realizado como prueba inicial para conocer las condiciones adecuadas para controlar la mesa, así como conocer el flujo de agua y la cantidad de agua necesaria para realizar una corrida en este equipo.

Tabla 5. Resultados de la Prueba1. Condiciones: inclinaciones de la mesa 1. 6°, velocidad de pulsación 244.3 rpm y un flujo de agua de 10.17 l/min

Producto	Peso (g.)	% Ley Fe	CM Fe	% Rec Fe
Concentrado (C)	222.6	49.68	110.58	75.10
Medio (M)	681.7	5.074	34.58	23.61
Colas (T)	86.4	2.311	1.30	0.88
Alimentación (F)	990.7	14.78	146.46	100

Con respecto a los resultados obtenidos en esta prueba, se puede observar una alta ley y recuperación en el concentrado, obteniéndose una ley de 49.68% y una recuperación del 75.10%, estos resultados los podemos considerar adecuados, esto es debido a que la ley máxima de hierro en la magnetita pura es de 72.4 %, además es necesario mencionar que debido a las propiedades de la magnetita este no es el proceso idóneo para su concentración y por esta razón en nuestro proceso se tiene una concentración primaria de hierro la mayor cantidad de material restante se encuentra en el producto intermedio el cual se puede recircular a la mesa para obtener un nuevo concentrado. Cabe señalar que la realización de la prueba tuvo una duración de 10 minutos desde que se alimenta el mineral a la tolva hasta que se obtiene los productos finales, con el flujo máximo de alimentación de agua, por lo que el consumo de agua fue de 107 litros. Por esta razón en el diseño del equipo se colocaron dos recipientes de las

dimensiones mostradas en el desarrollo experimental; 1 recipiente cilíndrico superior de 120 litros y un recipiente cilíndrico inferior de 50 litros, que son adecuados para tener suficiente agua de recirculación en este diseño.

Si se extrapola este consumo de agua a la realización de 3 pruebas, en dos sesiones de laboratorio por cada grupo de la asignatura de beneficio de minerales tendrá un consumo de agua de 642 litros de agua por grupo en cada semestre. Si son 8 grupos de laboratorio y se tienen 2 semestres por año se tendrá un consumo de 10, 272 litros de agua anual consumidos en dicho laboratorio sólo para la práctica de concentración por mesa Wilfley.

3.3 ETAPA 2 CONSTRUCCIÓN DE PARTES ESENCIALES DEL SISTEMA Y UNIÓN DE TODOS LOS COMPONENTES

El resultado final de la construcción y armado del sistema de recirculación de agua se puede observar en la figura 20. En donde se tiene como componentes principales a 2 contenedores de agua, uno en la parte superior (segundo piso del sistema), el cual tiene la función de suministrar agua a la mesa Wilfley. El otro contenedor más pequeño está colocado en la parte inferior (primer piso del sistema), este sirve para coleccionar el agua que sea utilizada en las pruebas de la mesa Wilfley, esta se colecciona por medio del sistema dual conectado a la salida de agua de la mesa Wilfley . Otros componentes del sistema de recirculación de agua es la trampa de sólidos que se ha descrito anteriormente, además de la bomba y un arrancador o controlador de nivel. El controlador de nivel tiene la función de indicarle a la bomba cuando accionarse o no, en caso de que el tanque de 120 litros tenga un nivel más bajo que el requerido, por lo que enciende la bomba para obtener nuevamente el nivel adecuado para el tanque superior.



Figura 20. Sistema con todas las uniones



Figura 21. Sistema dual de salida de agua de la mesa Wilfley

La conexión realizada a la entrada de la mesa Wilfley que se puede observar en la figura 22. Nuevamente nos da una función dual dado que en esta conexión se tiene una llave de válvula de globo colocada en el tubo de PVC que está en la parte inferior del contenedor principal de 120 litros, que sería la salida de agua del sistema. La válvula de globo colocada permite abrir o cerrar el flujo de agua a la Mesa Wilfley, esto con la intención de poder suministra agua proveniente de la toma principal de Ciudad Universitaria (como se tenía anteriormente) o bien suministrar el agua de recirculado del sistema. Para suministrar el agua al contenedor superior se realizó la conexión de la bomba entre la zona de succión y la zona de descarga.

