

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS  
PARA ENSAYAR DISPOSITIVOS HIDRÁULICOS DE FLUJO CENTRÍFUGO**

**ANDRÉS ALEXANDER ORTÍZ MORA**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
SAN JUAN DE PASTO  
2010**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS  
PARA ENSAYAR DISPOSITIVOS HIDRÁULICOS DE FLUJO CENTRÍFUGO**

**ANDRÉS ALEXANDER ORTÍZ MORA**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
Ingeniero Civil**

**Asesor:  
HERNÁN JAVIER GÓMEZ ZAMBRANO  
Ingeniero Civil  
Magíster en Recursos Hidráulicos**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
SAN JUAN DE PASTO  
2010**

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del Presidente del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

**San Juan de Pasto, Noviembre de 2010**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	20
1. DISEÑO.....	25
1.1 CONCEPTOS GENERALES .....	25
1.2 DESCRIPCION DEL MONTAJE DE LABORATORIO .....	26
1.3 Diseño de sistema de bombeo .....	27
1.4 SEDIMENTACION.....	36
1.5 DISEÑO DEL DESARENADOR DE ALTA TASA .....	45
1.6 CÁLCULO DE LOS VERTEDEROS TRIANGULARES .....	57
1.7 DISEÑO DE TOLVAS DE ALMACENAJE .....	58
1.8 DISEÑO DE LA CANALETA EN ESPIRAL.....	63
1.9 DISEÑO DEL SEPARADOR DE TUBO CURVO.....	67
1.10 DISEÑO DEL SEPARADOR CICLÓNICO.....	68
1.11 CONSTRUCCIÓN BANCO DE PRUEBAS .....	74
1.12 Tolvas de Almacenaje Material Sedimentable.....	78
1.13 Estructura de soporte .....	80
1.14 Equipos y accesorios.....	82
1.15 Construcción dispositivos hidráulicos (Hidrociclón) .....	84
1.16 ENSAMBLAMIENTO DE COMPONENTES .....	87
1.17 ENSAMBLE DE TOLVA ALMACENAJE DE SEDIMENTOS .....	90
1.18 ENSAMBLE Y CALIBRACIÓN BOMBA DE IMPULSIÓN .....	91
1.19 CALIBRACION - CAUDAL DE LA BOMBA DE IMPULSIÓN.....	92

1.20	CALIBRACION DEL DISPOSITIVO ENSAYADO.....	99
1.21	AFORO DE CAUDALES TOLVAS .....	100
1.22	GUIA DE LABORATORIO .....	118
	CONCLUSIONES.....	120
	RECOMENDACIONES .....	122
	BIBLIOGRAFÍA .....	123
	ANEXOS .....	124

## LISTA DE TABLAS

Tabla N°1.	Accesorios Succión.....	29
Tabla N°2.	Accesorios Impulsión .....	29
Tabla N°3.	Datos de caudal y cabeza dinámica total de la instalación de laboratorio. ....	30
Tabla N°4.	Presiones a distintas temperaturas del agua en m.c.a.....	35
Tabla N°5.	Valores de coeficiente de arrastre .....	42
Tabla N°6.	Valores de altura, coeficiente de gasto y caudal en el vertedero triangular de ángulo interno 45°. ....	58
Tabla N°7.	Coordenadas del perfil transversal de la canaleta en espiral FGL, a escala 1:1. ....	67
Tabla N°8.	Caudal Total de Impulsión de la Bomba .....	94
Tabla N°9.	Valores de aforo de bomba a diferentes presiones de trabajo. ....	95
Tabla N°10.	Tabla de conversión para diferentes unidades de presión.....	96
Tabla N°11.	Ecuaciones Teórica y de fabricante de bomba de impulsión.....	97
Tabla N°12.	Valores de aforo de la bomba experimentales y teóricos a diferentes presiones de trabajo.....	98
Tabla N°13.	Valores de aforo tolva almacenaje de sedimentos.....	101
Tabla N°14.	Valores peso específico arena blanca. ....	103
Tabla N°15.	Valores peso específico arena café. ....	103
Tabla N°16.	Valores peso específico arena amarilla .....	103
Tabla N°17.	Valores peso específico plomo .....	104

Tabla N°18.	Aforo caudal arena blanca .....	104
Tabla N°19.	Aforo caudal arena café. ....	104
Tabla N°20.	Aforo caudal arena amarilla. ....	105
Tabla N°21.	Aforo Vertederos Tanque de 0,5 m. ....	108
Tabla N°22.	Valores de Altura y Caudal para el Tanque de 0,5 m. ....	109
Tabla N°23.	Valores de Altura y Caudal corregidos para el Tanque de 0,5 m. ....	111
Tabla N°24.	Aforo Vertederos Tanque de 0,25 m. ....	112
Tabla N°25.	Valores de Altura y Caudal para el Tanque de 0,25 m. ....	115
Tabla N°26.	Valores de Altura y Caudal corregidos para el Tanque de 0,25 m. ....	116

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Esquema del montaje de laboratorio. $Q_m$ es el caudal de la mezcla, $Q_S$ es el caudal sólido y $Q_L$ es el caudal líquido. ....	27
Figura 2.	Curva de comportamiento del sistema.....	31
Figura 3.	Curva característica de la Bomba IHM.....	32
Figura 4.	Curva característica de la Bomba BARNES. ....	33
Figura 5.	Curva característica de la Bomba IHM, BARNES y curva del sistema.....	34
Figura 6.	Fuerzas actuantes en una partícula.....	39
Figura 7.	Velocidad de asentamiento y flotación de esferas discretas en un fluido estático $V_s = K_2 X_2$ .....	44
Figura 8.	Velocidad de asentamiento y flotación de esferas discretas en un fluido estático $V_s = K_2 X_2$ .....	45
Figura 9.	Dimensiones de las placas .....	47
Figura 10.	Esquema general del Desarenador de placas inclinadas. ....	49
Figura 11.	Datos de entrada y de salida para el diseño del desarenador de placas inclinadas.....	51
Figura 12.	Zona de entrada tanque desarenador.....	52
Figura 13.	Zona de sedimentación placas inclinadas.....	55
Figura 14.	Zona recolección tolvas de almacenaje partículas sedimentadas.....	55
Figura 15.	Tubería de recolección salida de tanque desarenador. ....	56

Figura 16.	Vertedero rectangular mezcla rápida. ....	60
Figura 17.	Fotografía de una espiral concentradora. ....	63
Figura 18.	Sección transversal típica de la espiral. ....	65
Figura 19.	Geometría de la canaleta en espiral. ....	65
Figura 20.	Geometría de la sección transversal original de la canaleta en espiral FGL .....	66
Figura 21.	Geometría del separador de tubo curvo.....	68
Figura 22.	Geometría de un hidrociclón de fondo plano y el esquema de las corrientes internas. ....	70
Figura 23.	Diagrama de flujo del hidrociclón convencional. ....	71
Figura 24.	Geometría del hidrociclón. ....	73
Figura 25.	Fotografía del tanque desarenador etapa de construcción.....	74
Figura 26.	Fotografía de tanque desarenador montaje definitivo.....	75
Figura 27.	Fotografía de tanque desarenador instalado en el laboratorio.....	76
Figura 28.	Fotografías de elaboración tolvas acrílicas.....	76
Figura 29.	Fotografía fondo del tanque desarenador.....	77
Figura 30.	Fotografías de la tolva de almacenaje en su proceso constructivo.....	78
Figura 31.	Tolva de almacenaje acabado final.....	79
Figura 32.	Tolva de almacenaje montaje definitivo.....	79
Figura 33.	Estructura de anclaje dispositivo hidráulico Hidrociclón.....	80
Figura 34.	Estructura de soporte disposición final.....	81

Figura 35.	Estructura final Banco de pruebas para ensayar dispositivos hidráulicos de flujo centrifugo. ....	81
Figura 36.	Bomba de impulsión.....	82
Figura 37.	Montaje bomba de impulsión. ....	82
Figura 38.	Tanque de abastecimiento.....	83
Figura 39.	Manómetro Medidor de Presiones tipo bourdon. ....	84
Figura 40.	Corte del acrílico .....	84
Figura 41.	Molde en cartón paja.....	84
Figura 42.	Calentado acrílico en horno .....	85
Figura 43.	Manipulado del acrílico .....	85
Figura 44.	Pegado del acrílico con inyección.....	85
Figura 45.	Hidrociclón final.....	85
Figura 46.	Corte de molde circular .....	86
Figura 47.	Tapa para hidrociclón.....	86
Figura 48.	Hidrociclón terminado. ....	86
Figura 49.	Canal curvo terminado.....	87
Figura 50.	Espiral concentradora terminada. ....	87
Figura 51.	Elementos químicos de limpieza y componentes de trabajo .....	88
Figura 52.	Ensamble de accesorios .....	89
Figura 53.	Acople de tubería y accesorios.....	89
Figura 54.	Pieza asegurada al sistema. ....	90
Figura 55.	Tolva de almacenaje de sedimento.....	91
Figura 56.	Ensamble de la bomba de impulsión .....	91
Figura 57.	Aforo caudal bomba de impulsión.....	92

Figura 58.	Gráfica Presión Vs. Caudal para un volumen de aforo de 30 litros. ....	97
Figura 59.	Gráfica Presión Vs. Caudal de los valores obtenidos mediante los dos métodos .....	99
Figura 60.	Disposición final del Sistema .....	100
Figura 61.	Fotografías de la Tolva de almacenaje y sus orificios.....	101
Figura 62.	Sección Vertedero triangular.....	106
Figura 63.	Dimensiones recomendadas vertederos triangulares .....	106
Figura 64.	Disposición final vertederos triangulares.....	107
Figura 65.	Aforo vertederos triangulares.....	107
Figura 66.	Gráfica Caudal Vs. Altura para el Tanque de 0,5 m.....	110
Figura 67.	Gráfica Caudal corregido Vs. Altura para el Tanque de 0,5 m.....	112
Figura 68.	Gráfica Caudal Vs. Altura para el Tanque de 0,25 m.....	116
Figura 69.	Gráfica Caudal corregido Vs. Altura para el Tanque de 0,25 m.....	117
Figura 70.	Camara de salida tanque sedimentador .....	118

## LISTA DE PLANOS

- Plano 1. Plano General vista perfil banco de pruebas.
- Plano 2. Plano General vista en planta corte A-A y B-B
- Plano 3. Canales curvos Tipo 1,2 y 3 vista en planta, perfil y 3D
- Plano 4. Hidrociclón vista en planta, perfil y 3D
- Plano 5. Espiral concentradora vista en planta, perfil y 3D

## NOMENCLATURA DE SIMBOLOS

<b><i>AT</i></b>	Área horizontal total
<b><i>BI</i></b>	Borde libre
<b><i>C<sub>H</sub></i></b>	Coefficiente de fricción de Hazen-Williams
<b><i>d</i></b>	Separación de las placas
<b><i>D<sub>i</sub></i></b>	Diámetro de la impulsión
<b><i>D<sub>s</sub></i></b>	Diámetro de la succión
<b><i>g</i></b>	Gravedad dada en m/s <sup>2</sup>
<b><i>h<sub>bar</sub></i></b>	Pérdida por altura barométrica
<b><i>H<sub>est</sub></i></b>	Altura estática total en m
<b><i>H<sub>f</sub></i></b>	Perdidas por fricción
<b><i>H<sub>L</sub></i></b>	Perdidas por accesorio
<b><i>h<sub>t</sub></i></b>	Altura libre por debajo de las placas
<b><i>h<sub>vacio</sub></i></b>	Pérdida por vacio imperfecto de la bomba
<b><i>K</i></b>	Coefficiente de pérdida
<b><i>L</i></b>	Longitud interna del tanque desarenador
<b><i>L<sub>n</sub></i></b>	Longitud neta ocupada por las placas
<b><i>L<sub>p</sub></i></b>	longitud inclinada de cada placa
<b><i>NP</i></b>	Numero de placas
<b><i>P<sub>atm</sub></i></b>	Presión atmosférica sobre la bomba
<b><i>Q<sub>m</sub></i></b>	Caudal de la mezcla
<b><i>Q<sub>s</sub></i></b>	Caudal solido
<b><i>V</i></b>	Velocidad en m/s
<b><i>V<sub>o</sub></i></b>	Velocidad media
<b><i>V<sub>sc</sub></i></b>	Velocidad de sedimentación critica
<b><i>Visw</i></b>	Viscosidad cinemática del agua

## NOMENCLATURA DE SIMBOLOS GRIEGOS

$\phi$	Angulo de inclinación del lado de las tolvas Ángulo de inclinación de las placas del desarenador
$\eta$	Eficiencia de separación

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>gpm</b>	Galones por minuto
<b>HP</b>	Caballos de Fuerza
<b>Lpm</b>	Litros por minuto
<b>m.c.a.</b>	Metros de columna de agua
<b>m.s.n.m.</b>	Metros sobre el nivel del mar
<b>RDE</b>	Relación Diámetro Espesor

## GLOSARIO

**Hidráulica.** Es la ciencia que estudia la ingeniería del comportamiento de los líquidos con respecto a la presión y al flujo de los mismos.

**Afluente.** Agua, agua residual u otro líquido que ingrese a un reservorio, o a algún proceso de tratamiento.

**Aguas crudas.** Aguas residuales que no han sido tratadas.

**Caudal.** Volumen de agua por unidad de tiempo  $q$  escurre por un cauce o conducto.

**Carga superficial.** Caudal o masa de un parámetro por unidad de área y por unidad de tiempo, que se emplea para dimensionar un proceso de tratamiento  $m/(m^2\text{día})$ ,  $kg\ DBO/(\text{ha día})$ .

**Concentración.** Denominase concentración de una sustancia, elemento o compuesto en un líquido, la relación existente entre su peso y el volumen del líquido que lo contiene.

**Criterios de diseño.** 1. Normas o guías de ingeniería que especifican objetivos, resultados o límites que deben cumplirse en el diseño de un proceso, estructura o componente de un sistema. 2. Guías que especifican detalles de construcción y materiales.

**Desarenadores.** Cámara diseñada para permitir la separación gravitacional de sólidos minerales (arena).

**Deshidratación de lodos.** Proceso de remoción del agua de lodos hasta formar una pasta.

**Disposición final.** Disposición del efluente de un proceso.

**Eficiencia de tratamiento.** Relación entre la masa o concentración removida y la masa o concentración en el efluente, para un proceso o planta de tratamiento y un parámetro específico; normalmente se expresa en porcentaje.

**Efluente.** Líquido que sale de un proceso de tratamiento.

**Permeabilidad.** Capacidad de un material para permitir que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se dice que un material es permeable si deja

pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable. La velocidad con la que el fluido atraviesa el material depende del tipo de material, de la naturaleza del fluido, de la presión del fluido y de la temperatura. La penetrabilidad suele considerarse sinónimo de permeabilidad.

**Sedimentación.** Proceso de clarificación de las aguas mediante la precipitación de sólidos.

**Sólidos sedimentables.** Materia sólida que sedimenta en un período de tiempo determinado.

**Vertederos.** Todos los vertederos poseen una ecuación general para el caudal. Esta ecuación general depende de la gravedad, de su geometría, de su espesor de pared. La variable independiente será siempre la altura de la lámina de agua sobre el nivel de referencia. De esta forma cualquier vertedero puede calibrarse mediante una curva de calibración del mismo con base en diferentes alturas de la lámina de agua de los diferentes caudales.

**Volumétrico.** El aforo volumétrico consiste en recoger en un tiempo específico una cantidad de material que se está aforando o recoger un volumen específico midiendo el tiempo utilizado en la recolección de éste. Es útil para aforos puntuales de tamaño pequeño.

**Conexiones.** Tee, bridas, reducciones, codos, etc.

**Corrosión.** Es el proceso de naturaleza electroquímica, por medio del cual los metales refinados tienden a formar compuestos (óxidos, hidróxidos, etc.) termodinámicamente estables debido a la interacción con el medio.

**Evaluación.** Es la determinación de la integridad mecánica de una instalación existente.

**Grieta o fisura.** Hendidura o abertura pequeña en la pared del tubo o en soldaduras longitudinales o circunferenciales.

**Imperfecciones.** Son las que se encuentran dentro de los límites de aceptación o "dentro de Norma". Pueden ser de fabricación (inclusiones no metálicas, etc.), así como también corrosiones interiores o exteriores, abolladuras, arrancaduras, etc.

**Instalación superficial.** Porción de ducto no enterrado utilizado en troncales, válvulas de seccionamiento, trampas de envío y recibo que se emplean para desviar, reducir y regular la presión en el ducto, incluye válvulas, instrumentos de control y tubería.

**Mantenimiento preventivo.** Acción u operación que se aplica antes de que ocurran fallas, manteniendo en buenas condiciones y en servicio continuo a todos los elementos que integran un ducto terrestre, a fin de no interrumpir las operaciones de este; así como de corrección de anomalías detectadas en su etapa inicial producto de la inspección al sistema, mediante programas derivados de un plan de mantenimiento, procurando que sea en el menor tiempo y costo.

**Pruebas destructivas.** Son aquellas en que las propiedades físicas de un material son alteradas y sufren cambio en la estructura.

**Soporte.** Elemento que soporta tanto cargas estáticas como dinámicas en la tubería y equipos a los cuales se encuentra asociado.

**Tubería.** Componente de diferentes materiales que se utilizan dentro de un sistema de ductos.

**Tubo.** Porción cilíndrica que se utiliza estructuralmente o como parte de un sistema de conducción.

**Válvulas de alivio.** Es un dispositivo relevador automático de presión, actuando por presión estática aplicada sobre la válvula.

**Válvulas de seccionamiento.** Dispositivo que se utiliza para seccionar tramos de tubería para reparación, mantenimiento o emergencia del ducto y que se encuentra espaciada de acuerdo a su localización.

**Manómetro.** Es un aparato de medida que sirve para medir la presión de fluidos contenidos en recipientes cerrados. Existen, básicamente, dos tipos: los de líquidos y los de gases

**Piezómetro.** Instrumento que mide la presión de un fluido en un punto.

## RESUMEN

Conocida la problemática social y ambiental que se presenta en varias regiones del país sobre la contaminación generada por la explotación minera de metales preciosos como oro, procesos que contaminan las fuentes hídricas de muchas localidades, ya que se generan descargas altamente contaminantes por el uso de químicos y reactivos. Además de la ineficacia en los procesos de recolección de metales pesados en fuentes aluviales y zonas de explotación, se observa la insuficiencia de mecanismos y métodos a usarse en este tipo de procesos.

Por esta razón se desarrolla el presente trabajo con el fin de presentar una alternativa viable en los procesos de explotación minera, partiendo de la bibliografía y la temática de la sedimentación gravimétrica y los dispositivos hidráulicos de flujo centrífugo conocidos comercialmente, el trabajo se orienta en el diseño y construcción de un banco de pruebas con el fin de ensayar dichos dispositivos, evaluando su calidad y eficiencia en los procesos sedimentación de metales pesados.

Se realizó la calibración del banco de pruebas evaluando su rango de trabajo para ensayar diferentes dispositivos hidráulicos, se construye un sistema recirculatorio con el fin de no generar pérdidas en los ensayos. Con los resultados obtenidos se busca evaluar varios dispositivos y recomendar el mejor mecanismo encontrado para usarse en la sedimentación de metales pesados, buscando su aplicabilidad en el medio comercial del sector minero, propuestas como estas contribuirán a una mejor y controlada explotación de metales, al igual que una disminución en la contaminación ambiental favoreciendo a comunidades expuestas a este tipo de riesgos.

## **ABSTRACT**

Knowing the social and environmental issues presented in various regions on pollution from the mining of precious metals like gold, processes that pollute water sources in many localities, as highly polluting discharges are generated by the use of chemicals and reagents. In addition to the inefficiency in the collection process of heavy metals in alluvial sources and mining areas, there is insufficient mechanisms and methods to be used in such processes.

For this reason this paper is developed to provide a viable alternative in the mining process, based on the literature and the theme of gravity sedimentation and centrifugal flow hydraulic device known commercially, the work focuses on design and construction of a test to test these devices, evaluating the quality and efficiency in heavy metal deposition processes.

Calibration was carried out test work to assess their range to test different hydraulic devices, we construct a recirculating system in order not to create losses in the trials. With the results of multiple devices is to evaluate and recommend the best mechanism found to be used in the deposition of heavy metals, looking for their applicability in the business environment in the mining sector, proposals, how are you contribute to a better and controlled exploitation of metals, like that a decrease in pollution-prone communities favoring this type of risk.

## INTRODUCCIÓN

El tema propuesto en esta investigación está enmarcado en lo que se conoce como separación gravimétrica o gravítica y el transporte hidráulico de sólidos conocido mundialmente como “hydrotransport”, temas que han tomando auge en las últimas décadas, aunque su estudio ha venido haciéndose especialmente por empresas privadas extranjeras y con muy poco aporte por entidades académicas. Según Pavez (1987)<sup>1</sup>, los métodos de separación por gravedad (concentración gravítica o gravimétrica) se usan para tratar un gran número de minerales, que varían desde los sulfuros metálicos pesados hasta carbón, en algunos casos con tamaños del orden de los micrones.

En nuestro país las investigaciones sobre la separación gravimétrica, han sido muy limitadas, se ha dado prioridad más a adquirir dispositivos comerciales con tecnología extranjera. Recientemente la Unidad de Planeación Minero Energética **UPME**<sup>2</sup>, perteneciente al Ministerio de Minas y Energía ha iniciado a plantear soluciones en lo que corresponde a producción más limpia en la minería del oro en Colombia.

El presente informe detalla el diseño, construcción y calibración de un banco de pruebas para ensayar dispositivos hidráulicos de flujo centrífugo, como son el Hidrociclón, la espiral concentradora, los canales curvos y los tubos a presión. Dentro de los capítulos aquí evaluados se detalla los procedimientos a seguir en la selección de equipos, materiales y métodos recomendados para el manejo de montajes de laboratorio como el referenciado.

El diseño determina los parámetros a tener en cuenta en un banco de pruebas para ensayar dispositivos hidráulicos de flujo centrífugo, identificando las características necesarias y las dimensiones correspondientes para alcanzar buenos resultados en el ensayo de dispositivos de laboratorio con gran precisión. El capítulo de construcción, detalla los mecanismos y herramientas a usarse en el acople y ensamble de piezas necesarias en montaje de laboratorio de banco de pruebas, aquí de manera detallada se encuentra la información pertinente en cuanto a los métodos y mecanismos usados, los cuales proporcionaron buenos resultados en cuanto a resistencia, calidad, y buen aspecto físico se refiere. El lineamiento a seguir propone la posibilidad de optar por nuevas estrategias o mecanismos que brinden unos buenos resultados con diferentes procesos,

---

<sup>1</sup> Pavez, Oswaldo (1987) “Concentración Gravimétrica”. Universidad de Atacama.

<sup>2</sup> UPME. (2007) Unidad de Planeación Minero Energética. “Producción más limpia en la minería del oro en Colombia”. Ministerio de Minas y Energía. Subdirección de Planeación Minera. Bogotá. Oct. 2007. Versión Web.

logrando la optimización en la construcción de montajes de laboratorio como el mencionado.

El capítulo de calibración presenta una guía para el usuario en donde encontramos los pasos a seguir en el momento de ensayar dispositivos, aquí se identifican las normas y las características necesarias a tener en cuenta en el momento de realizar una prueba, cada uno de los requerimientos es tan importante como el anterior para de tal manera lograr alcanzar buenos resultados en los datos recolectados a lo largo de todo el ensayo.

## **DESCRIPCION DEL MONTAJE.**

El montaje consta de: Tanque sedimentador, encargado de la decantación del fluido en donde las partículas pesadas son separadas dentro del tanque y posteriormente almacenadas en las tolvas de la parte inferior del montaje en donde se puede tener acceso a ellas mediante válvulas de bola diámetro de una pulgada, logrando su extracción para su medición y posterior manipulación, la entrada de agregados se hace mediante una tolva de almacenaje la cual está dotada de un dispositivo que permite la introducción de material de una manera constante garantizando así que el fluido cuente con los agregados necesarios para formar una buena mezcla homogénea. La tolva almacena la granulometría correspondiente para cada ensayo y dispositivo hidráulico evaluado, además cuenta con un dispensador gradual que facilita otorgar el caudal necesario.

El montaje consta de tanque de almacenamiento de agua, el cual suministra al sistema el volumen de agua necesario durante el ensayo, evitando así la falta de caudal en un ensayo, cumpliendo con las necesidades de los dispositivos, he impidiendo que la bomba de impulsión trabaje en cavitación, generando un mal funcionamiento de todo el sistema por la entrada de aire. Dicho tanque se dispone en la parte posterior del tanque desarenador, se conecta a la bomba de impulsión mediante tubería PVC de 2", cuenta con un válvula de compuerta en caso de que se desee aislar el sistema en el caso de lavado y mantenimiento.

La bomba de impulsión de rotor semi-abierto es la encargada del suministro de fluido a la tolva de mezcla y a su vez a la entrada de los dispositivos hidráulicos ensayados. La tolva tiene la función de realizar la homogenización de la mezcla, y graduar el caudal de entrada al dispositivo mediante una válvula de compuerta que garantiza un buen fluir de las partículas, la tolva está dotada de un sistema de rebose, usado cuando el caudal suministrado por la bomba sobrepasa el requerido por el dispositivo ensayado, este rebose conduce mediante tubería PVC de 2" hasta el tanque de almacenamiento antes mencionado, en donde el agua recircula nuevamente por el sistema, dispuesto de tal manera con el fin de optimizar su funcionamiento y no generar perdidas durante el ensayo. La tolva de mezcla se dispone a una altura adecuada para lograr la cabeza de presión necesaria según

el dispositivo ensayado, los soportes son flexibles permitiendo la movilidad de la tolva para posibles modificaciones.

La conexión entre la bomba de impulsión y la tolva de almacenaje se realiza en tubería PVC de 2" tipo presión, con algunos segmentos en tubería de material acrílico con el fin de observar el flujo de la mezcla en dicha conducción, logrando así prever posibles fugas y fallas debido al atascamiento o pérdida de material. A la salida de la bomba encontramos un manómetro tipo bourdon instalado junto a una válvula de compuerta, aquí se regula la salida de caudal de la bomba, realizando variaciones en la sección transversal de la tubería, donde se toma lectura de la presión a la cual se está trabajando. La tolva introduce de una manera regulada y en caída libre la mezcla hacia el dispositivo ensayado, aquí se cuenta con una válvula de compuerta para realizar la entrega del caudal necesario, a la entrada del dispositivo ensayado se instala un manómetro con el fin de graduar la presión de entrada necesaria según las características que brinde el ensayo.

El tanque desarenador se dispone sobre una estructura de soporte apoyada sobre el piso, en su interior se divide en dos compartimentos, debido a que los dispositivos ensayados cuentan con dos salidas, para el manejo del caudal de salida de los dispositivos el tanque desarenador cuenta con una zona de entrada, zona de sedimentación, zona de recolección de lodos, y zona de salida.

Los compartimentos se dimensionan según el caudal de entrada en el rango de trabajo que establece la salida de los dispositivos ensayados, los cuales presentan una variación muy considerable en sus dos salidas, por tal motivo se construye un tanque con un compartimento de sección de 0,25 m de ancho, 1,8 m de largo, y 0,6 m de fondo y otro con el doble de capacidad a este, con el fin de atender las necesidades máximas de un ensayo. La separación de los compartimentos permite tener independencia en los caudales, además el proceso de sedimentación otorga la extracción de material decantado, a través de las tolvas de recolección logrando tener dos muestras independientes para posterior análisis en el funcionamiento de un dispositivo hidráulico de flujo centrífugo. El fluido de salida es conducido hacia el tanque de almacenamiento para una posterior recirculación.

El principal uso del banco de pruebas es el ensayo y estudio de dispositivos hidráulicos de flujo centrífugo, el montaje brinda a facilidad de acople de cualquier dispositivo empleado en los usos mencionados, el sistema está sujeto a un rango de trabajo, el cual no puede ser superado sin realizarse las modificaciones pertinentes que brinden la facilidad de trabajo en condiciones diferentes como por ejemplo mayores caudales y mayor área de soporte para un dispositivo, es decir cuando se tenga un dispositivo de gran envergadura y dimensiones más grandes a las establecidas para el hidrociclón, espiral concentradora y tubo curvo.

Una vez garantizado el acople de un dispositivo hidráulico el banco de pruebas está en la capacidad de suministrar los datos y resultados de manera rápida y sencilla, la disposición del montaje se determino de esta manera puesto que la ubicación del mismo es el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Nariño en donde servirá como mecanismo de investigación en procesos y trabajos involucrando dispositivos hidráulicos de flujo centrifugo, así también es un buen mecanismo para la cátedra tratada por los estudiantes de pregrado, los cuales cuentan con un montaje que brinda de manera didáctica la posibilidad de tener un mejor entendimiento de la teoría explicada en clase, en lo referente al área hidráulica y la teoría de sedimentación.

## **JUSTIFICACION**

En la actualidad, la contaminación de las fuentes superficiales de agua se ha incrementado con el vertimiento reactivos químicos (mercurio), como producto del desarrollo de actividades de explotación minera. Por esta razón, el estado colombiano y las entidades encargadas de la gestión ambiental se han visto en la necesidad de regular estos vertimientos, para tratar de disminuir el impacto ambiental que se está generando en los cuerpos de agua receptores. Algunas regiones tienen grandes inconvenientes debido a que las descargas contaminantes se realizan aguas arriba de las zonas de captación de agua para consumo humano, generando un gran riesgo para las comunidades que hacen uso de dicho sistema.

