

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS
PARA VERIFICACIÓN DEL MOMENTO DE MOMENTUM PERTENECIENTE AL
LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUÍDOS**

**GLORIA SUSANA CÓRDOBA PANTOJA
YOLMAN YASMANY YELA VELASQUEZ**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2013**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS
PARA VERIFICACIÓN DEL MOMENTO DE MOMENTUM PERTENECIENTE AL
LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUÍDOS**

**GLORIA SUSANA CÓRDOBA PANTOJA
YOLMAN YASMANY YELA VELASQUEZ**

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

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

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2013**

NOTA DE RESPONSABILIDAD

“Las ideas y conclusiones aportadas en la tesis de grado son responsabilidad exclusiva de sus autoras”

“Artículo 1. Del acuerdo 324 de 11 de octubre de 1966 Emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño”.

Nota de aceptación:

Presidente:

Jurado A.

Jurado B.

San Juan de Pasto, Abril de 2013

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. CONCEPTOS TEÓRICOS Y DISEÑO DEL EQUIPO DE LABORATORIO	15
1.1 DEFINICIONES.....	15
1.2 ESTADO DEL ARTE	18
1.2.1 Antecedentes..	18
1.2.2 Marco teórico.	18
1.3 DISEÑO HIDRÁULICO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA.....	23
1.3.1 Diseño hidráulico de la tolva de cabeza constante..	23
1.3.2 Diseño del tubo principal.	24
1.3.3 Diseño hidráulico del banco de pruebas..	25
1.3.4 Diseño hidráulico del tubo del aspersor.	29
1.3.5 Diseño hidráulico del vertedero triangular y tanque de succión.	31
1.3.6 Diseño de la cabeza giratoria.....	33
1.4 METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE ASPERSOR.	36
1.4.1 Datos de entrada.....	36
2. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE LABORATORIO	40
2.1 DESCRIPCIÓN PARA LA CONTRUCCÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA	40
2.1.1 Generalidades.....	40
2.2 CONSTRUCCIÓN DE LA TOLVA DE CABEZA CONSTANTE.....	41
2.3 CONSTRUCCIÓN DE LA CABEZA GIRATORIA.....	42
2.4 CONSTRUCCIÓN DEL TANQUE RECOLECTOR DE AGUA	43
2.5 CONSTRUCCIÓN DEL TANQUE DE SUCCIÓN.....	44
2.6 MONTAJE FINALIZADO	45
2.7 COMENTARIOS DE CAPÍTULO.....	46
2.7.1 Dificultades en la construcción:.....	46
2.7.2 Recomendaciones:.....	47

3.	CALIBRACIÓN DEL MONTAJE DE LABORATORIO	48
3.1	MEDICIÓN, PROCESAMIENTO DE DATOS Y RESULTADOS	48
3.1.1	Procedimiento para la toma de los valores experimentales.	49
3.1.2	Metodología para el procesamiento de los datos obtenidos en el laboratorio	49
3.2	CALIBRACIÓN DEL AFORADOR TRIANGULAR.....	50
3.3	CALIBRACIÓN DE LOS BRAZOS GIRATORIOS.....	53
3.3.1	Modelo N° 1	53
3.3.2	Modelo N° 2	56
3.3.3	Modelo N° 3:	59
3.4	COMPARACIONES	61
3.5	CÁLCULO DE ERRORES.....	62
3.5.1	Modelo N° 1:	62
3.5.2	Modelo N° 2:	63
3.5.3	Modelo N° 3:	64
4.	CONCLUSIONES.....	66
5.	RECOMENDACIONES	67
	BIBLIOGRAFÍA.....	68
	NETGRAFIA	69
	ANEXOS.....	70

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Modelo general de un distribuidor de agua rotatorio	19
Figura 2. Tubo con Perforaciones	20
Figura 3. Vista en planta de la tolva de cabeza constante y el vertedero de excesos.....	24
Figura 4. Modelo básico de la instalación principal.....	25
Figura 5. Diagrama de las líneas de energía en el modelo básico del aspersor, entre el punto p_o y p_f	26
Figura 6. Líneas de presión en un brazo distribuidor de agua	29
Figura 7. Vista en planta y frontal del vertedero triangular.....	32
Figura 8. Vista en planta del tanque recolector de agua.....	33
Figura 9. Cabeza giratoria junto con la forma de cambiar los modelos de brazos.	34
Figura 10. Vista en plata del aspersor.	35
Figura 11. Imagen de la tolva de cabeza constante.....	41
Figura 12. Imagen interna de la tolva de cabeza constante.....	42
Figura 13. Imagen de la cabeza giratoria.....	43
Figura 14. Imagen del tanque recolector de agua.....	44
Figura 15. Imagen del tanque recolector y aforador de caudal	45
Figura 16. Imagen del montaje de laboratorio finalizado	46
Figura 17. Valores experimentales de caudal vs Carga (H).....	51
Figura 18. Representación gráfica de los valores teóricos de caudal vs Carga (H)	52
Figura 19. Contiene valores experimentales de rpm vs carga (cm)	54
Figura 20. Contiene valores experimentales de rpm vs caudal (L/s)	55
Figura 21. Contiene valores experimentales de rpm vs carga (cm)	57
Figura 22. Contiene valores experimentales de rpm vs caudal (L/s)	58
Figura 23. Contiene valores experimentales de rpm vs carga (cm)	60
Figura 24. Contiene valores experimentales de rpm vs caudal (L/s)	61

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Datos para el diseño del vertedero	32
Tabla 2. Datos experimentales obtenidos en el laboratorio	50
Tabla 3. Valores teóricos de Caudal vs Carga.....	52
Tabla 4. Datos experimentales obtenidos en el laboratorio	53
Tabla 5. Datos experimentales obtenidos en el laboratorio	56
Tabla 6. Datos experimentales obtenidos en el laboratorio	59
Tabla 7. Valores experimentales tomados según anexo D modelo 1	63
Tabla 8. Valores experimentales tomados según anexo D modelo 2	64
Tabla 9. Valores experimentales tomados según anexo D modelo 3	65

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A: SOLUCIÓN HIDRÁULICA PARA EL MODELO N° 1	71
ANEXO B: SOLUCIÓN HIDRÁULICA PARA EL MODELO N° 2	72
ANEXO C: SOLUCIÓN HIDRÁULICA PARA EL MODELO N° 3.....	73
ANEXO D: GUÍA DE LABORATORIOS.....	74
ANEXO E: PLANOS DETALLADOS DEL MONTAJE DE LABORATORIO	75

LISTA DE SÍMBOLOS

At:	Área del tubo [m ²]
A _o :	Área del orificio [m ²]
Cd:	Coeficiente de descarga [adimensional]
D _t :	Diámetro del tubo principal [m]
Do:	Diámetro interno del tubo [m]
D:	Diámetro del orificio [m]
ρ:	Densidad [kg/m ³]
E:	Energía [m]
f:	Factor de fricción de Colebrook-White
g:	Gravedad [m/s ²]
h _f :	Pérdidas por fricción en la tubería [m]
h _r :	Perdidas por accesorios [m]
K _s :	Coeficiente de rugosidad absoluta [micras]
L _o :	Espaciamiento entre orificios [m]
L _s :	Sumatoria de las longitudes del sistema [m]
L _t :	Distancia entre orificios [m]
NR:	Número de Reynolds
P _o :	Presión del nudo inicial del tramo [m]
P _f :	Presión final del tramo [m]
Q:	Caudal [m ³ /s]
Q _s :	Caudal de salida [m ³ /s]
T:	Temperatura del agua [°C]
ν _w :	Viscosidad cinemática [m ² /s]
V _t :	Velocidad del agua dentro del tubo [m/s]
V _i :	Velocidad en cada sección del tubo [m/s]
λ:	Es el peso específico del agua [kg/m ³]

RESUMEN

Esta investigación describe detalladamente los procesos que se llevaron a cabo para el Diseño Construcción y Calibración de un banco de pruebas para la verificación del Momento de Momentum perteneciente al laboratorio de Mecánica de fluidos de la Universidad de Nariño. Con esta investigación se obtuvo un dispositivo para que los estudiantes de los diferentes programas de la universidad puedan hacer sus prácticas y reconocer de manera visual lo expresado matemáticamente en las teorías acerca de la cantidad de movimiento.

ABSTRACT

This research describes in detail the processes that were carried out for the Design Construction and Calibration of a testbed for verifying the Moment of Momentum belonging to the Fluid Mechanics laboratory of the University of Nariño. With this research we obtained a device for students of different college programs can make their practices and visually recognize mathematically expressed theories about momentum.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo de investigación aplicada, fue realizado para dotar al laboratorio de mecánica de fluidos de una banco de pruebas para la enseñanza de la mecánica de fluidos, permitiendo visualizar con facilidad el fenómeno físico del momento angular y la comprobación de las ecuaciones que lo rigen (Streeter, 2000)

Estas ecuaciones tienen múltiples aplicaciones en la ingeniería práctica, como por ejemplo el diseño de distribuidores rotatorios de caudal, aspersores o rociadores, bombas y turbinas, donde los torques son más importantes que las fuerzas. En este trabajo se hizo énfasis en los conceptos básicos de los distribuidores rotatorios.

Los aspersores y distribuidores rotatorios son dispositivos utilizados para la distribución de agua sobre una superficie, por ejemplo los aspersores para los sistemas de riego y los distribuidores rotatorios en el tratamiento de aguas residuales especialmente sobre filtros percoladores.

Entre los productos que se obtuvo en esta investigación están, la metodología de diseño usando las ecuaciones de momentum, la implementación del banco de pruebas para que sea usado en el laboratorio de mecánica de fluidos, la metodología de calibración del dispositivo y la guía para elaboración futura de las prácticas de laboratorio.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Descripción del problema: En la Universidad de Nariño no existe un equipo con el cual se pueda realizar la guía de laboratorio de momentum en Mecánica de Fluidos, propuesta en el programa de Ingeniería Civil. Es necesario entonces diseñar, construir y calibrar un banco de pruebas con el cual los estudiantes tengan la posibilidad de comprobar la ecuación de momento angular aplicada a un rociador con varias geometrías y caudales.

Síntesis del tema: Es importante en la universidad disponer de todos los equipos y montajes de laboratorio para que los estudiantes puedan abarcar todas las posibilidades de conocimiento. Para este caso en particular la universidad de Nariño presenta en sus laboratorios de Hidráulica y Mecánica de Fluidos una guía de momento de momentum pero no existe el montaje para desarrollarla.

Se observa entonces una deficiencia en la universidad y a la vez un problema para los estudiantes, por esto es necesario construir, rediseñar y calibrar un nuevo dispositivo para que todos los estudiantes de la facultad de ingeniería y demás

facultades que llegaran a necesitar este montaje puedan elaborar las prácticas e informes adecuadamente.

OBJETIVOS DEL PROYECTO

Objetivo general: Contribuir al mejoramiento de los laboratorios de Mecánica de Fluidos e Hidráulica del programa de ingeniería civil con el diseño, construcción y calibración de un dispositivo para comprobar la ecuación de momento de momentum (cantidad de movimiento angular).

Objetivos específicos:

- Diseñar el montaje de laboratorio
- Construir el montaje de laboratorio
- Calibrar el montaje de laboratorio
- Elaborar la guía de la práctica para mecánica de fluidos
- Desarrollar la práctica de mecánica de fluidos según lo indicado en la guía.

JUSTIFICACIÓN

Debido a la carencia del equipo en los laboratorios de Ingeniería Civil, se detecta la imperiosa necesidad de diseñar, construir y calibrar un banco de pruebas con el cual los estudiantes puedan realizar las prácticas de Mecánica de Fluidos, de esta manera se podría desarrollar en laboratorio la guía correspondiente al momento de momentum, y así cumplir con todos los requisitos establecidos en el plan de estudios de esta asignatura.

Además que la inclusión de este montaje en los laboratorios sirve para los estudios de diseños de aspersores y sus múltiples derivaciones, complementando los laboratorios que ya existen y mejorar la calidad del Programa.

Teniendo en cuenta que en los distribuidores de agua giratorios, la teoría no incluye el efecto de fricción mecánica en el número de revoluciones, el cual es muy difícil estimarlo teóricamente, el banco de pruebas propuesta permite hacer esta calibración, con lo cual es posible construir una metodología de diseño de dichos distribuidores de forma segura para efectos prácticos en laboratorio.

1. CONCEPTOS TEÓRICOS Y DISEÑO DEL EQUIPO DE LABORATORIO

En este capítulo se describe los conceptos teóricos relacionados con el Momento de Momentum o cantidad de movimiento angular. Con base a esto se coloca el análisis que se tuvo en cuenta para el modelamiento hidráulico del aspersor y la metodología para realizar el diseño del mismo.

Dentro de estos ítems, se hace referencia a una de las aplicaciones más importantes en la Mecánica de Fluidos, la cual consiste en la ecuación de Momento Angular; esta ecuación tiene múltiples aplicaciones tales como el diseño de aspersores, diseños de bombas centrifugas, distribuidores rotatorios en filtros percoladores, turbo bombas hidráulicas, turbinas hidráulicas, entre otras.

Como productos de capítulo se obtuvo la calibración del modelo matemático para el tubo perforado, el diseño hidráulico de las componentes del modelo en donde se diseñó tres dispositivos de tubo perforado y se detalló en un plano, se diseñó la instalación desde el tanque hasta el tubo perforado y por último el diseño de los detalles constructivos del punto de giro, de tal manera que los aspersores se puedan remover y cambiar fácilmente.