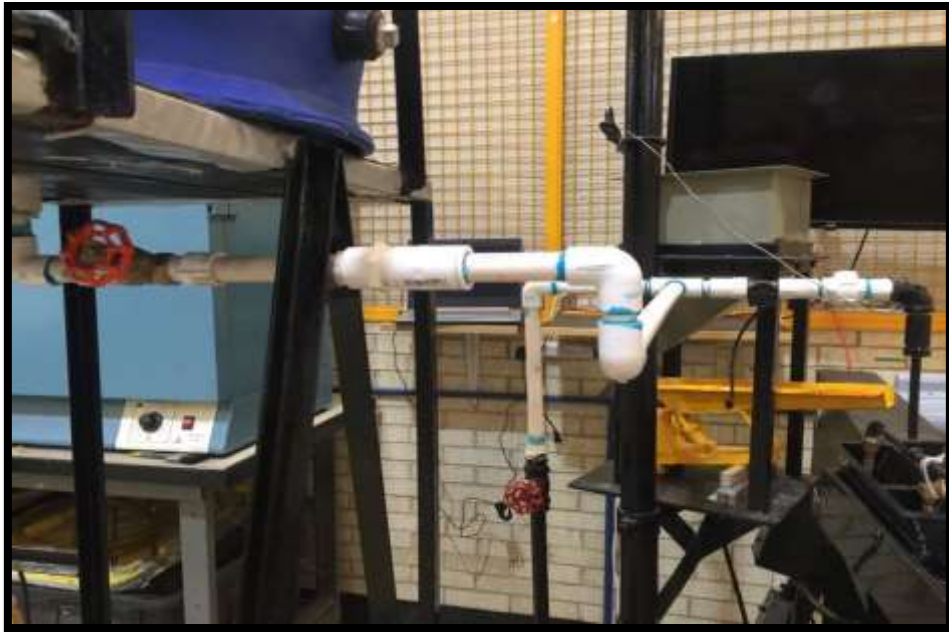


Figura 22. Entrada de agua dual a la mesa Wilfley

Al unir todos los componentes del sistema; bomba, tuberías, codos, trampa de sólidos, recipientes cilíndricos, salidas y entradas de agua, se tuvo el sistema completamente armado como se puede observar en la figura 23.



Figura 23. Sistema de recirculación de agua completo

Una vez completo el sistema, se llenó de agua el recipiente cilíndrico de 120 litros y se dejó correr el agua por el sistema de recirculación para comprobar que no existieran fugas. Las fugas encontradas se sellaron con pegamento para PVC de viscosidad alta, ya que es necesario cerciorarse de no tener fugas para minimizar cualquier pérdida de agua que pudiera existir. Una vez que se comprobó que no existieran fugas y que el sistema funcionaba correctamente, se procedió a realizar diferentes pruebas.

3.4 ETAPA 3. PRUEBA DE CONCENTRACIÓN DE ARENA UTILIZANDO EL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN.

Para verificar que el uso de la mesa Wilfley utilizando el sistema de recirculación de agua se realizó una nueva prueba de concentración utilizando la misma arena de playa que en la prueba 1. En la tabla 6 se muestran las condiciones experimentales de la Mesa .

Tabla 6. Condiciones prueba de arena utilizando el sistema de recirculación

Masa del mineral	1 kg
Inclinación de la mesa	1.6 °
Velocidad de pulsación	254.3 rpm
Flujo de agua	10.90 l/min
Flujo de alimentación	159.5 g/min

Para realizar la prueba se colocaron las condiciones experimentales en la mesa, se alimentó el mineral en la tolva, con ayuda del sistema dual, se cerró la válvula de agua de la mesa que da directamente al drenaje de Ciudad Universitaria y se abrió la válvula de agua que da salida al sistema de recirculación de agua, se conectó la bomba a la toma de corriente y se realizó la prueba hasta que ya no había alimentación de mineral en la mesa. Terminada la prueba se filtraron los concentrados, los medios y los estériles, posteriormente se secaron en una estufa, se tomó una muestra representativa de 1g. para ser llevada a análisis químico por espectrometría de absorción atómica. Finalmente, con los resultados de AA y peso de los productos se realizó un balance metalúrgico.

A continuación, se presenta la tabla 7, correspondiente al balance metalúrgico realizado para la prueba de concentración con el uso del dispositivo de recirculación de agua.

Tabla 7. Resultados de la Prueba 2. Condiciones: inclinación de la mesa 2. 6°, velocidad de pulsación de 254.3 rpm y un flujo de agua de 10.90 l/min.

Producto	Peso (g.)	% Ley Fe	CM Fe	% Rec Fe
Concentrado (C)	261.6	47.56	124.41	74.14
Medio (M)	590.1	6.623	39.08	23.29
Colas (T)	128.3	3.354	4.30	2.56
Alimentación (F)	980	17.12	167.79	100

Comparando las condiciones experimentales realizadas en la etapa 1 y 3 se puede observar que se cambiaron un poco las condiciones con respecto a la prueba 1, esto se debe a que es difícil recrear con exactitud las variables tales como: flujo de agua, ángulo de inclinación y velocidad de pulsación. A pesar de estas circunstancias se puede observar en la tabla 7 que se obtienen resultados comparables con los de la tabla 6 con una ley del concentrado de 47.56 % y una recuperación de 74,14, para ello es necesario señalar que para la realización de la prueba se tomó el tiempo de la prueba de 10 minutos igual a la prueba 1 por lo que el consumo de agua fue de 109 litros, nuevamente si se extrapola este a la realización de 3 pruebas, en dos sesiones de laboratorio se tiene un consumo de agua de 654 litros de agua por grupo en cada semestre. Si son 8 grupos de laboratorio y se tienen 2 semestres por año se tendrá un consumo de 10 464 litros de agua anual. Para tener una mejor aproximación del flujo de agua saliente del sistema, se realizaron pruebas con diferentes flujos.