El decreto 1594 del 84 (capítulo 6), establece los requerimientos que deben cumplir las aguas residuales antes de su vertimiento. Además, el decreto contempla el cobro de una tasa retributiva (capítulo 12), dependiendo de la carga contaminante que se esté arrojando a ríos, arroyos, lagos y aguas subterráneas producto de introducir o arrojar en ellos desechos o desperdicios agrícolas, mineros o industriales, aguas negras o servidas de cualquier origen y sustancias nocivas que sean resultado de actividades lucrativas; por esto hoy en día los asentamientos urbanos deben buscar la manera de disminuir la contaminación hídrica que están generando. Los beneficios que se pretenden obtener con la realización de este estudio son:

- Contribuir con la formulación de una buena alternativa en la explotación minera, disminuyendo las descargas contaminantes al no utilizar reactivos químicos.
- Colaborar en la generación de una política de conservación ambiental, mediante la selección de una tecnología adecuada para la explotación minera.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar, construir y calibrar un banco de pruebas para ensayar dispositivos hidráulicos de flujo centrífugo

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar los procedimientos matemáticos existentes para el diseño del banco de pruebas.
- Diseñar el banco de pruebas para ensayar dispositivos hidráulicos de flujo centrífugo.
- Construir el banco de pruebas para ensayar dispositivos hidráulicos de flujo centrífugo.
- Calibrar el Banco de pruebas para agua limpia y mezcla de agua y sedimentos.

## 1. DISEÑO

### 1.1 CONCEPTOS GENERALES

En el presente capítulo se aborda lo correspondiente al diseño y construcción del montaje de laboratorio para el ensayo de dispositivos de flujo centrífugo. El montaje es de tipo recirculatorio usando una bomba autocebante de rotor semiabierto inatascable para el bombeo de la mezcla de arena y agua. Los dispositivos de flujo centrífugo para el ensayo corresponden al hidrociclón, separador de tubo curvo y espiral concentradora.

La separación gravimétrica comprende muchos métodos de separación, pero los que se usan con influencia del flujo secundario se encuentran el hidrociclón, la espiral concentradora, los canales curvos y tubos curvos a presión, estos aparatos pueden ser usados en la separación de partículas gruesas de otras de menor diámetro.

En los últimos años, muchas compañías han re-evaluado los sistemas gravimétricos debido al incremento en los costos de los reactivos de flotación, la relativa simplicidad de los procesos gravimétricos y a que producen poca contaminación ambiental.

Actualmente, las técnicas más modernas que se aplican en este tipo de concentración incluyen equipos que aprovechan la fuerza centrífuga para la separación de partículas finas. Entre estas tecnologías modernas se pueden citar las siguientes: el concentrador centrífugo Knelson, el concentrador centrífugo Falcon, el jig-centrífugo Kelsey y el Separador de Gravedad Múltiple (MGS) Mozley. Con la desventaja que hay que suministrarles la energía de forma externa, principalmente con motores, siendo este el principal inconveniente para su aplicación en laboratorio y en trabajo de campo.

Los métodos de concentración gravimétrica se utilizan para la separación de minerales de diferentes densidades utilizando la fuerza de gravedad y, últimamente, las tecnologías modernas aprovechan también la fuerza centrífuga para la separación de los minerales.

En este tipo de separación se generan dos o tres productos: el concentrado, las colas, y en algunos casos, un producto medio (“middling”). La mezcla compacta para ensayo, se realiza con un material granular, un metal pesado y un fluido, dentro del proceso de separación el material con propiedades más densas es sedimentado en el caso de una mezcla esto es lo que se denomina *concentrado*,

aquellas partículas que presentan diferentes características en densidad y flotación se consideran *colas*, encontrándose dentro de ellos materiales livianos y flotantes.

En una mezcla aluvial se encuentran muchos componentes, material flotante, partículas con diferentes densidades y características, en un proceso de separación se pueden encontrar un fase intermedia en donde la mezcla es particular puesto que guarda características de los diferentes componentes que la integran, esta fase es la que comúnmente se conoce como middling.

Para una separación efectiva en este tipo de concentración es fundamental que exista una marcada diferencia de densidad entre el mineral y la ganga, la cual se define como el material inútil que acompaña a los minerales. A partir del llamado criterio de concentración se tendrá una idea sobre el tipo de separación posible. El criterio de concentración utilizado en la separación gravimétrica es el siguiente:

$$\Pi_1 = \left( \frac{D_h - D_f}{D_l - D_f} \right) \quad [1]$$

Donde,  $D_h$  = densidad relativa del mineral pesado,  $D_l$  = densidad relativa del mineral liviano y  $D_f$  = densidad relativa del medio fluido. En términos generales, cuando el cociente es mayor que 2,5, ya sea positivo o negativo, la separación gravimétrica es relativamente fácil. A medida que el cociente disminuye, la eficiencia de la separación disminuye; valores menores que 1,25 indicarían que la concentración por gravedad, por lo general, no sería posible comercialmente.

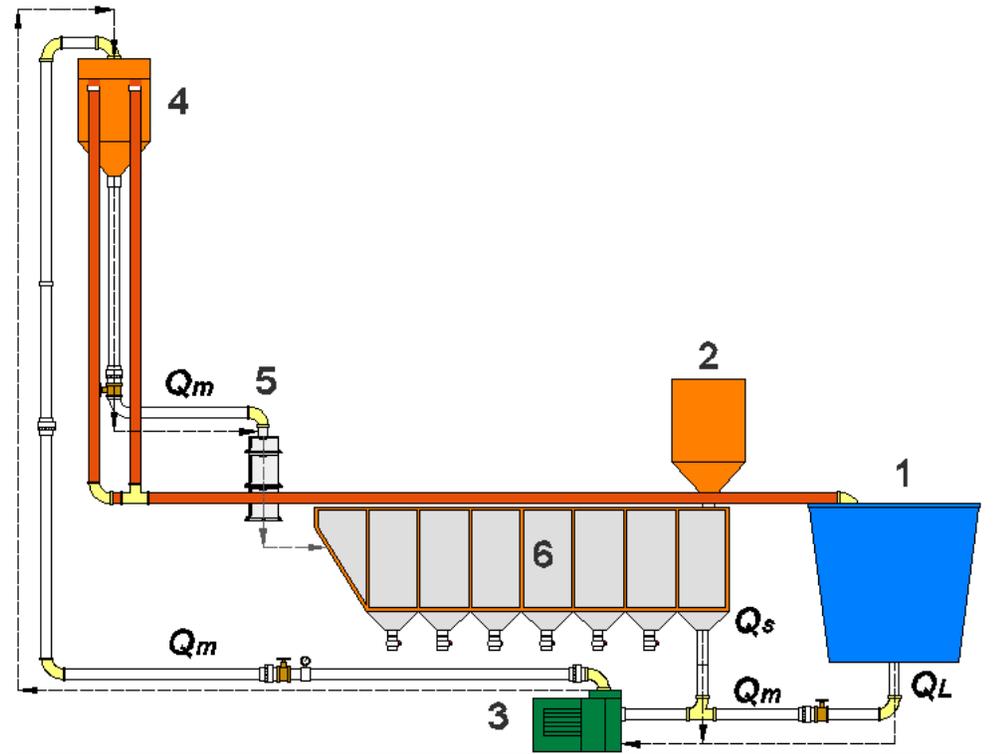
Si aplicamos la ecuación [1] al plomo, como metal pesado propuesto para estudio en esta investigación con  $D_h(\text{plomo}) = 11.34$ ,  $D_l(\text{material aluvial}) = 2.65$  y  $D_f(\text{agua}) = 1$ , se obtiene un  $\Pi_1$  de 6.27, el cual es adecuado para realizar ensayos de concentración.

## 1.2 DESCRIPCION DEL MONTAJE DE LABORATORIO

El montaje de laboratorio que se construyo es de tipo recirculatorio de mezcla, el cual sigue el esquema básico indicado en la Figura 1, el cual tiene los siguientes componentes: 1) Un tanque de succión por encima del eje de la bomba; 2) una tolva de abastecimiento sólido; 3) una bomba para la impulsión de sedimentos, de impulsor semi-abierto, autocebante, de 3 HP y diámetros de entrada y salida de 2 pulgadas; 4) un tanque de cabeza constante; 5) mecanismo para colocar el dispositivo de flujo centrífugo (separador de tubo curvo, hidrociclón y canaleta en espiral y 6) un tanque desarenador para recuperar el sedimento que funciona como convencional y como de alta tasa. La disposición de cada componente se

indica esquemáticamente en la Figura 1, donde observamos el sentido de flujo de la mezcla dentro del sistema.

Figura 1. Esquema del montaje de laboratorio.  $Q_m$  es el caudal de la mezcla,  $Q_s$  es el caudal sólido y  $Q_L$  es el caudal líquido.



### 1.3 DISEÑO DE SISTEMA DE BOMBEO

El objeto es seleccionar el diámetro del tubo para PVC y las características de la bomba tomadas de un manual de bombas (por ejemplo bombas de impulsión marcas comerciales como: BARNES, IHM, etc.) Se debe comprobar que la bomba no tendrá problemas de cavitación cuando opera normalmente. Se debe establecer el punto de funcionamiento y el caudal que él proporciona, garantizando que la velocidad no sea mayor de 2.0 m/s en la impulsión y de 1.0 m/s en la succión. La longitud de la succión es de 1.90 m, la longitud de la impulsión es de 10.60m. La altura sobre el nivel del mar de localización de la bomba es de 2559 m.s.n.m., a una temperatura promedio de 15°C, condiciones dadas en el laboratorio de hidráulica de la facultad de Ingeniería de la Universidad de Nariño.

Ecuaciones para pérdidas:

**Por Fricción  $H_f$ :** Se puede usar alguna de las ecuaciones para el cálculo de  $H_f$ , como la Ec. de Darcy-Weisbach, Manning o Hazen-William. Por facilidad de cálculo usamos esta última, dada por Ec. [2]:

$$H_f = r(Q)^{1/0.54} \quad [2]$$

Donde ( $r$ ) es dado por la siguiente ecuación:

$$r = \frac{L}{(0.2785C_H D^{2.63})^{1/0.54}} \quad [3]$$

Donde  $Q$  en ( $m^3/s$ ),  $L$  es la longitud del tubo en metros,  $C_H$  es el coeficiente de fricción de Hazen-Williams del tubo ( $C_H \text{ PVC} = 150$ ),  $D$  es el diámetro del tubo en metros.

Por Accesorios  $H_L$ . Se puede usar la ecuación con el coeficiente de pérdidas  $K$ .

$$h_L = \sum_{m=1}^{NA} \left( K \frac{V^2}{2g} \right) \quad [4]$$

$NA$  es el número de accesorios considerados en el tramo de tubería.  $V$  es la velocidad en  $m/s$  y  $g$  es la gravedad en  $m/s^2$ .

### PASOS A SEGUIR:

**Paso 1:** Determinar los diámetros de succión y de impulsión garantizando que no se exceda las velocidades máximas. Se usa la siguiente ecuación.

$$D = \left( \frac{4Q}{\pi V} \right)^{1/2} \quad [5]$$

Como no se conoce el caudal de operación, se toman inicialmente los diámetros de entrada y salida de la bomba. Para la impulsión se tiene que el diámetro nominal es de 2" (pulgadas) con diámetro interno real de 54.58 mm. Para la succión se tiene que el diámetro nominal de 2" (pulgadas) con diámetro interno real de 54.58 mm para PVC con RDE 21. Para cálculos posteriores se usará el diámetro interno real.

**Paso 2:** Enumerar los accesorios tanto de succión como de impulsión, en el mismo sentido de la instalación, como se indica en el esquema del montaje,

asignar el coeficiente de pérdida a cada uno y obtener la sumatoria, para ello se evalúan los elementos a usarse y se enumeran en las tablas 1 y 2.

Tabla N°1. Accesorios Succión

No.	Tipo de Accesorio	Diámetro [plg]	Coficiente de pérdida: K
1	Entrada tipo borda con $\delta=4\text{mm}$ , $D=60\text{mm}$ , $b=50\text{mm}$ de figura 8.8 de (Sotelo,2002).	2"	0.5
2	Codo de radio corto a $90^\circ$	2"	0.9**
3	Válvula de compuerta	2"	0.25**
4	Unión universal	2"	0.1
5	Tee de paso directo	2"	0.15
<b>Sumatoria de coeficientes de fricción para la succión:</b>			<b>1.8</b>

Tabla N°2. Accesorios Impulsión

No.	Tipo de Accesorio	Diámetro [plg]	Coficiente de pérdida:K
1	Codo de radio corto a $90^\circ$	2"	0.9**
2	Unión universal	2"	0.1
3	Válvula de compuerta	2"	0.25*
4	Unión universal	2"	0.1
5	Codo de radio corto a $90^\circ$	2"	0.9**
6	Unión universal	2"	0.1
7	Codo de radio corto a $90^\circ$	2"	0.9**
8	Codo de radio corto a $90^\circ$	2"	0.9**
9	Salida	2"	1.0**
<b>Sumatoria de coeficientes de fricción para la impulsión:</b>			<b>5.15</b>
<b>Sumatoria de coeficientes de fricción para la succión e impulsión:</b>			<b>7.0</b>

\*\* Tomados de la tabla 3.3A de Rodríguez (2005)

**Paso 3:** Se calcula la cabeza dinámica total  $H_T$ . en función del caudal  $Q$ , en las pérdidas se debe incluir la pérdida por vórtice en la succión que es igual a la mitad de la pérdida por fricción en dicha succión ( $r_s/2$ ),  $H_T$  se expresa en la siguiente ecuación:

$$H_T = H_{est} + (r_s/2 + r_s + r_i)Q^{1.8519} + \sum_{m=1}^{NA_s} K \left( \frac{4^2 Q^2}{\pi^2 2gD_s^4} \right) + \sum_{m=1}^{NA_i} K \left( \frac{4^2 Q^2}{\pi^2 2gD_i^4} \right) + \frac{4^2 Q^2}{\pi^2 2gD_i^4} \quad [6]$$

**H<sub>est</sub>** es la altura estática total en m. **r<sub>s</sub>** factor debido a la succión, **r<sub>i</sub>** factor debido a la impulsión, **D<sub>s</sub>** diámetro de la succión en m, **D<sub>i</sub>** diámetro de la impulsión en m, **g** en m/s<sup>2</sup>, **NA<sub>s</sub>** numero de accesorios en la succión, **NA<sub>i</sub>** número de accesorios en la impulsión.

La longitud de la tubería de succión es de 1.15 metros. La longitud de la tubería de impulsión es de 5,47 metros. La cabeza estática total (tomada como la diferencia de nivel entre el tanque de succión y la cota de rebose del tanque de cabeza constante) es de **3.275-1.10= 2.175m**. Remplazando los valores numéricos se obtiene, la siguiente expresión.

$$H_T = 2.175m + (1622/2 + 1622 + 7716)Q^{1.8519} + 47952Q^2 + 17760Q^2 + 931Q^2 \quad [7]$$

$$H_T = 2.175m + (10149)Q^{1.8519} + 75023Q^2 \quad [8]$$

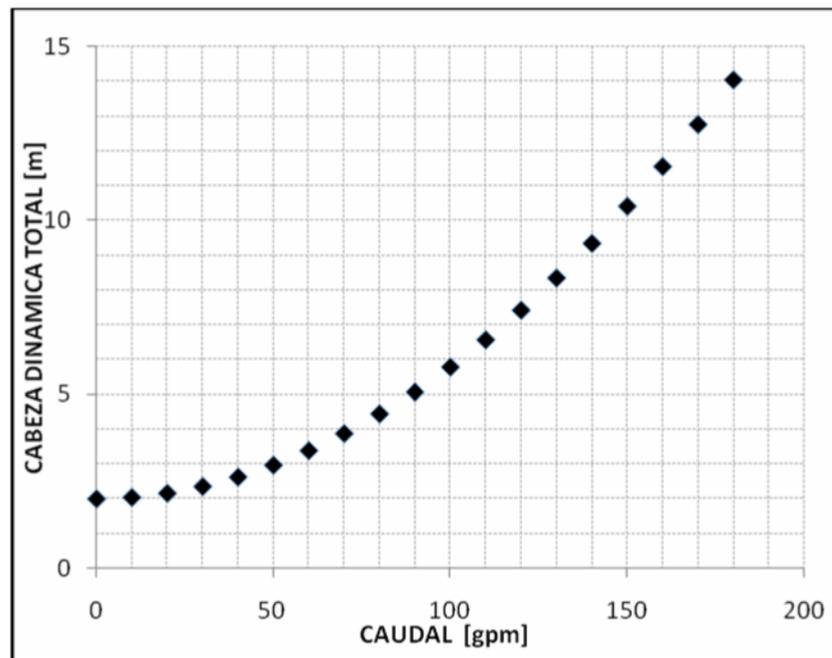
Donde **Q** en m<sup>3</sup>/s

**Paso 4:** Elaborar la curva característica del sistema, para ello se hace la gráfica de **H<sub>t</sub>** vs **Q**. Se grafica en las mismas unidades de caudal que vienen en las curvas características de las bombas. Por lo general en L/min o gpm. Los valores de **H<sub>t</sub>** vs **Q** se indican en la tabla 3, con su respectiva gráfica como se puede observar referenciada en la figura 2.

Tabla N°3. Datos de caudal y cabeza dinámica total de la instalación de laboratorio.

<b>Q</b> <b>[gpm]</b>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
<b>HT</b> <b>[mca]</b>	1.9	2.0	2.1	2.3	2.6	2.9	3.3	3.8	4.4	5.0	5.7	6.5	7.4	8.3	9.3	10.

Figura 2. Curva de comportamiento del sistema.



**Paso 5:** En las curvas características de las bombas preseleccionadas se superpone la curva del sistema como se indica en las siguientes figuras y se determina el punto de operación. Las bombas recomendadas para este sistema son de tipo autocebante para transporte de sedimentos, correspondientes a la bomba IHM como se indica en la Figura 3 y la bomba BARNES indicada en la Figura 4.

Figura 3. Curva característica de la Bomba IHM.

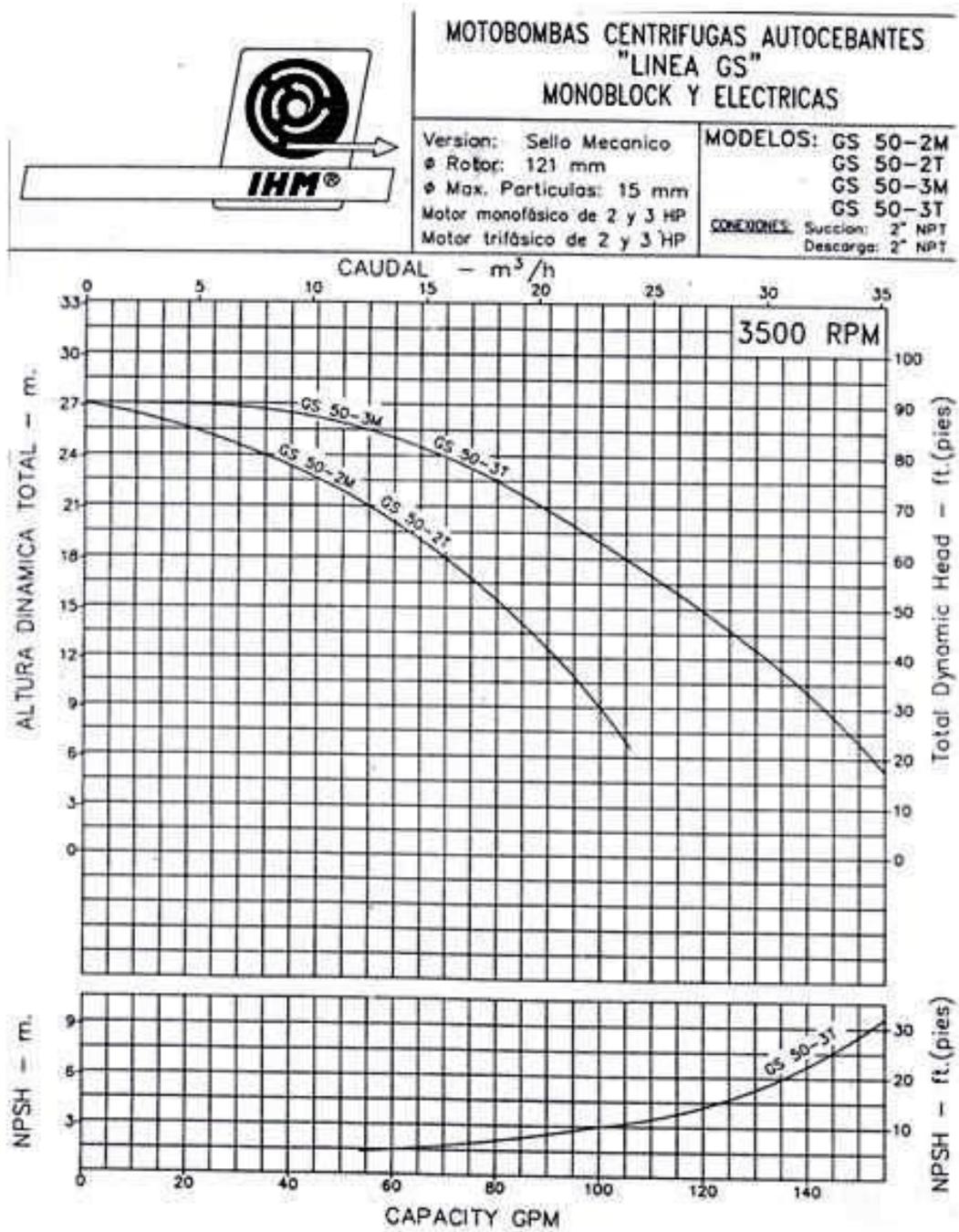
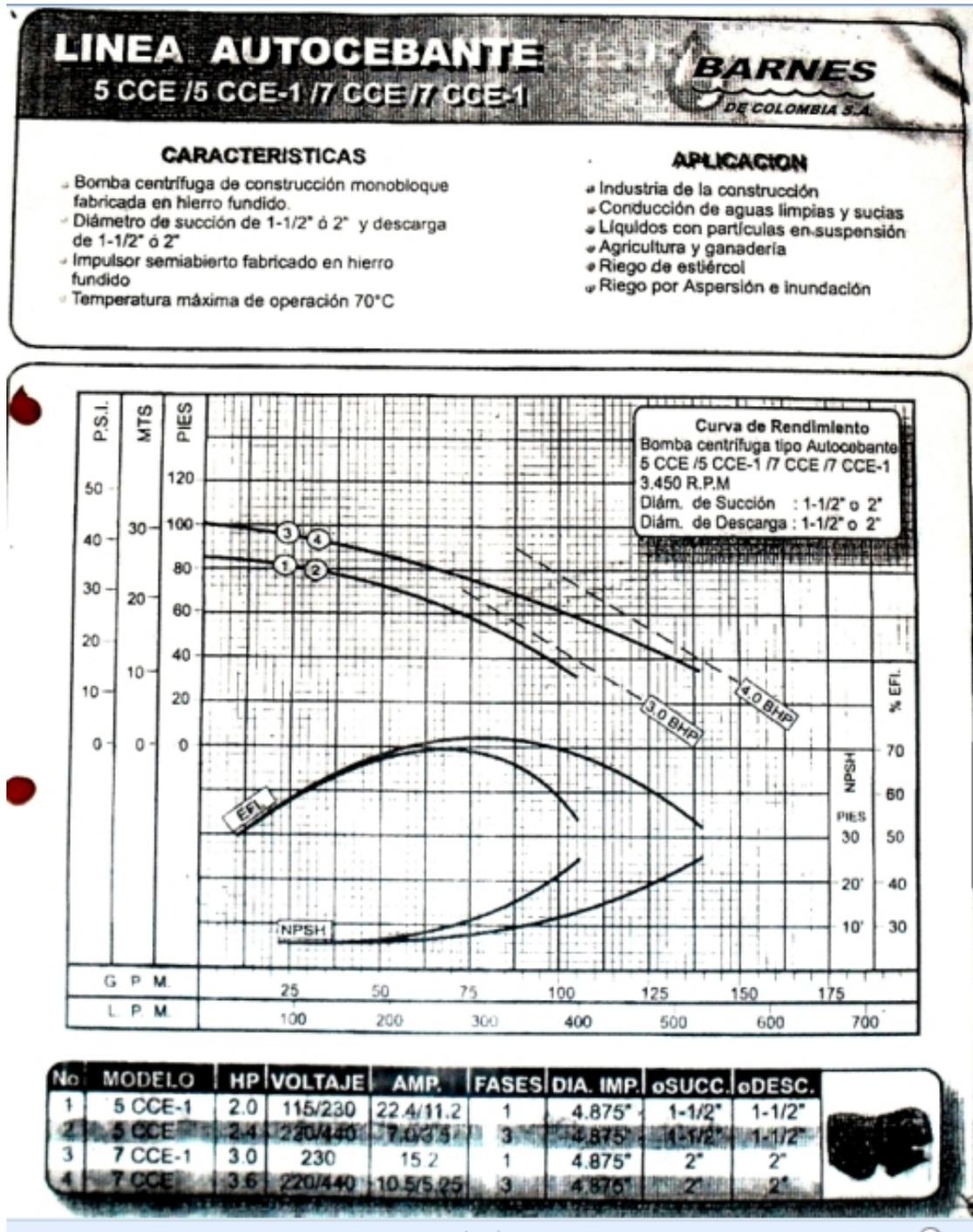


Figura 4. Curva característica de la Bomba BARNES.

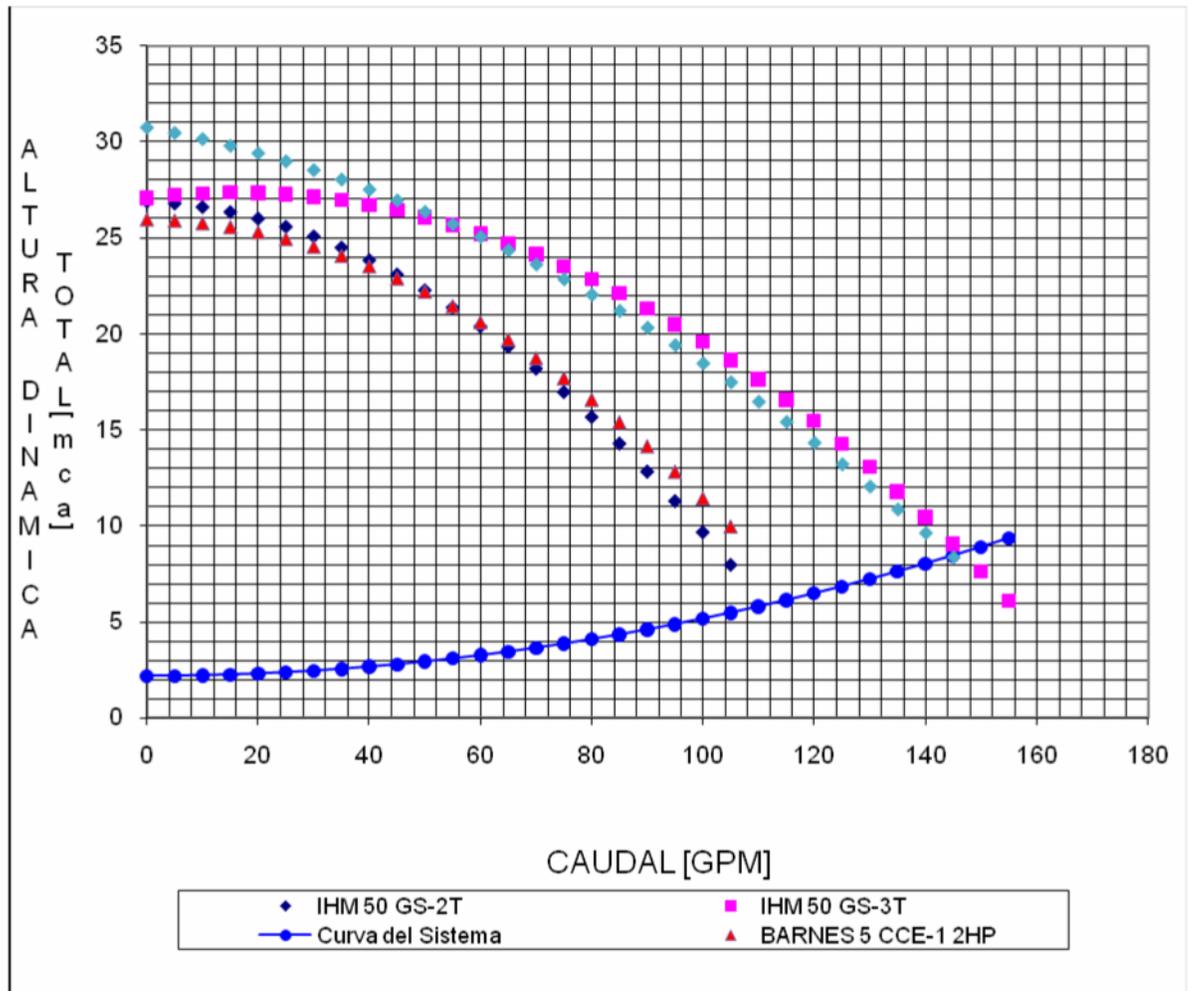


Tomando los datos de las curvas características de las bombas se estableció las siguientes ecuaciones,

- $H_T = -0.0016Q^2 - 0.0125Q + 26.91$ ,  $R^2 = 0.9989$ . Bomba IHM 50 GS-2T.
- $H_T = -0.0011Q^2 + 0.0348Q + 27.108$ ,  $R^2 = 0.9995$ . Bomba IHM 50 GS-3T.
- $H_T = -0.0014Q^2 - 0.005Q + 25.943$ .  $R^2 = 0.999$ . Bomba BARNES 5 CCE-1 2HP
- $H_T = -0.0007Q^2 - 0.0529Q + 30.742$ .  $R^2 = 0.9987$ . Bomba BARNES 7 CCE-1 3HP

Donde el caudal Q en [gpm], superponiendo las curvas características de las bombas y la curva del sistema se tiene la Figura 5.

Figura 5. Curva característica de la Bomba IHM, BARNES y curva del sistema.