1.1 DEFINICIONES

ASPERSOR

Un aspersor es un dispositivo mecánico que dispersa un flujo líquido a presión.¹

COEFICIENTE DE FRICCIÓN DE COLEBROOK

El factor de fricción o coeficiente de resistencia (f) es un parámetro adimensional que se utiliza para calcular la pérdida de carga en una tubería debida a la fricción.² Para realizar los cálculos aproximados del coeficiente de fricción de la ecuación de Colebrook-White, se utiliza la ecuación [1] o ec. De Swamee-Jain, ya que es más directa y no necesita iteraciones, por ende esta ecuación facilita encontrar los valores.

¹ Disponible en Internet: <http://www.mecanicadefluidos/Aspersor> (31 mayo 2012)

² Disponible en Internet: <http://www.mecanicadefluidos/Factordefriccion> (22 mayo 2012)

$$f = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{k_s}{3.7 D_t} + \frac{5.74}{NR^{0.9}}\right) \right]^2} \quad [1]$$

DENSIDAD

Conocida también como densidad absoluta es la magnitud que expresa la relación entre la masa y el volumen de una sustancia. Su unidad en el Sistema Internacional es kilogramo por metro cúbico (kg/m^3), aunque frecuentemente también es expresada en g/cm^3 .

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [2]$$

Siendo ρ la densidad; m la masa; y V el volumen de la sustancia”.³

LÍNEA DE ENERGÍA

“También es llamada línea de carga. La energía total del flujo en cualquier sección, con respecto a un plano de referencia determinado, es la suma de la energía potencial (Z), la energía de presión (P/γ) y la energía cinética ($V^2/2g$). La variación de la energía total de una sección a otra se representa por una línea denominada de carga o de energía y también gradiente de energía”.⁴

MOMENTO ANGULAR

El momento angular o momento cinético es una magnitud física importante en todas las teorías físicas de la mecánica.

Su importancia se debe a que está relacionada con las simetrías rotacionales de los sistemas físicos. Bajo ciertas condiciones de simetría rotacional de los sistemas es una magnitud que se mantiene constante con el tiempo a medida que el sistema evoluciona, lo cual da lugar a una ley de conservación conocida como ley de conservación del momento angular.

³ Disponible en Internet: <http://www.hidráulica.org/Densidad> (22 mayo 2012)

⁴ Disponible en Internet: <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/flujoentuberias> (23 mayo 2012)

NÚMERO DE REYNOLDS

El número de Reynolds relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión características, de un flujo en una expresión adimensional, que interviene en numerosos problemas de dinámica de fluidos. “Dicho número o combinación adimensional aparece en muchos casos relacionado con el hecho de que el flujo pueda considerarse laminar (número de Reynolds pequeño <2000) o turbulento (número de Reynolds grande >4000)”.⁵

$$NR = \frac{VD_t}{\nu_w} \quad [3]$$

VELOCIDAD ANGULAR

La velocidad angular es una medida de la velocidad de rotación. Se define como el ángulo girado por una unidad de tiempo y se designa mediante la letra griega omega (ω). Su unidad en el Sistema Internacional es el radián por segundo (rad/s), pero también es común usar revoluciones por minuto (rpm).

También se la emplea en la cinemática de la partícula, especialmente cuando ésta se mueve sobre una trayectoria cerrada (circular, elíptica).

“La velocidad angular media o rapidez angular media se define como la variación de la posición angular sobre el intervalo de tiempo y se expresa en la siguiente ecuación”.⁶

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad [4]$$

VISCOSIDAD DINÁMICA

Se habla de viscosidad para hacer referencia a la fuerza contraria que un fluido ejerce ante una deformación, se trata de una propiedad caracterizada por la resistencia a fluir que se genera a partir del rozamiento entre las moléculas; es decir la viscosidad dinámica es la resistencia interna de un líquido a fluir. (Streeter, 2000)

⁵ Disponible en Internet: http://www.hidráulica.org/numero_de_Reynolds (22 mayo 2012)

⁶ Disponible en Internet: http://www.mecanicadefluidos/Velocidad_angular (21 mayo 2012)

VISCOSIDAD CINEMÁTICA

La viscosidad cinemática ν es la resistencia a fluir de un fluido bajo la acción de la gravedad, es el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad. Su unidad física en el sistema internacional **SI** es el metro cuadrado sobre segundo. (m^2/s) (Streeter , 2000).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad [5]$$

1.2 ESTADO DEL ARTE

1.2.1 Antecedentes. Los laboratorios de Mecánica de fluidos e Hidráulica del programa de ingeniería civil han tenido un continuo mejoramiento debido al desarrollo de equipos de experimentación propiciados por las tesis o trabajos de grado elaboradas por los estudiantes, lo cual ha determinado un mejor conocimiento de las características de los fluidos con los equipos de experimentación desarrollados en estos laboratorios con fines didácticos y de investigación. Es así como se han construido una serie de equipos tales como: Banco de pruebas para sistemas de bombeo en paralelo y en serie; banco de pruebas para verificación de coeficientes en orificios; banco de pruebas para la determinación de pérdidas por fricción y accesorios, que corresponden a un sistema a presión con características similares al del proyecto en desarrollo.

1.2.2 Marco teórico. “El momento angular para un cuerpo rígido que rota respecto a un eje, es la resistencia que ofrece dicho cuerpo a la variación de la velocidad angular. En el Sistema Internacional de Unidades el momento angular se mide en $\text{kg}\cdot\text{m}^2\text{s}^{-1}(\text{J}\cdot\text{s})$ ”⁷

a. Cantidad de movimiento angular. Esta magnitud desempeña respecto a las rotaciones un papel análogo al momento lineal en las traslaciones. Sin embargo, eso no implica que sea una magnitud exclusiva de las rotaciones; por ejemplo, el momento angular de una partícula que se mueve libremente con velocidad constante (en módulo y dirección) también se conserva. (Sotelo, 2002).

b. Ecuación de momento angular. La ecuación del momento angular es una formulación alternativa de la segunda ley del movimiento de Newton, y frecuentemente su uso resulta más conveniente que el de la ecuación de cantidad de movimiento lineal para sistemas que presentan movimiento rotatorio, o cuando se requieren los momentos de las fuerzas. Mucha de la metodología que se

⁷ Disponible en Internet: www.fisicaenflash.es/dinamica/dinamicahtm. (23 mayo 2012)

emplea para la ecuación de cantidad de movimiento lineal se podría adaptar fácilmente a la ecuación del momento angular. Según (Streeter 2000), (Niño, 2007) y (Sotelo, 2002), la ecuación de Momentum Lineal está dada como:

$$\Gamma = \sum \frac{r}{g} [(QVR)_S - (QVR)_E] \quad [6]$$

Dónde:

Γ : Es la sumatoria de momentos angulares que actúan sobre el volumen de control.

R : Es el radio de giro o la distancia entre los puntos de salida del agua hasta el punto pivote de giro. (Gómez, Sánchez y García, 2010).

V : Es la velocidad; los subíndices s y e , denotan salida y entrada, respectivamente.

c. Deducción de la ecuación de momento angular para el distribuidor rotatorio. En la figura 1, se observa el dispositivo distribuidor rotatorio y la unidad de giro, que son las partes más importantes del sistema. Los orificios que están a los costados del brazo serán calibrados para permitir un flujo de volumen de agua lo suficiente como para hacer girar los brazos. Estos brazos y orificios pueden ser de diferentes dimensiones dependiendo de las necesidades del sistema, los orificios situados en la parte delantera y opuesta de los brazos, hacen girar el distribuidor rotatorio sobre la unidad de giro.

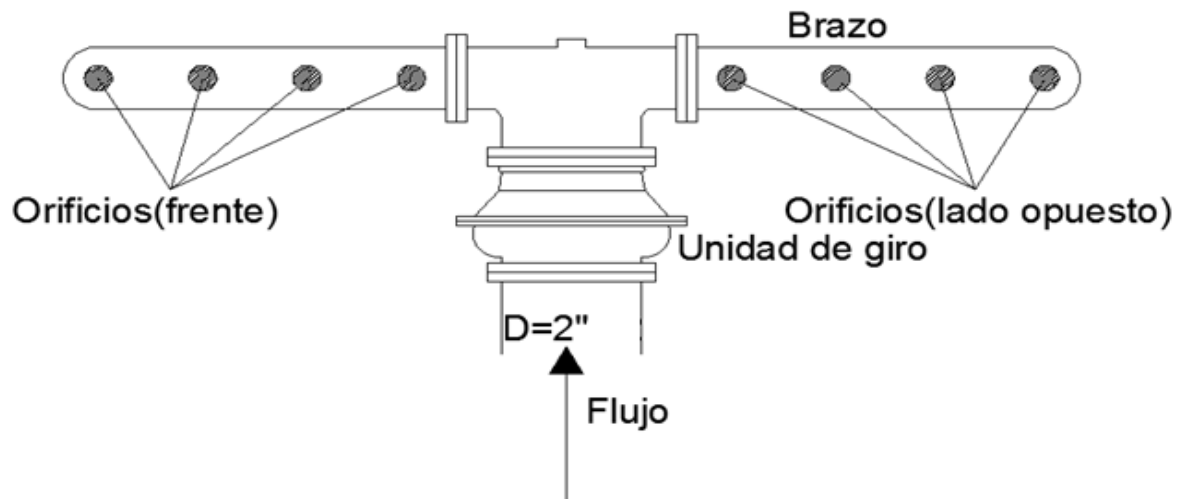


Figura 1. Modelo general de un distribuidor de agua rotatorio (Arboleda, 2000).

A continuación se explica la deducción de la ecuación de momento angular de (Streeter, 2000, Pg. 187), partiendo del modelo general del tubo con perforaciones en ambos brazos, sin embargo para la deducción de esta ecuación no hay necesidad de ambos brazos si no de uno. Ver figura 2.

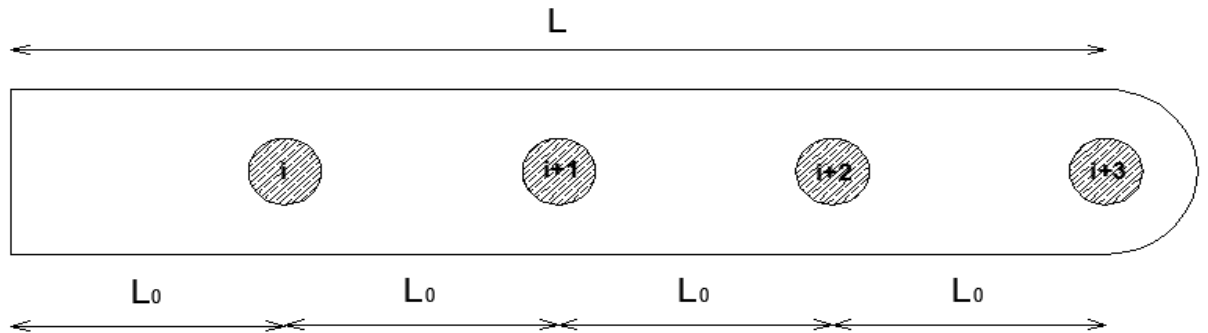


Figura 2. Tubo con Perforaciones

Para un tubo perforado como el de la figura se cumplirá que:

$$\Gamma = \frac{\sum}{g} [(QVR)_S - (QVR)_E] \quad [7]$$

Pero debido a que no existen caudales de entrada solo de salida el segundo término de la ecuación se elimina quedando:

$$\Gamma = \frac{\sum}{g} [(QVR)_S] \quad [8]$$

Como la velocidad que se presenta en el tubo es angular por que gira alrededor de un eje central (ver fig. 1) la ecuación se convierte en:

$$\Gamma = \frac{\sum}{g} [Q(V_{ti} - \omega R_i)_S R_i] \quad [9]$$

En consecuencia a que la sumatoria de momentos en el aspersor debe ser cero para permitir el giro, se tiene:

$$\Gamma = \frac{\sum}{g} [Q(V_{ti} - \omega R_i)_S R_i] = 0 \quad [10]$$

Si se considera que son “n” orificios, la ecuación queda:

$$0 = \frac{\sum}{g} ([Q(V_{ti} - \omega R_i)_S R_i] + [Q(V_{ti+1} - \omega R_{i+1})_S R_{i+1}] + \dots + [Q(V_n - \omega R_n)_S R_n]) \quad [11]$$

Se simplifica Q y la ecuación queda:

$$0 = \frac{\gamma}{g} Q ([V_{ti} - \omega R_i)_s R_i] + [(V_{ti+1} - \omega R_{i+1})_s R_{i+1}] + [(V_n - \omega R_n)_s R_n] \quad [12]$$

Si se divide todo por " γ " y Q, además si se multiplica toda la ecuación por "g" se obtiene:

$$0 = [(V_{ti} - \omega R_i)_s R_i] [(V_{ti+1} - \omega R_{i+1})_s R_{i+1}] [(V_n - \omega R_n)_s R_n] \quad [13]$$

Otra forma de escribir esta ecuación es:

$$\sum_{i=1}^n [(V_{ti} - \omega R_i)_s R_i] = 0 \quad [14]$$

$$\sum_{i=1}^n [V_{ti} R_i] - \sum_{i=1}^n [\omega R_i R_i] = 0 \quad [15]$$

$$\sum_{i=1}^n [\omega R_i R_i] = \sum_{i=1}^n [V_{ti} R_i] \quad [16]$$

Simplificando el término " ω " y realizando las operaciones de R se obtiene:

$$\sum_{i=1}^n [R^2_i] \omega = \sum_{i=1}^n [V_{ti} R_i] \quad [17]$$

$$\omega = \frac{\sum_{i=1}^n [V_{ti} R_i]}{\sum_{i=1}^n [R^2_i]} \quad [18]$$

Si se trata del número de vueltas por minuto (rpm), la ecuación final tendrá el siguiente término:

$$\omega = \frac{2\pi}{60} \left(\frac{\sum_{i=1}^n [V_{ti} R_i]}{\sum_{i=1}^n [R^2_i]} \right) \quad [19]$$

Una forma clara de demostrar esta ecuación es con el ejemplo anterior suponiendo un total de 4 orificios en el tubo, por tanto la ecuación final de " ω " sería:

$$\omega = \frac{2\pi}{60} \left(\frac{[V_{t1} R_1 + V_{t2} R_2 + V_{t3} R_3 + V_{t4} R_4]}{[R^2_1 + R^2_2 + R^2_3 + R^2_4]} \right) \quad [20]$$

Dónde:

ω : Es la velocidad angular con la que gira el aspersor en r.p.m.