3.5 ETAPA 3. PRUBAS REALIZADAS A DIFERENTES FLUJOS EN EL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE AGUA Y EN EL PASO DE LLAVE PARA DETERMINAR EL AGUA UTILIZADA Y CONTINUIDAD DE FLUJO.

Para las pruebas con diferentes flujos se tuvo apoyo de un proyecto complementario de un compañero, este consta de un sistema de arduinos¹ conectados en la salida de agua de la mesa Wilfley.

Se realizaron 4 pruebas; dos se realizaron con la salida de agua directa de la tubería de Ciudad Universitaria, y las otras dos con la salida de agua del sistema de recirculación con el fin de evaluar las variaciones en el flujo.

En todas las pruebas se realizó el mismo procedimiento; se colocaron las condiciones experimentales en la mesa. La lectura de las condiciones (inclinación de la mesa, flujo de agua y tiempo) se tomaron con ayuda del sistema de arduinos. Para tomar estos datos se utilizó una computadora que se conectó a las salidas USB del sistema Arduino. La computadora almacenó los datos de flujo y tiempo en formato Excel, a continuación, se alimentó el mineral en la tolva. Al abrir el flujo de agua se dio inicio a la captura de datos en formato excel. Se realizó la prueba hasta que ya no había alimentación de mineral en la mesa, en este punto se pauso la captura de datos del sistema de arduinos. En todas las pruebas se realizó el mismo procedimiento, a continuación se muestran los resultados.

¹El Arduino es una plataforma de desarrollo basada en una placa electrónica de hardware libre que incorpora un microcontrolador re-programable y una serie de pines hembra, los que permiten establecer conexiones entre el microcontrolador y los diferentes sensores y actuadores de una manera muy sencilla (principalmente con cables dupont). La plataforma fue programada de manera que arrojara los datos de lectura del ángulo de la mesa, el flujo y el tiempo en formato excel.

Tabla 7. Resultados de la prueba 3. Salida de agua directa Condiciones: flujo de agua medio, inclinación de la mesa 1.7°, 1 kg de Mineral.

Tiempo [min]	Flujo [L/min]	
1	5	
2	4.85	
3	5.74	
4	5.59	
5	5.59	
6	5.59	
7	5.59	
8	5.44	
9	5.44	
10	4.71	
11	5.74	
12	6.47	
13	6.03	
14	5.88	
15	5.88	
16	5.59	
17	5.59	
TOTAL LITROS		94.72

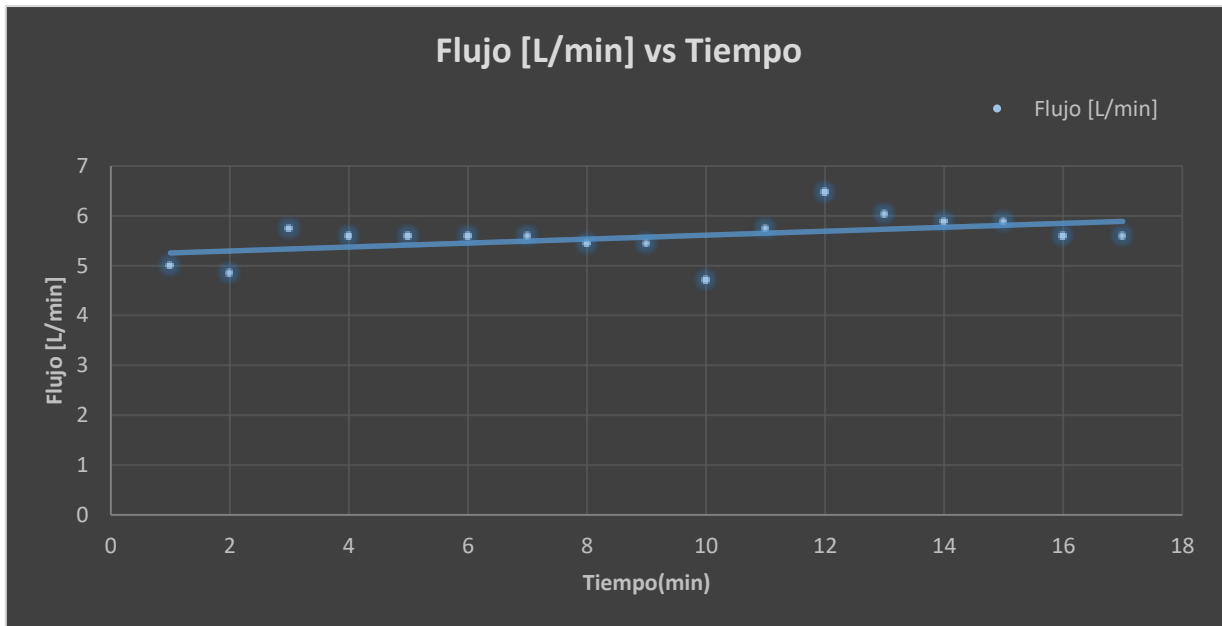


Figura 24. Gráfica 1 prueba 3, flujo [L/min] vs tiempo, salida de agua directa de la tubería de Ciudad Universitaria.