De la Figura 5 se puede obtener el punto de operación correspondiente a  $H_T = 8.4$  m.c.a. y un caudal de  $Q = 145$  gpm  $\approx 9.14$  lps. Que sería el caudal máximo que la bomba podría proporcionar. En este sentido se escoge la bomba *BARNES 7 CCE-1 3HP* como adecuada para el banco de pruebas para ensayar dispositivos hidráulicos de flujo centrífugo. De igual manera se considera con buenas

características a la bomba IHM 50 GS-3T, en este caso se tomo la opción número uno debido, a la diferentes variables de la bomba IHM, al encontrarse inconvenientes en su adquisición en el medio comercial local, al igual el valor económico el cual se encuentra en un rango elevado. De tal manera condicionadas las limitaciones se adquiere la bomba BARNES / CCE-1 de 3HP, con un buen rango de trabajo acoplándose a las necesidades del montaje.

**Paso 6:** Verificación de la cavitación: Se calcula el NPSH disponible (NPSHd) y se compara con el NPSH requerido (NPSHr). Se recomienda tomar 20% adicional del NPSHr por seguridad.

$$NPSHd > (1.2) NPSH \quad [9]$$

- **Cálculo del NPSH requerido.**

De la gráfica de curvas características de las bombas figuras 3 y 4, en la parte inferior se encuentra la curva del NPSHr, que entrando con el caudal de operación de 145 gpm se halla al lado derecho el valor de NPSHr = 25 pies = 7,62m.

- **Cálculo del NPSH disponible.**

Se calcula con la siguiente ecuación:

$$NPSHd = \frac{P_{atm}}{\gamma_w} - \frac{P_v}{\gamma_w} - H_s - \sum hf_T - \frac{V_s^2}{2g} - h_{bar} - h_{vacio} \quad [10]$$

Donde,  $h_{bar}$  es la pérdida por altura barométrica iguala 0,36 m y  $h_{vacio}$  =es la pérdida por vacio imperfecto de la bomba y varía entre (1,8m y 2,4m).  $P_{atm}$  es la presión atmosférica la cual cambia en 1,2 m por cada 1000 m de altura,  $H_s$  es la altura estática de succión que en este caso va con signo (+) ya que está por encima del eje de la bomba, en la tabla 4 se indican los valores de presión a diferentes temperaturas.

Tabla N°4. Presiones a distintas temperaturas del agua en m.c.a.

T [°C]	15	20	25	30	35
Pv/ $\gamma_w$ [m.c.a.]	0.17	0.25	0.33	0.44	0.58

Reemplazando valores se obtiene:

$$NPSHd = (10.33 - 1.2/1000 * 2600) - 0.17m + 0.905m - 0.49m - 0.05m - 0.36 - 1.8m = 2.74m$$

$$(1.2) NPSHr = 3.3 \text{ mca.} \quad [11]$$

Como el  $NPSH_d > (1.2) NPSH_r$ , se considera que la bomba no trabajará en condiciones de cavitación.

**Paso 7:** De las curvas del manual, se selecciona la bomba con las siguientes características:

Marca:	BARNES
Bomba:	2x2x9 eje libre
Modelo:	7CCE-1
Tamaño de succión:	2"
Tamaño de impulsión:	2"
Diámetro del impulsor:	4.875"
Velocidad del impulsor:	3450 rpm.
Comportamiento:	Bomba Centrífuga
Potencia del motor:	3.0 HP
NPSH disponible:	2.74 m
NPSH requerido:	25 pies (7,62m.)
(1.2)NPSH requerido:	2,92m. ok.
Eficiencia:	56%

#### 1.4 SEDIMENTACION

La sedimentación es la remoción de sólidos en suspensión en un fluido por la fuerza de gravedad. Los sólidos pueden estar presentes en el agua como ocurre naturalmente, como es el caso del limo o la arena, o en forma modificada de su estado natural, como resultado de la coagulación y floculación. Sea cual fuere el origen de las partículas, si son más densas que el agua es mayor su posibilidad de sedimentación, dando como resultado un fluido clarificado, y en el fondo de los tanques una suspensión más concentradora que se considera ha sido separada del mismo.

Hay que distinguir dos tipos de sedimentación dependiendo del tipo de partículas que se desean separar del agua, la sedimentación de partículas discretas o sedimentación simple, y la sedimentación de partículas aglomerables o sedimentación inducida. El primer caso es el que ocurre en las unidades de sedimentación llamadas desarenadores, en la cual se trata de reducir la concentración de partículas de cierto tamaño (arena de 0,015 a 0,15 cm de diámetro), sin la adición de coagulantes o cualquier otro producto químico, y sin que ocurra cambio de densidad, tamaño o forma de las mismas al descender en el agua; el segundo caso es el que se efectúa en una planta de tratamiento en las unidades llamadas decantadores, los cuales reciben agua previamente coagulada y floculada.

En el caso del banco de pruebas para ensayar dispositivos hidráulicos de flujo centrifugo se sigue el diseño de un tanque desarenador para partículas discretas o sedimentación simple, ya que se necesita la estimación de la concentración de

metales pesados en una determinada granulometría evaluada en un dispositivo de flujo centrifugo, no siendo necesarias las etapas de coagulación y floculación debido a que el agua se usa para recirculación y no para consumo humano como agua potable.

### **Sedimentación de partículas discretas**

Se llama *partículas discretas* a aquellas partículas que no cambian de características (forma, tamaño, densidad) durante la caída. Se denomina *sedimentación* o *sedimentación simple* al proceso de depósito de partículas discretas. Este tipo de partículas y esta forma de sedimentación se presentan en los desarenadores, en los sedimentadores y en los presedimentadores como paso previo a la coagulación en las plantas de filtración rápida y también en sedimentadores como paso previo a la filtración lenta.

### **Sedimentación por caída libre e interferida**

Cuando existe una baja concentración de partículas en el agua, éstas se depositan sin interferir. Se denomina a este fenómeno *caída libre*. En cambio, cuando hay altas concentraciones de partículas, se producen colisiones que las mantienen en una posición fija y ocurre un depósito masivo en lugar de individual. A este proceso de sedimentación se le denomina *depósito* o *caída interferida* o *sedimentación zonal*. Cuando las partículas ya en contacto forman una masa compacta que inhibe una mayor consolidación, se produce una *compresión* o *zona de compresión*. Este tipo de sedimentación se presenta en los concentradores de lodos de las unidades de decantación con manto de lodos.

Existen diferentes variables que afectan la sedimentación algunas de ellas se describen a continuación. *Corrientes de densidad*, son las corrientes que se producen dentro del tanque por efecto de las diferencias de densidad en la masa de agua y son ocasionadas por un cambio de temperatura (térmica) y/o por diferencias en la concentración de las partículas suspendidas en las distintas masas de agua (de concentración).

*Corrientes debidas al viento*, el viento puede producir corrientes de suficiente intensidad para inducir cambios en la dirección del flujo, en el caso particular del banco de pruebas para ensayar dispositivos hidráulicos de flujo centrifugo se ignora esta variable debido a que el montaje se encuentra aislado de cualquier evento climático que pueda influir en su funcionamiento.

*Corrientes cinéticas*, pueden ser debido al diseño impropio de la zona de entrada o de salida (Velocidad de flujo excesiva, zonas muertas, turbulencias) o por obstrucción en la zona de sedimentación.

La sedimentación de las partículas depende también de la calidad del agua, las

variaciones de concentración de materias en suspensión modifican, en primer lugar, la forma de sedimentación de las partículas (con caída libre o interferida), así como las propiedades de las partículas modifican la forma del depósito (sedimentación para partículas discretas y decantación para partículas flocúlenas). Adicionalmente, variaciones de concentración de partículas o de temperatura producen variaciones de densidad del agua y originan corrientes térmicas o cinéticas que, a su vez, generan cortocircuitos en las unidades. Al entrar agua más fría al sedimentador, la masa de agua se desplaza por el fondo de este y produce el tipo de corriente de sentido circulatorio, de manera inversa ocurre con el cambio de agua caliente donde la corriente cambia el sentido y el agua se desplaza por la parte superior.

En el caso de variar la concentración, se producen corrientes de densidad por diferencias en las distintas masas de agua, que suelen crear fuerzas más importantes que las térmicas. Afortunadamente, la mayor concentración de partículas suele estar en el fondo, pero cualquier perturbación en el flujo, ya sea por temperatura, obstrucciones, alta velocidad, etc. Puede alterar el equilibrio y producir flujo sinuoso o envolvente sobre sí mismo, muy diferente al teórico calculado, que es el que con frecuencia aparece en los sedimentadores horizontales, incluso en los bien diseñados.

La Velocidad de Asentamiento se define como la velocidad promedio terminal de una partícula que cae en un depósito de agua destilada en reposo de extensión infinita. Si la velocidad de asentamiento es medida a una temperatura del agua de 24°C se denomina *Velocidad de Asentamiento Estándar*.

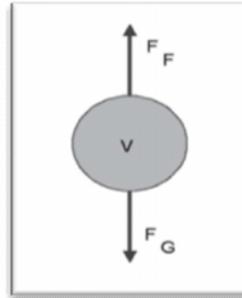
La velocidad de asentamiento o velocidad terminal o velocidad de caída es una propiedad básica de las partículas de sedimentos en un fluido. Esta depende no solamente de las características físicas de la partícula sino también de las propiedades del fluido y propiedades de la mezcla. De este modo la velocidad de asentamiento puede verse afectada por varios factores; por un lado, por el tamaño, forma, densidad, rugosidad, rotación de las partículas, efectos de turbulencia, concentración y por otro lado por fronteras de confinamiento, viscosidad y densidad del fluido. Aunque incluir todos estos efectos en la predicción de la velocidad de asentamiento, es un problema que está lejos de ser resuelto, si se ha logrado incluir los parámetros y variables independientes que tienen mayor influencia, proporcionado la suficiente exactitud en la cuantificación de la velocidad terminal para efectos prácticos en ingeniería.

### **Expresiones de velocidad de sedimentación**

#### *Partículas discretas con caída libre*

El fenómeno de sedimentación de partículas discretas por caída libre, también denominado *en soluciones diluidas*, puede describirse por medio de la mecánica clásica.

Figura 6. Fuerzas actuantes en una partícula



Imaginemos el caso de una partícula que se deja caer en el agua. Esta partícula estará sometida a dos fuerzas (figura 6): fuerza de flotación (FF), que es igual al peso del volumen del líquido desplazado por la partícula (Principio de Arquímedes), y fuerza gravitacional (FG).

En este caso, la sedimentación es solamente una función de las propiedades del fluido y las características de las partículas según se demuestra a continuación

$$\text{Si } FF = \rho \cdot g \cdot V \quad [12]$$

Y

$$FG = \rho_s \cdot g \cdot V \quad [13]$$

Donde:

- $\rho$  = densidad del líquido
- $\rho_s$  = densidad del sólido
- $V$  = volumen de la partícula
- $g$  = Gravedad

De la acción de ambas fuerzas tenemos la fuerza resultante, que será igual a la diferencia de estos dos valores y estará dada por:

$$F_i = g \cdot V \cdot (\rho_s - \rho) \quad [14]$$

Donde:

$F_i$  = fuerza resultante o fuerza de impulsión  
 Arrastrada por esta fuerza ( $F_i$ ), la partícula desciende con velocidad creciente, pero a medida que baja, la fricción que el líquido genera en ella crea una fuerza de roce definida por la Ley de Newton, cuyo valor es:

$$FR = CD \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{Vs^2}{2} \quad [15]$$

Donde:

$FR$  = fuerza de rozamiento

$\frac{Vs^2}{2}$  = energía cinética

$A$  = área transversal al escurrimiento

$Vs$  = velocidad de sedimentación

$CD$  = coeficiente de arrastre

Después de un corto periodo, la aceleración pasa a ser nula y el valor de la fuerza de fricción ( $FR$ ) iguala a la de impulsión ( $F_i$ ), momento en el cual la partícula adquiere una velocidad constante, conocida como *velocidad de asentamiento* o *sedimentación*. En ese momento se cumple que (14) y (15) son iguales; por lo tanto:

$$g \cdot V (s - ) = CD \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{Vs^2}{2} \quad [16]$$

Despejando el valor de  $V_s$  se obtiene:

$$Vs = \sqrt{\frac{2g \cdot \rho s - \rho \cdot V}{CD \cdot \rho \cdot A}} \quad \text{Régimen Inercial} \quad [17]$$

Para el caso particular de partículas esféricas:

$$A = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \quad \text{y} \quad V = \pi \cdot \frac{d^3}{6}$$

Siendo  $d$  = diámetro de la partícula:

$$\frac{V}{A} = \frac{\frac{\pi}{6} d^3}{\frac{\pi}{4} d^2} = \frac{2}{3} d$$

$$Vs = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{g \cdot \rho s - \rho}{CD \cdot \rho} \cdot d} \quad [18]$$

En la cual:

$V_s$  = velocidad de sedimentación

$d$  = diámetro de la partícula

$g$  = aceleración de la gravedad

$\rho_s$  = densidad de la partícula

$\rho$  = densidad del fluido

El coeficiente de arrastre de Newton es una función del Número de Reynolds y de la forma de las partículas:

$$CD = a.Re^{-n} \quad [19]$$

Siendo:  $Re = Vs \cdot \frac{d}{\mu}$  [20]

$a$  = constante específica

$Re$  = número de Reynolds

$\mu$  = viscosidad cinemática (Stokes)

Si  $d < 0,085$  mm,  $Re < 1$ , entonces prevalece flujo laminar, siendo:

$$CD = \frac{24}{Re} \quad \text{y} \quad \frac{\rho_s}{\rho} = Ss$$

Al reemplazar en la ecuación (18), se origina la ecuación de Stokes:

$$Vs = \frac{g}{18} (Ss - 1) \frac{d^2}{\mu} \quad [21]$$

Cuando  $d > 1,0$  mm,  $Re > 1.000$ , presenta flujo turbulento, para lo cual:

$$C_D = 0,4$$

Reemplazando los valores anteriores en la ecuación (18), se obtiene una velocidad terminal de:

$$Vs = \sqrt{3.3 \cdot g(Ss - 1)d} \quad [22]$$

*Conocida como la ecuación de Newton.*

Para los casos de diámetro de partículas comprendidas entre 0,85 y 1,0 mm y especialmente números de Reynolds de 1 a 1.000, se presenta flujo de transición para el cual los valores de  $C_D$  son variables y su determinación puede realizarse a

través de cualquiera de las ecuaciones indicadas en la Tabla No. 5, siendo una de las más usadas la propuesta por Fair-Geyer-Okun.

**Tabla N°5. Valores de coeficiente de arrastre**

Autor	Expresión
Rich	$C_D = \frac{18,5}{Re^{0,60}}$
Hatch	$C_D = \frac{14}{Re^{0,50}}$
Allen	$C_D = \frac{12,65}{Re^{0,50}}$
Fair-Geyer-Okun	$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0,34$
Schiller-Newman	$C_D = \frac{12}{Re} (1 + 0,14 Re^{0,687})$
Goldstein	$C_D = \frac{12}{Re} + \frac{3}{16} Re - \frac{19}{1.280} Re^2 + \frac{71}{20.480} Re^3$

Si se desconoce cómo se comporta la sedimentación de una determinada partícula (zona laminar, turbulenta o en transición), el cálculo de la velocidad de sedimentación debe hacerse por tanteos.

Fair, Geyer y Okun determinan la velocidad de sedimentación utilizando los ábacos de las figuras 7 y 8 que tienen la ventaja de que permiten visualizar directamente y en forma simultánea distintas soluciones. Este método, que permite el cálculo directo, se aplica resolviendo las siguientes ecuaciones:

Término del diámetro ( $X_1$ ):

$$\left(\frac{g(Ss - 1)}{V^2}\right)^{\frac{1}{3}} d = K1. d = X_1 \quad [23]$$

Término del diámetro ( $X_2$ ):

$$\frac{Vs}{(g(Ss - 1)v)^{\frac{1}{3}}} = \frac{Vs}{k2} = X_2 \quad [24]$$

Se puede, entonces, representar  $K_1$  y  $K_2$  en función de la densidad relativa  $S_s$  y la temperatura, tal como se muestra en el gráfico de la figura 7. También se puede representar  $X_2$  en función de  $X_1$ , tal como se muestra en el gráfico de la figura 8.

***El cálculo se realiza de la siguiente manera:***

Conociendo las características de las partículas y del agua, se obtiene  $K_1$  y  $K_2$  de la figura 7. Conociendo, por otra parte,  $X_1 = K_1 d$ , se entra al gráfico de la figura 8 y se obtiene  $X_2$ , con lo cual se calcula  $V_s = K_2 X_1$ .

***Ejemplo:*** Se quiere conocer la velocidad de sedimentación de una partícula esférica discreta cuyo peso específico es de 1,01 y cuyo diámetro es de 0,01 para una temperatura de 10 °C. Del gráfico de la figura 7 obtenemos:  $K_1 = 38,5$ , valor obtenido de entrando con los valores predeterminados de densidad específica y temperatura del agua, en la curva de la grafica en donde se obtiene el valor de  $K_1$  correspondiente; igual procedimiento se repite en la grafica de la figura 8 donde se obtiene el valor de velocidad de asentamiento;

Por lo tanto,  $X_1 = K_1 d = 38,5 \times 0,01 = 0,385$

Con este valor de 0,385 entramos al gráfico de la figura 8 y encontramos que  $X_2 = 0,0075$   $V_s = X_2 K_2 = 0,0075 \times 0,505 = 0,0037$  cm/s.

En la figura 7 se hace referencia a los valores de  $K_1$  determinados por Fair Geyer el cual presenta una solución grafica simplificando las expresiones de la ecuación de Allen. De manera grafica se tiene las curvas características a diferentes temperaturas del agua, con el valor conocido de temperatura y densidad relativa de la partícula en estudio, se procede a la ubicación de la curva correspondiente a estos valores encontrándose los resultados para  $K_1$  y  $K_2$ .

La figura 8 representa de manera grafica los valores correspondientes a la velocidad de asentamiento de esferas discretas en un fluido estático, gracias a las curvas de calibración establecidas en el grafica se facilita el cálculo de la velocidad de asentamiento de manera visual; se requiere conocer previamente los valores correspondientes a  $K_1$  y  $K_2$  como se explico en la figura 7, datos con los cuales se entra en el ábaco de la figura 8 con el fin de identificar de manera grafica el valor correspondiente a la velocidad.

Para la determinación de los valores de  $K_1$  y  $K_2$  usados en el cálculo de la velocidad de asentamiento en sedimentación, se puede hacer gráficamente con el uso de los ábacos descritos anteriormente y de manera matemática por medio de

la deducción de ecuaciones siendo esta ultima la aplicada en el presente diseño con el objeto de obtener datos más precisos en el cálculo de velocidad.

Figura 7. Velocidad de asentamiento y flotación de esferas discretas en un fluido estático

$$V_s = K_2 X_2$$

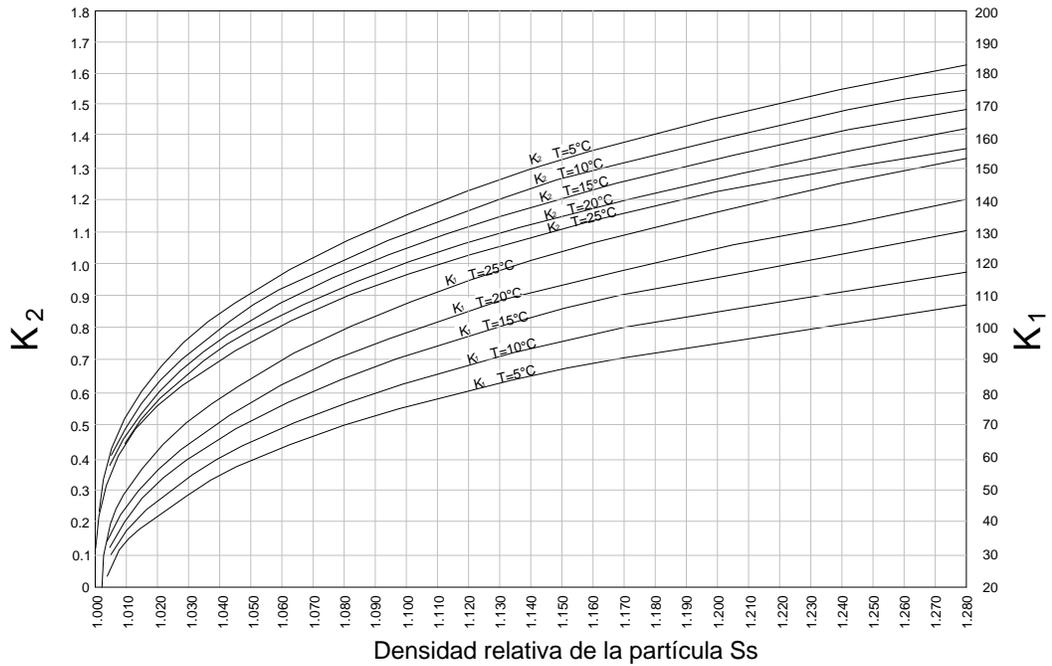
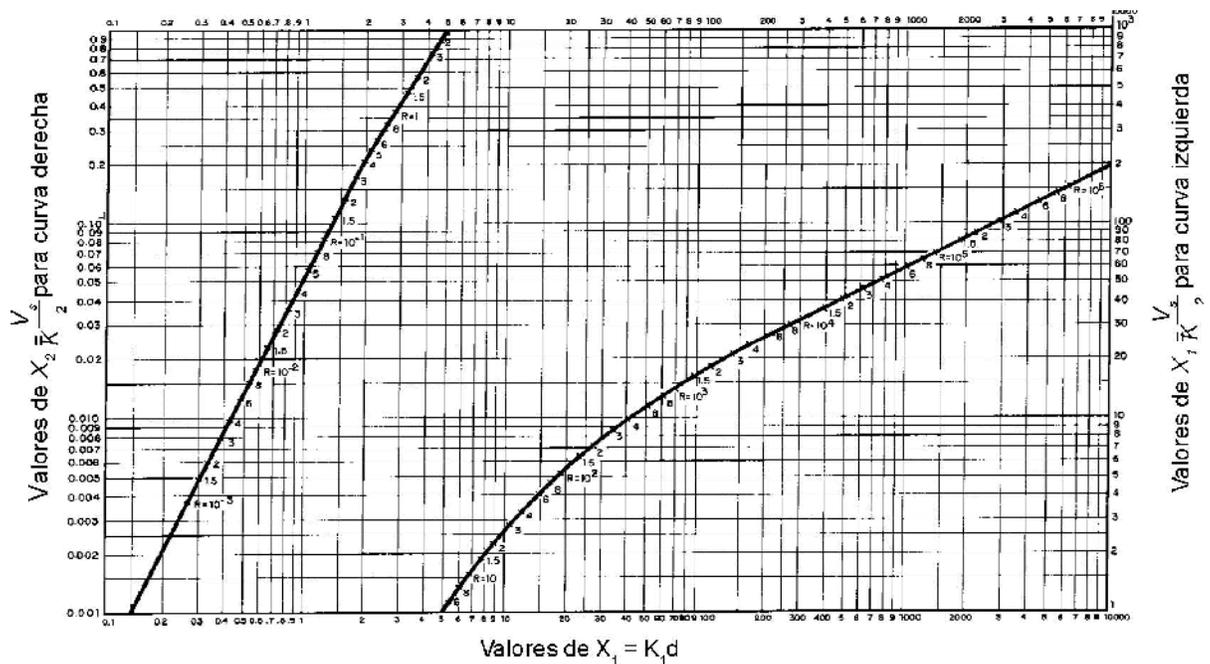


Figura 8. Velocidad de asentamiento y flotación de esferas discretas en un fluido estático

$$V_s = K_2 X_2$$



## 1.5 DISEÑO DEL DESARENADOR DE ALTA TASA

Decantadores de alta tasa. La acción de un tanque sedimentador ideal depende de su área superficial y no de su profundidad, Hazen propuso en 1904 que una subdivisión superficial producirá una superficie doble para recibir sedimentos, dos subdivisiones la duplicarán y así sucesivamente, entonces si la zona de sedimentación se subdividía por una serie de bandejas horizontales en un gran número de celdas de poca profundidad, el incremento de eficiencia sería muy grande.

No obstante su alta eficiencia, el problema práctico que presentaban era la remoción de lodos depositados sobre las bandejas horizontales. Como una temprana solución se propuso sacar de funcionamiento el sedimentador y lavarlo con agua a presión cada determinado intervalo de tiempo. Camp en 1946 presentó el diseño de un sedimentador de placas horizontales, con un sistema de recolección mecánico de lodos; posteriormente surgió la idea de inclinar las bandejas con respecto a la horizontal con el objeto de que los lodos pudieran deslizarse por su propio peso sobre la superficie de las mismas y llegar a la zona de lodos, sistema este que da una adecuada solución al problema de lavado.

Los términos sedimentación de alta tasa o sedimentación acelerada son sinónimos, y hacen referencia a decantadores formados por una serie de tubos circulares, tubos cuadrados, tubos hexagonales o laminas planas u onduladas

paralelas debidamente colocadas en el tanque, haciendo un ángulo con la horizontal que garantice deslizamiento de lodos, las cuales constituyen la celda de sedimentación, de tal forma que el agua fluya por dentro de la celda con flujo laminar, esto es,  $Re < 500$ . Estas celdas permiten cargas superficiales equivalentes del orden de 120 a 300  $m^3/m^2.d$ , contra 20 a 60  $m^3/m^2.d$  de la sedimentación convencional; el periodo de detención en este tipo de decantadores es generalmente menor de 10 min, contra varias horas en los decantadores convencionales.

Los decantadores de alta tasa son utilizados en Europa y Norte América desde hace cerca de 50 años, y en el país desde hace 25 años con magníficos resultados en cuanto se refiere a su eficiencia, obteniéndose estructuras más compactas, con la consiguiente economía en el proyecto.

**Decantadores de alta tasa de flujo ascendente.** Son unidades en las cuales el agua entra por la parte inferior de las placas mediante una tubería perforada o un canal con orificios que se localiza a lo largo de toda la extensión ocupada por ellas, y asciende a través de las mismas para posteriormente ser evacuada mediante canaletas o tuberías perforadas colocadas sobre las placas.

Fundamento teórico. A continuación se presenta una síntesis de la teoría utilizada para el diseño del desarenador.

- Cálculo de la separación de las placas

Partiendo de la ecuación básica para sedimentadores de placas, dada como:

$$V_{sc} = \frac{ScVo}{Sen \theta + LcCos \theta} \quad [25]$$

Con **Lc** dado como:

$$Lc = \left( \frac{l_p}{d} - \frac{K_f V_{od}}{v} \right) \quad [26]$$

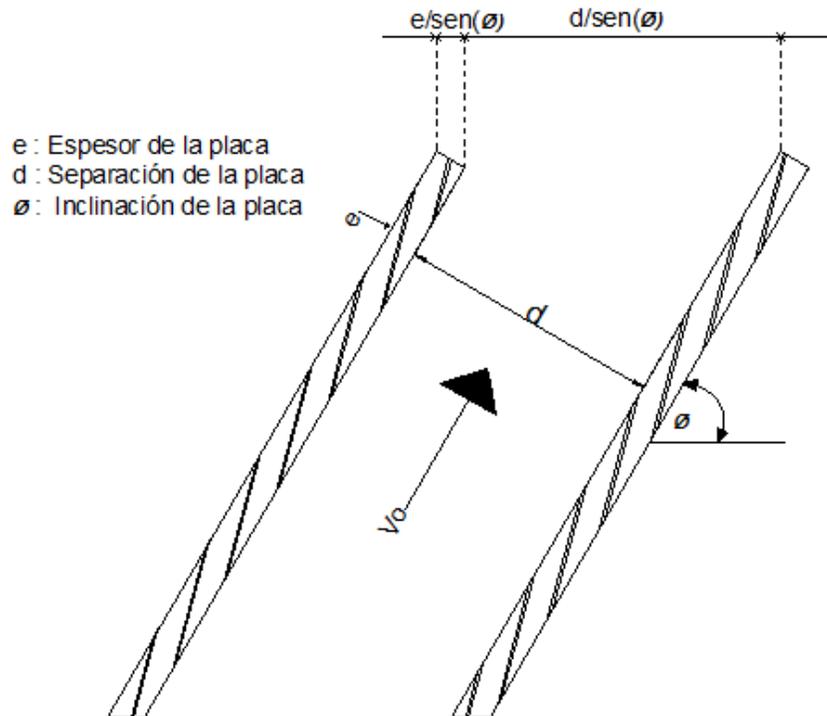
El valor  $K_f$  según Streeter y Yao, es dada como  $K_f = 0.058$ , pero según (Romero, 2005, pg. 148), está produce valores muy grandes y recomienda el valor dado por Schulze de  $K_f = 0.014$ . Aunque (Perez, 2009, pg. 210) en sus diseños usa un valor de  $K_f = 0.058$ . En esta investigación se tomará el valor más conservador, por seguridad en la recuperación de los sedimentos:

Con  $V_o$  dado como:

$$V_o = \frac{Q_d \left(1 + \frac{e}{d}\right)}{\text{sen}(\theta) A_T} \quad [27]$$

$A_T$  es el área horizontal total que ocupan las placas, por lo tanto es menor al área superficial del tanque:  $A_T = B \cdot L - B \cdot l_p \cdot \cos(\theta)$ . La figura 9 presenta una sección de placas inclinadas en donde se observa el funcionamiento en un tanque sedimentador.