V_{t1} , V_{t2} , V_{t3} y V_{t4} : Son las velocidades de salida por el orificio en m/s.

d. Aplicación en los aspersores:

- ✓ **Distribución a filtros percoladores.** El distribuidor rotativo en filtro percolador se ha convertido en un elemento estándar del proceso por su fiabilidad y facilidad en el mantenimiento. Este consiste en dos o más brazos montados sobre un pivote en el centro del filtro que giran en el plano horizontal, los brazos son huecos y tiene boquillas por las que se descarga agua residual sobre el lecho del filtro, el distribuidor puede ser impulsado por un motor eléctrico o por la reacción dinámica del agua residual que descarga por las boquillas. La velocidad de giro variará con el caudal en la unidad accionada por reacción, pero deberá ser del orden de una vuelta cada 10min, o menor en un distribuidor de dos brazos, la distancia entre el fondo del brazo del distribuidor y la parte superior del lecho deberá ser no mayor de 22cm, esto permitirá que el agua residual salga de las boquillas, se extienda y cubra de forma uniforme todo el lecho.

“Se puede usar tanques de alimentación de operación intermitente o recirculación para así asegurar que el caudal mínimo será suficiente para hacer girar el distribuidor y descargar el agua residual por las boquillas, puede instalarse distribuidores de 4 brazos con sistemas de vertedero que limita el caudal a dos brazos durante dos caudales mínimos”.⁸

- ✓ **Sistemas de riego por aspersión.** El agua se aplica sobre la superficie del suelo en forma parecida a la lluvia, dicha aspersión se obtiene al impulsar agua a presión, a través de pequeños orificios o boquillas, generalmente la presión se obtiene por bombeo, aunque puede lograrse por gravedad.

Los aspersores más utilizados en la Agricultura son los giratorios porque giran alrededor de su eje y permiten regar una superficie circular impulsados por la presión del agua, aunque en el mercado los hay de variadas funciones y distinto alcance. Son parte muy importante del equipo del riego por aspersión y por tanto el modelo, tipo de lluvia (más o menos pulverizada) que producen, alcance etc.⁹

⁸ Disponible en Internet: <http://filtrospc.blogspot.com/2012/03/distribucion-de-los-filtros.html> (23 mayo 2012)

⁹ Disponible en Internet: http://www.ecured.cu/index.php/Riego_por_Aspersi%C3%B3n (23 mayo 2012)

1.3 DISEÑO HIDRÁULICO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA

1.3.1 Diseño hidráulico de la tolva de cabeza constante. Para diseñar la tolva de cabeza constante y el vertedero de excesos en este montaje se tuvo en cuenta que la pérdida de energía por carga de velocidad es de 1mm, además se consideró el caudal más crítico.

$$\frac{V^2}{2 \cdot g} = 0.001\text{m} \quad [21]$$

Despejando velocidad de la ecuación [21] se tiene:

$$V^2 = 2 \cdot g \cdot 0.001\text{m} \quad [22]$$

$$V = \sqrt{0.001\text{m} \cdot 2 \cdot 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0.14 \text{ m/s} \quad [23]$$

Considerando que la velocidad es una función del caudal y del área del vertedero se tiene:

$$Q = V \cdot A \quad [24]$$

$$V = \frac{Q}{A} \quad [25]$$

El caudal crítico o también el mayor caudal está determinado por las restricciones de los componentes del sistema. En particular este caudal será $Q = 0.007 \text{ m}^3/\text{s}$; sustituyendo este valor en la ecuación [25] queda:

$$V = \frac{0.007\text{m}^3/\text{s}}{A} \quad [26]$$

Pero el valor de la velocidad es conocido, reemplazando este valor en la ecuación [26] se tiene:

$$0.14 \text{ m/s} = \frac{0.007\text{m}^3/\text{s}}{A} \quad [27]$$

Se despeja de la ecuación [27] A (área), para encontrar el respectivo valor así:

$$A = \frac{0.007\text{m}^3/\text{s}}{0.14 \text{ m/s}} \quad [28]$$

$$A = 0.05\text{m}^2$$

Se trata de determinar el valor de los lados de la tolva de cabeza constante por lo tanto otra forma de escribir el área del vertedero es:

$$A = l * l \quad [29]$$

$$A = l^2$$

Sustituyendo el valor del área y despejando el valor de “L” se tiene que:

$$l^2 = 0.05m^2 \quad [30]$$

$$l = \sqrt{0.05m^2} = 0.23 \text{ m} \quad [31]$$

El valor de L=23 cm, para efectos constructivos y para dar mayor rango en el valor de los caudales L será aproximado a L= 40cm. En la figura 3, se observa las dimensiones de la tolva en plata, las dimensiones del vertedero de excesos y se muestra el tubo de desagüe del agua que recircula en el sistema.

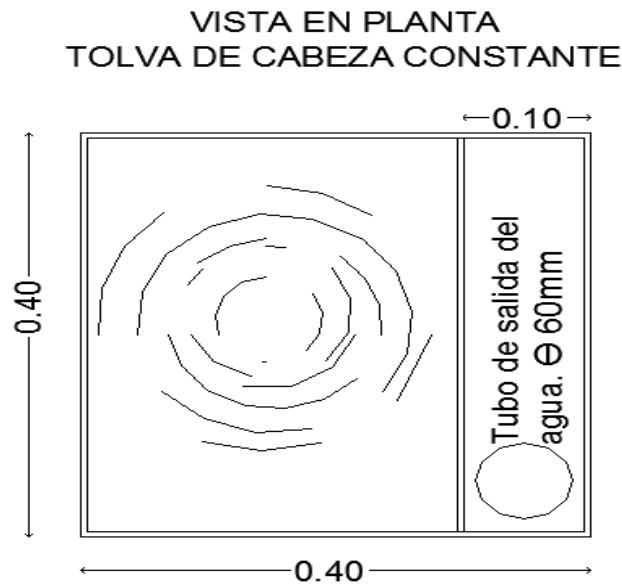


Figura 3. Vista en planta de la tolva de cabeza constante y el vertedero de excesos.

1.3.2 Diseño del tubo principal. Para el diseño del tubo principal se tuvo en cuenta las disposiciones del caudal en el sistema y la cantidad de energía disponible para perder, si el valor de la energía es alto los diámetros del tubo principal deben ser pequeños para aumentar el valor de las pérdidas. Si por el contrario se tiene poca energía para perder, entonces los valores del diámetro del tubo deben ser grandes para disminuir las pérdidas de energía. En este caso tanto los valores de cabeza de energía disponibles como las necesidades del caudal para el aspersor son pequeños, por lo tanto se asumió un diámetro $D = 2\text{plg}$, porque cumple con los requisitos necesarios del sistema. El tubo principal se indica en la figura 4.

1.3.3 Diseño hidráulico del banco de pruebas. En la figura 4, se observa la disposición que tiene cada componente del banco de pruebas y su ilustración corresponde al modelo que se construyó. En la parte superior del dispositivo se tiene el tanque de cabeza constante que garantiza la presión del sistema, seguido de tubos de distribución de pvc, también se observa el aforador triangular que permite la medición del caudal que circula por el sistema así como el tanque de succión que sirve de almacenamiento para la recirculación del agua a través de la bomba hacia el inicio del banco de pruebas que es el tanque de cabeza constante.

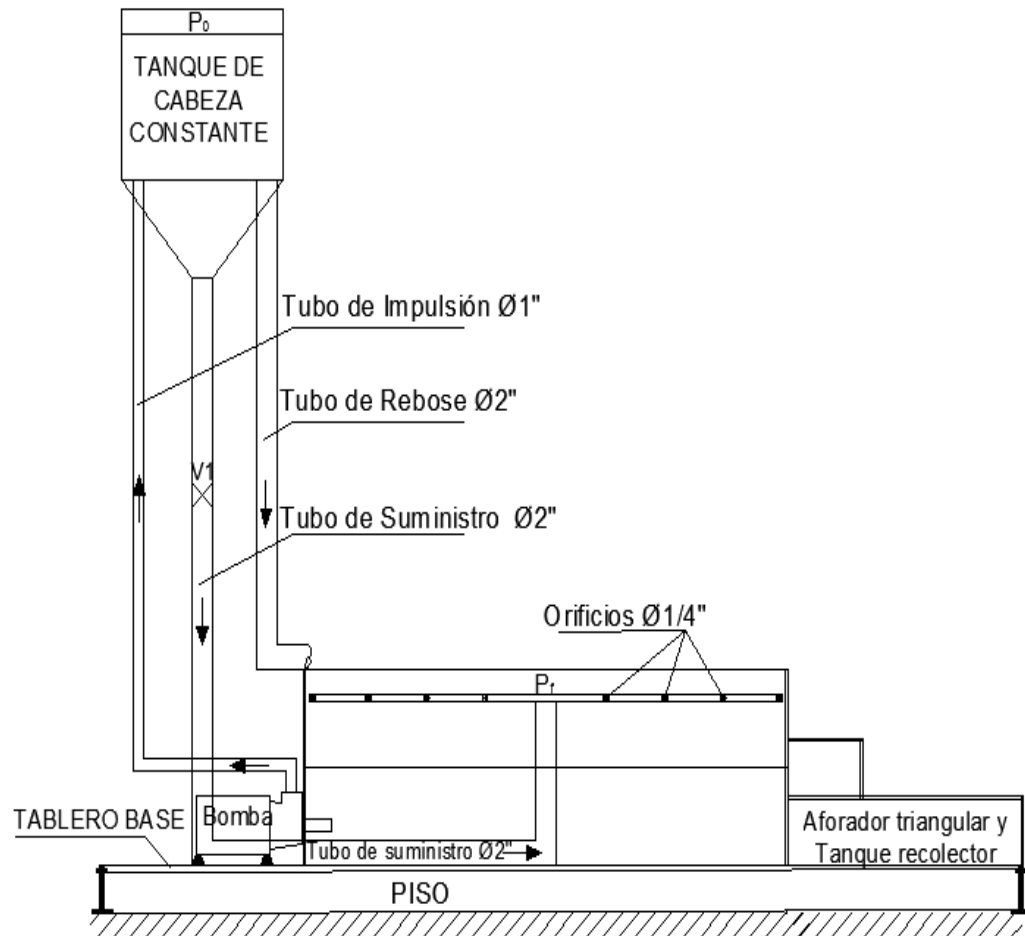


Figura 4. Modelo básico de la instalación principal.

Para el diseño hidráulico del banco de pruebas se dibujan las líneas de energía entre el punto cero (P_o) y el punto f (P_f).

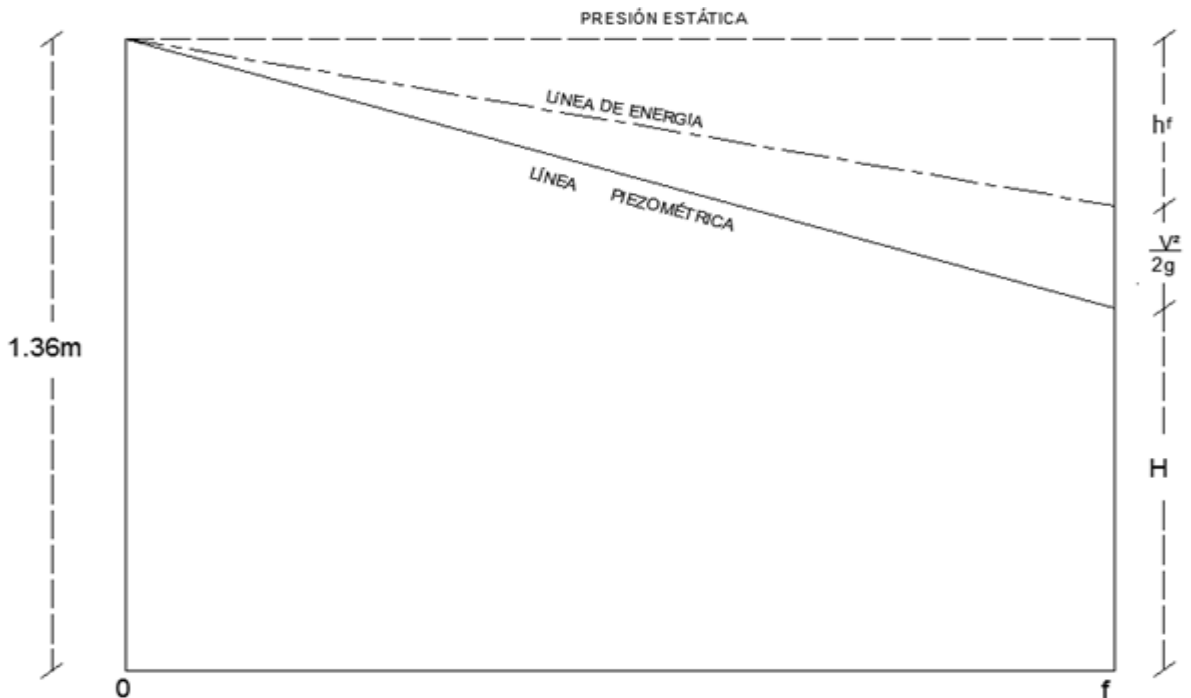


Figura 5. Diagrama de las líneas de energía en el modelo básico del aspersor, entre el punto p_o y p_f

En la figura 5, se muestran las cabezas disponibles de energía a perder. En el punto cero (0) se muestra la energía total, en el punto "F" se muestra la presión final (H) en el sistema y las pérdidas de energía que se presentan. Estas pérdidas son por fricción y por accesorios.