Tabla 8. Resultados de la prueba 4. Salida de agua directa. Condiciones: flujo de agua bajo, inclinación 2.21°, 1 kg de mineral.

Tiempo [min]	Flujo [L/min]	
1	1.47	
2	1.32	
3	1.18	
4	1.03	
5	1.03	
6	1.03	
7	0.88	
8	0.88	
9	1.47	
10	1.47	
11	1.18	
12	1.18	
13	1.18	
14	1.03	
15	1.03	
16	1.03	
17	1.03	
18	1.03	
19	1.03	
20	1.03	
21	1.18	
22	1.18	
23	1.18	
24	1.18	
	TOTAL LITROS	19.42

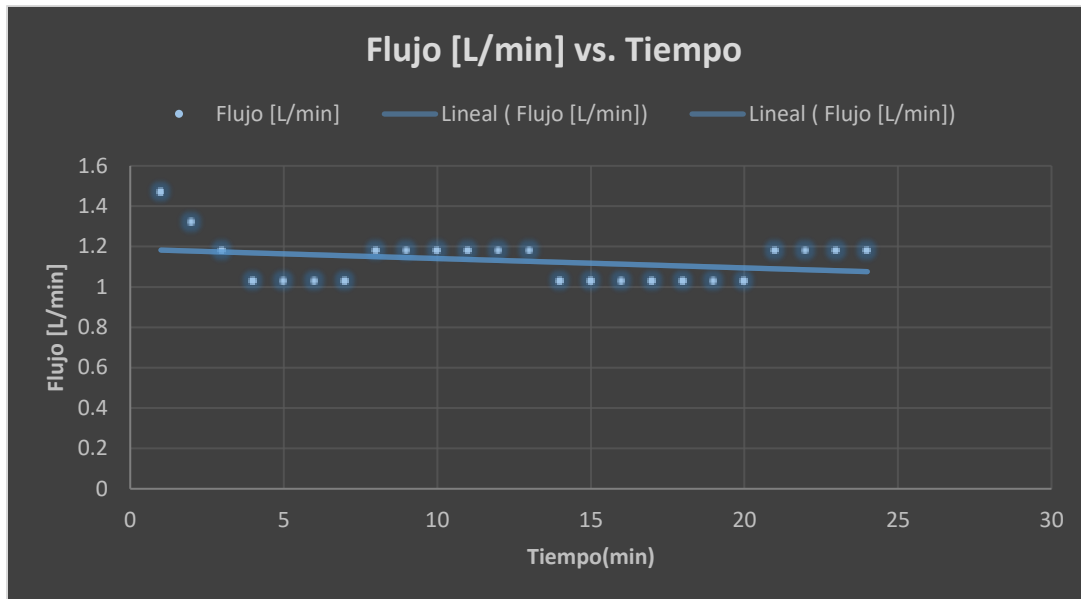


Figura 25. Gráfica 2. Prueba 4, flujo [L/min] vs Tiempo salida de agua directa de la tubería de Ciudad Universitaria

Como podemos observar en las gráficas 1 y 2 el flujo de agua proveniente de las tuberías de Ciudad Universitaria no es constante, este flujo es un factor casi imposible de controlar, ya que existen diversos factores que pueden influir en este.

En la tubería de un sistema de distribución de agua se presume generalmente que el flujo de agua llenará la tubería. En ese caso el caudal en la tubería está controlado por la carga disponible, el diámetro y aspereza de la tubería y las así llamadas pérdidas singulares causadas por diferentes obstrucciones (constricciones, codos, expansiones, téns y especialmente válvulas). Pero, si por alguna razón la tubería no está completamente llena de agua, la relación entre la carga disponible y el caudal será muy diferente. Esto se debe a que la conexión directa de flujo de agua que se tiene en el laboratorio de beneficio es utilizada por muchos usuarios, razón por la cual se tiene una gran variación del flujo. Al no tener información exacta sobre las tuberías y el sistema de distribución de agua de Ciudad Universitaria que provee agua al Laboratorio de Beneficio de Minerales de la Facultad de Química, no se puede saber con lo que ocasiona las variaciones en el flujo.

A continuación en la tabla 9, tenemos los resultados utilizando el sistema de recirculación, tratando de recrear los valores de flujo de la tubería de Ciudad Universitaria.