Figura 9. Dimensiones de las placas



Despejando la Ecuación [25] y reemplazando en la Ecuación [26], se obtiene la expresión para la separación de las placas  $d$ .

$$\text{Sen } \theta V_{sc} + Lc \text{Cos } \theta V_{sc} - ScV_o = 0 \quad [28]$$

Si se reemplaza  $V_o$  en  $L_c$ , se obtiene.

$$L_c = \left( \frac{l_p}{d} - \frac{K_t d}{v} \frac{Q_d (1 + e/d)}{\text{sen}(\theta) A_T} \right) \quad [29]$$

$$L_c = \frac{l_p}{d} - \frac{K_t d}{v} \frac{Q_d}{\text{sen}(\theta) A_T} - \frac{K_t}{v} \frac{Q_d e}{\text{sen}(\theta) A_T} \quad [30]$$

Para efectos de claridad en el proceso se toma:

$$K_1 = \frac{K_t}{v} \frac{Q_d \text{Cos} \theta}{\text{sen}(\theta) A_T} \quad [31]$$

$$\text{cos} \theta * L_c = \frac{l_p}{d} \text{cos} \theta - K_1 d - K_1 e \quad [32]$$

Continuando con las sustituciones se tiene:

$$\text{Sen} \theta V_{sc} + V_{sc} \frac{l_p}{d} \text{cos} \theta - V_{sc} K_1 d - V_{sc} K_1 e - S_c \left( \frac{Q_d (1 + e/d)}{\text{sen}(\theta) A_T} \right) = 0 \quad [33]$$

Con.

$$K_2 = \frac{Q_d S_c}{\text{sen}(\theta) A_T} \quad [34]$$

$$\text{Sen} \theta V_{sc} + V_{sc} \frac{l_p}{d} \text{cos} \theta - V_{sc} K_1 d - V_{sc} K_1 e - K_2 d - K_2 \frac{e}{d} = 0 \quad [35]$$

Multiplicando Ec. [35] por  $d$ , se obtiene una ecuación cuadrática en función de  $d$ .

$$\text{Sen} \theta V_{sc} d + V_{sc} l_p \text{cos} \theta - V_{sc} K_1 d^2 - V_{sc} K_1 e d - K_2 d - K_2 e = 0 \quad [36]$$

Reorganizando términos obtenemos:

$$-V_{sc} K_1 d^2 + (\text{Sen} \theta V_{sc} - V_{sc} K_1 e - K_2) d + (V_{sc} l_p \text{cos} \theta - K_2 e) = 0 \quad [37]$$

Solucionando para d, se obtiene:

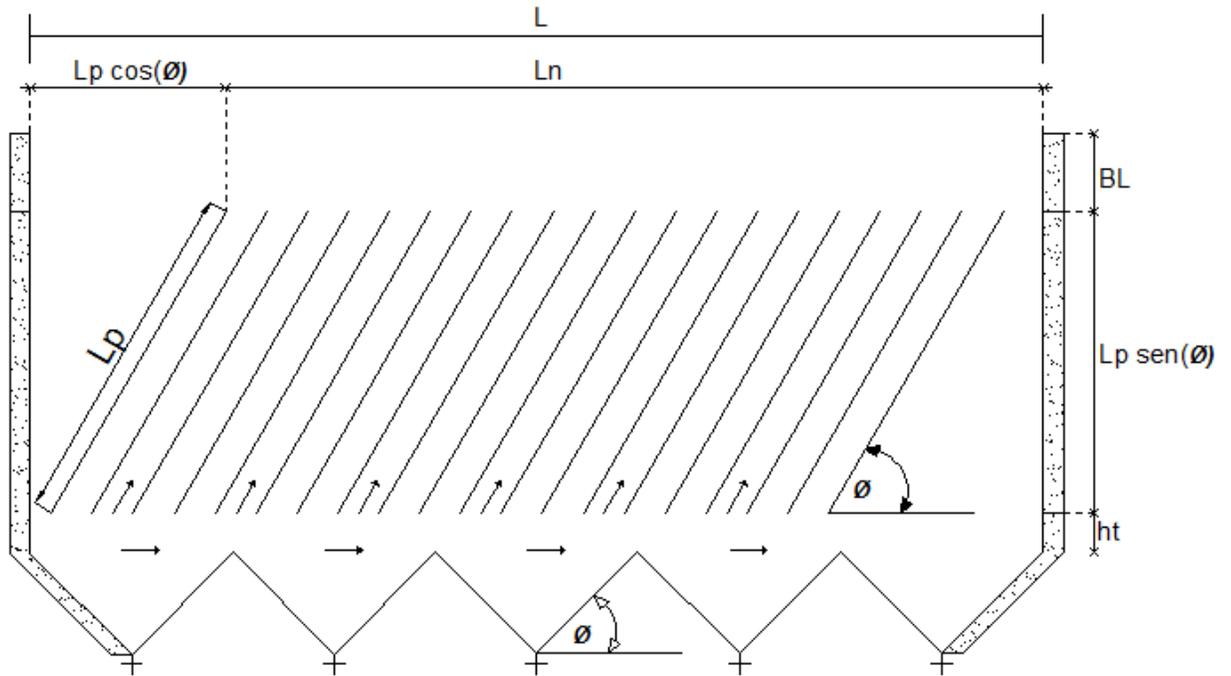
$$d = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad [38]$$

Donde:

$$a = -V_{sc}K_1; b = (\text{Sen } \theta V_{sc} - V_{sc}K_1 e - K_2); c = (V_{sc}l_p \cos \theta - K_2 e) \quad [39]$$

En la figura 10 se puede observar un corte de un tanque sedimentador de alta tasa con sus partes y dimensiones.

Figura 10. Esquema general del Desarenador de placas inclinadas.



Ln : Longitud neta ocupada por las placas  
 L : Longitud interna del tanque  
 Lp: Longitud inclinada de cada placa  
 ht: Altura libre por debajo de las placas  
 BL: Borde libre  
 $\theta$  : ángulo de inclinación del lado de las tolvas

- Cálculo del número de placas

$$NP = \frac{(L - l_p \cos(\theta)) \text{sen} \theta + d}{(d + e)} \quad [40]$$

## Algoritmo de cálculo paso a paso

### 1. Datos de Entrada

- Caudal de diseño:  $Q_d = 0.005 \text{ m}^3/\text{seg}$
- Número de desarenadores :  $Z = 1$
- Temperatura del agua:  $T_m = 17.5 \text{ }^\circ\text{C}$
- Longitud del tanque:  $L = 1.25\text{m}$
- Ancho del tanque:  $B = 0.5 \text{ m}$
- Espesor de la placa:  $e = 0.005 \text{ m}$
- Longitud inclinada de las placas:  $l_p = 0.462\text{m}$
- Angulo de inclinación de las placas:  $\theta = 60^\circ$
- Borde libre:  $b_L = 0.05 \text{ m}$

2. Rem Cálculo de la viscosidad cinemática del agua  $\text{m}^2/\text{s}$   
 $\text{visw} = 0.000001792 / (1 + 0.0337 * T + 0.000221 * T^2)$

3. Rem Cálculo de la separación de placas  $d$

Dim  $k_1, k_2, a_1, b_1, c_1$  As Double

$$AT = b * L - b * l_p * \text{Cos}(\theta)$$

$$k_1 = Kt * Q_d * \text{Cos}(\theta) / \text{Sin}(\theta) / AT / \text{visw}$$

$$k_2 = Sc * Q_d / \text{Sin}(\theta) / AT$$

$$a_1 = -V_{sc} * k_1; b_1 = V_{sc} * \text{Sin}(\theta) - V_{sc} * k_1 * e - k_2; c_1 = V_{sc} * l_p * \text{Cos}(\theta) - k_2 * e$$

$$d = (-b_1 - (b_1^2 - 4 * a_1 * c_1)^{0.5}) / 2 / a_1$$

$$d = \text{Int}(d * 1000); d = d / 1000$$

4. Rem Cálculo del Número de placas

$$NP = ((L - l_p * \text{Cos}(\theta)) * \text{Sin}(\theta) + d) / (d + e)$$

5. Rem Cálculo de la velocidad neta entre placas  $V_o$

$$V_o = Q_d / AT / \text{Sin}(\theta) * (1 + e / d)$$

6. Rem Cálculo del número de Reynolds entre placas  $Re$

$$Re = V_o * d / \text{visw}$$

7. Rem Cálculo del tiempo de retención en las celdas,  $t_c$  [min]

$$t_c = l_p / V_o / 60$$

8. Rem Cálculo del tiempo de retención en el tanque,  $t_r$  [min]

$$t_r = (L * b * (\text{ht} + l_p * \text{Sin}(\theta))) / Q_d / 60$$

9. Rem Cálculo de la carga superficial equivalente,  $V_{scCal}$  [min]

Como comprobación debe dar el mismo valor de entrada.

$$V_{scCal} = Sc * V_o / (\text{Sin}(\theta) + (l_p / d - Kt * Re) * \text{Cos}(\theta))$$

## 10. Datos de Salida.

Los valores del diseño del tanque desarenador con placas inclinadas se indica en la Figura 11, calculado mediante un software diseñado en la presente investigación.

Figura 11. Datos de entrada y de salida para el diseño del desarenador de placas inclinadas.

The screenshot shows a software window titled 'Des Placas v.1.0 Programa que calcula la separación de las placas en un desarenador de placas'. It is divided into two main sections: 'DATOS DE ENTRADA' (Input Data) and 'DATOS DE SALIDA' (Output Data).

DATOS DE ENTRADA		DATOS DE SALIDA	
Caudal de diseño Qd:[lps]	= 0.005	Separación de las placas d: [mm]	= 11.0 [mm]
Longitud del Tanque L:[m]	= 1.25	Número de placas:NP[#]	= 55 [placas]
Ancho interno del tanque B:[-]	= 0.5	Gravedad específica del agua temperatura T* : Gs[-]	= 0.99868 [-]
Espesor de la placa e:[-]	= 0.005	Viscosidad Cinemática del agua temperatura T* : Gs[-]	= 0.00000108 [m2/s]
Longitud inclinada de las Placas lp:[-]	= 0.462	Velocidad neta entre placas Vo: [m/s]	= 0.016 [m/s]
Angulo de inclinación de las Placas lp:[-]	= 60	Número de Reynolds entre placas: Re: [-]	167.7 [-]
Coficiente de Flujo laminar Kt:[-]	= 0.013	Tiempo de retención en la celda: tc: [min]	= 0.47 [min]
Temperatura del agua en la operación T:[°C]	= 17.5	Tiempo de retención en el tanque: tr: [min]	= 1.04 [min]
Eficiencia del desarenador Sc:[%]	= 100	Carga superficial equivalente: Vsc: [m/s]	= 0.00079 [m/s]
Carga superficial Vsc:[m/s]	= 0.0008252		
Altura libre pro debajo de las placas ht:[m]	= 0.10		

At the bottom of the window, there are two buttons: '<<< Salir' and 'Calcular >>>'. The output values are displayed in red text.

$$NP = \frac{(1.25m - 0.462m \cos(60)) \sin(60) + 0.011m}{(0.01 + 0.005)} = 55.8 \text{ placas} \quad [41]$$

Descripción de tanque sedimentador:

**Zona de quietamiento:** a la entrada del tanque sedimentador se dispone de una cámara de quietamiento con la finalidad de reducir la velocidad del agua en virtud del aumento de área con respecto a las salidas de los dispositivos ensayados en el montaje, definidos en tuberías de aproximadamente 2", esta zona no cuenta con rebosaderos o fugas debido a que se debe contar con el volumen total generado en los dispositivos hidráulicos estudiados, obteniéndose óptimos resultados en cuanto a la evaluación de efectividad de los mismos dentro del tanque sedimentador.

**Zona de entrada:** está provista de un dispositivo de entrada, tubería tipo PVC de 2" dispuesta a lo largo de la zona de sedimentación cuenta con orificios en sus extremos, con la finalidad de distribuir el caudal de manera uniforme y a una velocidad adecuada, no generándose turbulencias o obstrucciones a lo largo del

recorrido. La cámara de aquietamiento cuenta con unas aberturas en su parte inferior conectándose directamente con la zona de sedimentación dispuesta aquí con el fin de no generar acumulación de partículas en la entrada disminuyendo las pérdidas de material en el ensayo, la zona de entrada en tubería PVC puede apreciarse en la figura 12.

Figura 12. Zona de entrada tanque desarenador.



Para el diseño de la zona de entrada del tanque desarenador, se usa tubería PVC debido a la facilidad de acople, ya que una sección cuadrada en materiales acrílicos o plásticos tendría un costo mucho más elevado y un alto nivel de complejidad en su construcción, la tubería es evaluada desde el punto de vista hidráulico, económico y de resistencia, por lo cual se considera como adecuada para su disposición dentro del tanque desarenador<sup>3</sup>.

Para los cálculos de selección de tubería, se determina el diámetro a usar y las adecuaciones pertinentes, se trabaja con los siguientes datos de entrada, Caudal de diseño máximo entrada  $Q = 5 \text{ L/s} = 0,005 \text{ m}^3/\text{s}$

Teniendo en cuenta un velocidad de entrada recomendable de  $V = 0.3 \text{ m/s}$

$$\text{Área sección de entrada (tubería)} = \frac{Q}{V} = \frac{0,005 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,016 \text{ m}^2$$

$$\text{Área de una sección circular } A = d^2 * \frac{\pi}{4} \quad [42]$$

Despejamos diámetro, por lo tanto se tiene.

<sup>3</sup> Salazar Cano Roberto, "Acueductos, Desarenadores". Universidad de Nariño.

$$d = \sqrt{A \cdot \frac{4}{\pi}} \quad [43]$$

$$d = \sqrt{0,016 \text{ m}^2 \cdot \frac{4}{\pi}} = 0.14 \text{ m} = 5 \text{ pulg.}$$

Se disponen dos tuberías PVC de 2" ubicadas de forma paralela con el propósito de suministrar de una manera más uniforme el caudal de entrada al tanque desarenador, la cámara de entrada está conectada con orificios simulando una lamina perforada, estas secciones permiten entrada de caudal a la zona de sedimentación, dichos orificios se construyen con el fin de evitar la acumulación de sedimento en el fondo de la cámara entrada o zona de aquietamiento. Las tuberías se perforan en toda su longitud y en sus dos caras, con un ángulo de inclinación de 45° respecto al centro imaginario de la tubería, con el fin de garantizar un buen flujo de la mezcla hacia la zona de sedimentación.

Calculo de distribución de orificios. Aquí se determina los cálculos partiendo del caudal de entrada de cada tubería siendo el 50% del caudal de diseño del tanque desarenador de 5 L/s.

Q por cada tubería = 0,0025 m<sup>3</sup>/seg.

Velocidad de entrada = 0,3 m/s

$$\text{Área de orificios necesaria} = \frac{Q}{V} = \frac{0,0025}{0,3} = 0.0083 \text{ m}^2$$

Distribuyendo los orificios en las dos caras se tiene.

$$\text{Área orificio por cara} = A_c = \frac{A}{2} = \frac{0.0083}{2} = 0.004167 \text{ m}^2$$

Para el cálculo de numero de orificios N se tiene la siguiente formula.

$$A_c = \frac{N \cdot \pi \cdot D^2}{4} \quad [44]$$

Donde D es el diámetro de los orificios, se escoge un diámetro de orificio de ½" = 0.0127m. Por lo tanto despejamos el valor de número de orificios N.

$$N = \frac{A_c \cdot 4}{\pi \cdot D^2} \quad [45]$$

$$N = \frac{0.00416 * 4}{\pi * 0.0127^2} \quad [46]$$

$N = 32,89 = 33$  orificios por cada cara.

Espaciamiento  $N * (a+t) = L$

$L =$  longitud de tubería = 1.25 metros

$t =$  diámetro orificio = 0.0127 m

$a =$  Espaciamiento entre orificios.

$$a = \frac{L}{N} - t = \frac{1.25}{33} - 0.0127 = 0.0252 \text{ m} \quad [47]$$

$$a + t = 0.0252 + 0.0127 = 0.0378 \text{ m}$$

Se tiene 33 orificios de  $\frac{1}{2}$  "de diámetro por cada cara, espaciados 3.78 cm de centro a centro.

**Zona de sedimentación:** destinada a la remoción de partículas en una mezcla aluvial, se disponen placas onduladas de manera consecutiva y fija con el fin de proporcionar una superficie circular simulando una sección en tuberías, dichas placas determinan el lecho filtrante, en donde se obtiene una buena remoción de partículas en el proceso de sedimentación. La superficie de sedimentación tiene forma de panel rectangular, formada a lo largo por la unión de laminas onduladas, ordenadas y alineadas adecuadamente según el ancho de la pared interna del tanque desarenador, este tipo de estructura permite generar área de sedimentación amplia, otorgando buenos resultados, la forma de panel y la unión de laminas hace fácil su mantenimiento al poder sustraer del montaje la sección necesaria para realizar el proceso de lavado. La disposición final de la zona de sedimentación puede observarse en la figura 13.

Figura 13. Zona de sedimentación placas inclinadas.



**Zona de recolección de partículas sedimentables:** el tanque desarenador está provisto con una serie de tolvas en ángulo de 45 grados ubicadas en el fondo, con el fin de evacuar el sedimento proveniente de la decantación, cada tolva tiene una válvula para la extracción de material para posterior manipulación. Se conoce como zona de lodos, de mucha importancia pues de estos compartimentos se obtendrá el material de estudio para la estimación de la eficiencia de remoción de metales pesados en los dispositivos hidráulicos de flujo centrifugo. La disposición final de las tolvas puede observarse en la figura 14.

Figura 14. Zona recolección tolvas de almacenaje partículas sedimentadas



**Zona de salida:** puede ser en canaleta con vertederos u orificios, para el caso especial se adopta una tubería PVC, dispuesta a lo largo de la zona de sedimentación con las modificaciones pertinentes para simular el canal de

recolección, esta conduce hasta la cámara de salida, para su evacuación y posterior recirculación dentro del sistema.

Se proyectan un sistema de dos tuberías perforadas PVC para conseguir una extracción uniforme de flujo.

El diámetro de los tubos se calcula por la formula de fair:

Haciendo el tirante inicial 15% mayor que  $\frac{1}{2} d$  y para un caudal por tubo de 5 l/s

$$d = 1.25Q^{0.4} = 1.25(0.005)^{0.4} = 0.15m \quad [48]$$

Diámetro de tubería 0.15 m = 6"

Generalmente las tuberías instaladas en la recolección de agua a la salida en sedimentación están dotadas de una serie de orificios en toda su longitud, con el fin de que el agua ingrese de manera gradual para su posterior evacuación; para el diseño del tanque desarenador del banco de pruebas para ensayar dispositivos hidráulicos de flujo centrifugo se adecuan tres tuberías PVC de 2 pulgadas ubicadas de forma paralela con la capacidad suficiente para la evacuación de caudal durante un ensayo, caudal de diseño de 5 l/s, las tuberías se perforan en su sección transversal tomando la forma de canal semicircular en toda su longitud, como puede observarse en la figura 15 según la disposición final de las tuberías.

Figura 15. Tubería de recolección salida de tanque desarenador.



**Cámara de salida:** se estima un compartimento a lo ancho de la sección transversal del tanque sedimentador con un volumen conveniente, con el fin de evitar el paso de sedimento y partículas flotantes a la cámara de mezcla. Este

compartimento está dotado de una válvula de lavado en el fondo con el fin de poder realizar el mantenimiento adecuado.

**Cámara de mezcla:** compartimento dispuesto para la mezcla de material sedimentable proveniente de la tolva de almacenaje y el agua de recirculación evacuado desde la cámara de salida de la sedimentación. La salida de esta cámara se une con el tanque de abastecimiento proporcionando el caudal necesario en la mezcla, siendo posteriormente manipulados por la bomba de impulsión, hasta ser introducidos en el dispositivo ensayado de manera controlada.

## 1.6 CÁLCULO DE LOS VERTEDEROS TRIANGULARES

Para el vertedero se usa la ecuación dada por Merritt (1985), transformada al sistema internacional, como se indica a continuación:

$$Q = 0.55209 * C1H^{5/2} * \tan(\theta/2) \quad [49]$$

Donde **Q** es el caudal en [m<sup>3</sup>/s]; **H** es la altura de la lámina de agua por encima de el vértice del vertedero en [m] y **C1** es el coeficiente de descarga dado por la Gráfica de Merritt (1985), de la cual se tomaron los datos y se halló las correlaciones para calcular este coeficiente.

- Para Angulo de 90°.
 
$$C1 = -14,8060H^2 + 10,6163H^2 - 2,5504H + 2,6877; R^2 = 0,9993 \quad [50]$$
- Para Angulo de 60°.
 
$$C1 = -19,9733H^2 + 13,6487H^2 - 3,2470H + 2,7687; R^2 = 0,9998 \quad [51]$$
- Para Angulo de 45°.
 
$$C1 = -24,9956H^2 + 15,9514H^2 - 3,7202H + 2,8332; R^2 = 0,9999 \quad [52]$$
- Para Angulo de 20°.
 
$$C1 = -44,02101H^2 + 27,15812H^2 - 6,04990H + 3,08791; R^2 = 0,99929 \quad [53]$$

Estas cuatro ecuaciones calculan el valor de C1 con errores muy bajos por debajo del 1 %, con respecto a los valores de la gráfica original. Generalizando la ecuación para C1, con varios ángulos  $\theta$  (entre 20° y 90°), de la gráfica de Merrit se tiene la siguiente ecuación:

$$C1 = 2.799134H^{-0.0412962}\theta^{-0.0434718} \quad [54]$$

$$R^2=95\%. \quad H[m], \theta[^\circ], C1[-].$$

Para los vertederos del tanque desarenador a la salida se selecciona un ángulo de 45°, obteniéndose la variación de caudal indicada en la Tabla No. 6.

Tabla N°6. Valores de altura, coeficiente de gasto y caudal en el vertedero triangular de ángulo interno 45°.

<b>H</b> <b>[m]</b>	0.0 05	0.0 10	0.0 15	0.0 20	0.0 25	0.0 30	0.0 35	0.0 40	0.0 45	0.0 50	0.0 55	0.0 60	0.0 65	0.0 70	0.0 75
<b>C1</b> <b>[-]</b>	2.8 15	2.7 98	2.7 81	2.7 65	2.7 50	2.7 35	2.7 21	2.7 08	2.6 96	2.6 84	2.6 73	2.6 62	2.6 52	2.6 42	2.6 33
<b>Q</b> <b>[m</b> <b>3/s]</b>	3.E -06	2.E -05	4.E -05	9.E -05	2.E -04	2.E -04	3.E -04	5.E -04	6.E -04	8.E -04	1.E -03	1.E -03	2.E -03	2.E -03	2.E -03
<b>H</b> <b>[m]</b>	0.0 80	0.0 85	0.0 90	0.0 95	0.1 00	0.1 05	0.1 10	0.1 15	0.1 20	0.1 25	0.1 30	0.1 35	0.1 40	0.1 45	0.1 50
<b>C1</b> <b>[-]</b>	2.6 25	2.6 17	2.6 09	2.6 02	2.5 96	2.5 90	2.5 84	2.5 78	2.5 73	2.5 69	2.5 64	2.5 60	2.5 56	2.5 53	2.5 50
<b>Q</b> <b>[m</b> <b>3/s]</b>	3.E -03	3.E -03	4.E -03	4.E -03	5.E -03	5.E -03	6.E -03	6.E -03	7.E -03	8.E -03	9.E -03	9.E -03	1.E -02	1.E -02	1.E -02

## 1.7 DISEÑO DE TOLVAS DE ALMACENAJE

Para el diseño de las tolvas, se considero como parámetro fundamental el volumen de almacenaje, para garantizar el suministro adecuado que supla las necesidades del sistema, la tolva de almacenamiento de sedimento presenta unas características especiales determinadas en el diseño, consideradas convenientes en cuanto al funcionamiento y comodidad de esta pieza dentro del proyecto general.

Cálculo de volumen:

$$\text{VOLUMEN DEL CUBO} = 0,4 \times 0,4 \times 0,4 \text{ m} = 0,064\text{m}^3$$

$$\text{VOLUMEN DE PIRÁMIDE} = ((0,4^2) \times 0,2) / 3 = 0,010667\text{m}^3$$

$$\text{VOLUMEN TOTAL} = 0,074667\text{m}^3$$

Este volumen se considero conveniente, para el suministro de material al banco de pruebas para ensayar dispositivos hidráulicos de flujo centrifugo. Después de observar las características de los aparatos a ensayar en el sistema como el hidrociclón, la espiral concentradora y tubos curvos a presión, se determina un valor promedio del volumen de sedimento requerido en la mezcla de tal manera se

busca dimensiones adecuadas que proporcionen el volumen necesitado, se dimensiona guardando una holgura considerable buscando la utilización del banco de pruebas para el ensayo y prueba de dispositivos con requerimientos mayores.

La tolva fue prevista de una salida en niple de 3" roscado en material metálico, el cual tiene la facilidad de ser acoplado a las necesidades requeridas para suplir imprevistos.

Tolva de mezcla. Se determina un proceso de selección de volumen similar al método usado en la tolva de sedimento, aquí se conoce el caudal con el que funciona el sistema, el caudal de diseño es 10 l/s, en base a este dato se considera un volumen igual a de la anterior tolva y de igual manera se previó el aparato de una salida de 3" en niple roscado, el cual se denomina como una sección transversal de tubería soldada y dispuesta para el acople de accesorios y tubería PVC.

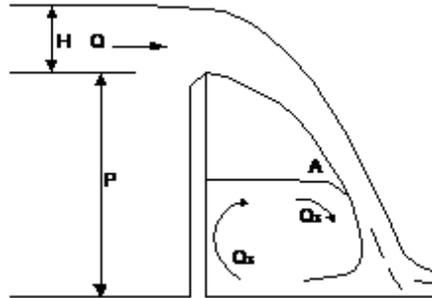
A demás este aparato cuenta con un dispositivo de desagüe diseñado para evacuar el caudal de rebose en la mezcla, a los extremos de la tolva se diseña una cámara para la evacuación del caudal sobrante en la tolva de mezcla, esta cámara tiene una altura de 12cm según el vertedero de salida de cabeza de 5 cm. El ancho de la cámara es de 6 cm longitud suficiente para la ubicación de una tubería de 2" para la evacuación de caudal sobrante.

Cada cámara consta de 2 salidas en tubería de 2" de acuerdo con el cálculo de de desagües explicado a continuación, esta tubería conduce hasta el tanque de abastecimiento en donde descarga el fluido quedando a disposición de la bomba en la succión y siendo recirculado en el sistema.

Según los componentes los datos de entrada para el vertedero de excesos, son una altura de 5cm y un ancho de 40cm, ancho establecido en las consideraciones de volumen para la tolva de mezcla aquí se procede a realizar el diseño correspondiente a dicho vertedero.

Los vertederos pueden utilizarse tanto para medir caudal como para producir mezcla rápida debido a la turbulencia del resalto hidráulico en la lámina de agua. En la figura 16 está representada una de las formas más simples de un vertedero rectangular. La lámina vertiente produce en el punto de impacto en la sección, una gran pérdida de energía, debida a la circulación de masa de agua represada sobre la estructura.

Figura 16. Vertedero rectangular mezcla rápida.



Esta masa de agua produce el empuje necesario para moverse en dirección horizontal. Parte de la energía restante que queda disipada en el resalto.

Cuando la lámina de agua alcanza el fondo se divide en una corriente principal que se mueve por el frente, y una corriente secundaria que retorna contribuyendo a la masa de agua represada. Un igual volumen de agua es arrastrado por la corriente en el punto A, retornando a la corriente líquida a la misma tasa  $Q_3$ .

Calculo de alturas conjugadas de resalto  $h_1$  y  $h_2$ .

La dificultad estaría en determinar la energía perdida que queda libre o la energía restante en la sección. La profundidad del agua en esta sección  $h_1$ , estará relacionada con la profundidad crítica  $h_c$  de la ecuación de White<sup>4</sup>.

$$\frac{h_1}{h_c} = \frac{\sqrt{2}}{1.06 + \sqrt{\frac{P}{h_c} + 1.5}} \quad [55]$$

con:

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad [56]$$

Y,

$$q = \frac{Q}{B} \quad [57]$$

Se calcula  $V_1 = q / h_1$  [58]

---

<sup>4</sup> Salazar Cano Roberto, "Plantas de Potabilización, Coagulación y Floculación". Universidad de Nariño.

$$Y, \quad F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{(g * h_1)}} \quad [59]$$

con  $h_1$  y  $F_1$  , se calcula  $h_2$  y  $v_2$  :

$$h_2 = \frac{h_1}{2} (\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1) \quad [60]$$

$$v_2 = \frac{q}{h_2}$$

2. calculo de pérdida de carga.

La pérdida de carga puede ser calculada por la fórmula de Belanger:

$$\Delta H = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1h_2} \quad [61]$$

Vertedero rectangular rebosadero:

**a. Para las condiciones dadas:**

$$\begin{aligned} Q = 5 \text{ l/s} &= 0,005 \text{ m}^3/\text{s} \\ R = 0,4 \text{ m} &= R = \text{Ancho} \\ p = 0,05 \text{ m} &= P = \text{Altura} \end{aligned}$$

Caudal Específico

$$q = Q/R$$

$$q = 0,0125 \text{ m}^3/\text{s} * \text{ml}$$

$$hc = \sqrt[3]{q^2/g} \quad hc = 0,025160369 \text{ M}$$

**b. Cálculo de las alturas conjugadas del resalto,  $h_1$  y  $h_2$**

$$\frac{h_1}{hc} = \frac{\sqrt{2}}{1,06 + \sqrt{(p/hc) + 1,5}} \quad \frac{h_1}{Hc} = 0,4830924$$

$$h_1 = 0,01215478 \text{ m}$$

$$v_1 = q/h_1 \quad 1,02840182 \text{ m/s}$$

$$F1 = \frac{v_1 \sqrt{h_1}}{\sqrt{g}}$$

$$F1 = 2,9782061$$

$$h_2 = \frac{h_1}{2} (\sqrt{1 + 8F1^2} - 1)$$

$$h_2 = 0,0454758 \text{ m}$$

$$v_2 = q/h_2 = 0,2748713 \text{ m/s}$$

c. Cálculo de las pérdidas de carga

$$H = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1h_2}$$

$$H = 0,01673278 \text{ M}$$

Calculo de rebosaderos. Se toma como referencia la teoría expuesta para desagües<sup>5</sup>

Fórmula de cálculo de Caudal para diseño de desagües:

$$Q = 1.754 \cdot r^{5/3} \cdot d^{8/3} \quad [62]$$

En donde Q esta en l/s, r es la relación de las áreas de la corona circular y el área total del tubo (se recomienda como valor máximo 7/24) y d es el diámetro de la bajante en pulgadas, pasos a seguir en el cálculo:

**Paso 1.** Se modifica la formula de referencia, despejando la variable a calcularse, en este caso el diámetro necesario.

$$d = \left( \frac{Q}{1.754 \cdot r^{5/3}} \right)^{3/8} \quad [63]$$

$$d = 3.2 \text{ pulg.}$$

**Paso 2.** Se remplazan los datos con los valores conocidos, el valor de caudal máximo suministrado por la bomba de impulsión es de 10 l/s, cabe resaltar que

<sup>5</sup> Rodriguez Dias Hector Alfonso, "Diseños Hidráulicos, Sanitarios y de Gas en Edificaciones, Desagües". Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, Colombia 2005

para este cálculo se utilizara como dato de entrada en la fórmula 5 l/s, debido a que la tolva de mezcla tiene dispuesto dos rebosaderos en sus extremos, aquí se parte de la idea de que cada uno de estos evacua cantidades iguales el caudal sobrante.