La manera más práctica para resolver ejercicios de hidráulica es con la ecuación de energía porque es la ecuación que relaciona todas las variables que pueden afectar las condiciones de un sistema entre 2 puntos dados.

Aplicando la ecuación de energía en el punto cero (0) y en el punto "F" se tiene:

$$E_0 = E_F + \Sigma h \quad [32]$$

La energía E_0 está compuesta por la diferencia de alturas entre el punto "0" y el punto "F". Como la velocidad en el punto (0) es muy pequeña se desprecia, la presión en el punto (0) también se desprecia por estar abierto a la atmosfera y tampoco existe cabeza de velocidad porque en el diseño del vertedero se asumió este valor casi igual a cero (1mm).

De esta manera se concluye que la energía en el punto inicial es: $E_0 = 1.36\text{m}$
La energía E_f en el punto final del aspersor cumple que:

$$E_F = H + \frac{V^2}{2 \cdot g} + h \quad [33]$$

Donde:

H: Es la presión final en mca en el sistema en el punto F

V: Es la velocidad en el tubo

h: Son las pérdidas de energía en el sistema debido a la fricción y los accesorios entre los 2 puntos en análisis.

Sustituyendo este valor en la ecuación [33] se obtiene:

$$1.36\text{m} = H + \frac{V^2}{2 \cdot g} + h \quad [34]$$

Las pérdidas de energía que se presentan en el sistema son por fricción y por accesorios.

a. Cálculo de las pérdidas de energía por fricción (H_f)

$$H_f = f \frac{L_s \cdot V^2}{D_t \cdot 2 \cdot g} \quad [35]$$

Dónde:

f : Coeficiente que se calcula con la ecuación [1] de Colebrook-White: $f = 0.0205$

L_s : Sumatoria de las longitudes de tubo pvc que hay en el sistema.

$$L_s = 1.3\text{m} + 0.4\text{m} + 1\text{m} = 2.7 \text{ m} \quad [36]$$

La velocidad del tubo (V) depende del caudal y del diámetro del tubo principal, para este aspersor el diámetro del tubo es 2" expresado en m $D_t = 0.0508 \text{ m}$, por lo tanto el caudal es $Q = 0.00076 \text{ m}^3/\text{s}$; y el área $A = 0.0202 \text{ m}^2$, sustituyendo estos valores:

$$v = \frac{Q}{A} \quad [37]$$

$$V = \frac{0.00076 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.0202 \text{ m}^2} = 0.375\text{m/s}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación [35] se obtiene:

$$H_f = 0.0205 \left(\frac{2.7*(0.375\text{m/s})^2}{0.0508\text{m} * 2*9.8\text{m/s}^2} \right) = 0.01 \quad [38]$$

b. Cálculo de las pérdidas de energía por accesorios (H_r):

$$H_r = \frac{\sum KV^2}{2*g} \quad [39]$$

Dónde:

$\sum K$: Es la sumatoria de coeficientes de pérdidas de carga en los accesorios.
En el sistema hay 2 codos de 90° y una válvula de compuerta cuyos valores de K son:

- K para codos de 90° = 0.45
- K para la válvula de compuerta = 0.2

Entonces:

$$\sum K = 2 * 0.45 + 0.2 = 1.1 \quad [40]$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación [40] se obtiene:

$$H_r = \frac{1.1*(0.375\text{m/s})^2}{2*9.8\text{m/s}^2} = 0.008 \quad [41]$$

c. Cálculo de la cabeza de velocidad:

$$\frac{V^2}{2*g} = \frac{(0.375\text{m/s})^2}{2*9.8\text{m/s}^2} = 0.007 \quad [42]$$

Sustituyendo los valores de las pérdidas de energía y la cabeza de velocidad en la ecuación [34] y despejando el valor de H se obtiene:

$$\begin{aligned} 1.36\text{m} &= H + 0.01\text{m} + 0.008\text{m} + 0.007\text{m} \\ H &= 1.36\text{m} - 0.01\text{m} - 0.008\text{m} - 0.007\text{m} = 1.335\text{m} \end{aligned} \quad [43]$$

1.3.4 Diseño hidráulico del tubo del aspersor. A partir del modelo general (fig.2) de tubo con perforaciones se hizo el análisis únicamente para un solo brazo del tubo ya que el otro brazo es igual. En la figura 6, se observan las líneas de energía, las velocidades y caudales que se originan en cada orificio. Para el primer orificio situado a L_0 del punto cero (0) se observa una pérdida de energía por fricción h_{f1} además de las pérdidas de energía por cabeza de velocidad $v_1^2/2g$ que comparada con este mismo tipo de pérdida de energía del orificio 4 es mayor. Se observa que a medida que el caudal inicial (Q) disminuye por la salida de los caudales q_1 y q_2 de los orificios 1 y 2, las pérdidas por cabeza de velocidad disminuye haciendo que la energía total en los extremos del brazo sea mayor que en el inicio del mismo.

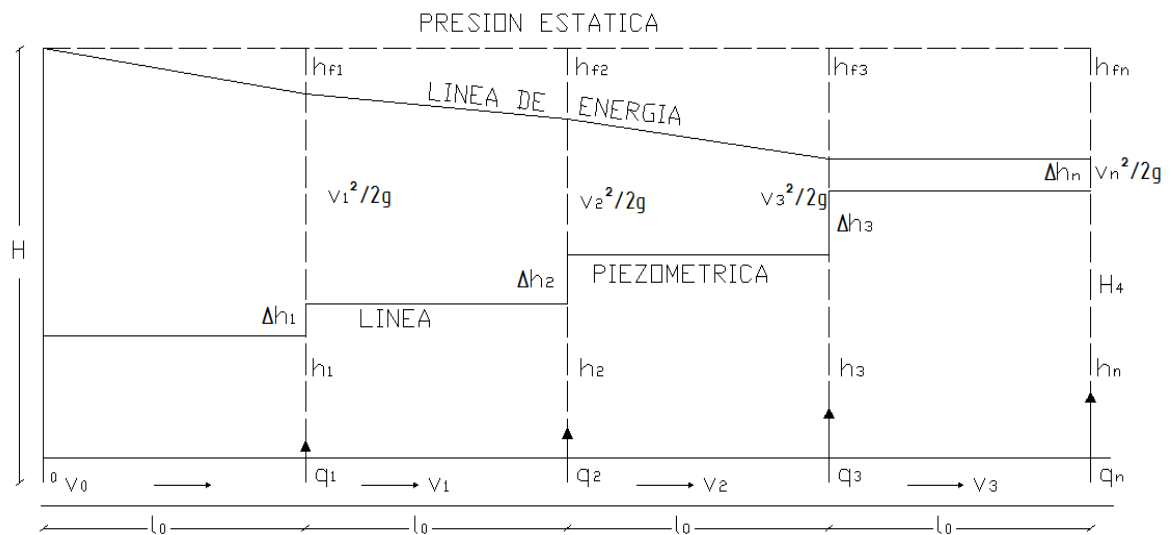


Figura 6. Líneas de presión en un brazo distribuidor de agua (Arboleda, 2000).

Considerando una carga H sobre el brazo en cada orificio se cumple que:

$$H = h + \frac{v_i^2}{2 \cdot g} + h_f \quad [44]$$

Dónde:

H : Es la presión final en el punto f del aspersor igual a 1,32m para todo el tramo del múltiple.

h : Altura piezométrica hasta donde teóricamente (excluida la resistencia del aire) sube el chorro de agua si se los dejara fluir libremente.

$V^2/2g$: Carga de velocidad

h_f =: Pérdida por fricción

Como a medida que va saliendo por los orificios los caudales q_1, q_2, q_3, q_n , las velocidades v_1, v_2, v_3, v_n , van a ir disminuyendo en el ducto, las alturas piezométrica h_1, h_2, h_3, h_n , van a ir aumentando en valor de $\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3, \Delta h_n$, a lo largo del múltiple.

Esto implica que los gastos y la presión de salida en los orificios van a ser mayor en los del extremo opuesto a la entrada del flujo que en los del comienzo. (Arboleda, 2000).

a. Análisis del tramo 0-1:

$$H = h + \frac{V_i^2}{2 \cdot g} + h_f \quad [45]$$

$$h = H - \frac{V_i^2}{2 \cdot g} - h_f \quad [46]$$

b. Cálculo de la pérdida por fricción:

$$h_f = f \left(\frac{L_o \cdot V_i^2}{D_b \cdot 2 \cdot g} \right) \quad [47]$$

Dónde:

- L_o : Distancia entre orificios igual a 0.15m
- D_b : Diámetro del múltiple igual a 0.0127m
- f : Coeficiente de fricción igual a 0.0262

El caudal que circula por el tubo del brazo es el caudal inicial del tubo dividido entre 2 porque son 2 los brazos por donde el caudal inicial debe salir. El caudal del tramo 0-1 es igual a:

$$Q_1 = Q/2 \quad [48]$$

$$Q_1 = \frac{0.00076 \text{ m}^3/\text{s}}{2} = 0.00038 \text{ m}^3/\text{s}$$

Con el valor de Q_1 y el área del múltiple distribuidor se calcula la velocidad V_1 , para esto:

$$A_b = 0.000127 \text{ m}^2$$

$$V_1 = \frac{0.00038 \text{ m}^3/\text{s}}{0.000127 \text{ m}^2} = 3.00 \text{ m/s} \quad [49]$$

Sustituyendo los valores en la ecuación [47] queda:

$$h_f = 0.0262 \left(\frac{0.15\text{m} \cdot (3.00\text{m/s})^2}{0.0127\text{m} \cdot 2 \cdot 9.8 \text{ m/s}^2} \right) = 0.10 \text{ m} \quad [50]$$

Cálculo de la carga de velocidad:

$$\frac{V^2}{2 \cdot g} = \frac{(3.00\text{m/s})^2}{2 \cdot 9.8\text{m/s}^2} = 0.46 \text{ m} \quad [51]$$

Sustituyendo los valores de carga de velocidad y pérdida de fricción en la ecuación [46] queda.

$$h = 1.335\text{m} - 0.46\text{m} - 0.1\text{m} = 0.76 \text{ m} \quad [52]$$

h: Presión en m.c.a sobre el orificio 1.

El anterior procedimiento descrito se repite de igual manera en todos los tramos hasta llegar al orificio del extremo.

1.3.5 Diseño hidráulico del vertedero triangular y tanque de succión. Las dimensiones de base, largo y altura del vertedero triangular y el tanque de succión se dimensionaron teniendo en cuenta el caudal que sale por los orificios del aspersor y las necesidades del sistema.

a. Diseño del vertedero triangular. Este tipo de vertedero se utiliza para medir pequeños gastos, siendo estos más precisos que los vertederos rectangulares ya que para un mismo caudal los valores de (H) son mayores.

Expresando la fórmula de Thomson para estos tipos de vertederos y un ángulo de $\theta = 20^\circ$, $Q = 0.3564 \cdot h^{2.45}$, la carga (H) en metros y el caudal (Q) en m^3/s , (Gómez, 2010, pg. 7-8).

Esta ecuación está sujeta a cambios debido a la calibración del equipo.

Las dimensiones del vertedero están relacionadas directamente con el caudal máximo de trabajo o caudal crítico que para este caso es de $Q = 1 \text{ l/s}$. La altura, ancho y largo están representadas en la siguiente tabla teniendo en cuenta el caudal crítico, además se establece la altura de la lámina de agua que está sobre el vertedero teniendo en cuenta la fórmula de Thomson. Ver tabla 1.

Tabla 1. Datos para el diseño del vertedero

Dimensiones del vertedero				Altura de la lámina de agua.
Caudal (l/s)	Ancho (cm)	Base (cm)	Alto (cm)	H (cm)
0,3	15	17	19	6
0,5	15	22	24	7
0,7	15	26	28	8
1	15	32	34	9

Para que las longitudes sean confiables se trabajó con las dimensiones del caudal crítico, por tanto las medidas del vertedero son: Ancho 20 cm, largo 40 cm y una altura de 40 cm. En la figura 7, se observa las dimensiones establecidas para el aforador triangular, también se observa la disposición final de este aforador en la figura 10.