Tabla 9. Resultados de la prueba 5. Salida de agua del sistema de recirculación.. Condiciones: flujo de agua bajo, inclinación 2.22. 1 kg de mineral.

Tiempo [min]	Flujo [L/min]	
1	1.18	
2	1.32	
3	1.18	
4	1.18	
5	1.32	
6	1.18	
7	1.18	
8	1.32	
9	1.18	
10	1.32	
11	1.18	
12	1.18	
13	1.32	
14	1.18	
15	1.18	
16	1.32	
17	1.18	
18	1.18	
19	1.18	
20	1.32	
21	1.18	
22	1.18	
23	1.18	
24	1.18	
	TOTAL LITROS	20.9

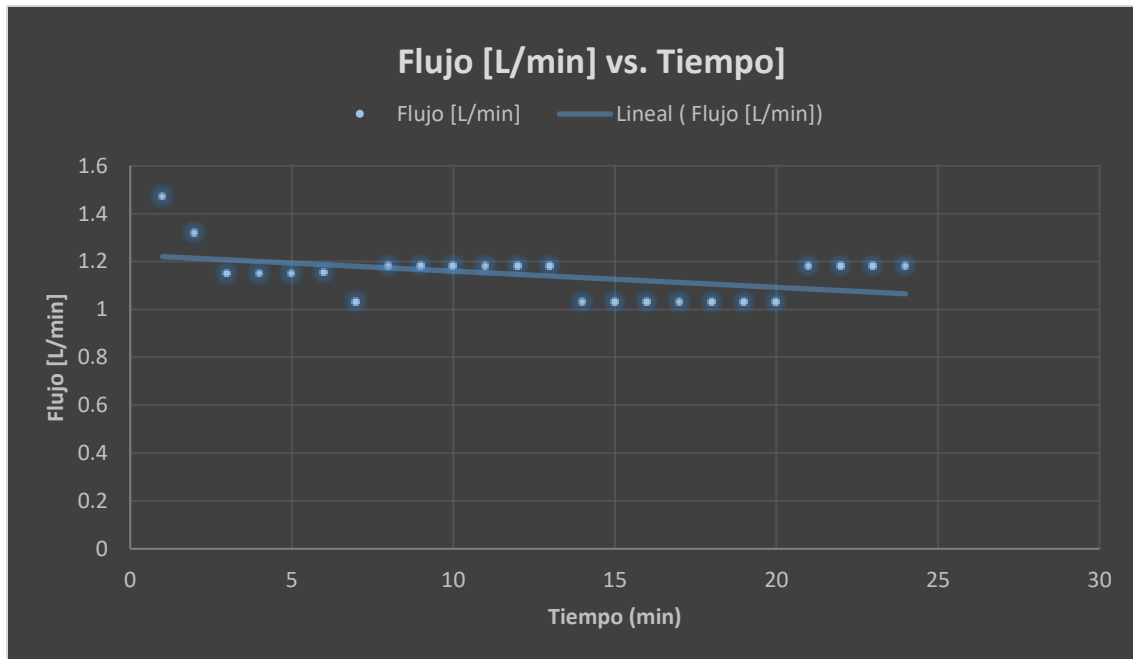


Figura 26. Gráfica 3. Prueba 5, flujo [L/min] vs Tiempo salida de agua del sistema de recirculación.

Para la realización de la prueba 6 se encontró un limitante al tratar de obtener el mismo valor de flujo en el sistema de recirculación que se tiene en la tubería directa de Ciudad Universitaria. Al tener el flujo de salida de agua del contenedor superior únicamente controlado por gravedad, la energía utilizada para el desplazamiento es la energía potencial que tiene el agua por su altura, por lo tanto, el flujo no se puede aumentar más allá de este valor. Con la utilización del circuito cerrado de recirculación de agua se tendrá un mejor control del flujo de agua. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Resultados de la prueba 6. Salida de agua del sistema de recirculación. Condiciones: flujo de agua medio, inclinación 2.22, 1 kg de mineral.

Tiempo [min]	Flujo [L/min]	
1	4.85	
2	4.85	
3	4.74	
4	4.59	
5	4.59	
6	4.59	
7	4.59	
8	4.44	
9	4.44	
10	4.71	
11	4.74	
12	4.47	
13	4.03	
14	4.88	
15	4.88	
16	4.59	
17	5.74	
18	5.78	
19	4.75	
20	4.75	
21	4.75	
22	4.75	
23	4.79	
24	4.75	
25	4.75	
26	4.75	
	TOTAL LITROS	79.72