**Paso 3.** Obtención de diámetro necesario para el caudal, con los valores establecidos se encuentra un diámetro necesario de 3.2 pulg para evacuar un caudal de 5l/s al no ser un diámetro comercial se hace uso de dos tuberías de 2 pulg. Dispuestas con el fin de evacuar el caudal sobrante hacia el tanque de almacenamiento para la recirculación.

El montaje del banco de pruebas en detalle esta referenciado en los anexos técnicos plano 01, y 02. Donde se puede apreciar en detalle vista plata, perfil, cortes y secciones, suministrando la información detallada en cuanto a dimensiones y disposiciones finales de diseño.

## 1.8 DISEÑO DE LA CANALETA EN ESPIRAL

En la Figura 17 se indica una espiral clasificadora usada en laboratorio

Figura 17. Fotografía de una espiral concentradora.



La espiral concentradora es un aparato concentrador basado en la gravedad, que separa material consistente en arena granular (2mm a 0.075mm) con densidad baja de otro material con densidad más alta. El rango de concentraciones

volumétricas recomendado a manejar es entre 20% y 40%. La mezcla suele ser bombeada a una altura de 13 pies a 15 pies.

La mezcla a procesar se introduce por la parte superior de la espiral concentradora y la geometría y pendiente de la misma, hacen el trabajo, como se observa en la Figura 18, las partículas con mayor densidad o mayor tamaño ocupan la parte interna de la curva y las partículas más livianas y el agua ocupan la parte externa de la curvatura.

Pavez (1987)<sup>6</sup> da los siguientes datos para espirales concentradoras. La capacidad de tratamiento de sólidos por espiral varía de 0,5 a 2,5 ton/h, la tasa más utilizada es de 1,5 ton/h (0.4167 kp/s). El flujo de pulpa de la alimentación depende de las características de la menas. Para materiales finos se aconseja flujos de 50 a 65 L/min, para materiales medios, 70 a 90 L/min y para materiales gruesos, alrededor de 110 L/min.

El consumo de agua para cada espiral, incluyendo el agua de lavado varía de 50 a 110 L/min. Esta agua es normalmente recuperada y recirculada. En el caso de las espirales de retiradas limitadas, el agua de lavado ha sido reducida e incluso en ciertos casos ha sido eliminada.

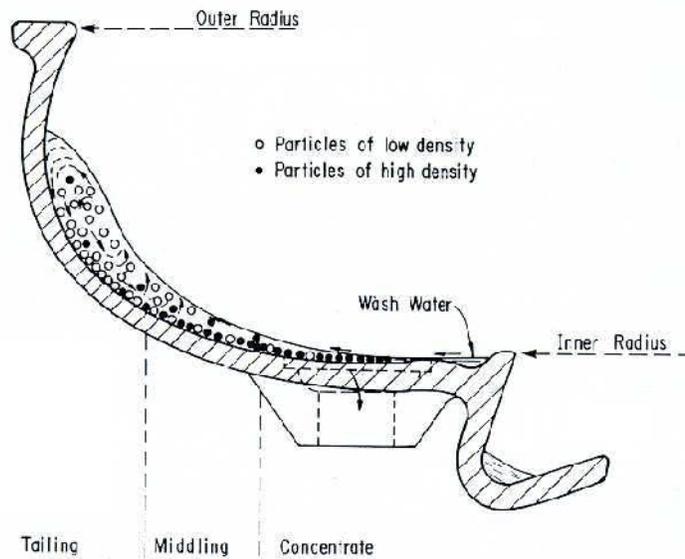
El porcentaje de sólidos es de 20 a 30%, pulpas conteniendo sólidos de granulometría gruesa, pueden tener hasta 50% de sólidos.

La dificultad con las espirales concentradoras es que no conocemos la relación que existe entre la geometría de la espiral, las propiedades del flujo, las del fluido, las de los sólidos y las de la mezcla. Por lo cual no nos es posible diseñar una espiral para las condiciones iniciales que se tenga. Por lo tanto lo que se pretende es encontrar la relación entre las anteriores propiedades en ecuaciones que nos permitan establecer una metodología de diseño. En la figura 18 podemos observar una sección típica de la espiral para entender mejor su funcionamiento.

---

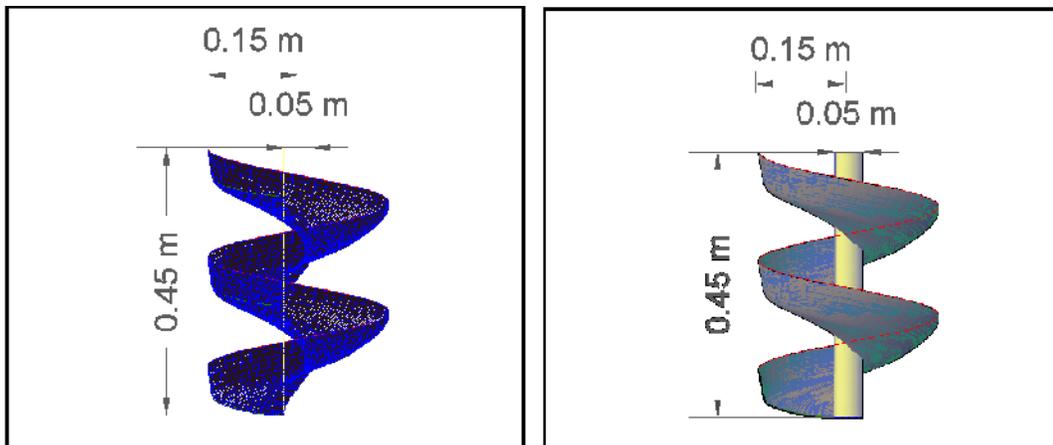
<sup>6</sup> Pavez, Oswaldo (1987) "Concentración Gravimétrica". Universidad de Atacama.

Figura 18. Sección transversal típica de la espiral.



Para el diseño se seleccionó la canaleta en espiral FGL (fine grade low) finos con bajo contenido de metal pesado, menor al 5%. Se tomó el perfil dado por (Holland-Batt, 1991)<sup>7</sup>, para un paso de espiral de 45 cm y un radio de 30 cm, el detalle constructivo de la espiral concentradora es apreciable en los anexos Plano 05, la figura 19 hace referencia de la vista en perfil con las dimensiones finales del dispositivo.

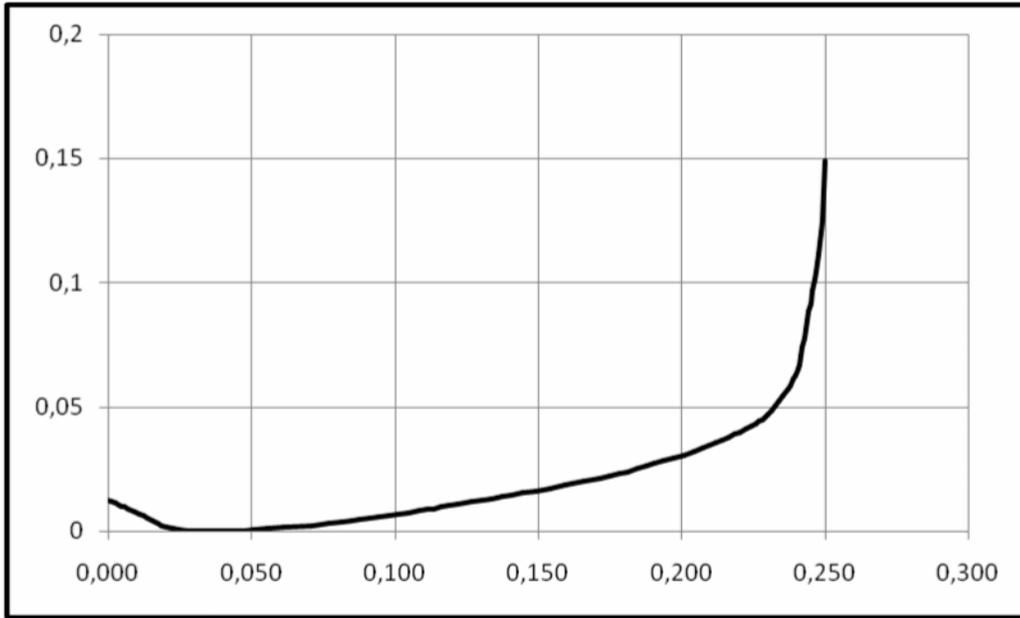
Figura 19. Geometría de la canaleta en espiral.



<sup>7</sup>B. HOLLAND-BATT and P.N. HOLTHAM. 1991. Particle and fluid motion on spiral separators. *Minerals engineering*. Vol 4. N° 3/4. Pp. 457-482. 1991. <http://mineraltechnologies.com.au/042>. [En Línea]

El perfil de la sección transversal de la canaleta en espiral tipo FGL se indica a continuación, en la figura 20.

**Figura 20. Geometría de la sección transversal original de la canaleta en espiral FGL**



Las coordenadas para la canaleta en espiral tipo FGL se indican en la tabla numero 7:

Tabla N°7. Coordenadas del perfil transversal de la canaleta en espiral FGL, a escala 1:1.

No.	X	Y									
1	0.000	0.012	31	0.091	0.005	61	0.197	0.029	91	0.243	0.081
2	0.001	0.012	32	0.094	0.006	62	0.200	0.030	92	0.244	0.085
3	0.003	0.011	33	0.098	0.006	63	0.204	0.032	93	0.244	0.088
4	0.004	0.010	34	0.101	0.007	64	0.207	0.033	94	0.245	0.092
5	0.005	0.010	35	0.105	0.007	65	0.210	0.035	95	0.246	0.097
6	0.006	0.010	36	0.108	0.008	66	0.212	0.036	96	0.246	0.101
7	0.007	0.009	37	0.111	0.009	67	0.214	0.037	97	0.247	0.104
8	0.009	0.008	38	0.113	0.009	68	0.216	0.038	98	0.247	0.108
9	0.011	0.007	39	0.116	0.010	69	0.218	0.039	99	0.248	0.112
10	0.012	0.006	40	0.119	0.010	70	0.220	0.040	100	0.248	0.116
11	0.014	0.005	41	0.122	0.011	71	0.222	0.041	101	0.249	0.120
12	0.016	0.004	42	0.127	0.012	72	0.224	0.042	102	0.249	0.125
13	0.017	0.003	43	0.130	0.012	73	0.226	0.043	103	0.250	0.149
14	0.019	0.002	44	0.133	0.013	74	0.227	0.044			
15	0.020	0.001	45	0.135	0.013	75	0.228	0.045			
16	0.023	0.001	46	0.137	0.014	76	0.229	0.046			
17	0.025	0.000	47	0.140	0.014	77	0.230	0.047			
18	0.029	0.000	48	0.144	0.015	78	0.231	0.048			
19	0.033	0.000	49	0.149	0.016	79	0.233	0.050			
20	0.038	0.000	50	0.154	0.017	80	0.234	0.053			
21	0.043	0.000	51	0.159	0.018	81	0.235	0.054			
22	0.047	0.000	52	0.166	0.020	82	0.237	0.057			
23	0.050	0.000	53	0.171	0.021	83	0.238	0.059			
24	0.056	0.001	54	0.175	0.022	84	0.239	0.061			
25	0.061	0.001	55	0.178	0.023	85	0.240	0.063			
26	0.071	0.002	56	0.181	0.024	86	0.241	0.065			
27	0.077	0.003	57	0.185	0.025	87	0.241	0.067			
28	0.082	0.003	58	0.188	0.026	88	0.242	0.071			
29	0.085	0.004	59	0.190	0.027	89	0.242	0.074			
30	0.088	0.005	60	0.194	0.028	90	0.243	0.078			

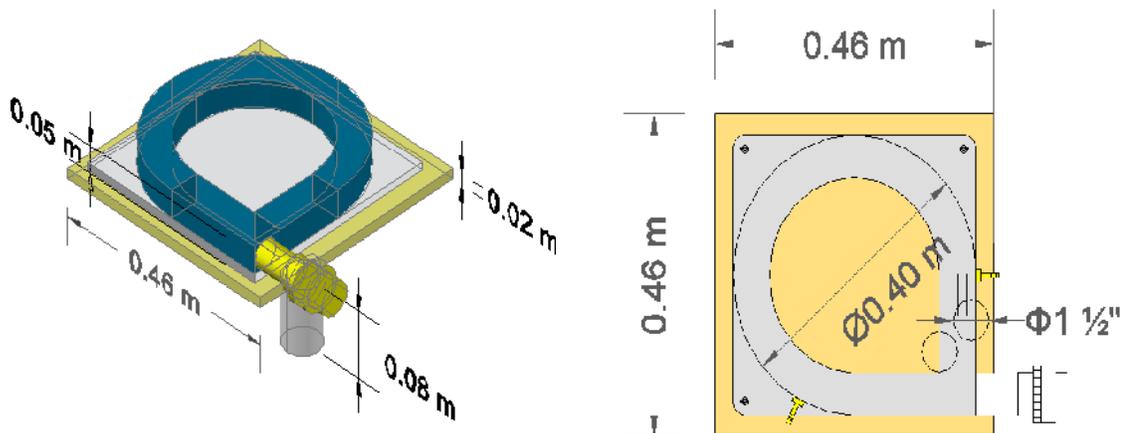
## 1.9 DISEÑO DEL SEPARADOR DE TUBO CURVO

Este dispositivo funciona usando las propiedades del flujo secundario en un tubo a presión. Consiste en un tubo de sección transversal rectangular de una relación ancho alto como mínimo de 1:5 y curvado con un radio determinado, que se establecerá en el desarrollo de la investigación. Las dimensiones se indican en el

esquema de la Figura 21, donde la mezcla entra en la sección recta del tubo, pasando por la curvatura, en la cual las partículas son disgregadas a lo ancho del tubo y son recogidas al final por unos tabiques los cuales evacuan cada granulometría por separado. Partimos de la hipótesis de que los tabique internos drenan el material sólido más pesado o más grande, que es lo que se investigará en laboratorio. Las variables a estudiar en este caso es la eficiencia en separación en función de la geometría del dispositivo, propiedades del fluido, de los sedimentos y la mezcla.

El fluido en movimiento dentro del tubo curvado genera componentes de flujo transversales denominado flujo secundario, que al igual que un canal las partículas se mueven en forma de espiral desde la parte externa a la parte interna, por el fondo del tubo. El flujo secundario es el responsable de que las partículas se depositen más rápido en el fondo y curva interna del tubo, que en un tubo recto, lo que permite lograr una separación por velocidad crítica de depósito a mayores velocidades. Esta velocidad crítica en tubos y canales rectos ha sido estudiada a profundidad por Gómez, 2002<sup>8</sup>, cuyas relaciones se pueden adaptar a tubos curvos incluyendo en la ecuación el efecto de la curvatura. Las dimensiones y detalles constructivos son referenciados en los anexos técnicos plano 03, canales curvos tipo 1,2 y 3. En la figura 21 se puede observar las dimensiones finales del canal curvo junto a una vista isométrica del dispositivo.

Figura 21. Geometría del separador de tubo curvo.



## 1.10 DISEÑO DEL SEPARADOR CICLÓNICO

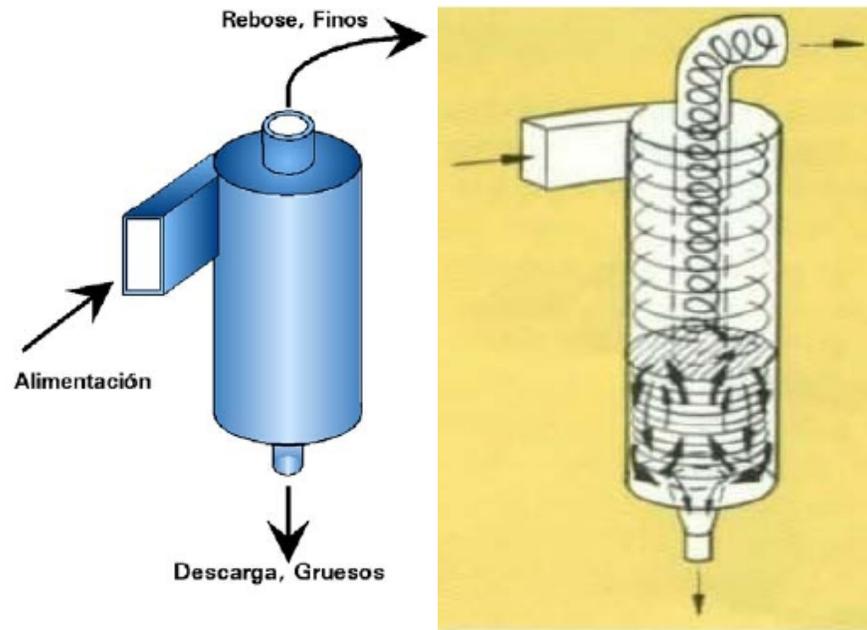
A comienzos del Siglo XX empiezan a aparecer, esporádicamente, aplicaciones de Hidrociclones. La primera patente de que se tiene constancia sobre un hidrociclón, fue otorgada a Bretney en Estados Unidos en 1891, pero curiosamente, hasta 1914 no se conoce la aplicación aislada de un hidrociclón, tal y como recoge

<sup>8</sup> Gómez Zambrano Hernán "Separación Hidráulica de Metales" 2002

Bradley en su libro "The Hydrocyclone", la primera publicación seria sobre este equipo. Mediados los años 20 se hicieron tímidas incursiones con hidrociclones para la depuración de arenas en la extracción de petróleo, y a finales de los 30 se empiezan a emplear con éxito en la industria del papel. En 1939 el Estado de Minas Holandés, Dutch State Mines (DSM) comienza a estudiar la aplicación de los hidrociclones en el lavado de carbón por medios densos, más concretamente en el desaguado de estériles, y un poco más tarde en el desaguado del carbón lavado previo a las cribas de escurrido. Los mayores desarrollos en esta aplicación fueron llevados a cabo por M. G. Driessen, quien publicó numerosos artículos sobre sus trabajos, entre los años 1939 a 1948. El hidrociclón diseñado por Driessen carecía de tobera de rebose, evacuándose el mismo a través de una sencilla abertura practicada en la tapa del cuerpo de alimentación. No obstante, al momento de su comercialización en 1948, por la empresa Stamicarbon N. V., el hidrociclón ya contaba con la correspondiente tobera de rebose.

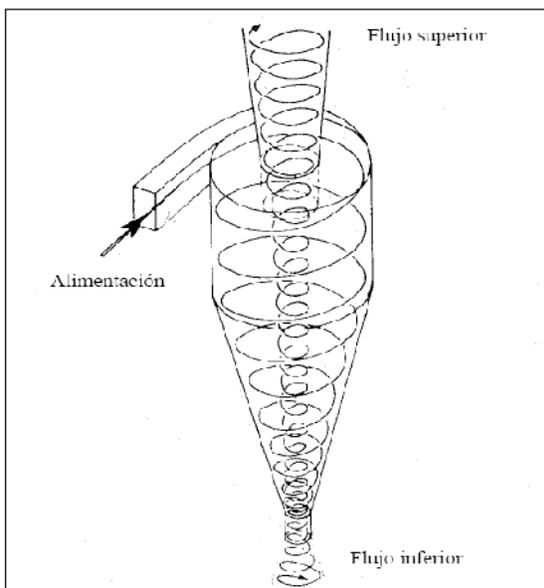
En un hidrociclón el fluido de alimentación entra tangencialmente a la parte cilíndrica bajo una cierta presión, lo que genera su rotación alrededor del eje longitudinal del hidrociclón, formando un torbellino descendente hacia el vértice de la parte circular o cónica. Las partículas más gruesas debido a la aceleración centrífuga giran cercanas a la pared, siendo evacuadas a través de la boquilla en forma de pulpa espesa. Debido a las reducidas dimensiones de ésta, solamente se evacua una parte de la suspensión, creándose en el vértice del cono un segundo torbellino de trayectoria ascendente, el cual transporta las partículas finas junto con la mayor parte del líquido, abandonando el hidrociclón a través de un tubo central situado en la tapa superior del cuerpo cilíndrico. En la figura 22 se indican la geometría general de un hidrociclón y el comportamiento del flujo en su interior.

Figura 22. Geometría de un hidrociclón de fondo plano y el esquema de las corrientes internas.



Como se puede observar en la figura 23, debido al incremento de la velocidad tangencial en el torbellino secundario (flujo inferior), las altas fuerzas centrífugas generadas traen consigo una eficientísima separación secundaria. Las partículas finas rechazadas sedimentan radialmente y se unen al torbellino primario; la mayoría de estas partículas son evacuadas finalmente a través de la boquilla formada por el vértice del cono. Por consiguiente, la separación dentro de un hidrociclón tiene lugar como resultado de estos dos procesos, y el punto de corte final será determinado principalmente por la aceleración centrífuga del torbellino secundario interior.

Figura 23. Diagrama de flujo del hidrociclón convencional.



A continuación muestra diez aplicaciones esenciales para hidrociclones:

- **Espesado.** Esta denominación se refiere a la eliminación de la mayor cantidad de agua para producir un escurrido de los sólidos. El verdadero espesado apunta a la recuperación de todos los sólidos, resultando una clarificación del líquido, pero como en la práctica, y debido a que los agentes floculantes no pueden ser utilizados, en los hidrociclones, como acelerantes de la sedimentación, la recuperación de peso es limitada y el resultado es un flujo superior turbio, es decir, lo que tiene lugar en el ciclón es un deslamado. La construcción de diques de residuos con hidrociclones es un ejemplo muy conocido de esta técnica.
- **Deslamado.** En esta operación el objeto es eliminar las partículas finas junto con el flujo superior. Esto es a menudo necesario para mejorar el producto para procesos posteriores, tales como flotación, separación magnética en húmedo, filtración, etc. En plantas químicas, los ciclones en deslamado se usan frecuentemente para eliminar el agua después de un proceso de cristalización; los cristales finos, son evacuados con el flujo superior, siendo reciclados al cristizador donde actúan como núcleos para la formación de un nuevo cristal.
- **Refinado.** En el refinado, el flujo superior es el producto final y pequeñas cantidades de partículas superiores al tamaño deseado son evacuadas con el flujo inferior.
- **Circuitos cerrados de molienda.** Los ciclones de deslamado y refinado se usan a menudo juntos con procesos de molienda. Diferentes circuitos posibles, en

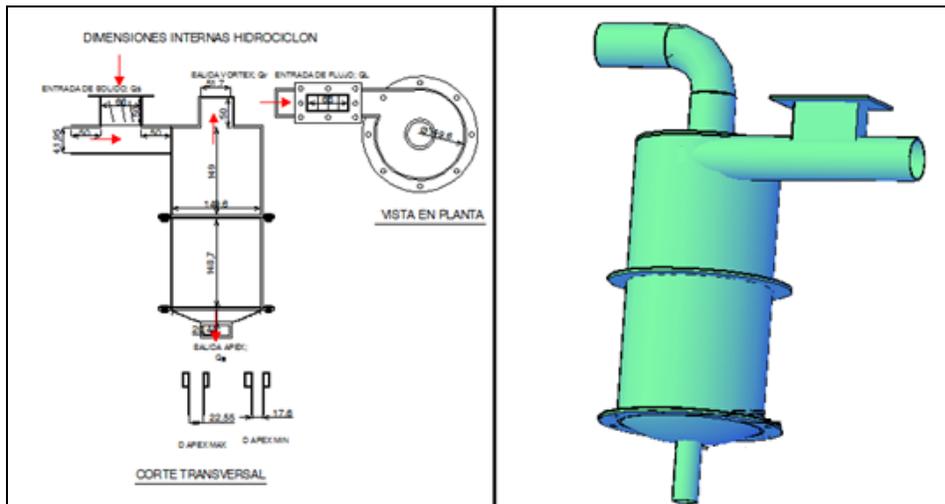
los cuales, los hidrociclones de clasificación y molinos en vía húmeda, pueden emplearse conjuntamente.

- **Clasificación selectiva.** La separación de una alimentación heterogénea en sus componentes minerales puede basarse en las diferentes características de los minerales: por ejemplo: el peso específico (separación por medios densos, mesas, espirales); forma de partículas (mesas, espirales); tensión superficial (flotación); propiedades eléctricas y magnéticas (separadores); solubilidad (proceso de lixiviación); y otras. Algunas veces, tan sólo la diferencia en el tamaño del grano permite la separación por un simple proceso mecánico.
- **Recuperación de sólidos.** Los equipos de lavado y escurrido, a menudo, generan efluentes turbios (flujos superiores o filtrados) que transportan con ellos fracciones finas, las cuales causan pérdidas de producto. La recuperación de estas fracciones finas de: tornillos lavadores de arenas, desenlodadores, escurridores, cribas, escurridoras centrífugas, es una aplicación atractiva para los hidrociclones.
- **Fraccionamiento.** Otra aplicación interesante en el tratamiento por hidrociclones, es la clasificación en dos fracciones para un tratamiento posterior en diferentes procesos. Un ejemplo típico, es el fraccionado de un concentrado de hierro para alimentación sinter (gruesos) y pellet (finos).
- **Pre-concentración.** Si hay grandes diferencias en el peso específico de los componentes minerales, el producto bruto puede ser enriquecido en hidrociclones. Esto es un proceso de concentración por gravedad, o quizás, mejor dicho, un proceso de concentración centrífuga. En estos hidrociclones no se usan medios densos. Un ejemplo típico es la separación de componentes pesados, tales como sulfuros metálicos (pirita, blenda), óxidos metálicos, metales preciosos (plata, platino), etc., de gangas. Los ciclones para esta operación difieren de los tipos normales, ya que su fondo plano y su larga parte cilíndrica se han proyectado para aumentar la eficacia.
- **Recuperación de líquido.** Si las aguas de procesos o soluciones madres deben reciclarse, con hidrociclones puede obtenerse a menudo una clarificación satisfactoria. En las plantas de lavado de carbón, este es uno de los problemas más importantes, especialmente cuando los esperadores existentes están sobrecargados; en estos casos, los hidrociclones se instalan frecuentemente en paralelo para mantener el nivel de turbiedad del agua de reciclado dentro de valores admisibles.
- **Lavado contra-corriente.** La eliminación de ácidos adherentes, lejías o partículas finas de un producto en particular, es realizada por diluciones y espesados periódicos en etapas múltiples de ciclones. El lavado en contra-

corriente puede alcanzar eficiencias altas, añadiendo agua solamente una vez, p. ej. en la última etapa de ciclonado. En comparación con los procesos en los que se añade agua limpia varias veces, el efecto total de lavado es un poco más reducido, por supuesto, pero en relación con la cantidad de agua limpia añadida, el sistema contra-corriente es mucho más efectivo.

Teniendo en cuenta los parámetros a estudiar del hidrociclón, es necesario diseñar tres hidrociclones con diferente longitud y salida de sólidos por la descarga variable con tres opciones de diámetro. La alturas fueron de 7.5 cms 22.5 cms y 37.5 cms, las aberturas del ápex son de 1.5", 1" y  $\frac{3}{4}$ ". La geometría del dispositivo hidráulico hidrociclón se indica en la Figura 26, los detalles constructivos son referenciados en los anexos técnicos plano 04, hidrociclón.

Figura 24. Geometría del hidrociclón.



## 1.11 CONSTRUCCIÓN BANCO DE PRUEBAS - TANQUE DESARENADOR

Estructura metálica en Etapa de construcción. En la Figura 25 se observa la estructura del tanque desarenador en su etapa de construcción, el cual fue realizado en su totalidad con materiales metálicos, como: Angulo metálico de  $1\frac{1}{2}$ " x  $1\frac{1}{2}$ ", una tee metálica de  $1$ " x  $1/8$ ", platina de  $1/4$ " x  $2$ ", tubo estructural pesado de  $2\frac{1}{2}$ ".

Figura 25. Fotografía del tanque desarenador etapa de construcción.



Los materiales se estiman convenientes después de realizar un análisis económico y eficiente de los mismos, determinados de tal manera una vez evaluadas sus características de resistencia y durabilidad.

En el caso de capacidad, la estructura metálica brinda un buen soporte considerando el volumen de fluido distribuido en el tanque, los apoyos principales de dicho montaje están provistos de un tubo estructural pesado de  $2\frac{1}{2}$ " con un espesor de 4 mm, el cual otorga una gran capacidad de soporte, el tanque se asegura estos soportes por medio de pernos de anclaje fijados por soldadura y de manera mecánica, brindando unas buenas características de empotramiento.