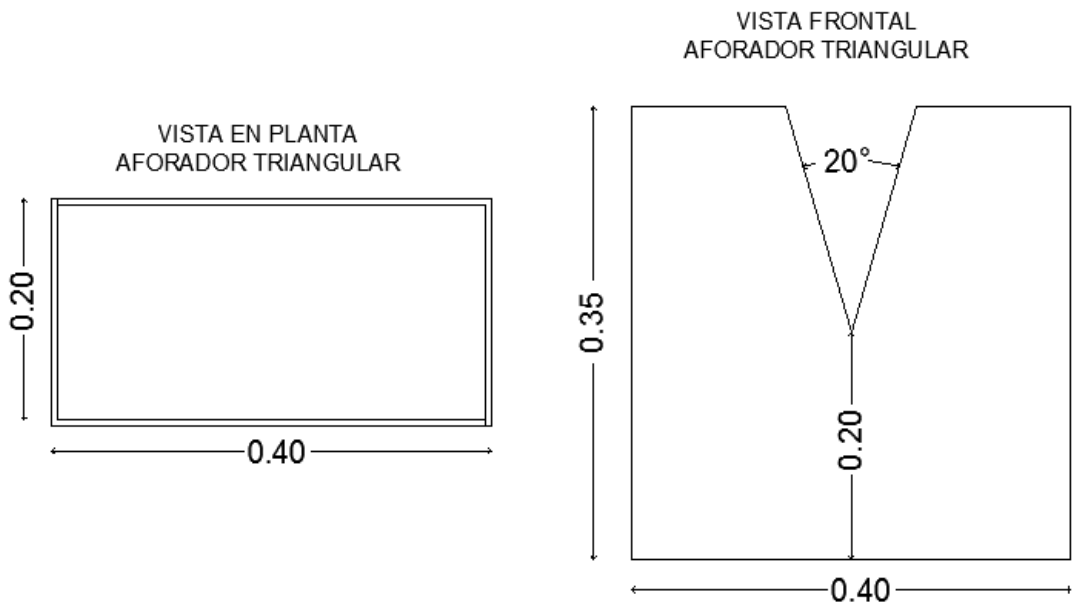


Figura 7. Vista en planta y frontal del vertedero triangular.

b. Diseño del tanque de succión. En la figura 8, se observa la disposición del tanque recolector de agua o de succión y el vertedero triangular, justo después del tanque recolector de agua redondo. Se observa como es el funcionamiento y la secuencia lógica del sistema. A este tanque recolector le llegarán las aguas que salen de los orificios del brazo giratorio (ver fig.1) y el agua que recolecta en el vertedero de excesos (ver fig. 7), además de recolectar el agua este tanque es la fuente que abastece a la bomba hidráulica la cual suministra agua al sistema.

Para el diseño del tanque recolector se tuvo en cuenta el volumen de la tolva que se desea rebosar más un 20% del volumen por seguridad.

Cálculo del volumen de la tolva (V) en cm^3 :

El volumen de la tolva está compuesto por el volumen del cubo más el volumen del cono de la parte inferior:

$$\begin{aligned} V &= (30 \cdot 30 \cdot 35) \text{ cm}^3 + (1.047 \cdot (30)^2 \cdot 20) \text{ cm}^3 \\ V &= 50446 \text{ cm}^3 + 50446 \cdot 0.2 \text{ cm}^3 = 60420 \text{ cm}^3 \end{aligned} \quad [53]$$

Las dimensiones del tanque recolector son derivadas del volumen calculado así:

$$L = \sqrt[3]{60420 \text{ cm}^3} = 39.3 \text{ cm} \quad [54]$$

Las dimensiones finales para el tanque recolector de agua son: Ancho 50 cm, largo 45 cm y una altura de 45cm, para una mayor seguridad.

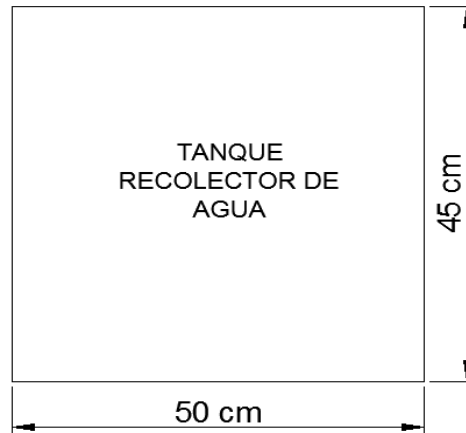


Figura 8. Vista en planta del tanque recolector de agua.

1.3.6 Diseño de la cabeza giratoria. Para el diseño de la cabeza giratoria se modifica una cabeza giratoria de un aspersor comercial y se adaptan modificaciones para cumplir con las medidas necesarias en este montaje. (Ver figura 4). En la figura 9, se observa la cabeza giratorio junto con la forma para unir los brazos a esta misma. La unión es a presión debido a que los modelos de los brazos deben ser de fácil retiro y manejo para poder cambiar la posición de los brazos y realizar las mediciones y aforos necesarios en el laboratorio.

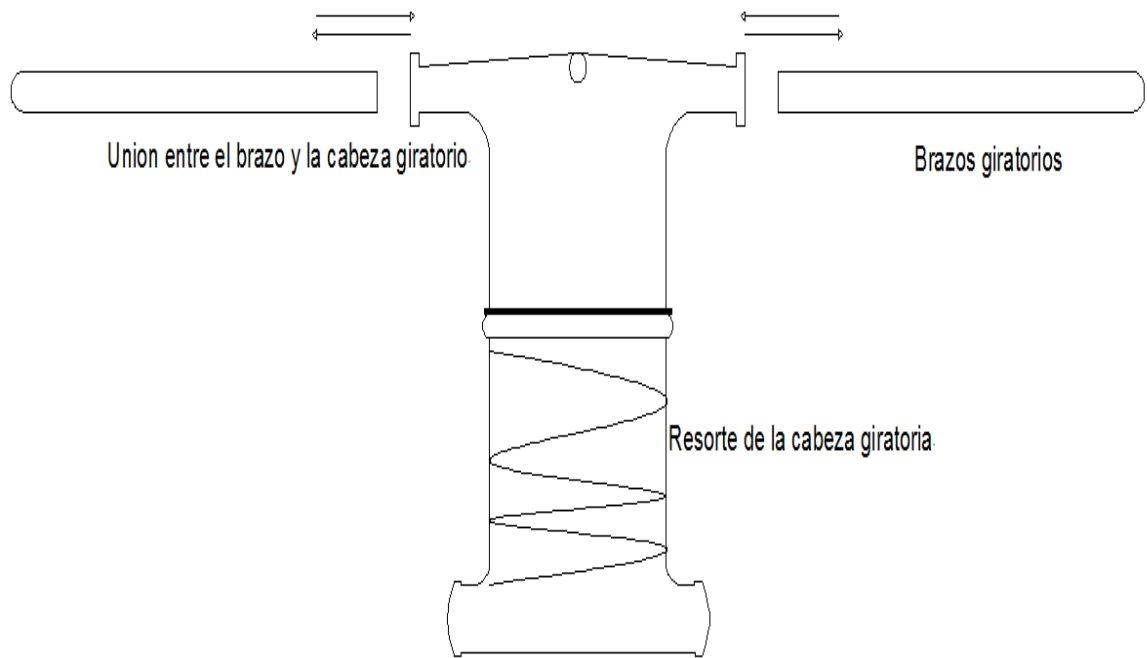


Figura 9. Cabeza giratoria junto con la forma de cambiar los modelos de brazos.

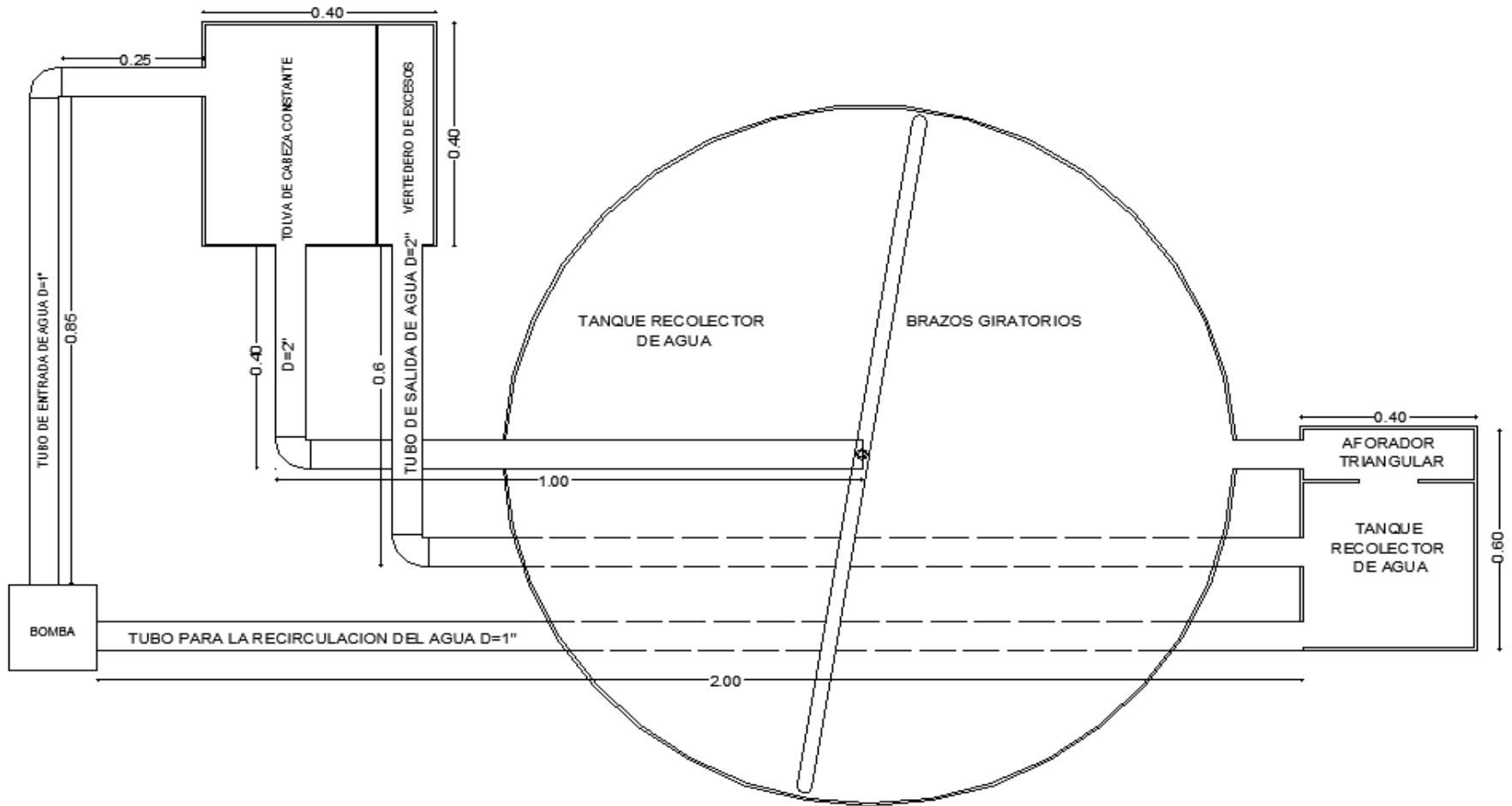


Figura 10. Vista en plata del aspersor.

Se muestra la secuencia lógica de los procesos que intervienen en el laboratorio, desde la impulsión del agua con la bomba hasta la tolva de cabeza constante pasando por el tubo que lleva el agua al brazo giratorio, el tubo que lleva el agua del vertedero de excesos al tanque recolector, el agua que cae al tanque redondo es llevada al aforador triangular donde después de ser aforado el caudal cae sobre el tanque de succión recirculando el agua e iniciando de nuevo el proceso.

1.4 METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE ASPERSOR

Las dimensiones del brazo giratorio, el diámetro del orificio de salida de agua, el caudal que circula por el sistema y demás características que podrían variar la velocidad angular con la que giran los brazos giratorios llevan todos el mismo proceso que a continuación se describe. En particular se realizaron 3 modelos distintos que tienen diferentes dimensiones, diámetros y disposiciones, que afectan de manera directa la velocidad en cada modelo. (Ver anexo A, B Y C)

1.4.1 Datos de entrada. Procedimiento para la solución hidráulica en el modelo número n° 1. Este procedimiento es similar tanto para el modelo n° 2 como para el modelo n° 3, mostrados en los anexos A, B Y C.

a. Metodología para el modelo N° 1. La descripción siguiente muestra el procedimiento para el tramo 1 del aspersor perforado, ya que para los demás tramos se hace de forma análoga a éste.

b. Características del modelo número 1:

- ✓ Establecer el diámetro interno del tubo: $D_t = 1/2"$, pvc RDE = 41. ($D_i=0.0127\text{m}$)
- ✓ Establecer el diámetro de los orificios de salida del agua: $D_o = 1/4"$ ($D=0.00635\text{ m}$)
- ✓ Diámetro del tubo principal 2" (0.0508 m)
- ✓ Definir longitud de la regadera (L), que es la suma de todas las longitudes de los espaciamientos entre orificios: $L = 0.60\text{m}$
- ✓ Espaciamiento entre orificios: $L_o = 0.15\text{ m}$.