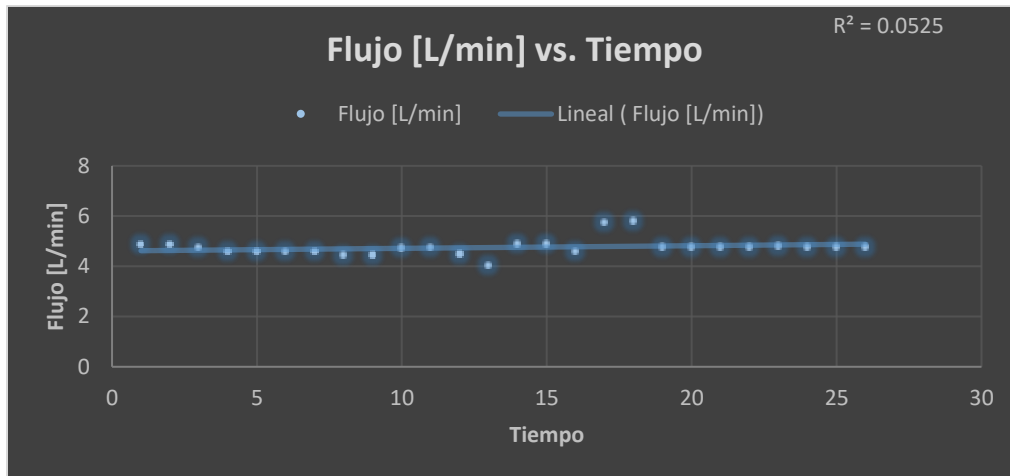


Figura 27. Gráfica 4. Prueba 6 flujo [L/min] vs Tiempo salida de agua del sistema de recirculación

Como podemos observar en la gráfica 4, el flujo de agua del sistema de recirculación da un salto en el valor del flujo y este aumenta. Al utilizar un sistema de bombeo de agua se obtiene un flujo turbulento, este a su vez, ocasiona variaciones en el flujo de salida al aumentar la presión, también existe la posibilidad de tener burbujas de aire en el sistema. La necesidad de cargar agua en el depósito superior de manera automática con ayuda de los electro-niveles ocasionará saltos en el flujo, pero estos ayudaran a reducir costos de gasto de energía y a mantener el sistema de recirculación en funcionamiento.

Como parte final de la construcción del sistema de recirculación de agua aplicado en la concentración gravimétrica por mesa Wilfley, obtuve los costos finales de este equipo que se muestran en la tabla 11, 12 y 13.

Tabla 11. Costos del material

COSTOS DE MATERIALES PARA EL SISTEMA			
Descripción	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Total
Llaves válvula de espiga 1/2	6	29.8	178.8
Tubo PVC de 1/2 plg.	7	15.5	108.5
Tubo PVC de 1 plg.	2	18.2	36.4
Tuerca unión	2	34	68
Tornillos	12	1.5	18
Codos 90° PVC 1/2 plg.	5	6.5	32.5
Codos 90° PVC 1 plg.	1	10	10
Brida 3/4	4	12	48
Llave de paso PVC 1/2 plg.	2	26	52
Válvula de globo de metal 1/2	1	78.2	78.2
Tambo de plastico 50 lts	1	240	240
Tambo de plastico 120 lts	1	586	586
Controlador de nivel automático	2	393	786
Reductor pvc de 1 a 3/4	1	16	16
Bomba de agua .25Cp.	1	1155.17	1155.17
Ángulo de acero	10	74.35	743.5
Ángulos de aluminio	4	17.36	69.44
Recipiente plástico 3 lts.	1	13.78	13.78
Total Costos			4240.29

Tabla 12. Gastos del sistema

GASTOS			
	Cantidad	Precio unitario(\$)	Total
Cinta teflón	2	14	28
Silicon multiusos	2	79	158
Pintura Negra	1	56	56
Lija	2	10	20
Total			262

Tabla 13. Total del presupuesto del proyecto

Total costos de materiales	4240.29
Total de gastos	262
Presupuesto Total del Proyecto	4502.29

De acuerdo a el total del costo y comparando con un equipo comercial, el dispositivo de recirculación de agua es mucho más barato y tiene un fácil manejo para que los estudiantes lo puedan utilizar en la realización de las prácticas de laboratorio de Beneficio de Minerales.

CONCLUSIONES

Se realizó la construcción de un dispositivo de recuperación de agua en el concentrador gravimétrico “Mesa Wilfley” de bajo costo y que dará servicio al laboratorio de Beneficio de Minerales de la Facultad de Química, UNAM.

Los resultados fueron exitosos. Se obtuvo un 98% de recirculación de agua, lo que nos permitirá en futuras prácticas de laboratorio a disminuir notablemente el desperdicio de agua.

A partir del uso del dispositivo de recirculación de agua, utilizado en la práctica de concentración gravimétrica por mesa Wilfley se tendrá un ahorro anual de aproximado de 10,464 litros

Con el uso del equipo de recirculación construido se tendrá un flujo de agua más controlado, que no se tiene en el flujo de agua directo de Ciudad Universitaria.

De acuerdo a las pruebas realizadas, la variación en el flujo de agua entrante a la mesa del sistema de recirculación, no ocasiona problemas en las pruebas, por lo que los resultados de concentrados son similares utilizando el sistema de recirculación o con la toma de agua del laboratorio.