Considerando que los materiales usados son netamente metálicos, se tuvieron en cuenta aspectos de presentación y de durabilidad, aquí se uso un asilamiento y protección contra la corrosión causado por el contacto del metal con el fluido, así como la adecuación de las características físicas por medio de pintura especializada y procesos de cromado en algunas piezas de la estructura. En la Figura 26 podemos apreciar la forma en que estos materiales fueron debidamente manipulados en el taller de construcción; aquí se debió cortar con gran precisión elaborando detalladamente cada uno de los componentes necesarios, se continuo

con el proceso de soldadura en donde se necesito un gran número de uniones soldadas debido a la complejidad del montaje y de la necesidad de que la estructura sea estable y bien reforzada, se consideró necesario realizar el montaje según los requerimientos y especificaciones obtenidas en el cálculo para de tal manera poder obtener los resultados de manera segura y eficiente, se tiene la mayor precisión para lograr tener el dimensionamiento determinado en el diseño del tanque desarenador, con el fin de garantizar su buen funcionamiento.

**Figura 26. Fotografía de tanque desarenador montaje definitivo.**



En la figura 26, podemos ver que después de realizadas las uniones por medio de la soldadura se requiere pulir las mismas pues no presentan una apariencia agradable; de igual manera se procedió al trabajo de pintura pues el montaje necesita una buena presentación, previo a la pintura el montaje recibe un recubrimiento de un material anticorrosivo, pues el desarenador estará expuesto a procesos de oxidación debido a su contenido, agua y material corrosivo con metales. De igual manera se protege a todos los elementos que se encuentran en contacto con el fluido para evitar posibles fallas o problemas debidos a la corrosión que produzcan un mal funcionamiento del montaje.

La Figura 27 nos muestra el tanque desarenador terminado con el recubrimiento en acrílico de sus paredes y sus cuatro bases cromadas siendo esta su disposición final en cuanto se refiere al aspecto físico. En estas condiciones se procede al proceso de acople de piezas y nivelación en la zona de laboratorio, para tener su instalación completa y estar listo para realizar sus funciones de ensayo de dispositivos.

**Figura 27. Fotografía de tanque desarenador instalado en el laboratorio.**



Partes acrílicas recubrimiento de tanque. En la figura 28 podemos observar el trabajo realizado en acrílico para formar las tolvas de almacenaje en el fondo del tanque desarenador, cada pieza cuenta con su molde para tener una simetría entre los componentes.

**Figura 28. Fotografías de elaboración tolvas acrílicas.**



El proceso de recubrimiento en acrílico del tanque desarenador cuenta en su fondo con 15 tolvas de 25 x 25 cm en acrílico de 3mm de espesor. Las cuales fueron elaboradas de manera artesanal en el taller de acrílico, aquí se debió elaborar previamente un molde adecuado con las medidas necesarias del objeto a fabricar, se debe calentar el acrílico en un horno hasta que alcance una temperatura adecuada la cual le brinde una buena elasticidad facilitando su manipulación, con el acrílico en estas condiciones se ubica el molde de tal manera que el acrílico lo cubra tomando su forma, se necesita hacer presión para que el acrílico toma su disposición final. Como se puede observar en las figuras

anteriores las tolvas se fabrican una por una cuando se finalice el proceso se procede a unir las de tal manera que tomen la forma del fondo del tanque apoyadas sobre la estructura metálica que aquí se dispuso, cada tolva está dotada en su parte inferior por una llave de bola de 1" de diámetro fabricada en PVC, la cual está debidamente unida a la tolva con un pegante especial que garantice no solo la buena cohesión sino que además brinde un estado de impermeabilidad evitando posibles fugas, en este caso el pegante usado es un pegante de uso comercial Pegadit, el cual se une con carbonato en polvo, realizando una mezcla formando una arcilla de condiciones homogéneas las cuales brindan facilidad de manipulación y un área de contacto mayor para que la unión entre material PVC y acrílico sea la mejor posible, obteniéndose magníficos resultados. Las paredes del tanque desarenador están recubiertas por acrílico de 5mm de espesor el cual se considera adecuado debido a las presiones que ejerce el volumen de agua que aquí se contiene, este proceso se realiza cortando el acrílico el cual se encuentra en la fábrica en laminas de 1,2 x 1,8 metros, en partes acondicionadas a las dimensiones del tanque, cada pieza se asegura a la estructura metálica mediante un tornillo en las distancias en las que el diseño nos determino necesarias, cada pieza de acrílico se ensambla con las demás de tal manera que queden debidamente pegadas y selladas previniendo posibles fallas o fugas, aquí se uso el mismo pegante que en las tolvas, el cual se conoce en el mercado como Pegadit, se mezcló con carbonato en polvo. Facilitando la cohesión entre las partes involucradas, acrílico y PVC. Fue necesaria la unión entre partes acrílicas, en las esquinas y fondo del tanque, aquí se requiere una unión sellada e impermeable, se uso un material en polvo proveniente de la pulverización de acrílico, combinado con cloruro metileno, adquirido en forma líquida, formando una masa fluida la cual brinda facilidad en la cohesión garantizando un sellamiento fuerte y de buenas condiciones logrando alcanzar las normas requeridas.

La figura 29 se observa el fondo del tanque desarenador ya terminado, con el acople de todas las tolvas de acumulación de sedimento, donde cada tolva esta provista de una llave para la extracción de material.

**Figura 29. Fotografía fondo del tanque desarenador.**



## 1.12 TOLVAS DE ALMACENAJE MATERIAL SEDIMENTABLE

- Estructura metálica.

Las tolvas de almacenaje son 2, están fabricadas en lamina metálica de calibre numero 12, esta lamina tiene un espesor que se considero aceptable debido al volumen de almacenaje que tienen las tolvas, por la utilización de esta lamina se encomienda el trabajo de su elaboración a la ferretería el Español ubicada en la ciudad de Pasto la cual posee una maquinaria especial dotada de mecanismos que le permiten doblar la lamina de tal manera que se consigan figuras curvas o cuadradas. Fue fundamental este tipo de mecanismos pues las tolvas necesariamente deben tener la menor soldadura posible pues como estas estarán a una altura considerable del piso y cargan un volumen grande de fluido, podrían presentarse muchas fugas causando inconvenientes.

En la figura 30, podemos apreciar la tolva de almacenaje en el proceso constructivo y de acabado guardando buenas condiciones de apariencia y resistencia.

**Figura 30. Fotografías de la tolva de almacenaje en su proceso constructivo.**



Una vez terminado el trabajo de doblado se lleva las partes al taller de soldadura para proceder al ensamblaje de las mismas, se requiere al igual que el tanque desarenador, recubrir esta tolva con material anticorrosivo, para protegerla de posibles problemas causados por la corrosión, posteriormente se realiza el trabajo de acabado y pintura para brindar una estructura con una buena apariencia y condiciones optimas.

La tolva presenta una cara descubierta con unas cejas en sus extremos, esta parte se recubre con acrílico de espesor 5mm, el cual se asegura de manera mecánica mediante pernos y con una buena impermeabilización en silicona liquida

para evitar fugas, se adapta esta parte acrílica, pues una cara traslúcida en la tolva nos permite observar el contenido de la misma y saber cuándo debemos proceder a su limpieza o previo mantenimiento, la disposición de la cara traslúcida en acrílico se puede apreciar en la figura 31.

**Figura 31. Tolva de almacenaje acabado final.**



Las tolvas de almacenaje cuentan con un sistema de anclaje a la estructura de soporte, por medio de abrazaderas se asegura a las columnas de soporte, aquí se cuenta con un tornillo roscado que permite dar apertura a la tolva para lograr una buena nivelación y disposición final, la tolva debidamente asegurada se puede observar en la figura 32.

**Figura 32. Tolva de almacenaje montaje definitivo.**



### 1.13 ESTRUCTURA DE SOPORTE

La estructura de soporte de las tolvas se elabora en tubo estructural pesado de 2 ½" de diámetro y con un espesor de 5.4 mm de sus paredes, los cuales se usan para trabajos de gran exigencia por lo cual en este caso brindan la seguridad correspondiente en el proyecto. Las tolvas se unen a estos tubos mediante un mecanismo por medio de abrazaderas, cada tolva esta prevista de dos uniones soldadas en sus dos caras, estas uniones tienen un tornillo roscado de ½", la abrazadera se divide en dos, una de sus caras tiene roscada una tuerca la cual se une manualmente con el tornillo de las tolvas, la cara posterior de la abrazadera se pone en un lado del tubo, luego se procede a la unión con la otra cara que ya está en la tolva, se aseguran y fijan mediante pernos a la estructura. El tubo tiene unas perforaciones de ¼" a lo largo de su longitud en donde se puede manipular las abrazaderas para poder mover en conveniencia las tolvas.

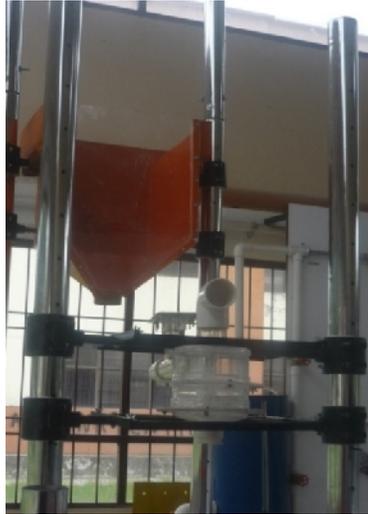
Los tubos tienen una base soldada en ángulo metálico de 2" x 2", y tubo estructural de las mismas características, esta base brinda estabilidad al montaje, los tubos se aseguran mediante pernos a la estructura quedando fijos y seguros. La base cuenta con dos lados, la parte posterior en donde se dispondrán las tolvas de almacenaje, estos tubos traseros tienen una longitud de 3m, altura considerada en el diseño para que el fluido tenga la suficiente cabeza de presión, de tal manera los mecanismos que se ensayan en este montaje trabajen en condiciones óptimas. Los tubos delanteros, son el soporte de los dispositivos hidráulicos de flujo centrífugo, tales como el hidrociclón, la espiral concentradora (canaleta en espiral) y el tubo curvado a presión. Los tubos tienen una longitud de 2,3 metros, están provistos de una unión universal soldada a ellos en donde se acoplan los dispositivos. También brindan la facilidad de ampliación o modificación del montaje acondicionando los dispositivos para un mejor funcionamiento, debido a que se cuenta con una base metálica modulable a las condiciones requeridas, la disposición final del dispositivo asegurado en la base metálica y la estructura de soporte se puede apreciar en la figura 33.

Figura 33. Estructura de anclaje dispositivo hidráulico Hidrociclón.



En la figura 34 se puede observar la disposición de la tolva de almacenaje y el dispositivo a ensayar, la ubicación de cada uno puede graduarse gracias a las condiciones de acople a las columnas de soporte por medio de abrazaderas, así se podrá contar con la cabeza necesaria para un determinado ensayo.

**Figura 34. Estructura de soporte disposición final.**



La disposición final del banco de pruebas para ensayar dispositivos hidráulicos de flujo centrífugo se puede apreciar en la figura 35, dicho montaje se encuentra ubicado en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Nariño.

**Figura 35. Estructura final Banco de pruebas para ensayar dispositivos hidráulicos de flujo centrífugo.**



## 1.14 EQUIPOS Y ACCESORIOS

- **Bomba de impulsión.** Se usa electro bomba Barnez, con motor Siemens de 3 caballos de potencia nominal; usa un rotor semiabierto el cual permite el transporte de fluido con un considerable contenido de sedimento. Posee una entrada y salida de 2 pulgadas de diámetro, las condiciones y características de este tipo de dispositivos se consideraron adecuados en el montaje del banco de pruebas en el laboratorio. La figura 36 muestra una fotografía de la bomba de impulsión a usarse en el banco de pruebas.

Figura 36. Bomba de impulsión.



- **Montaje de bomba de impulsión.** Se ubica la electro bomba en el sitio de disposición de trabajo, aquí se busco un lugar estratégico que nos garantice un buen funcionamiento, y facilidad de operación del montaje, se usa una estructura metálica aislada con caucho como base de la bomba para brindarle estabilidad y seguridad, el dispositivo armado se asegura al piso mediante tornillos de anclaje quedando sellado y seguro. Se procedió a la conexión de las partes acrílicas y en material PVC según la disposición que se considero en el diseño. En la figura 37 observamos la bomba de impulsión y sus conexiones de aducción e impulsión.

Figura 37. Montaje bomba de impulsión.



La bomba cuenta con su correspondiente sistema de conexión eléctrica debidamente instalado y protegido según las normas de seguridad, su encendido se hace de manera manual desde un tablero de control en donde se encuentra el arrancador eléctrico, y el toma de conexión, se usa cable de alta tensión debido a la complejidad del montaje y a la capacidad del equipo pues se cuenta con un motor trifásico.

- **Tanque de abastecimiento de agua.** El montaje del banco de pruebas se reforzó, con un tanque de abastecimiento con capacidad de 250 litros, de forma cilíndrica, material plástico, de uso comercial como el que se puede observar en la figura 38. Se considero adecuado debido a que la bomba de impulsión debe contar con suficiente caudal de entrada, en el montaje la succión se hace desde el tanque de abastecimiento y la tolva de salida del tanque desarenador, garantizando un flujo homogéneo por el sistema y brindando a la bomba el volumen necesario de fluido para trabajar en buenas condiciones.

**Figura 38. Tanque de abastecimiento.**



- **Adaptación de manómetro medidor de presiones:** En el sistema se dispuso de un Manómetro tipo bourdon, ubicado en la impulsión de la bomba antes de una válvula de compuerta de 2", el cual nos indica la presión en PSI a la cual la bomba está trabajando, mediante la válvula mencionada se logra controlar el caudal de impulsión de la bomba para graduar la entrada del mismo a la tolva de mezcla en donde se debe garantizar un flujo homogéneo del fluido para la entrada al dispositivo en estudio en el banco de pruebas. La disposición del manómetro puede apreciarse en la figura 39.

**Figura 39. Manómetro Medidor de Presiones tipo bourdon.**



### **1.15 CONSTRUCCIÓN DISPOSITIVOS HIDRÁULICOS (HIDROCICLÓN)**

Los tanques del hidrociclón se construyeron en acrílico espesor 3 mm con diámetros de 14.96 cm y altura de 15 cm respectivamente para cada sección. El acrílico se cortó en forma rectangular como se indica en la Figura 40 se verificó sus dimensiones y las dimensiones del molde en cartón (ver figura 41), luego se las colocó a calentar en una estufa (ver Figura 42), para manipular con facilidad la forma circular de los tanques; se colocó el acrílico calentado sobre un molde (ver Figuras 43) para dar la forma circular a los tanques; al enfriar el acrílico se procede a pegar con cloruro de metilo para que quede completamente fundido el tanque en acrílico como muestra la Figura 44. Y así se obtiene el equipo esperado final como indica la Figura 45.

**Figura 40. Corte del acrílico**



**Figura 41. Molde en cartón paja**



**Figura 42. Calentado acrílico en horno**



**Figura 43. Manipulado del acrílico**



**Figura 44. Pegado del acrílico con inyección.**



**Figura 45. Hidrociclón final**



Fue necesario realizar moldes (ver Figura 46) para elaborar ángulos de forma circular diámetro de 15 cm para luego ser pegados en el hidrociclón circular para que sirvan de conexión entre tanques y formar diferentes alturas para el hidrociclón (ver Figura 47), a estos ángulos se les realizó ocho perforaciones a cada uno para apretar entre ángulos con tornillos de 1/16" logrando un cello hermético.

El sellado de los ángulos se lo realizo con empaques del mismo diámetro y con Silicona gris para evitar fugas de agua en esta forma de unión del hidrociclón.

**Figura 46. Corte de molde circular**



**Figura 47. Tapa para hidrociclón**



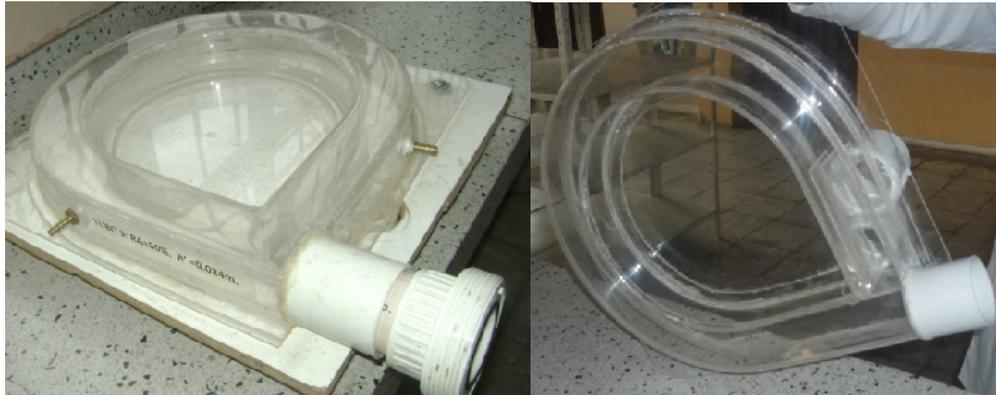
En la Figura 48 se indica el hidrociclón terminado con su base de soporte.

**Figura 48. Hidrociclón terminado.**



El proceso de manipulación del acrílico en caliente y basado en moldes de madera y plásticos conlleva a la culminación de la construcción de los dispositivos hidráulicos de flujo centrífugo; en la figura 49 se puede apreciar el canal curvo con su disposición final.

**Figura 49. Canal curvo terminado.**



En la figura 50 se observa la disposición final de la espiral concentradora, una vez han sido manipulados los moldes para lograr darle un buen acabado.

**Figura 50. Espiral concentradora terminada.**



## **1.16 ENSAMBLAMIENTO DE COMPONENTES**

El montaje del banco de pruebas para ensayar dispositivos hidráulicos de flujo centrífugo, se desarrollo de manera detallada en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Nariño.

Los componentes a unir fueron manipulados correctamente para alcanzar un estándar de calidad del montaje en general, se dispuso de elementos químicos como limpiador de PVC y acetona líquida para la limpieza de cada una de las piezas a unir, así como la utilización de elementos sellantes y con propiedades pegantes como son la Soldadura de PVC pegante de piezas, y La silicona semilíquida impermeable.

En cada componente se usa el elemento limpiador y sellante correspondientes según la característica del mismo, PVC, Acrílico, para alcanzar las características de unión más favorables, puesto que el material de los elementos reacciona mejor a cierto tipo de pegantes, por ejemplo para la unión de acrílico es mejor la utilización de silicona semilíquida puesto que brinda propiedades cohesivas muy resistentes y duraderas. Posteriormente se analiza detalladamente la unión de los componentes verificando que no existan ningún tipo de fugas o desperfectos en el sistema.

El procedimiento de limpieza de componentes con productos químicos se puede apreciar en la figura 51.

**Figura 51. Elementos químicos de limpieza y componentes de trabajo**



El trabajo ya finalizado realizado en el ensamble de los accesorios en el banco de pruebas se puede observar en la figura 52.

**Figura 52. Ensamble de accesorios**



Como se observa en la Figura 53, las tuberías se nivelan buscando un correcto funcionamiento de las mismas, de igual manera cada uno de los componentes de todo el sistema en general se nivelan como son tanque desarenador, tanque de abastecimiento, tolvas de almacenaje y mezcla; en cada accesorio se realizó la respectiva inspección verificando que no existan fugas y garantizando una buena unión entre las piezas; además de una nivelación adecuada frente a un punto de referencia, para de tal manera obtener mejores resultados en el funcionamiento de todo el montaje.

**Figura 53. Acople de tubería y accesorios.**



Los accesorios y tubería se aseguran a las estructuras de soporte del montaje para evitar fallas en los componentes debido al movimiento y la fricción causada por el trabajo de las mismas, se usa materiales de madera y metálicos para dar soporte a la sección en referencia, se implementa el uso de abrazaderas elaboradas en las medidas necesarias para garantizar la unión adecuada del elemento. Este proceso finalizado se puede observar como un ejemplo en la figura 54.

**Figura 54. Pieza asegurada al sistema.**

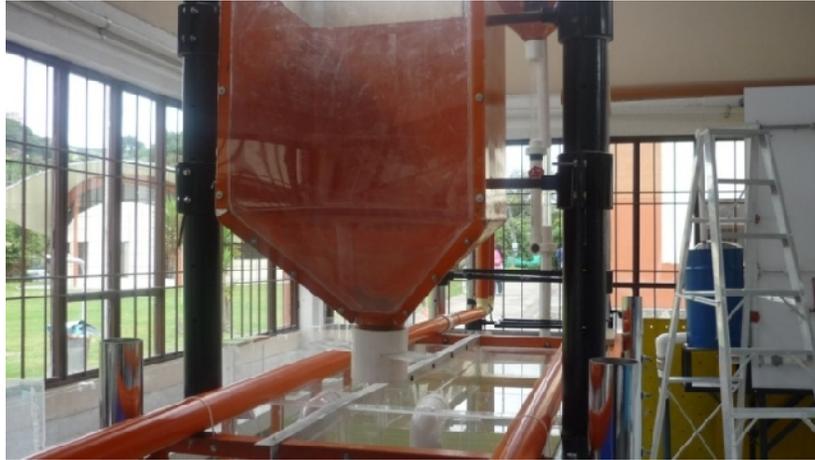


### **1.17 ENSAMBLE DE TOLVA ALMACENAJE DE SEDIMENTOS**

En la Figura 55 se observa la disposición final de la tolva de almacenaje de sedimento, ubicada sobre la cámara final del tanque desarenador, en donde se realiza la mezcla del material a tratar con el fluido de transporte. La ubicación se considero adecuada debido a las necesidades de los dispositivos a ensayar, puesto que con las mezcla en la cámara final del tanque desarenador la bomba tiene acceso a ella directamente logrando la impulsión hasta la tolva de mezcla en donde el material a tratar entra de manera gradual al dispositivo ensayado como, el hidrociclón, el canal curvo y la espiral concentradora.

Todos los elementos y componentes del sistema están en la capacidad de someterse a posibles modificaciones dependiendo de la necesidad, en cada uno de ellos se previó un mecanismo de adecuación para que se tenga la posibilidad de trasladarlo o acoplarlo de varias maneras.

**Figura 55. Tolva de almacenaje de sedimento**



### **1.18 ENSAMBLE Y CALIBRACIÓN BOMBA DE IMPULSIÓN**

La bomba de impulsión se acopla a una estructura de soporte y se asegura al piso mediante tornillo de unión profunda quedando anclada y debidamente nivelada, se procede al proceso de conexión en donde se dispuso de un arrancador eléctrico como se puede observar en la figura 56, este arrancador puede modificarse de acuerdo a las necesidades de la bomba en lo referente a su conexión.

**Figura 56. Ensamble de la bomba de impulsión**



La bomba se calibra, verificando el sentido de giro de su motor, garantizando que la corriente que recibe sea la adecuada, verificando su aislamiento y protección, optimizando así su funcionamiento.

### 1.19 CALIBRACION - CAUDAL DE LA BOMBA DE IMPULSIÓN

El caudal total de la bomba se obtuvo después de realizar un aforo en el sistema, se dispuso el montaje en condiciones en las cuales el caudal total impulsado por la bomba es vertido por los rebosaderos de la tolva de mezcla, esto se logra cerrando la válvula de 2" a la entrada del dispositivo ensayado. La tubería de desagüe conduce el agua de rebose, desde la tolva de mezcla hasta el tanque de abastecimiento para que se realice una recirculación, aquí se dispuso de tubería acoplada a la salida para facilitar el aforo del volumen de agua que llega al tanque.

Con un volumen de aforo constante se toman varios tiempos y se determina el caudal total de impulsión de la bomba.

Para realizar el procedimiento mencionado se tiene como referencia la norma técnica Colombiana NTC 1063-3 **“MEDICION DEL FLUJO DE AGUA EN CONDUCTOS CERRADOS A SECCION LLENA. MEDIDORES DE AGUA POTABLE FRIA Y AGUA CALIENTE. PARTE 3: EQUIPOS Y METODOS DE ENSAYO”**

En la figura 57 podemos apreciar el proceso realizado en el aforo de los caudales suministrados por la bomba de impulsión a una misma presión de trabajo y posteriormente variando dichas presiones para observar el comportamiento de trabajo de la bomba de impulsión.

Figura 57. Aforo caudal bomba de impulsión.



Según referencia de la norma técnica colombiana NTC 1063-3, se tiene.

El método descrito en esta norma para determinar los errores de indicación es el denominado método de "recolección", en el cual la cantidad de agua que pasa a través del medidor es recogida en uno o más recipientes y luego se determina su

cantidad calculando su volumen o su masa. Se pueden emplear métodos diferentes siempre y cuando se respete el nivel de exactitud.

## **DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE ENSAYO**

El banco de ensayo habitualmente consta de:

- a) Un suministro de agua (tubería principal, tanque no presurizado, tanque presurizado, bomba, etc.).
- b) Tubería.
- c) Un dispositivo de referencia calibrado (tanque calibrado, medidor de referencia, etc.)
- d) Instrumentos para medir el tiempo del ensayo
- e) Dispositivos para automatizar el ensayo.
- f) Instrumentos para medir la temperatura del agua de ensayo.
- g) Instrumentos para medir la presión del agua.
- h) Instrumentos para determinar la densidad, si es necesario.
- i) Instrumentos para determinar la conductividad, si es necesario.

## **TUBERÍA**

Descripción: La tubería debe incluir: a) Una sección de ensayo en la que está(n) colocado(s) el(los) medidor(es). b) Instrumentos para establecer el caudal deseado. c) Uno o dos dispositivos de separación. d) Instrumentos para determinar el caudal. Y si es necesario, e) Una o más purgas de aire. f) Un dispositivo de no retorno. g) Un separador de aire. h) Un filtro. i) Medios para verificar que la tubería se llena a un nivel de referencia antes y después del ensayo.

Durante el ensayo, no debe ocurrir fuga, entrada o drenaje del flujo entre el(los) medidor(es) y el dispositivo de referencia, o desde el dispositivo de referencia.

La tubería debe ser tal, que a la salida de todos los medidores exista una presión positiva de al menos 0,3 bar a cualquier caudal.

### **Precauciones que se deben tomar durante el ensayo**

La operación del banco de ensayo debe garantizar que la cantidad de agua que pasa a través del(los) medidor(es) es igual a la que mide el dispositivo de referencia. Debe verificarse que las tuberías (por ejemplo, los cuellos de cisne en las tuberías de salida) se encuentren llenas al mismo nivel de referencia tanto al comienzo como al final del ensayo.

Se debe purgar el aire de la tubería de interconexión y el(los) medidor(es). Se

deben tomar todas las precauciones para evitar los efectos de la vibración y de los golpes.

Los datos obtenidos en el aforo realizado en el laboratorio para una presión constante de trabajo de la bomba de impulsión se referencian en la tabla N° 8.

**Tabla N°8. Caudal Total de Impulsión de la Bomba**

<b>CAUDAL BOMBA</b>			
<b>REBOSADERO 1</b>			
<b>Vol (lts)</b>	<b>T (s)</b>	<b>Q (Lts/s)</b>	<b>Q prom</b>
40	12,59	3,1771247	<b>3,18491025</b>
40	12,05	3,31950207	
40	13,08	3,05810398	
<b>REBOSADERO 2</b>			
<b>Vol (lts)</b>	<b>T (s)</b>	<b>Q (Lts/s)</b>	<b>Q prom</b>
40	7,88	5,07614213	<b>4,99880162</b>
40	8,14	4,91400491	
40	7,99	5,00625782	
<b>CAUDAL TOTAL</b>		<b>8,18371187 Lt/s</b>	

En la zona de impulsión de la bomba se encuentra ubicado un manómetro tipo bourdon y una válvula de compuerta de 2", el manómetro mide las presión a la cual está trabajando la bomba.

En condiciones normales con la válvula totalmente abierta y la bomba trabajando al límite se obtiene el caudal total de impulsión con una presión aproximada de 8 PSI. Para determinar la curva de trabajo de la bomba se realizo un proceso de aforo de caudales como el ya mencionado, variando la presión en la impulsión de la bomba, esto se logra accionando la válvula de compuerta de 2", reduciendo el diámetro de paso del agua a través de ella, reduciendo la apertura para cada lectura.

Se tomaron varios caudales para diferentes presiones de trabajo, se compara la curva de la bomba teórica con la práctica obtenida en el laboratorio, a continuación se presenta los datos obtenidos en los aforos y la gráfica de comparación de curvas.

Aforo de bomba a diferentes presiones de trabajo. Volumen del aforo de 30 litros, para algunas presiones se toman volúmenes más pequeños debido a que el caudal es mucho menor y se busca tener la mayor exactitud. En la tabla N° 9 se presentan los valores encontrados para caudales suministrados por la bomba de impulsión a diferentes presiones de trabajo.

Tabla N°9. Valores de aforo de bomba a diferentes presiones de trabajo.

PRESIÓN PSI	REBOSADERO 1			REBOSADERO 2		
	T (s)	Q (Lts/s)	Q prom	T (s)	Q (Lts/s)	Q prom
8		Q MAXIMO	<b>4,9988016</b>		Q MAXIMO	<b>3,1849103</b>
10	6,52	4,601227	<b>4,6019049</b>	12,46	2,4077047	<b>2,4044407</b>
	6,32	4,7468354		12,73	2,3566379	
	6,73	4,4576523		12,25	2,4489796	
15	7,1	4,2253521	<b>4,2105</b>	14,34	2,0920502	<b>2,0912781</b>
	7,01	4,2796006		14,86	2,0188425	
	7,27	4,1265475		13,87	2,1629416	
20	8,25	3,6363636	<b>3,7302763</b>	15,52	1,9329897	<b>1,9743523</b>
	8,39	3,5756853		14,84	2,0215633	
	7,54	3,9787798		15,24	1,9685039	
25	8,83	3,3975085	<b>3,3173888</b>	17,77	1,6882386	<b>1,7083151</b>
	9,05	3,3149171		17,13	1,7513135	
	9,26	3,2397408		17,8	1,6853933	
28	2,05	2,9268293	<b>3,0113518</b>	2,77	1,4440433	<b>1,4453162</b>
	1,95	3,0769231		2,62	1,5267176	
	1,98	3,030303		2,93	1,3651877	
30	11,05	2,7149321	<b>2,8082309</b>	23,82	1,2594458	<b>1,2452586</b>
	10,78	2,7829314		24,11	1,244297	
	10,25	2,9268293		24,35	1,2320329	
33	1,81	2,2099448	<b>2,4718351</b>	4,38	0,913242	<b>0,9248971</b>
	1,61	2,484472		4,08	0,9803922	
	1,47	2,7210884		4,54	0,8810573	

Continuación Tabla N°9

35	1,66	2,4096386	<b>2,113342</b>	8,14	0,4914005	<b>0,4643235</b>
	1,92	2,0833333		9,13	0,4381161	
	2,02	1,980198		8,38	0,477327	
	2,02	1,980198		8,88	0,4504505	
38	3,16	1,2658228	<b>1,219206</b>	<b>Caudal total para 38 PSI</b>		
	3,01	1,3289037				
	3,33	1,2012012				
	3,64	1,0989011				
	3,33	1,2012012				

Para expresar los resultados en las dimensiones deseadas es preciso determinar las unidades de conversión para diferentes magnitudes como se hace referencia en la tabla N° 10.