Este valor puede variar a conveniencia dependiendo del modelo del brazo giratorio.

Según anexo A: solución hidráulica para el modelo n° 1.

Columna 1: Se coloca el número de tramos

Columna 2: Se coloca el nudo inicial del tramo, **i**, empezando a numerar desde 0

Columna 3: Se coloca el nudo final del tramo, **f** empezando a numerar desde 1

Columna 4: Se coloca el espaciamiento entre orificios. $L_o = 0.15\text{ m}$

Columna 5: Coeficiente de rugosidad absoluta para el PVC. $K_s=1.5\text{ micras}$.

Columna 6: Se coloca el diámetro interno del tubo. $D = 0.0508\text{ m}$

Columna 7: Se coloca el caudal inicial que pasa por el Tubo. $Q = 0.00038 \text{ m}^3/\text{s}$, cabe aclarar que para los siguientes tramos, este se obtiene al hacer la diferencia entre el valor inicial del tramo en la columna 7 y el caudal de salida de la columna 21 respectivamente.

Columna 8: Se calcula el área del tubo, con el diámetro interno de la columna 6. $A_t = 0.000127\text{m}^2$

Columna 9: Se calcula la velocidad del agua dentro del tubo como la relación entre la columna 7 y la columna 8 que son el caudal y el área respectivamente. $V_1 = 3 \text{ m/s}$

$$V_i = \frac{Q_i}{A_t} \quad [55]$$

Columna 10: Se coloca la temperatura del agua a la cual se está realizando el ensayo $T = (18^\circ\text{C})$.

Columna 11: Se calcula la viscosidad cinemática del agua, con el uso de la siguiente ecuación, obteniendo un valor de $\nu_w = 1,0168\text{E}-06 \text{ (m}^2/\text{s)}$.

$$\nu_w = \frac{1.792 \cdot 10^{-6}}{1 + 0.0337T + 0.000221T^2} \quad [56]$$

Donde, ν_w en m^2/s y T en $^\circ\text{C}$

Columna 12: Se calcula el número de Reynolds NR, multiplicando las columnas 6 y 9, con este producto se hace la relación con la columna 11. $NR = 37467,7$

$$NR = \frac{VD_t}{\nu_w} \quad [57]$$

Columna 13: Se calcula el factor de fricción de Colebrook-White, f , con las columnas 5, 6 y 12. Aplicando la ecuación [59]:

$f = 0.0262$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{k_s}{3.7 D_t} + \frac{5.74}{NR^{0.9}} \right) \right]^2} \quad [58]$$

Columna 14: Se calcula las pérdidas por fricción en la tubería h_f , haciendo las respectivas operaciones con las columnas 4, 6, 9 y 13, y aplicando la ecuación de Darcy Weisbach, se obtiene un valor de: $H_f=0.10$ m

$$h_f = f \frac{L_t}{D_t} \frac{V_t^2}{2g} \quad [59]$$

Dónde:

L_T : Es la distancia entre orificios

Columna 15: Se calcula la cabeza de velocidad, $V^2/2g$, que se calcula elevando al cuadrado la columna 9 y dividir este valor sobre dos veces la gravedad ($g=9.81\text{m/s}^2$).

$$(V^2/2g) = 0.4591 \text{ s}$$

Columna 16: Se coloca la presión del nudo inicial del tramo 1. $P_i = 1.2$ m

Esta presión inicial corresponde a la presión final del aspersor P_f , para los demás casos esta presión inicial será la presión final del tramo anterior.

Columna 17: Se calcula la presión final P_f del tramo 1, para esto se aplica la ecuación mostrada a continuación; haciendo la diferencia entre las columnas 14, 15 y 16.

Aquí $P_o = P_i$ y $P_f = 0.756$ m

$$P_f = P_o - \frac{V_i^2}{2 * g} - h_f \quad [60]$$

Columna 18: Se coloca el diámetro del orificio asignado. $D_o = 0.00635$ m

Columna 19: Se calcula el área del orificio, con el diámetro anterior ubicado en la columna 18. $A_o = 000032 \text{ m}^2$

Columna 20: Se coloca el coeficiente de descarga $C_d = 0.73$

Columna 21: Se calcula el caudal de salida por el orificio, Q_s , mediante la siguiente ecuación y haciendo las respectivas operaciones con las columnas 7, 17, 19 y 20.

$$Q = C_d A_o \sqrt{2gP_f} \quad [61]$$

Dónde:

A_o : Es el área transversal del orificio.

$$Q_s = 0.000089 \text{ m}^3/\text{s}$$

Columna 22: Se calcula el caudal de salida pero en unidades de l/s, para esto se multiplica la columna 21 por 1000. $Q_s=0.089 \text{ l/s}$

2. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE LABORATORIO

En este capítulo se describe el procedimiento general para la construcción de los componentes del sistema, la tolva de cabeza constante; el vertedero triangular; el tanque recolector de agua y la cabeza giratoria.

Además se detalla la forma como se construye el montaje completo, con sus respectivos accesorios que este requiere para su funcionamiento.

Como productos del capítulo se obtuvo la construcción adecuada de cada uno de los componentes del montaje, cumpliendo con las medidas diseñadas y especificadas en el capítulo I, esto se pudo conseguir debido a la alta precisión al transformar la lámina de acero y de igual manera al tener un apropiado acabado de las piezas.

Como segundo producto del capítulo se alcanzó una construcción eficiente en el montaje total, ya que al encajar una pieza con otra no se presentaron irregularidades ni dificultades para empalmarlas entre sí.

Por último, se puede inferir que el diseño y construcción que se han realizado, dará paso a una calibración para cumplir con los objetivos enumerados en esta investigación.

2.1 DESCRIPCIÓN PARA LA CONTRUCCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA

2.1.1 Generalidades. Para la construcción de cada uno de los componentes del sistema fue necesaria la mano de obra calificada y equipos especializados, ya que el material que se utilizó para su formación fue lámina de acero de diferentes calibres según la ubicación de cada elemento.

La transformación de la lámina se realizó mediante herramientas especiales denominados troqueles o matrices, anclados con fuerza sobre prensas de gran presión y velocidad; esto implica precisión y perfección, que son características significativas para obtener los resultados esperados en la construcción y calibración del banco de pruebas para verificación del momento de momentum.

De manera general el procedimiento de estas herramientas se puede considerar: mediante una prensa, el troquel ejerce presión sobre el material, supera su límite elástico y actúa como fuerza para transformarlo, bien sea para cortar, doblar o

conformar una forma previamente definida. El lugar donde se llevó a cabo lo anteriormente descrito se denomina “Ferretalleres Industriales de Nariño”. Cabe anotar que la construcción de la cabeza giratoria se realizó en laboratorios de Mecánica de fluidos ya que, hay herramienta disponible para trabajar con pvc, el cual es material fundamental de este componente del equipo.

2.2 CONSTRUCCIÓN DE LA TOLVA DE CABEZA CONSTANTE

Tiene una sección de 45x45 cm y altura de 55cm, en su interior lleva un rebosadero con el objeto de evacuar los excesos de agua que se puedan presentar para mantener la cabeza constante en el sistema.

Esta construido en lámina de acero laminadas en caliente o HR calibre 12; en la parte inferior de la tolva existe un cono del cual se desprende un tubo a presión de 2” pvc el cual transportara el fluido a presión al dispositivo giratorio, en la parte intermedia del tubo se instaló una válvula de 2” pvc tipo compuerta, con el objeto de regular los caudales que maneja el sistema giratorio. Ver figura 11 y 12.



Figura 11. Imagen de la tolva de cabeza constante



Figura 12. Imagen interna de la tolva de cabeza constante

2.3 CONSTRUCCIÓN DE LA CABEZA GIRATORIA

Del final del tubo a presión de 2" se desprende la cabeza giratoria del equipo, la cual está compuesta por dos elementos, el dispositivo giratorio y los brazos giratorios. El sistema de brazos giratorios depende del modelo que se esté utilizando, pues estos no están fijos al dispositivo giratorio si no que están a presión y pueden ser fácilmente reemplazados utilizando una reducción o una ampliación dependiendo de la necesidad. Los diseños que se realizaron fueron: brazos de 1/2" perforados con 4 orificios de 1/4" por tubo; como segundo diseño brazos de 3/4" perforados con 3 orificios de 1/3" por tubo y finalmente brazos de 1/2" perforadas con 4 orificios de 1/4" por tubo, a diferencia con el primer diseño, en este las distancias entre orificios no son equidistantes. Todos los modelos llevan un tapón en la parte final.

Para la construcción se siguieron las instrucciones dadas por PAVCO, para la limpieza y pega de tuberías, para la apertura de los orificios se utilizó un taladro con una broca de diámetro según lo requiera el diseño. Ver figura 13.



Figura 13. Imagen de la cabeza giratoria.

2.4 CONSTRUCCIÓN DEL TANQUE RECOLECTOR DE AGUA

Para la construcción del tanque se utilizó lámina de acero HR calibre 12, efectuándose los cortes de la misma con un troquel para definir los cortes sin aristas ni elementos discontinuos.

Para la unión de las láminas externas del tanque se utilizó soldadura eléctrica SS6011 alrededor de la base de diámetro 1.5m y de las uniones, con el objeto de darle rigidez al tanque y no permitir fugas de agua; además debajo de la base del tanque se instaló un soporte metálico para asentar sobre el tanque.

En el extremo de la base se colocó un tubo Pvc de 2" que sirve de interconexión entre el tanque y el sistema de medición de caudales del montaje. Ver figura 14.



Figura 14. Imagen del tanque recolector de agua

2.5 CONSTRUCCIÓN DEL TANQUE DE SUCCIÓN

El vertedero se elaboró en lámina de acero HR calibre 12, con una sección de 45x45 cm y una altura de 50cm, se construyó con el troquel y las uniones se hicieron con soldadura eléctrica SS6011.

En el sitio de descarga se instaló una tubería de 1" conectada a la bomba impulsora con el objeto de recircular el agua al punto inicial. Ver figura 15.



Figura 15. Imagen del tanque recolector y aforador de caudal

2.6 MONTAJE FINALIZADO

Para la construcción y terminación del montaje, se unieron cuidadosamente todos los componentes nombrados y descritos anteriormente, usando los respectivos equipos y herramientas adecuadas para una mejor funcionalidad y aseguramiento en la toma de datos al realizar los ensayos que sean necesarios en la calibración del sistema que es la última etapa de esta investigación. Ver figura 16.



Figura 16. Imagen del montaje de laboratorio finalizado

2.7 COMENTARIOS DE CAPÍTULO

2.7.1 Dificultades en la construcción:

- Para realizar la construcción de las piezas compuestas por lámina de acero, fue necesario usar maquinaria especializada que no se encuentra en el laboratorio de Mecánica de fluidos de la Universidad de Nariño.
- Otro imprevisto en el proceso de construcción del montaje fue la necesidad de puntualidad en los cortes y en las medidas de materiales tales como tuberías y acrílico, ya que los cortes se hicieron con herramientas manuales que dificultan la precisión.

- Todas las dimensiones nominales de los tubos a presión en la tubería pvc, no se encontraron en el mercado, factor que restringe el diseño de algunos componentes tales como el tubo principal.

2.7.2 Recomendaciones:

- Ensamblar cada componente del sistema en conjunto, verificar que las medidas y acabados de cada componente sean los adecuados, para evitar posibles errores en la terminación del montaje.
- Ensamblar cada parte del sistema por separado y luego unir a medida que la construcción del montaje lo requiera.
- Realizar las medidas con el mismo sistema de unidad y con el mismo instrumento de medida para que la precisión sea mayor.
- Usar materiales de la mejor calidad sobre todo cuando se trata de uniones, porque si las partes no quedan bien pegadas habrán fugas que llevan a fallas en el banco de pruebas.

3. CALIBRACIÓN DEL MONTAJE DE LABORATORIO

En este capítulo se pretende determinar experimentalmente los caudales tanto en los orificios del aspersor como en el vertedero así como las revoluciones por minuto de los brazos del sistema; para los tres modelos propuestos en el capítulo I de diseño.

Para el efecto y una vez construido el equipo se inicia la etapa de calibración del vertedero triangular por el método volumétrico y se determina la curva de calibración por medio de la ecuación de vertedero triangular.

En la segunda etapa de este proceso se midieron por el método volumétrico los caudales en cada uno de los orificios para los diferentes modelos de brazos y las longitudes de separación entre orificios.

En la tercera evaluación se consideró el número de revoluciones por minuto para los diferentes caudales medidos en el vertedero, lo cual se consigue abriendo o cerrando la válvula que se encuentra en la tubería de entrada del montaje.

Una vez tomados los datos experimentales se procedió a efectuar las curvas de calibración de cada modelo, los cuales se los ingresa a la ecuación de momento y así poder comparar dichos resultados con los teóricos obtenidos en el capítulo de diseño y deducir si realmente la parte experimental se ajusta a los datos teóricos de la ecuación correspondiente.

3.1 MEDICIÓN, PROCESAMIENTO DE DATOS Y RESULTADOS

3.1.1 Procedimiento para la toma de los valores experimentales. Para la calibración del aforador triangular fue necesario tomar medidas de caudal vs altura, variando la cantidad de agua que circula por el sistema con la válvula de compuerta y se tomó la lectura cuando el nivel del agua en la tolva de cabeza constante se estabiliza, una vez tomada la altura se procedió a tomar tres valores de volumen con una probeta por unidad de tiempo, todo esto para calcular el caudal promedio correspondiente a cada altura, como se muestra en la tabla 2.