Recomendaciones

1. Llevar una bitácora de uso con la finalidad de saber si el sistema está a su máxima capacidad de agua.
2. Después de utilizar el sistema no dejar la bomba conectada al tomacorriente.
3. Si se dejara de utilizar el sistema por un periodo largo de tiempo, vaciar el contenido de agua almacenada en los recipientes para evitar su estancamiento .

BIBLIOGRAFÍA Y MESOGRAFÍA

1. El país “Desperdicio de agua en las ciudades” *Sostenibilidad para todos* [En línea]. CDMX, disponible en : <https://www.sostenibilidad.com/agua/desperdicio-de-agua-en-las-ciudades/> [Accesado el día 23 de febrero de 2018]
2. Desarrollo Humano 2006 “La escasez de agua” *Más allá de la escasez: Poder, pobreza y crisis mundial del agua* [En línea]. ONU, disponible en: <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/scarcity.shtml> [Accesado el día 25 de febrero de 2018]
3. Seguridad Minera (2016). “Uso del agua en procesos industriales” en *Operaciones Mineras*. [En línea]. Perú, disponible en : <http://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/usos-del-agua-en-procesos-industriales/> [Accesado el 5 de marzo 2018]
4. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., editado por Maurice C. Fuerstenau y Kenneth N. Han (2003) *Principles of Mineral Processing*. Publicado por Exploration Inc., Littleton, Colorado, USA.
5. Procesos de concentración (2015). “Concentración por gravedad (pulsadoras)” en *OCW* .[En línea]. Chile , disponible en: http://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/5555/mod_resource/content/1/Tema_8_Concentracion_por_Gravedad_I_-_Pulsadoras.pdf [Accesado 15 Noviembre 2018].
6. Mineral técnica “Separación por gravedad” [En línea]. Beijing, China, disponible en: <http://www.mgcmsw.org/2018-Dec-18/16249-separacion-por-gravedad-mineral-tecnica-de-prossing-de-mineral.html> [Accesado 17 de Noviembre de 2018]

7. 911 Metallurgist (2012). "Mesa Wilfley de Laboratorio por Concentración Gravimétrica", Canadá. [En línea], disponible en:
<https://www.911metallurgist.com/metalurgia/mesa-wilfley-concentradora-gravimetrica/>
 [Accesado 24 de Noviembre de 2018]
8. Aqua fundación (2018). "Escasez del agua en el mundo", Madrid. [En línea], disponible en :
<https://www.fundacionaqua.org/sostenibilidad/escasez-de-agua-en-el-mundo-naciones-unidas-advierte-que-la-demanda-crecera-hasta-un-30-por-ciento-en-2050>
 [Accesado 15 de Enero de 2019]
9. AgroIndustria (2006) "Sistemas de Recirculación Cerrada", Brasil, Kubitza, F. [En línea], disponible en:
http://www.minagri.gob.ar/SAGPyA/pesca/acuicultura/01=Cultivos/03-Otros_Sistemas/_archivos/000004_Sistemas%20de%20recirculaci%C3%B3n%20cerrada.pdf
 [Accesado 20 de Febrero de 2019]
10. Mecánica de Fluidos (2012) "Impulsión de líquidos", en Rua, I. Martín, R. Salcedo, R. Font California, USA [En línea], disponible en PDF:
https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/20299/4/tema2_impulsion.pdf
 [Accesado 27 de Febrero de 2019]
11. Bird, R. Byron; Stewart, Warren E.; Lighthfoot, Edwin N., "Fenómenos de Transporte". Segunda edición. John Wiley & Sons, (2002) USA.
12. F.A. y Bragg, R. "Fluid Flow for Chemical Engineers". Segunda Edición. Edward Arnold (1995) Holland.
13. Martín, R. Salcedo, R. Font. "Mecánica de Fluidos". Universidad de Alicante, Volumen 1, 2011 España.
14. Kalpakjian, Schmid. "Manufactura, Ingeniería y Tecnología". Cuarta edición. Editorial Pearson. New Jersey, U.S.A. (2002).
15. Kelly, E. y Spottiswood, D., "Introducción al Procesamiento de Minerales", México, Ed. Limusa, 1990.
16. Hayer, C. Peter, "Process Principles in Minerals & Materials Production", Australia, Edit. Hayer Publishing Co., 1993

17. De la Rosa Canales Juan Manuel. “Flotación selectiva de minerales sulfuros de plomo-zinc en presencia de reactivos naturales del tipo quebracho”, tesis Maestro en metalurgia, Facultad de Química, UNAM, 2013.