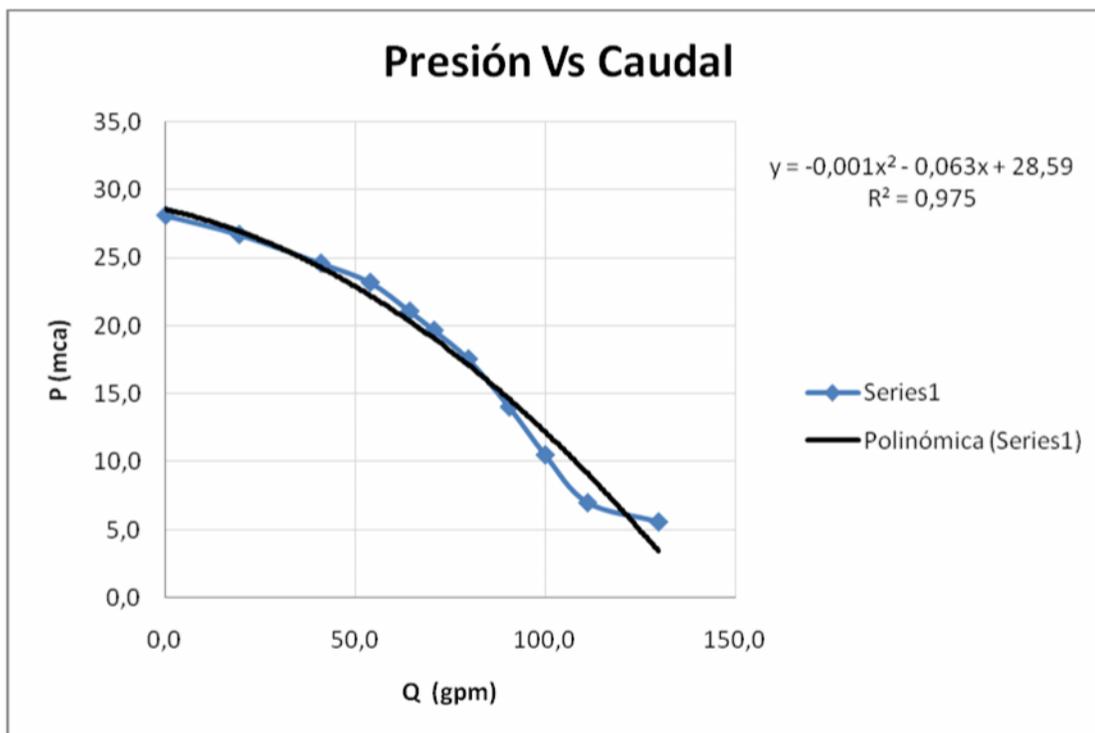
**Tabla N°10. Tabla de conversión para diferentes unidades de presión**

<b>Unidades de presión</b>			
L/s	Gpm	PSI	m.c.a.
1	16	1	0,7035467

En la figura 58 podemos observar el comportamiento del caudal a diferentes presiones de trabajo de la bomba de impulsión.

En cada uno de los aforos realizados en el capítulo de calibración se presenta una curva característica del comportamiento del caudal aforado, para determinar la ecuación que describe correctamente a esta se realiza una regresión potencial con el objetivo de encontrar la línea de tendencia de los datos en la grafica consignados, a demás del cálculo de la ecuación descriptiva de la curva se hace referencia del coeficiente de correlación R el cual determina el grado de ajuste de los datos obtenidos en laboratorio, buscándose siempre una valor elevado que tienda a 1.

Figura 58. Gráfica Presión Vs. Caudal para un volumen de aforo de 30 litros.



Fuente: Esta investigación.

A continuación, se presentan dos ecuaciones utilizadas para obtener el aforo de la bomba a diferentes presiones de trabajo. La primera es obtenida a partir de las mediciones realizadas en el Laboratorio, y la segunda es la ecuación teórica del fabricante. Como se puede apreciar en la tabla N° 11.

Tabla N°11. Ecuaciones Teórica y de fabricante de bomba de impulsión

ECUACIÓN GRÁFICA AFORO DE LA BOMBA	ECUACIÓN DEL AFORO DE LA BOMA (Teórica. Bomba BARNES 7 CCE-1 3HP)
$Y = -0,001x^2 - 0,0633x + 28,595$	$HT = -0.0007Q^2 - 0.0529Q + 30.742. R^2 = 0.9987$

En la tabla N° 12 se referencias los datos calculados de acuerdo a las ecuaciones correspondientes a la curva teórica y la del fabricante, se analizan los datos con el fin de comprar los dos métodos y determinar el adecuado funcionamiento de la bomba.

Tabla N°12. Valores de aforo de la bomba experimentales y teóricos a diferentes presiones de trabajo

**DATOS TEORICOS**

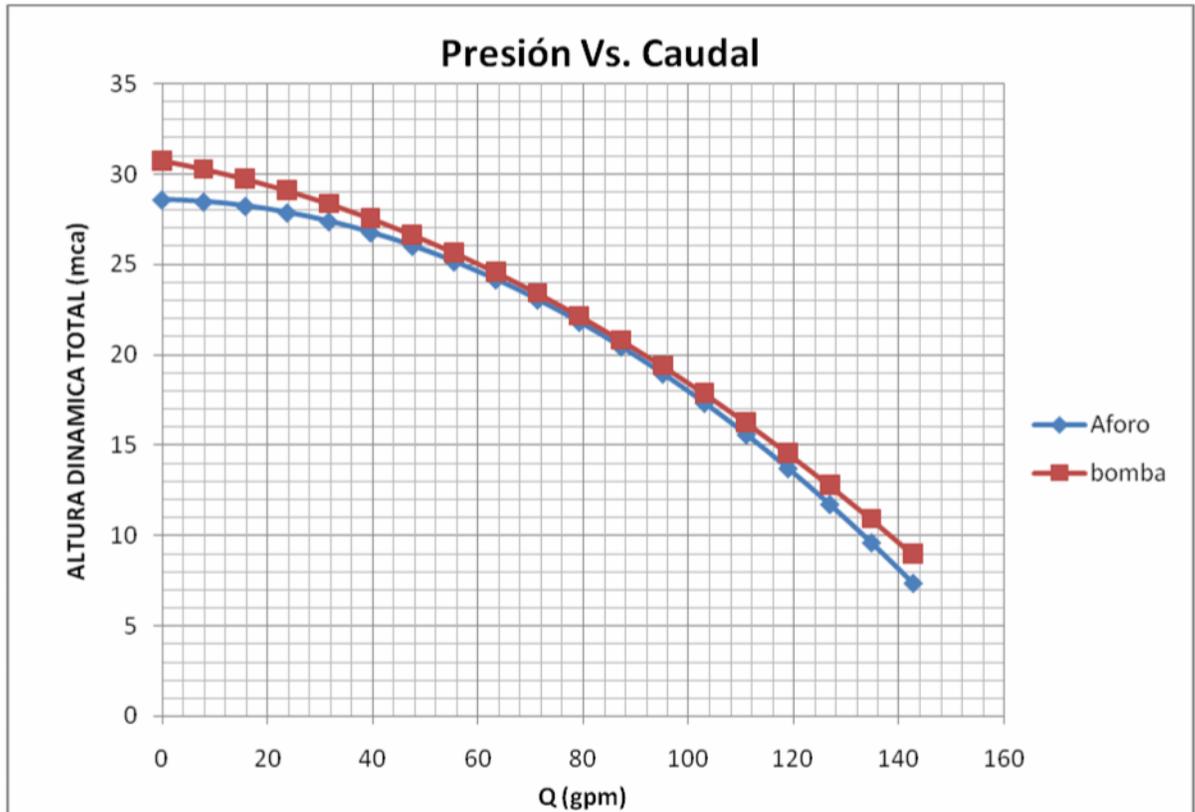
Q (l/s)	Q (gpm)	Presión
0	0	28,595
0,5	7,926028	28,482006
1	15,852056	28,243369
1,5	23,778084	27,879087
2	31,704112	27,389162
2,5	39,63014	26,773593
3	47,556168	26,03238
3,5	55,482196	25,165524
4	63,408224	24,173023
4,5	71,334252	23,054879
5	79,26028	21,81109
5,5	87,186308	20,441658
6	95,112336	18,946583
6,5	103,03836	17,325863
7	110,96439	15,579499
7,5	118,89042	13,707492
8	126,81645	11,709841
8,5	134,74248	9,5865454
9	142,6685	7,3376065

**DATOS DEL FABRICANTE**

Q (l/s)	Q (gpm)	Presión
0	0	30,742
0,5	7,926028	30,278738
1	15,852056	29,727525
1,5	23,778084	29,088361
2	31,704112	28,361247
2,5	39,63014	27,546182
3	47,556168	26,643166
3,5	55,482196	25,6522
4	63,408224	24,573283
4,5	71,334252	23,406415
5	79,26028	22,151597
5,5	87,186308	20,808828
6	95,112336	19,378108
6,5	103,03836	17,859438
7	110,96439	16,252816
7,5	118,89042	14,558245
8	126,81645	12,775722
8,5	134,74248	10,905249
9	142,6685	8,9468249

La gráfica 59 muestra una comparación entre los valores obtenidos mediante los dos métodos, donde podemos apreciar una gran similitud en el funcionamiento de la bomba de impulsión según la recomendada por el fabricante con lo que se concluye que esta apta y en buenas condiciones para su posterior uso.

Figura 59. Gráfica Presión Vs. Caudal de los valores obtenidos mediante los dos métodos



Fuente: Esta investigación.

## 1.20 CALIBRACION DEL DISPOSITIVO ENSAYADO

Cada dispositivo hidráulico de flujo centrífugo cuenta con su respectiva estructura de soporte debidamente nivelada y asegurada al sistema, a la entrada del dispositivo se instala una válvula de compuerta de 2" de diámetro encargada de regular el caudal; de esta manera se puede trabajar a diferentes presiones de carga regulando así el funcionamiento de dispositivo.

Se acopla a la entrada del aparato ensayado un piezómetro con una escala numérica en donde podemos tomar lectura de la las presiones mencionadas anteriormente como se puede observar en la figura 60, este piezómetro cuenta con su estructura de soporte en donde se verifico su buen funcionamiento y la calidad de los datos proporcionados por el mismo.

**Figura 60. Disposición final del Sistema**



### **1.21 AFORO DE CAUDALES TOLVAS**

Calibración de Tolva de Almacenaje Sedimentos. La tolva de almacenaje de sedimento cuenta a la salida de la misma con un adaptador hembra de 3" material PVC, el cual fue modificado a las necesidades del sistema, en donde se cuenta con un dispositivo de salida en el cual dispone de una lamina acrílica perforada a diferentes diámetros, estos diámetros regulan el caudal de salida de la tolva, orificio 1 hasta orificio 4 siendo este el de menor diámetro.

La salida de la tolva se asegura y modifica para garantizar el buen fluir de los sedimentos, mediante el uso de materiales plásticos. Para lograr obtener el caudal de salida de la tolva con los diferentes orificios se realizó el proceso de calibración, descrito a continuación.

Los orificios de salida de la tolva tiene diferentes diámetros para cada uno de ellos se realizo un procedimiento similar en la obtención matemática del caudal, se dispuso la tolva en una estructura de soporte la cual mantuviese la misma en condiciones ideales de nivelación, fijación y de accesibilidad en el proceso como puede apreciarse en la figura 61. Con diferentes volúmenes de material se toma lectura de varios tiempos de descarga de la tolva para obtener un tiempo promedio para ese volumen y así determinar el caudal de salida. El procedimiento se representa gráficamente en las siguientes figuras.

**Figura 61. Fotografías de la Tolva de almacenaje y sus orificios**



La tabla 13 muestra los aforos realizados en la tolva de almacenaje de sedimentos, con arena blanca. Aquí se afora para los 4 orificios de la tableta de ranuras con el fin de determinar el caudal promedio que se puede suministrarse con cada uno de ellos, posterior mente cada ensayo con un dispositivo hidráulico necesitara un caudal a graduar según las características y condiciones de funcionamiento del dispositivo.

**Tabla Nº13. Valores de aforo tolva almacenaje de sedimentos**

peso (gr)	T (s)	Prom	Q (cm <sup>3</sup> /seg)	Q (gr/seg)
Orificio 1 7780	7.98	7.935	408.729	980.466
	7.86			
	7.78			
	8.12			
Orificio 2 7730	9.95	9.7825	329.407	790.187
	9.66			
	9.88			
	9.64			

Continuación Tabla N°13

Orificio 3 7690	13.62	13.6775	234.381	562.237
	13.46			
	14.05			
	13.58			
Orificio 4 7650	22.64	22.745	140.210	336.338
	22.44			
	23.01			
	22.89			

Peso específico Arena Blanca = 2.399 gr/cm<sup>3</sup>

Los dispositivos hidráulicos de flujo centrífugo, manejan diferentes granulometrías, donde se debe realizar los aforos correspondientes para cada una de ellas antes de realizar el correspondiente ensayo, con el fin de suministrar el caudal de sedimento necesario a la mezcla.

Se manejan diferentes tipos de sedimento como, arena blanca de río, arena café, arena amarilla y plomo, con estos materiales se determinan unos caudales de aforo para el ensayo de dispositivos hidráulicos de flujo centrífugo. Se estima la gravedad específica para los diferentes materiales, con el fin de obtener el caudal en dos unidades de medida en gr/s y en Cm<sup>3</sup>/s, dicho procedimiento permite realizar la dosificación de sedimento de dos maneras por peso o por volumen.

La disposición final de la mezcla será homogénea contenido sedimento y plomo en las fracciones requeridas según el ensayo, en la tabla 14, 15 y 16 se observa los datos obtenidos en la determinación del peso específico de la arena blanca, café y amarilla respectivamente.

Estos ensayos se realizan debido a que los dispositivos hidráulicos a ensayar son el hidrociclón, la espiral concentradora y el canal curvo, si se contara con un dispositivo diferente se realizarían los análisis correspondientes a las granulometrías manejadas por dicho dispositivo según las especificaciones técnicas del mismo.

Tabla Nº14. Valores peso específico arena blanca.

**Arena blanca**

Peso arena seca	Peso arena sumergida	Temperatura °C	Peso esp agua g/cm <sup>3</sup>	Vs (cm <sup>3</sup> )	Peso esp arena g/cm <sup>3</sup>
113.76	65.93	21.1	0.997	47.996	2.370183
112.66	64.82	20.7	0.997	47.999	2.347147
70.71	41.91	21	0.997	28.899	2.446800
47.45	28	21.1	0.997	19.518	2.431136
				Prom =	<b>2.398816</b>

Tabla Nº15. Valores peso específico arena café.

**Arena café**

Peso arena seca	Peso arena sumergida	Temperatura °C	Peso esp agua g/cm <sup>3</sup>	Vs (cm <sup>3</sup> )	Peso esp arena g/cm <sup>3</sup>
83.44	50.68	17.6	0.998	32.832	2.541388
76.94	46.7	18.4	0.998	30.315	2.538032
38.18	23.25	21.2	0.996	14.983	2.548304
153.15	91.79	17.9	0.998	61.502	2.490178
				Prom =	<b>2.5294753</b>

Tabla Nº16. Valores peso específico arena amarilla

**Arena amarilla**

Peso arena seca	Peso arena sumergida	Temperatura °C	Peso esp agua g/cm <sup>3</sup>	Vs (cm <sup>3</sup> )	Peso esp arena g/cm <sup>3</sup>
118.97	73.69	21	0.997	45.436	2.618431
106.79	66.2	18.6	0.997	40.693	2.624271
72.74	45.17	20.8	0.997	27.663	2.629548
46.62	28.98	20.8	0.997	17.699	2.634015
				Prom =	<b>2.626566</b>

Se determina el peso específico del plomo como se hace referencia en la tabla 17, debido a que este será el metal pesado a ensayarse en una mezcla aluvial tratada por los dispositivos hidráulicos de flujo centrifugo.

Tabla N°17. Valores peso específico plomo

**Plomo**

Peso arena seca	Peso arena sumergida	Temperatura °C	Peso esp agua g/cm <sup>3</sup>	Vs (cm <sup>3</sup> )	Peso esp arena g/cm <sup>3</sup>
99.88	91.07	17.8	0.998	8.830	11.311374
209.4	190.92	18.7	0.997	18.528	11.302041
130.8	119.25	18.6	0.997	11.579	11.295953
128.07	116.76	18.1	0.998	11.337	11.296788
				Prom =	<b>11.301539</b>

Para la determinación de caudal se toma como referencia un único orificio, si se gradúa el diámetro de este se puede variar el caudal de salida de la tolva, se busca un diámetro de orificio que entregue el caudal necesario en un tiempo adecuado garantizando una buena mezcla con el fluido, según las especificación del dispositivo ensayado en el banco de pruebas, en las tablas 18, 19 y 20 se referencia el caudal obtenido en los aforos realizados para las granulometrías de arena blanca, café y amarilla respectivamente.

Tabla N°18. Aforo caudal arena blanca

**Caudal arena blanca**

Aforo	tiempo (sg)	peso (gr)	Q (gr/seg)
1	10.72	5645	526.5858
2	10.82	5645	521.7190
3	10.75	5645	525.1163
		Qtotal =	524.4737

Tabla N°19. Aforo caudal arena café.

**Caudal arena café**

Aforo	tiempo (sg)	peso (gr)	Q (gr/seg)
1	12.52	6249	499.1214
2	12.45	6249	501.9277
3	12.51	6249	499.5204
		Qtotal =	500.1898

Tabla N°20. Aforo caudal arena amarilla.

<b>Caudal arena amarilla</b>			
Aforo	tiempo (sg)	peso (gr)	Q (gr/seg)
1	14.31	8169	570.8595
2	14.27	8169	572.4597
3	14.85	8169	550.1010
Q <sub>prom</sub> =			564.4734

Aforo de caudal en vertederos de salida. Los vertederos triangulares ubicados a la salida del tanque desarenador tienen un comportamiento similar debido a que tienen las mismas dimensiones y se encuentran en similares condiciones.

Para el aforo de los caudales de estos vertederos se toma como referencia La Norma NTC 3705 “**MEDICIÓN DE FLUJO DE AGUA EN CANAL ABIERTO CON VERTEDEROS DE PLACA FINA**”

#### **RESUMEN METODO DE ENSAYO**

Los vertederos de placa fina son estructuras para rebose de geometrías específicas, para las cuales el caudal es función única de una sola profundidad medida (cabeza) por encima de la cresta del vertedero o vértice; los factores restantes en la relación cabeza-descarga han sido determinados experimentalmente o analíticamente como funciones de la forma de la sección de rebose y la geometría del canal de llegada.

Importancia y uso: los vertederos de placa fina son dispositivos sencillos y confiables con potencial para mediciones de flujo muy exactas. Con la selección apropiada de la forma de la sección de rebose se puede cubrir un amplio intervalo de descargas; las recomendaciones encontradas en la norma técnica colombiana NTC 3705 se basan en experimentos con caudales de aproximadamente 0,00023 m<sup>3</sup>/s (0.008 pie<sup>3</sup>/s) hasta aproximadamente 1.4 m<sup>3</sup>/s (50 pies<sup>3</sup>/s).

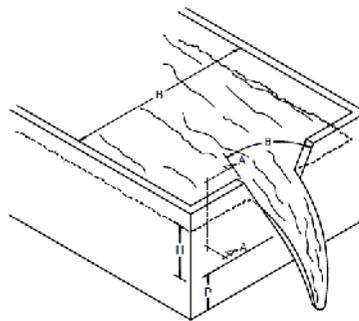
Los vertederos de placa fina son particularmente adecuados para uso en cruda, potable y residual sin cantidades significativas de sólidos y en posiciones en donde se puede afrontar una pérdida de cabeza.

Un sistema de medición para vertederos consta de la placa del vertedero, de su canal inmediato (primario) y de un dispositivo de medición (secundario) profundo (cabeza). El **dispositivo secundario puede ser una simple escala para hacer lecturas manuales**, hasta un instrumento que detecta continuamente la profundidad, la transforma en caudal y presenta o transmite una lectura o registro de caudal instantáneo o flujo totalizado, o ambos.

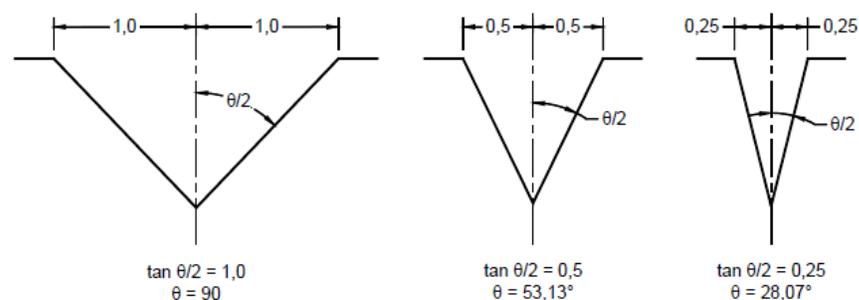
El vertedero proporciona una sección de rebosamiento meticulosamente formada y localizada simétricamente en una sección de llegada (usualmente) rectangular. Aunque se encuentra a disposición mucha información sobre variedad de formas de sección de rebose o de muesca (por ejemplo: rectangular, triangular, trapezoidal, circular), en la norma NTC 3705 solo las formas triangular y rectangular se considera que tienen una base de datos suficiente para su promulgación como norma.

En el caso especial del banco de pruebas para ensayar dispositivos hidráulicos de flujo centrifugo se escoge vertederos de placa fina de sección triangular, este tipo de rebose brinda buenas características otorgando facilidad en el ensayo, dando buenos resultados en aforos. Con una sección como la que se indica en la figura 62, las dimensiones recomendadas y los ángulos de apertura se muestran referenciados en la figura 63.

**Figura 62. Sección Vertedero triangular**



**Figura 63. Dimensiones recomendadas vertederos triangulares**



**Sección del borde de la muesca (A-A)**

El procedimiento consiste en tomar volúmenes en tiempos determinados, se realizaron varias lecturas para obtener un promedio y una media más exacta de los datos adquiridos, con estos se dispuso a realizar el cálculo de caudal para cada una de las alturas sobre los vertederos.

El tanque desarenador se divide en dos compartimentos de 0,5 y 0,25 m respectivamente, el tanque más ancho cuenta con 2 vertederos y el pequeño con uno, se determinaron diferentes caudales para diferentes alturas sobre la cámara de descarga de cada compartimento, encontrándose graficas de comparación y una ecuación la cual representa el comportamiento del vertedero en estudio. La figura 64 indica la disposición final de los vertederos ubicados a la salida del tanque de sedimentación.

**Figura 64. Disposición final vertederos triangulares**



En la figura 65 podemos apreciar el funcionamiento de un vertedero triangular, se dispuso de un vertedero de pared delgada con un acrílico de 3mm de espesor.

**Figura 65. Aforo vertederos triangulares**



El caudal total será la suma de los caudales que pasan a través de cada vertedero, este total se usa para la determinación de la mezcla en la cámara final en donde se introduce el sedimento y de donde la bomba succiona el fluido en estudio. A continuación se muestra las tablas de datos y las graficas correspondientes al aforo mencionado anteriormente. En la tabla N° 21 encontramos referenciados los datos obtenidos en el aforo realizado en los vertederos de salida del tanque desarenador de 0.5m de ancho, aquí se marca

una regla numérica sobre la cara lateral del compartimento en donde se identifica la altura del nivel de agua sobre el vertedero en donde se obtendrá un caudal correspondiente en el instante de la medición, con el propósito de generar una curva grafica donde se identifique el comportamiento del caudal que pasa a través del vertedero.

Tabla Nº21. Aforo Vertederos Tanque de 0,5 m.

<b>CARGA (m)</b>	<b>Vol (lts)</b>	<b>T (s)</b>	<b>Q (Lts/s)</b>	<b>Q prom</b>
<b>0,075</b>	1,42	1,21	1,17355372	<b>1,15899893</b>
	1,76	1,53	1,1503268	
	1,5	1,29	1,1627907	
	1,58	1,37	1,15328467	
	1,49	1,29	1,15503876	
<b>0,07</b>	1,85	1,92	0,96354167	<b>0,96550377</b>
	1,14	1,36	0,83823529	
	1,19	1,38	0,86231884	
	1,47	1,35	1,08888889	
	1,73	1,61	1,07453416	
<b>0,065</b>	0,89	1,05	0,84761905	<b>0,85163612</b>
	1,1	1,29	0,85271318	
	1,16	1,34	0,86567164	
	1,47	1,73	0,84971098	
	1,23	1,46	0,84246575	
<b>0,06</b>	1,37	1,91	0,71727749	<b>0,73792162</b>
	1,33	1,72	0,77325581	
	1,47	2	0,735	
	1,46	2,05	0,71219512	
	2	2,66	0,7518797	
<b>0,055</b>	0,95	1,56	0,60897436	<b>0,61718908</b>
	0,92	1,49	0,61744966	
	0,86	1,39	0,61870504	
	0,9	1,47	0,6122449	
	1,1	1,75	0,62857143	

Continuación Tabla N°21

<b>0,05</b>	1,23	2,48	0,49596774	<b>0,49569803</b>
	1,062	2,11	0,50331754	
	1,26	2,54	0,49606299	
	1,35	2,73	0,49450549	
	1,29	2,64	0,48863636	
<b>0,045</b>	0,67	1,79	0,37430168	<b>0,37053809</b>
	0,77	2,09	0,36842105	
	0,69	1,82	0,37912088	
	0,8	2,12	0,37735849	
	0,76	2,15	0,35348837	
<b>0,04</b>	1,34	5,25	0,2552381	<b>0,24443563</b>
	0,54	2,2	0,24545455	
	0,67	2,88	0,23263889	
	0,75	3,28	0,22865854	
	0,83	3,19	0,26018809	
<b>0,035</b>	0,59	3,17	0,18611987	<b>0,18803777</b>
	0,45	2,39	0,18828452	
	0,47	2,49	0,18875502	
	0,73	3,89	0,18766067	
	0,57	3,01	0,18936877	
<b>0,03</b>	0,61	4,64	0,13146552	<b>0,13225599</b>
	0,81	6,51	0,12442396	
	0,58	4,46	0,13004484	
	0,73	5,29	0,13799622	
	0,57	4,15	0,1373494	

En la tabla N° 22, se hace un resumen de los datos encontrados en donde se realiza un promedio de los valores encontrados en el aforo, con el fin de tener un dato promedio de caudal para una determinada altura sobre la cresta del vertedero.

Tabla N°22. Valores de Altura y Caudal para el Tanque de 0,5 m.

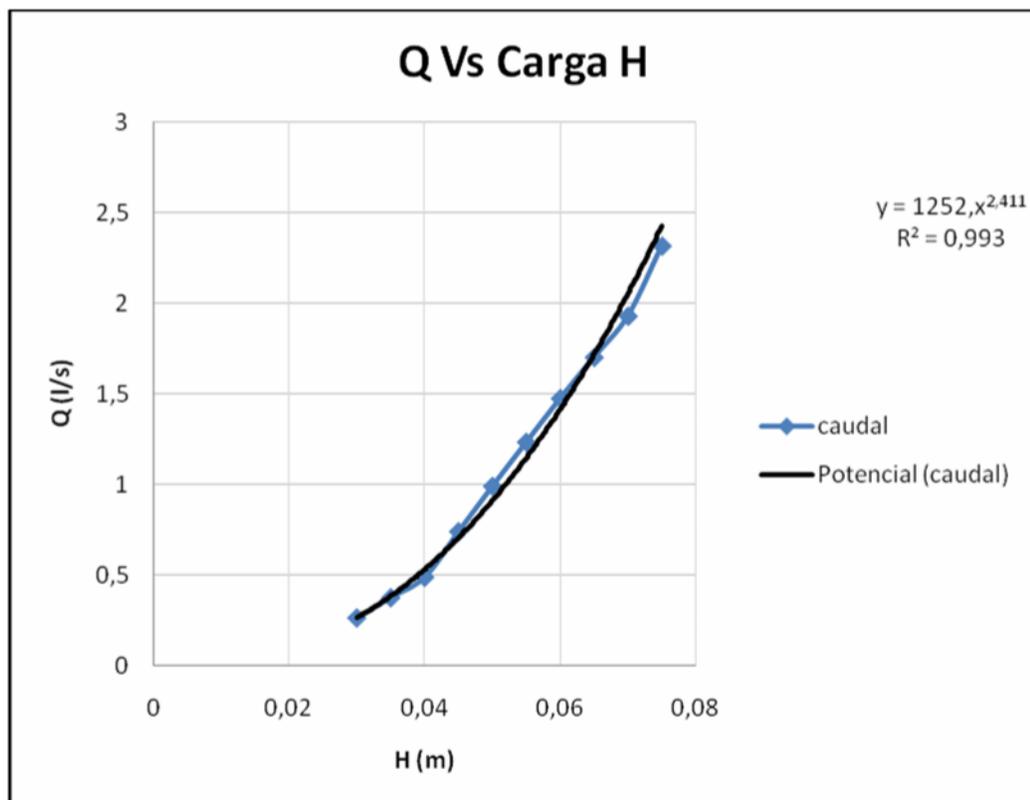
H (m)	Q (l/s)
0,075	2,31799786
0,07	1,93100754
0,065	1,70327224
0,06	1,47584325
0,055	1,23437815

Continuación Tabla N°22

0,05	0,99139605
0,045	0,74107619
0,04	0,48887126
0,035	0,37607554
0,03	0,26451198

Con los datos obtenidos en el aforo de caudales se grafica el caudal vs la altura sobre el vertedero como se indica en la figura 66.