Para la calibración de los brazos se tomaron distintos valores de rpm vs H (cm), para esto fue necesario variar el caudal que circulaba por el sistema y tomar la altura del aforador triangular, esta toma de rpm se hizo alrededor de unas 4 a 5 veces para cada altura y con estos datos se calculó las rpm promedio. Para cambiar el valor de la altura lo que se hace es girar la válvula de compuerta hacia

la izquierda o derecha dependiendo si se quiere mayor o menor circulación de agua por el sistema.

Estos valores se muestran en la tabla N° 3 y este procedimiento se siguió para todos los modelos de brazos giratorios que se probaron.

3.1.2 Metodología para el procesamiento de los datos obtenidos en el laboratorio. Para el aforador triangular se organizaron los datos en una tabla de Excel y se calculó el valor promedio de caudal para cada altura, una vez hecho esto se graficaron los valores de Q (l/s) vs H (cm) y se realizó una regresión cuya línea de tendencia cortase la mayor cantidad de puntos de la gráfica, seguidamente se calculó la ecuación que mejor se ajusta a la trayectoria de los datos y se recalcularon unos nuevos valores de Q (l/s) vs H (cm) para graficarlos y de esta manera se obtuvo la gráfica teórica del aforador triangular en cuestión.

Para la calibración de los brazos perforados una vez obtenidos los valores de experimentales y calculadas las rpm vs H o caudal se graficaron los datos y se calculó la ecuación que mejor describe la trayectoria de los datos. Esta ecuación se utilizó para obtener de manera directa las rpm conociendo el caudal que circula por el sistema o la H del vertedero triangular. Cabe aclarar que cada juego de brazos tiene una ecuación diferente. Ver tabla 2.

3.2 CALIBRACIÓN DEL AFORADOR TRIANGULAR

Tabla 2. Datos experimentales obtenidos en el laboratorio

Carga (cm)	Volumen (l)	Tiempo (s)	Caudal (l/s)	Caudal promedio(l/s)
6,2	1,480	3,770	0,393	0,395
	1,060	2,640	0,402	
	1,530	3,910	0,391	
5,9	1,550	4,140	0,374	0,379
	1,030	2,730	0,377	
	1,240	3,230	0,384	
5,6	0,985	2,840	0,347	0,344
	1,250	3,640	0,343	
	1,320	3,860	0,342	
5,4	1,060	3,560	0,298	0,295
	1,190	4,020	0,296	
	0,840	2,880	0,292	
4,8	0,880	4,000	0,220	0,222
	0,790	3,540	0,223	
	1,030	4,600	0,224	
4,5	0,870	5,000	0,174	0,177
	0,820	4,630	0,177	
	0,660	3,660	0,180	
4,3	0,780	4,750	0,164	0,165
	0,650	3,910	0,166	
	0,590	3,560	0,166	

GRAFICA EXPERIMENTAL DE CAUDAL vs CARGA

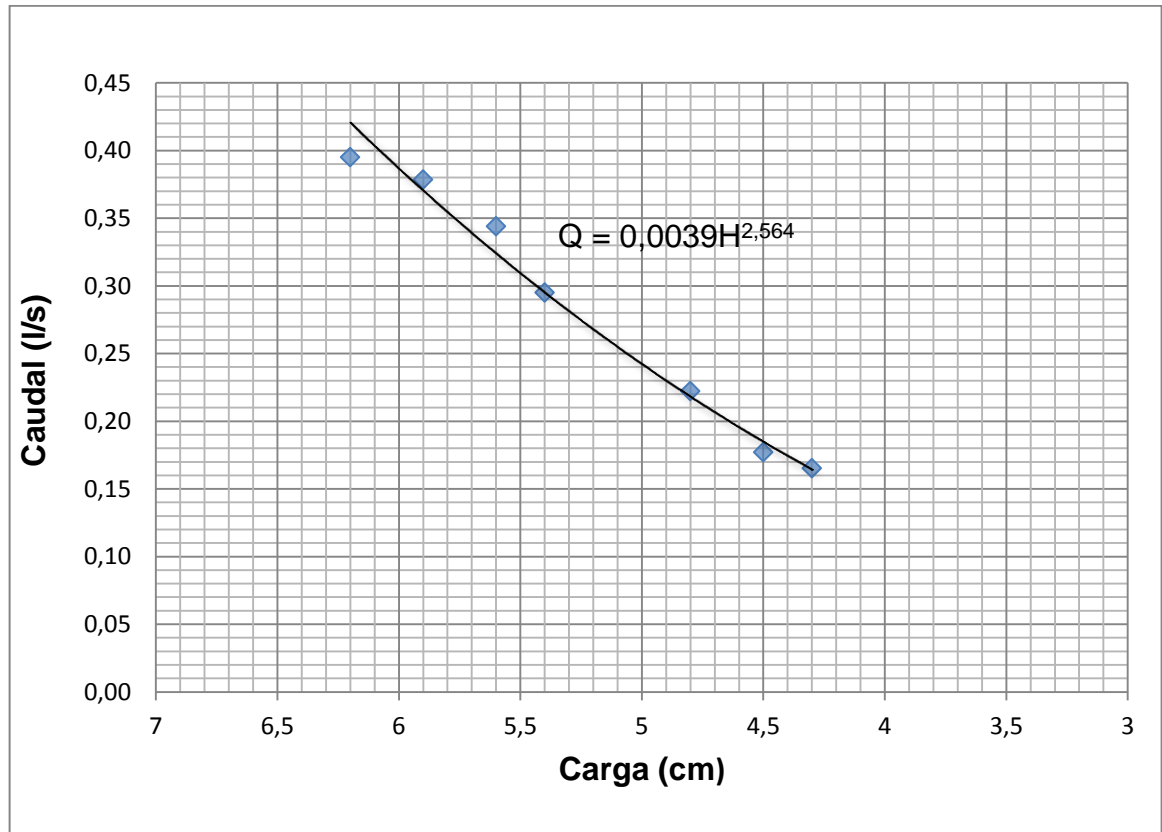


Figura 17. Valores experimentales de caudal vs carga (H)

Después de graficar los valores experimentales de caudal vs carga podemos deducir la ecuación que mejor describe la posición de cada punto:

$$Q = 0,039H^{2,564} \quad [62]$$

La anterior ecuación corresponde a la ecuación obtenida por correlación para calcular el caudal teniendo en cuenta la altura del agua en el aforador triangular. Q (l/s) y H (cm)

A continuación se muestran valores de caudal con respecto a la altura. Estos valores son calculados con la ecuación anterior.

Tabla 3. Valores teóricos de caudal vs carga

Carga (cm)	Caudal (l/s)
1	0,004
2	0,023
3	0,065
4	0,136
5	0,242
6	0,386
7	0,573
8	0,806
9	1,091
10	1,429
11	1,825
12	2,281
11,7	2,137

REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS DATOS TEÓRICOS DE CAUDAL vs CARGA

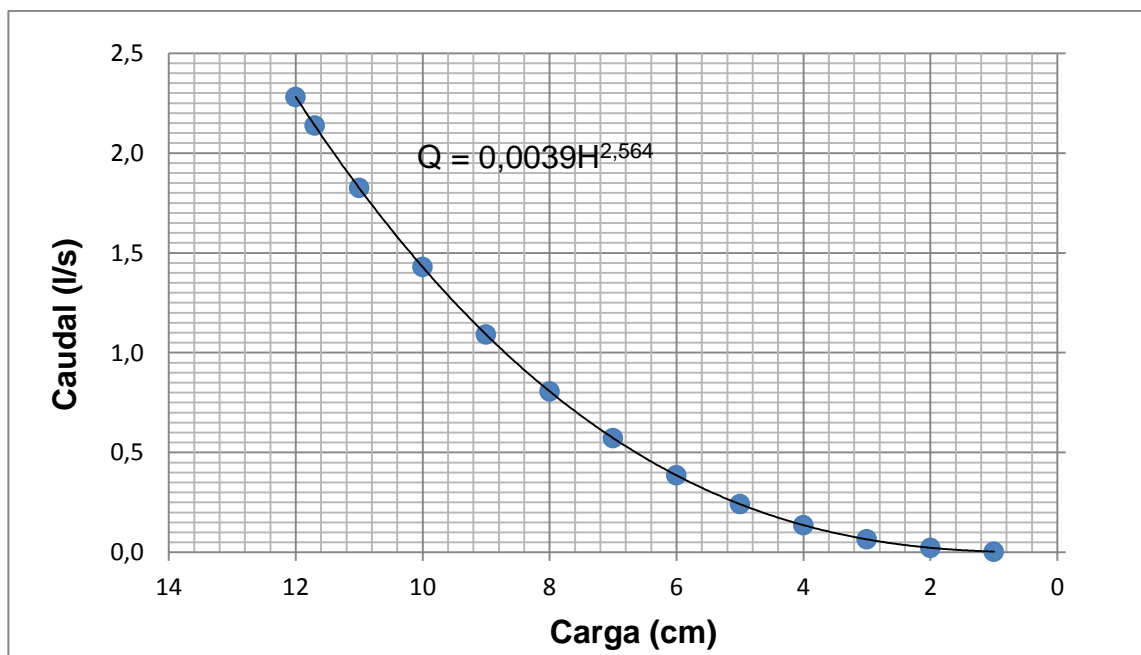


Figura 18. Representación gráfica de los valores teóricos de caudal vs carga (H)

Esta gráfica es el resumen de la calibración del aforador triangular y es la que se utilizó en el montaje de laboratorio para medir el caudal.

3.3 CALIBRACIÓN DE LOS BRAZOS GIRATORIOS

3.3.1 Modelo N° 1

Tabla 4. Datos experimentales obtenidos en el laboratorio

Carga (cm)	Caudal (l/s)	rpm	rpm promedio
5,90	0,37	37,94	38,00
		38,00	
		38,00	
		38,06	
5,40	0,29	29,00	28,97
		29,00	
		28,94	
		28,94	
4,80	0,22	18,00	18,00
		18,00	
		17,88	
		18,12	
4,50	0,18	11,00	10,94
		11,00	
		10,88	
		10,88	
4,30	0,16	9,00	9,06
		9,00	
		8,50	
		9,75	
4,00	0,14	2,50	2,54
		2,50	
		2,5	
		2,67	
3,80	0,12	0,00	0,00

REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS DATOS EXPERIMENTALES DE rpm vs CARGA (cm)

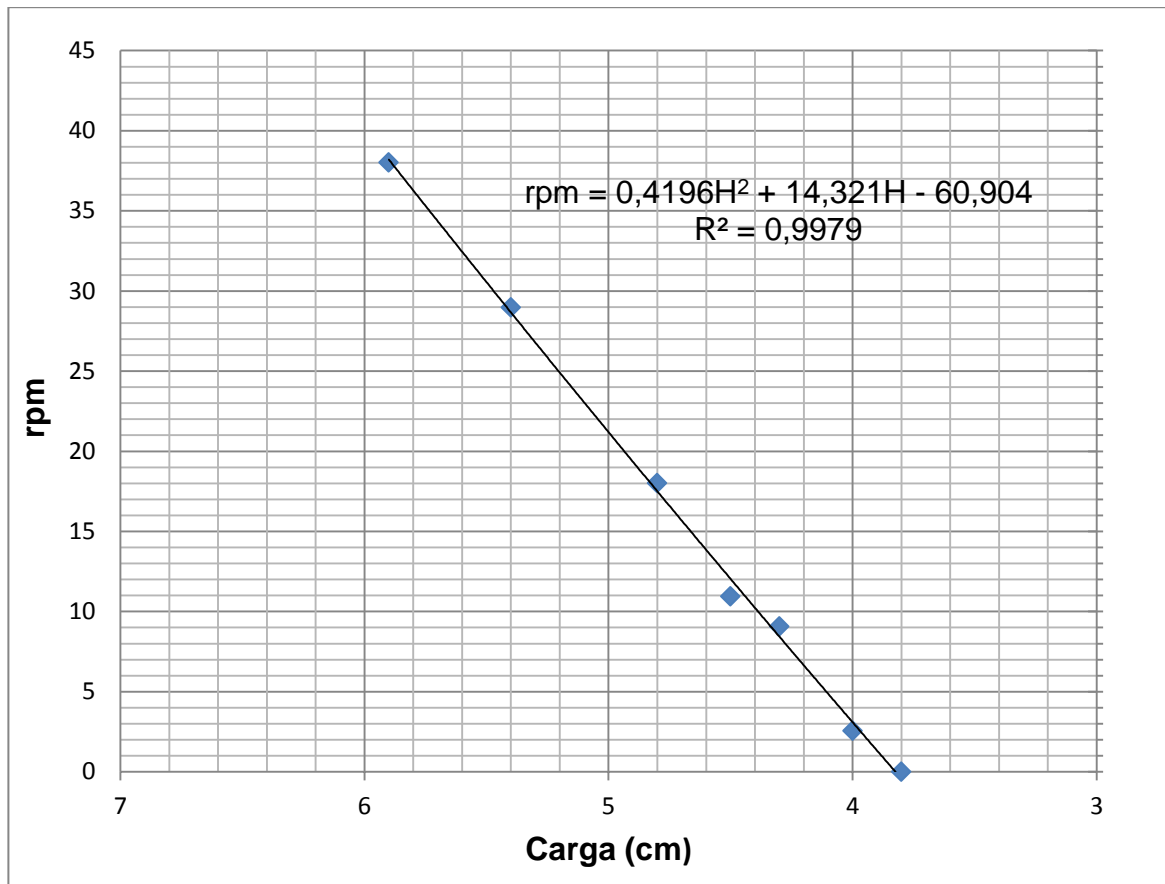


Figura 19. Contiene valores experimentales de rpm vs carga (cm)

En la figura 19, se observa la tendencia cuadrática de los datos experimentales obtenidos en el laboratorio de las rpm vs la carga (H) para el aspersor. Luego de graficar los valores obtenidos se encuentra que las rpm siguen la ecuación [63] polinómica de orden 2.

$$\text{rpm} = 0,4196H^2 + 14,321H - 60,904 \quad [63]$$

Con esta ecuación se calculan las revoluciones por minuto del aspersor teniendo en cuenta la carga (H) del aforador triangular.