18. Zepeda Salas Samuel Oswaldo “Implementación y evaluación de un nuevo diseño de sistema de colada y alimentación de una pieza comercial de acero para minimizar defectos” tesis que para obtener el título de Licenciado en Ingeniería Química Metalúrgica. Facultad de Química, UNAM, 2018

19. Diagrama Moody en formato para impresión Disponible en :
<https://previa.uclm.es/area/amf/gonzalo/IngFluidosFiles/Multimedia/Graphs/MoodyPeq.pdf>
[Accesado 5 de Marzo 2019]

APENDICE A. CÁLCULOS PARA LA OBTENCIÓN DE POTENCIA REQUERIDA DE LA BOMBA

Cálculo Flujo:

$$Q = S \cdot v$$

Despejamos V

$$V = \frac{Q}{S}$$

Donde:

- $Q = 5.67 \text{ lpm}$
- $S = \pi \cdot r^2$

Transformamos las unidades de Q

$$\frac{5.67 \text{ lt}}{\text{min}} \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) \left(\frac{0.001 \text{ m}^3}{1 \text{ lt}} \right) = 0.0000945 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Por lo tanto

$$S = \pi \cdot (0.0127 \text{ m})^2$$

$$S = 0.000506707 \text{ m}^2$$

Entonces la velocidad

$$V = \frac{0.0000945 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.000506707 \text{ m}^2} = .1864 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Ecuación Bernoulli:

$$h_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + h_b = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_2 + h_f$$

- Se consideró el punto de referencia como h_1 , por lo tanto; la velocidad en ese punto se puede considerar como 0. La presión 1 y la presión 2 son iguales ya que las dos están bajo presión atmosférica

$$\cancel{h_1} + \cancel{\frac{P_1}{\gamma}} + \cancel{\frac{v_1^2}{2g}} + h_b = \cancel{\frac{P_2}{\gamma}} + \frac{v_2^2}{2g} + h_2 + h_f$$

Entonces la puede reducirse a la siguiente ecuación:

$$h_b = \frac{v_2^2}{2g} + h_2 + h_f \dots\dots\dots 1$$

Para calcular la cabeza neta de la bomba es necesario calcular primero las pérdidas por fricción que existen desde la succión, hasta la descarga (h_f). Para esto se utiliza la ecuación de Darcy.

Ecuación de Darcy.

$$h_f = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{D \cdot 2g}$$

Como tenemos accesorios en el sistema (codos, válvulas de globo, etc.) se deben de considerar sus respectivos coeficientes de pérdida de carga (k) en la ecuación, por lo tanto, tenemos queda de la siguiente manera:

$$h_f = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{D \cdot 2g} + \sum k_c \frac{v^2}{2g} + k_v \frac{v^2}{2g}$$

Factorizando los términos en común tenemos:

$$h_f = \frac{v^2}{2g} \left(f \cdot \frac{L}{d} + \sum K_c + K_v \right) \dots\dots\dots 2$$

Para obtener el coeficiente de fricción (f) se calculó el valor de Reynolds. Se obtuvo un valor de Reynolds

$$Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu} = \frac{D \cdot v}{\gamma}$$

Donde:

D= 0.0254m

γ a 20°: 0.000001007 m²/s

Por lo tanto

$$Re = \frac{0.0254m * .1864 \frac{m}{s}}{0.000001007 \frac{m^2}{s}} = 4701.64846$$

lo que nos indica que es un flujo turbulento.

Al tener un flujo turbulento se usará el Diagrama de Moody para obtener el coeficiente de fricción. Para esto se necesitó calcular la rugosidad relativa.

$$\varepsilon = \frac{0.0015 \text{ mm}}{25.4 \text{ mm}} = 0.00005906$$

El Diagrama de Moody nos da un valor de $f = 0.036$

Con los coeficientes de pérdida de carga de los accesorios obtenidos de la bibliografía, ya se puede calcular la cabeza neta de la bomba.

Cálculo cabeza neta de la bomba

$$h_f = \frac{v^2}{2g} \left(f \cdot \frac{L}{d} + \sum K_c + K_v \right)$$

Donde:

v: 0.1864 m/s

g: 9.81 m/s²

f: 0.036

L: 1.04 m

d: 0.0254m

$$h_f = \frac{(0.1864 \frac{m}{s})^2}{2(9.81 \frac{m}{s^2})} \left(0.036 \cdot \frac{1.04m}{0.0254m} + \sum 0.9 + 10 \right) = 2.108829616m$$

Una vez calculada la cabeza neta, se puede obtener la potencia requerida con la siguiente formula.

$$P_{(hp)} = \frac{\rho \cdot g \cdot h_b \cdot Q}{746 \cdot \eta}$$

Donde:

ρ : 1000 $\frac{kg}{m^3}$

g : 9.81 $\frac{m}{s^2}$

hb: 2.108829616 m

Q: 0.0000945 $\frac{m^3}{s}$

$$P_{(hp)} = \left(\frac{1000 \frac{kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * 2.108829616m * 0.0000945 \frac{m^3}{s}}{746 * (.75)} \right) = 0.0019hp$$