Figura 66. Gráfica Caudal Vs. Altura para el Tanque de 0,5 m



Se realiza una regresión potencial a la curva de la grafica obtenida con el propósito de establecer una ecuación más exacta del comportamiento del caudal del vertedero a diferentes alturas de carga.

### Ecuación de la Gráfica de la Figura 53 (Regresión Potencial)

$$Y = 1252,4X^{2,4113}$$

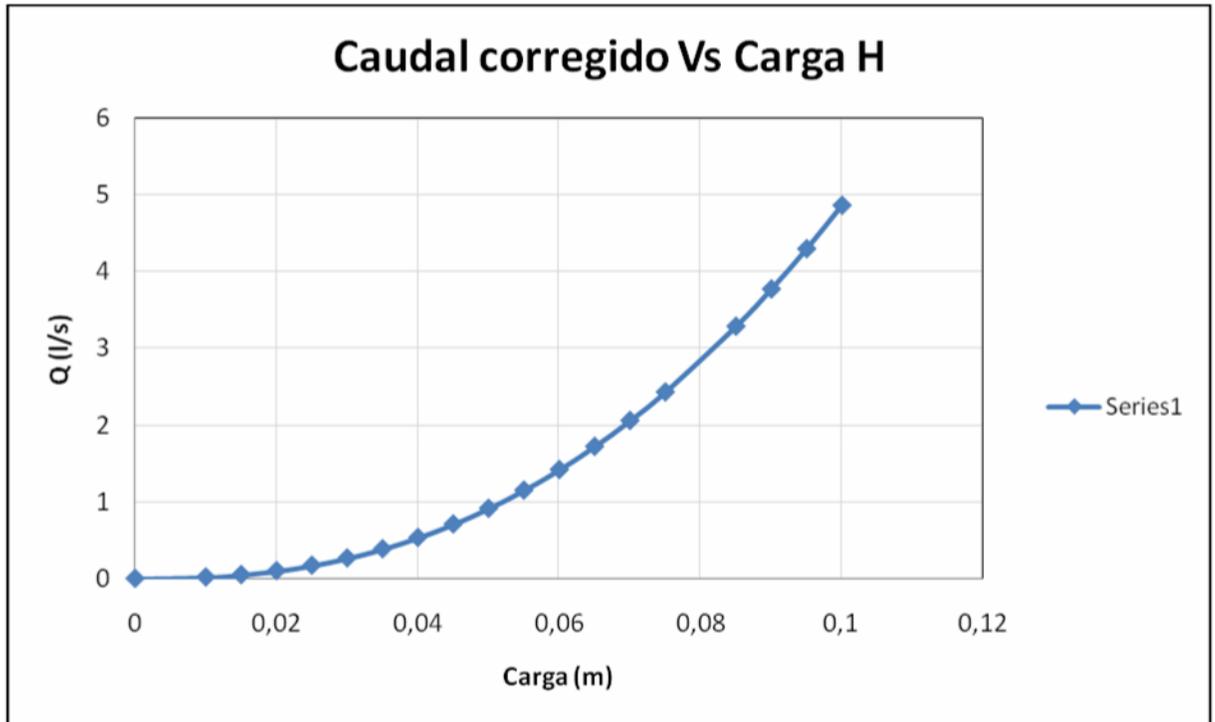
Realizada la corrección se utilizara la ecuación del comportamiento de la curva con el fin realizar una grafica ajustada con valores calculados en base a ella como se pueden apreciar en la tabla N° 23.

Tabla N°23. Valores de Altura y Caudal corregidos para el Tanque de 0,5 m.

H (m)	Q (l/s)
0	0
0,01	0,0188427
0,015	0,0500901
0,02	0,10023438
0,025	0,17167055
0,03	0,26645602
0,035	0,38641532
0,04	0,53320022
0,045	0,70832797
0,05	0,91320742
0,055	1,14915765
0,06	1,417422
0,065	1,71917876
0,07	2,05554961
0,075	2,42760645
0,085	3,28284906
0,09	3,76797508
0,095	4,29267479
0,1	4,85783835

En la figura 67 se tiene la curva característica del vertedero con la información correspondiente a un caudal producido en una determinada altura de carga, valores que ya se encuentran ajustados.

Figura 67. Gráfica Caudal corregido Vs. Altura para el Tanque de 0,5 m



Fuente: Esta investigación.

Para la determinación del caudal producido a diferentes alturas de carga sobre el vertedero del tanque de 0.25m se realiza un proceso similar al efectuado para el tanque de 0.5, en la tabla N° 24 se referencias los datos obtenidos en el aforo del vertedero ubicado a la salida del tanque de 0.25m

Tabla N°24. Aforo Vertederos Tanque de 0,25 m.

<b>CARGA (m)</b>	<b>Vol (lt)</b>	<b>T (s)</b>	<b>Q (Lts/s)</b>	<b>Q prom</b>
<b>0,075</b>	1,26	1,18	1,06779661	<b>1,17854999</b>
	1,33	1,07	1,24299065	
	1,36	1,08	1,25925926	
	1,95	1,67	1,16766467	
	1,49	1,29	1,15503876	
<b>0,07</b>	0,89	0,94	0,94680851	<b>0,9866833</b>
	1,12	1,1	1,01818182	
	1,11	1,23	0,90243902	
	1,16	1,17	0,99145299	
	1,73	1,61	1,07453416	

Continuación Tabla N°24

<b>0,065</b>	1,07 0,77 0,84 1,05 1,23	1,2 0,92 0,99 1,32 1,52	0,89166667 0,83695652 0,84848485 0,79545455 0,80921053	<b>0,83635462</b>
<b>0,06</b>	0,7 0,82 0,83 0,74 0,89	1,1 1,12 1,04 0,95 1,25	0,63636364 0,73214286 0,79807692 0,77894737 0,712	<b>0,73150616</b>
<b>0,055</b>	0,73 0,93 0,79 0,94 0,9	1,48 1,39 1,19 1,52 1,32	0,49324324 0,66906475 0,66386555 0,61842105 0,68181818	<b>0,62528255</b>
<b>0,05</b>	0,51 0,67 0,7 0,59 0,79	1,12 1,39 1,48 1,13 1,67	0,45535714 0,48201439 0,47297297 0,52212389 0,47305389	<b>0,48110446</b>
<b>0,045</b>	0,46 0,55 0,44 0,5 0,65	1,25 1,49 1,06 1,42 1,71	0,368 0,36912752 0,41509434 0,35211268 0,38011696	<b>0,3768903</b>
<b>0,04</b>	0,37 0,39 0,38 0,33 0,44	1,48 1,66 1,77 1,54 1,71	0,25 0,23493976 0,21468927 0,21428571 0,25730994	<b>0,23424494</b>
<b>0,035</b>	0,37 0,39 0,38 0,33 0,52	1,93 1,91 2,01 1,98 2,96	0,19170984 0,20418848 0,18905473 0,16666667 0,17567568	<b>0,18545908</b>

Continuación Tabla N°24

<b>0,03</b>	0,37 0,39 0,38 0,33 0,44	2,55 2,54 2,86 2,12 2,55	0,14509804 0,15354331 0,13286713 0,15566038 0,17254902	<b>0,15194358</b>
<b>0,025</b>	0,22 0,24 0,3 0,28 0,32	2,46 2,76 3,34 2,45 3,44	0,08943089 0,08695652 0,08982036 0,11428571 0,09302326	<b>0,09470335</b>
<b>0,024</b>	0,17 0,43 0,46	1,88 5,03 5,37	0,09042553 0,08548708 0,08566108	<b>0,08719123</b>
<b>0,019</b>	0,156 0,154 0,114	3,2 3,27 2,4	0,04875 0,0470948 0,0475	<b>0,0477816</b>
<b>0,015</b>	0,114 0,106 0,168	4,11 3,99 6,63	0,02773723 0,02656642 0,02533937	<b>0,02654767</b>
<b>0,012</b>	0,078 0,064 0,15	4,62 3,82 8,39	0,01688312 0,01675393 0,01787843	<b>0,01717182</b>
<b>0,01</b>	0,04 0,054 0,07	4,19 5,48 8,33	0,00954654 0,00985401 0,00840336	<b>0,00926797</b>
<b>0,0075</b>	0,118 0,098 0,092	30,02 25,06 24,82	0,00393071 0,00391061 0,00370669	<b>0,00384934</b>

La tabla N° 25 referencia los datos resumen con un promedio de los aforos realizados en la tabla N° 24.

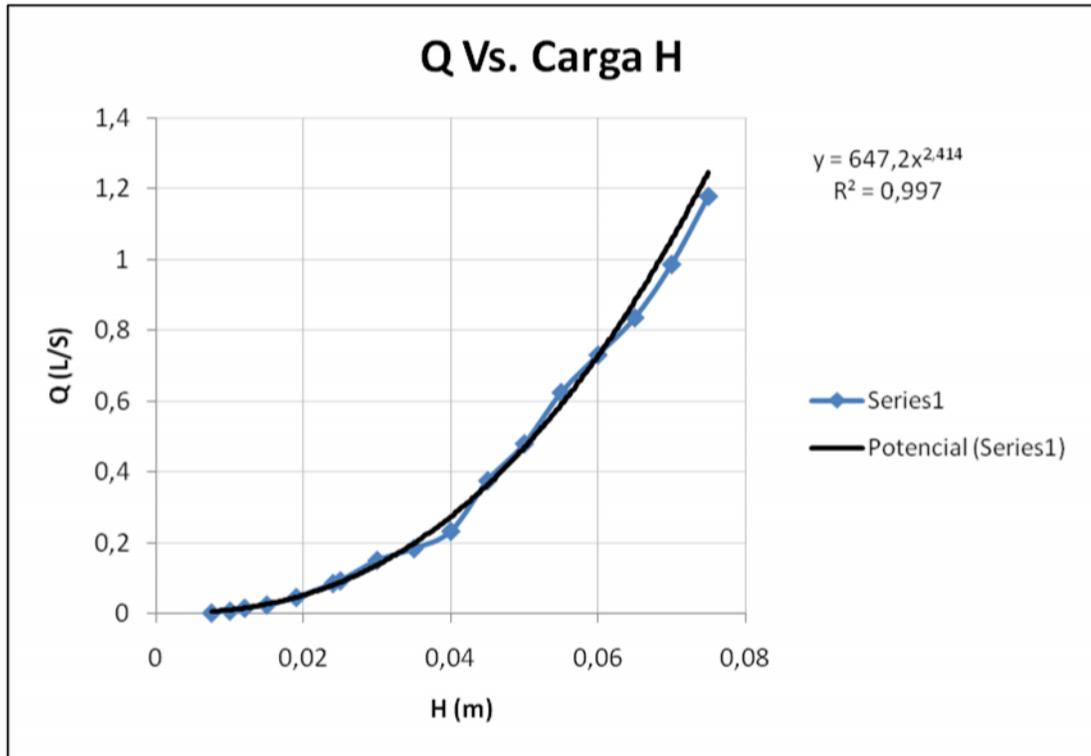
Tabla N°25. Valores de Altura y Caudal para el Tanque de 0,25 m.

H (m)	Q (L/s)
0,075	1,17854999
0,07	0,9866833
0,065	0,83635462
0,06	0,73150616
0,055	0,62528255
0,05	0,48110446
0,045	0,3768903
0,04	0,23424494
0,035	0,18545908
0,03	0,15194358
0,025	0,09470335
0,024	0,08719123
0,019	0,0477816
0,015	0,02654767
0,012	0,01717182
0,01	0,00926797
0,0075	0,00384934

En la figura 68 se referencia la curva de comportamiento del vertedero a la salida del tanque sedimentador de 0.25m, con la variación de caudal para diferentes alturas de carga.

Al igual que para el tanque de 0.5 m se determina la ecuación de la curva donde se realiza una regresión potencial con el propósito de establecer una ecuación ajustada al comportamiento del vertedero.

Figura 68. Gráfica Caudal Vs. Altura para el Tanque de 0,25 m.



**Ecuación de la Gráfica de la Figura 55 (Regresión Potencial)**

$$Y = 647,29X^{2,4143}$$

En la tabla 26 se referencian los datos calculados en base a la ecuación obtenida en la regresión potencial de la curva aforo, con estos valores se graficará la curva característica del comportamiento del vertedero.

Tabla N°26. Valores de Altura y Caudal corregidos para el Tanque de 0,25 m.

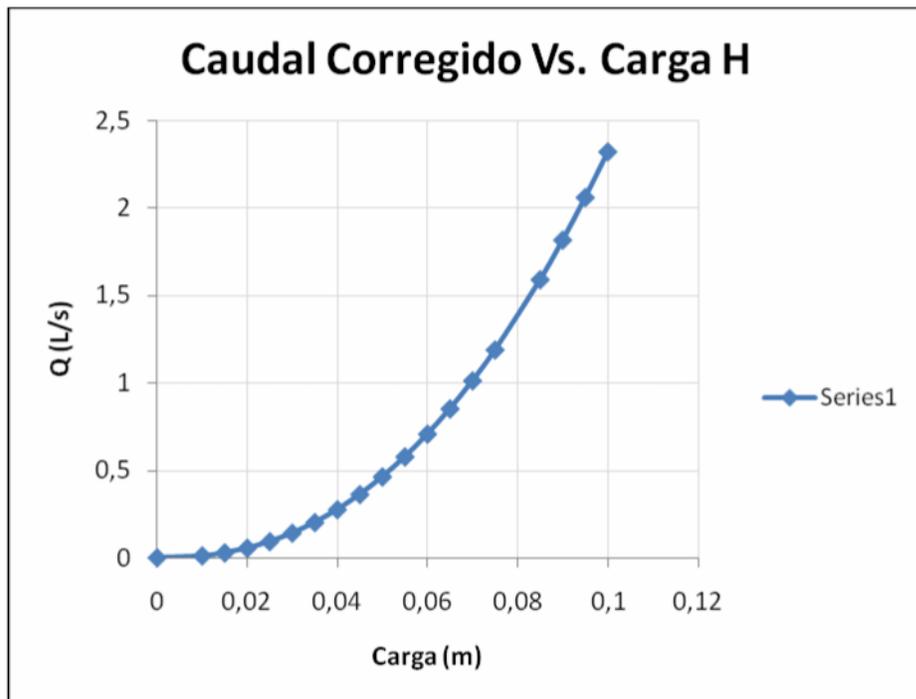
H (m)	Q (l/s)
0	0
0,01	0,00960503
0,015	0,02556442
0,02	0,05120067
0,025	0,08774966
0,03	0,13627392
0,035	0,19771626

Continuación Tabla N°26

0,04	0,27293067
0,045	0,36270193
0,05	0,46775903
0,055	0,58878473
0,06	0,72642279
0,065	0,88128345
0,07	1,05394779
0,075	1,2449712
0,085	1,68420522
0,09	1,9334217
0,095	2,20301269
0,1	2,49343986

La figura 69 permite apreciar el comportamiento del vertedero ubicado a la salida del tanque sedimentador del compartimento de 0.25m, la grafica suministra el dato del caudal suministrado a una determinada altura de carga, la cual se obtiene de una escala numérica ubicada en la cara lateral del compartimento de salida del tanque desarenador.

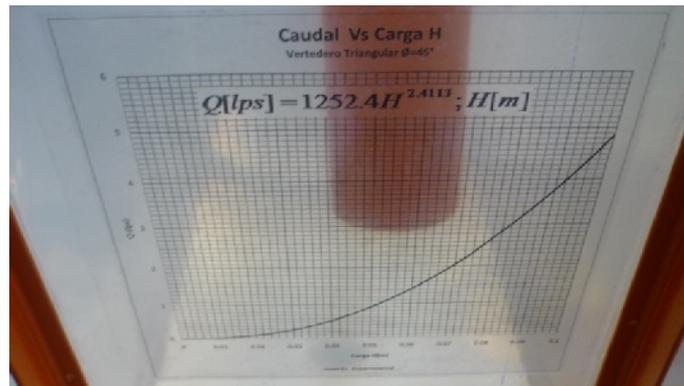
Figura 69. Gráfica Caudal corregido Vs. Altura para el Tanque de 0,25 m.



Con las graficas establecidas, y con los ensayos determinados en la presente investigación se representa gráficamente sobre el banco de pruebas, una escala numérica con los resultados obtenidos en calibración, donde se plasma la curva característica de los vertederos con el fin de determinar el caudal de aforo para un ensayo.

En la figura 70 se observa la grafica característica para un determinado vertedero, la cual se encuentra junto al banco de pruebas para facilitar los cálculos necesarios en un ensayo.

Figura 70. Camara de salida tanque sedimentador



## 1.22 GUIA DE LABORATORIO

### Metodología

El banco de pruebas para ensayar dispositivos hidráulicos de flujo centrífugo se dispuso con el fin de evaluar dispositivos tales como el hidrociclón, la espiral concentradora y el tubo curvo a presión. Para la evaluación de uno de ellos se propone el siguiente procedimiento.

**Paso 1:** Escogido el dispositivo a ensayar, se debe determinar las características del mismo para realizar una prueba, puesto que cada uno de ellos cuenta con diferentes ampliaciones y dimensiones determinadas según el tipo de mezcla a tratar. Se debe revisar previo al ensayo que todos los componentes del banco de pruebas este en buenas condiciones de nivelación, soporte, conexiones eléctricas, aislamiento, etc. Se recomienda hacer una prueba previa de todo el sistema haciendo circular un fluido, con el fin de corroborar que no existan fugas o desperfectos. Se revisara las conexiones entre tolvas de almacenaje, tolva mezcla, tanque desarenador, tanque de almacenamiento de agua y bomba de impulsión con el fin de observar y asegurar su buen funcionamiento.

**Paso 2:** Se asegura el dispositivo a la estructura de soporte, ayudados con los mecanismos de acople, como abrazaderas plásticas, bandeja de soporte, gancho

de seguridad; en la disposición final del dispositivo se tendrá en cuenta sus necesidades de nivelación y fijación, con el fin de no generar perdidas y errores. Como manera de seguridad adicional se debe garantizar que la estructura no sufra movimiento durante el ensayo, buscando optimizar los resultados. El dispositivo cuenta con dos salidas de mezcla estas se conducen mediante tubería hacia los dos compartimentos del tanque desarenador, se escogerá el tanque de mayor sección para tratar la salida con mayor caudal generado por el dispositivo.

**Paso 3:** Con las características establecidas para cada dispositivo se debe conocer, granulometría a tratar, caudal de agregado, caudal líquido, caudal de mezcla entrada al dispositivo, Cabeza de presión necesaria para ensayo.

**Paso 4:** Con la información referenciada se procede a la calibración del banco de pruebas para el ensayo, se debe graduar la salida de la tolva de almacenaje de sedimento otorgando el caudal necesario de una manera proporcional, los dispositivos de salida de agregados tiene un rango amplio de trabajo facilitando el acople a diferentes caudales.

**Paso 5:** A la salida de la bomba de impulsión se necesita manipular la válvula de compuerta aquí ubicada, con el fin de suministrar al sistema el caudal necesario para un determinado ensayo, se toma lectura del manómetro tipo bourdon donde encontramos una presión de trabajo, con los valores ya calibrados se determina el caudal a suministrar.

**Paso 6:** A la salida de la tolva de mezcla encontramos una válvula de compuerta, debe ser accionada con el fin de graduar el caudal de entrada al dispositivo ensayado, aquí se cuenta con un piezómetro que nos permite calibrar el caudal hasta alcanzar los requerimientos del dispositivo en su ensayo.

**Paso 7:** Durante el ensayo se observa la acumulación de la mezcla dentro del tanque desarenador, el proceso de sedimentación requiere de un tiempo de retención de la mezcla dependiendo de las características de los agregados, una vez el agua es sedimentada empieza a recircular, la zona de lodos del tanque desarenador dispone de una serie de tolvas de recolección con llave de extracción manual, las cuales deben ser accionadas con el propósito de recolectar el material sedimentado en el ensayo.

Siendo este el principal objetivo del sistema, se debe aislar la mezcla llevándola a secar a horno en un periodo de 12 a 24 horas con el fin realizar los cálculos correspondientes en la eficiencia del dispositivo hidráulico de flujo centrífugo ensayado.

## CONCLUSIONES

El banco de pruebas para ensayar dispositivos hidráulicos de flujo centrífugo, es un sistema analizado y desarrollado en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Nariño. Se concluyó en su buen funcionamiento y adecuación, se considera un aporte valioso para el laboratorio de hidráulica debido a su uso con fines didácticos e investigativos, la base de datos obtenida en la elaboración de este proyecto sirve como un medio de consulta de información a posibles trabajos con dispositivos hidráulicos de flujo centrífugo en lo que se refiere a la sedimentación de plomo y metales pesados. El procedimiento explicativo del diseño, construcción y calibración de dispositivos como éste es considerado de gran beneficio a la ciudadanía y a la comunidad universitaria debido a su gran aporte investigativo en aras de buscar el progreso y sostenibilidad de comunidades marginadas y aisladas que se verían beneficiadas con la posibilidad de explotar los recursos naturales con los que cuentan con la aplicación de proyectos como éste.

Después de un análisis minucioso se logró adaptar y proponer un mecanismo de cálculo para el diseño de un banco de pruebas para ensayar dispositivos hidráulicos de flujo centrífugo, se concluye con un procedimiento adecuado a seguir en el diseño, como se explica paso a paso en el capítulo referencia, con una información de entrada como caudal de diseño, dimensiones de tanque, características materiales sedimentables, etc. Se observó que el modelo de diseño está en la capacidad de someterse a varias modificaciones mostrando buenos resultados, sea en dimensiones, posibles ampliaciones, formas y figuras, del banco de pruebas, considerando la evaluación de diferentes dispositivos hidráulicos de flujo centrífugo además de el hidrociclón, la espiral concentradora y el canal curvo.

En el capítulo de construcción se consigue identificar y proponer los materiales y el procedimiento adecuado en la elaboración y construcción de un banco de pruebas para ensayar dispositivos hidráulicos de flujo centrífugo. Aquí se demuestra la flexibilidad de materiales en nuestra región así como el uso e implemento de mano de obra calificada, encontrando buenos resultados, en cuanto a calidad y rendimiento se refiere, considerándose recomendable la utilización de los mismos. Se resalta en manejo y mantenimiento a los materiales de construcción, destacando, limpieza, manipulación y adecuación.

Después de realizada la calibración de los aparatos y del banco de pruebas para ensayar los dispositivos descritos, se concluye con un procedimiento a seguir para la obtención de buenos resultados en los aparatos de laboratorio, se observó similitudes en el funcionamiento y se recomienda hacer uso de las normas

técnicas en la obtención de datos, así como la buena manipulación de la indumentaria de laboratorio manejo de accesorios y dispositivos, en la actualidad el sistema cuenta con unas curvas características con las cuales se pueden determinar los rangos de trabajo correspondientes.

## RECOMENDACIONES

Evaluar un dispositivo hidráulico considerando las condiciones máximas de trabajo, con el fin de no sobrecargar el banco de pruebas causando averías y desperfectos. Como los usos más comunes que el banco de pruebas tiene, se recomienda hacer uso de este en las aplicaciones nombradas a continuación:

Acoplar algunos dispositivos diferentes a los mencionados, aquí se debe resaltar la complejidad de ejecución de un ensayo dependiendo de las características específicas en una evaluación, donde encontramos granulometrías, densidad de mezcla, velocidad del ensayo, caudales necesarios, presiones de trabajo, cabeza disponible.

Dar uso del banco de pruebas en estudio y análisis de la teoría de sedimentación, ya que se cuenta con un tanque desarenador de placas inclinadas, se podrán realizar pruebas para evaluar parámetros como buen funcionamiento, eficiencia de remoción, velocidad de sedimentación, porcentaje de partículas sedimentadas, carga superficial de trabajo, funcionamiento de componentes del sistema zonas de entrada, sedimentación, lodos, salida. EL tanque desarenador ofrece una zona de sedimentación modificable, siendo extraíbles las placas inclinadas se podrá evaluar el funcionamiento del tanque como convencional y de alta tasa, logrando así estimar las principales diferencias en su funcionamiento y determinando las ventajas y desventajas de cada sistema.

Ensayar dispositivos hidráulicos de flujo centrifugo se tiene su disposición como mecanismo didáctico en la cátedra para estudiantes de pregrado, teniéndose como temáticas la teoría de sedimentación, el funcionamiento de bombas de impulsión, aforo y funcionamiento de vertederos, evaluación de dispositivos hidráulicos, manómetros, piezómetros, perdidas por aditamentos y accesorios. Dispuesto el banco de pruebas para la cátedra estudiantil, se genera un medio de aprendizaje practico, donde se establece un determinado número de pruebas evaluativas con una guía de laboratorio, permitiendo la aprobación en la parte practica de los logros del pensum académico de las asignaturas en donde se trabaja temáticas referentes al área hidráulica.

## BIBLIOGRAFÍA

BOUSO, Juan Luis. Hitos históricos en el desarrollo de la clasificación. IX simposium sobre procesamiento de minerales Moly- Cop 2001. Puyehue, Chile

CHENG, N.-S. (1997a) "Simplified settling velocity formula for sediment particle". Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 123. No 2. February. 1997a. ASCE. Tech. note No. 10734.

----- (1997b) "Effect of concentration on settling velocity of sediment particles". Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 123. No 8. August. 1997b. ASCE. Technical note No. 11124.

GÓMEZ, Z- H.J. "Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión: Estudio de la Velocidad Crítica de Depositación" Tesis de Grado para optar al título de Magister en Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Bogotá, Julio, 2002.

MINISTERIO DE DESARROLLO ECONOMICO. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico, RAS-2000. Bogotá, 2001

SALAZAR CANO, Roberto. Plantas de Potabilización. Universidad de Nariño, Facultad de Ingeniería, Trabajo promoción para asenso a la categoría de Profesor titular. San Juan de Pasto, 1998.

\_\_\_\_\_. "Acueductos" Universidad de Nariño, Facultad de Ingeniería, programa de Ingeniería Civil. San Juan de Pasto 2007

RODRÍGUEZ Díaz Héctor Alfonso. "Diseños Hidráulicos, Sanitarios y de Gas en Edificaciones." . Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, Colombia 2005.

TRAWINSKI, Helmut. Aplicaciones y funcionamiento práctico de los hidrociclones. Adaptación: Juan Luis Bouso Aragonés, Director General de ERAL, Equipos y Procesos, S.A. [En línea]. [www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/ApliyFun\\_Prac\\_Hidrociclones.pdf](http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Bouso-M3/ApliyFun_Prac_Hidrociclones.pdf) -

UPME. (2007) Unidad de Planeación Minero Energética. "Producción más limpia en la minería del oro en Colombia". Ministerio de Minas y Energía. Subdirección de YANG, Ted Chih. "Sediment Transport: Theory and Practice". McGraw.Hill. Series in Water Resources and Environmental Engineering. New York. 1996. Pg 1.18.

## **ANEXOS**

### Anexo A. Cronograma de las actividades

DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES	MESES					
	1	2	3	4	5	6
Revisión y análisis del Estado del Arte e Identificación.						
Diseño definitivo de los montajes de laboratorio						
Construcción de los montajes de laboratorio						
Calibración del banco de pruebas						
Elaboración del informe de la investigación						

### Anexo B. Cantidades de obra para la elaboración del proyecto.

#### SUCCION

Materiales	Características	UND	Cantidad
Tubería	succión pvc 2 "	ml	1
Codo 90	PVC 2 "	und	1
Bomba	Centrifuga de rotor Abierto Autocebante	und	1
Soporte Bomba	Perfil Angulo acero	ml	5

#### IMPULSION

Materiales	Características	UND	Cantidad
Tubería	PVC 2"	ml	6
Codo 90	PVC 2 "	und	3

#### CAMARA DE SEDIMENTACION

Materiales	Características	UND	Cantidad
Acrilico	Lamina acrilico espesor 5 mm	m2	5.26
Acrilico division interna	Lamina acrilico espesor 3 mm	m2	4
Placas Inclinadas	Lamina	und	4
Tubo Soporte	acero galvanizado 2 1/2"	ml	5
Mesa soporte	Perfil Angulo acero 1 1/2"	ml	6
Sop. laterales	tee acero 1 X 1/8"	ml	12

Tolvas	Recoleccion de lodos Acrilico 0,25x0,25 m	un	20
Valvula bola 1"	Salida para lodos	und	20
Parilla Tolvas	Soporte en perfil acero	ml	11

### **TOLVAS DE MEZCLADO**

Materiales	Caracteristicas	UND	Cantidad
Tolva	Acrilico 0,4x0,4	und	2
Valvulas salida	valvula salida 2"	und	2
Tuberia coneccion	PVC 2" 1 m	ml	3
soporte tolva	tubo acero galvanizado 2 1/2"	ml	7
	Lamina contorno No 12	m2	2
	Sujetador Tubo Acero	und	4
Soporte Disposit.	Tubo acero 2 1/2" soporte disp. hidraulico de flujo centrifugo	ml	5
	Sujetador Tubo Acero	und	2
	Sujetador dispositivo lamina de acero	und	1
Parilla de soporte general	Perfil angulo acero	ml	12

Anexo C. VISTA 3 DIMENSIONES BANCO DE PRUEBAS ETAPA FINAL