GRAFICA EXPERIMENTAL DE rpm vs CAUDAL (l/s)

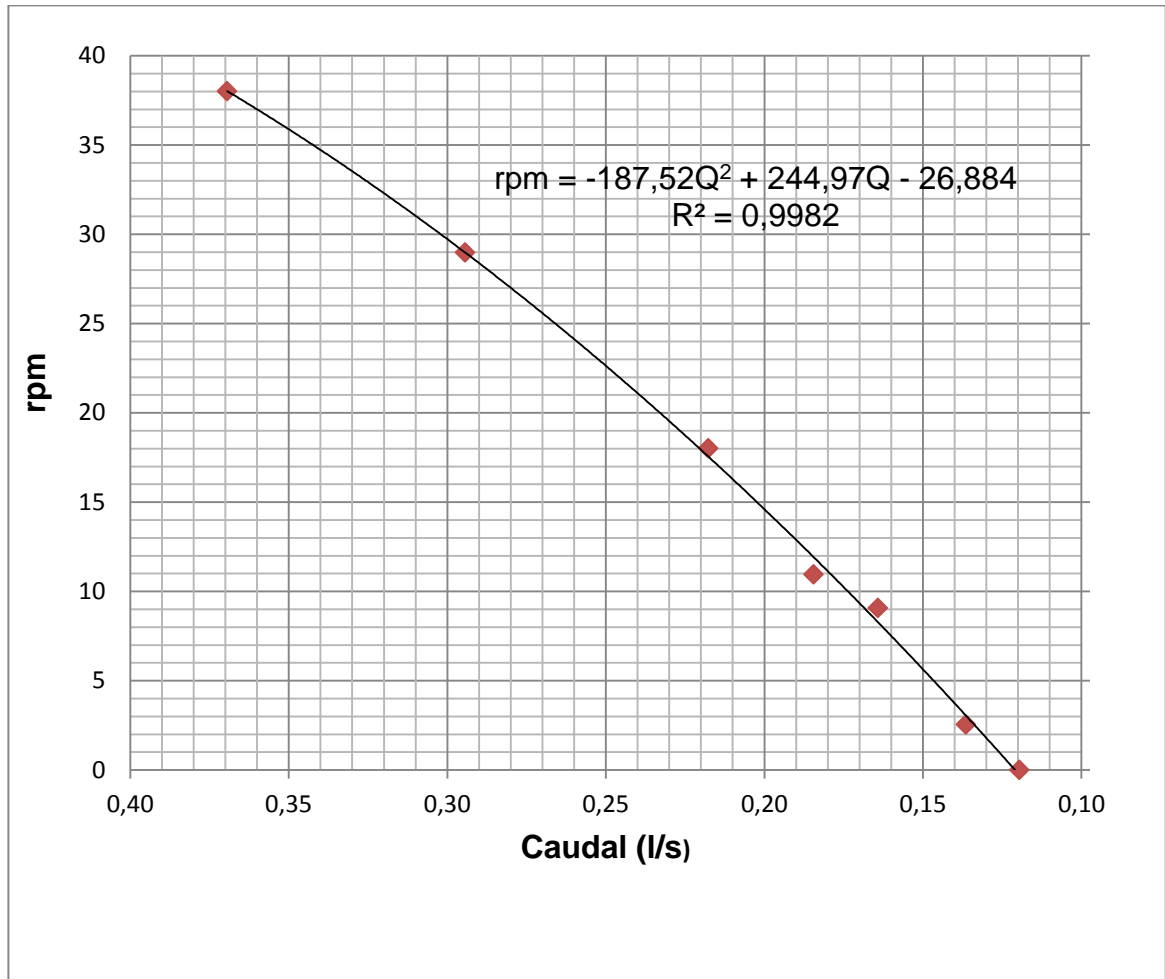


Figura 20. Contiene valores experimentales de rpm vs caudal (l/s)

La figura 20, muestra la ecuación para encontrar las revoluciones por minuto del aspersor teniendo en cuenta el caudal que circula por él, la ecuación es:

$$rpm = -187.52Q^2 + 244.9Q - 26.884 \quad [64]$$

Esta ecuación se cumplirá para cualquier caudal.

3.3.2 Modelo N° 2

Tabla 5. Datos experimentales obtenidos en el laboratorio

Carga (cm)	Caudal (l/s)	rpm	rpm Promedio
6,20	0,42	49,00	49,63
		50,00	
		50,50	
		49,00	
5,90	0,37	41,00	40,75
		40,50	
		41,00	
		40,50	
5,00	0,24	21,00	20,88
		21,00	
		20,50	
		21,00	
4,40	0,17	12,00	12,00
		12,00	
		12,00	
		12,00	
4,10	0,15	8,00	8,00
		8,00	
		8,00	
		8,00	
4,00	0,14	5,00	5,00
		5,00	
		5	
		5,00	
3,60	0,10	0,00	0,00

REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS DATOS EXPERIMENTALES DE rpm vs CARGA (cm)

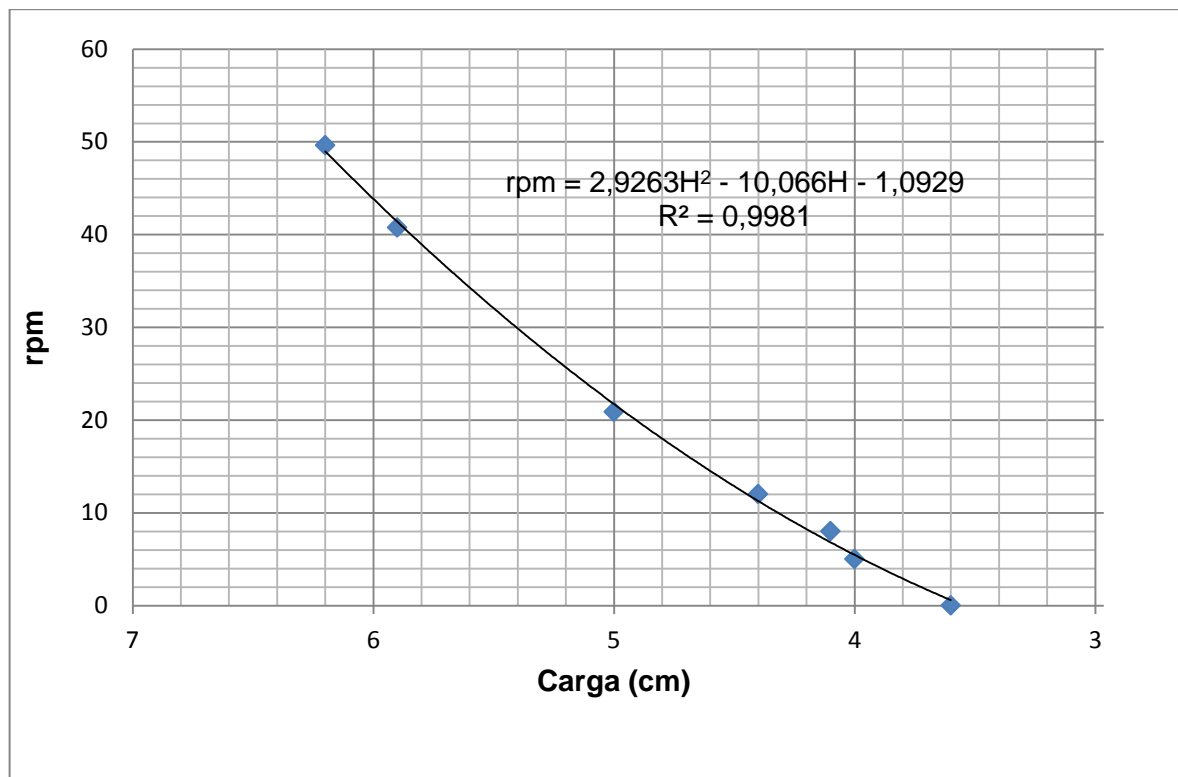


Figura 21. Contiene valores experimentales de rpm vs carga (cm)

En la figura 21, se observa la tendencia cuadrática de los datos experimentales obtenidos en el laboratorio de las rpm vs la carga (H) para el aspensor. Luego de graficar los valores obtenidos se encuentra que las rpm siguen la ecuación [65] polinómica de orden 2.

$$rpm = 2,9263H^2 + 10,066 H - 1,093 \quad [65]$$

Con esta ecuación se calcula las revoluciones por minuto del aspensor teniendo en cuenta la carga (H) del aforador triangular.

GRAFICA EXPERIMENTAL DE rpm vs CAUDAL (l/s)

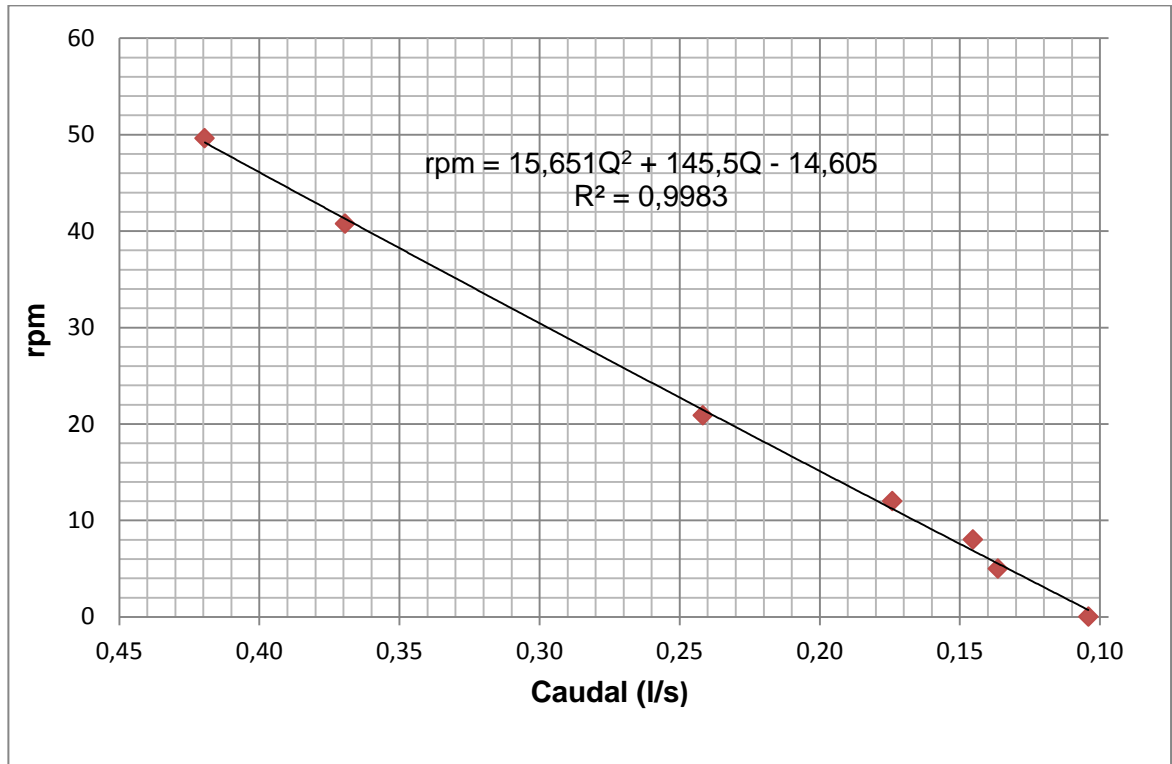


Figura 22. Contiene valores experimentales de rpm vs caudal (l/s)

La figura 22, muestra la ecuación para encontrar las revoluciones por minuto del aspersor teniendo en cuenta el caudal que circula por él, la ecuación es:

$$rpm = 15,651Q^2 + 145,5Q - 14,605 \quad [66]$$

Esta ecuación se cumplirá para cualquier caudal.

3.3.3 Modelo N° 3:

Tabla 6. Datos experimentales obtenidos en el laboratorio

Carga (cm)	Caudal (l/s)	rpm	rpm Promedio
6,20	0,42	50,00	50,00
		50,00	
		50,00	
		50,00	
5,90	0,37	40,00	40,00
		40,00	
		40,00	
		40,00	
5,20	0,27	25,00	25,10
		25,00	
		25,20	
		25,20	
4,40	0,17	10,00	10,00
		10,00	
		10,00	
		10,00	
4,20	0,15	7,75	7,75
		7,75	
		7,75	
		7,75	
3,50	0,10	0,00	0,00

REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS DATOS EXPERIMENTALES DE rpm vs CARGA (cm)

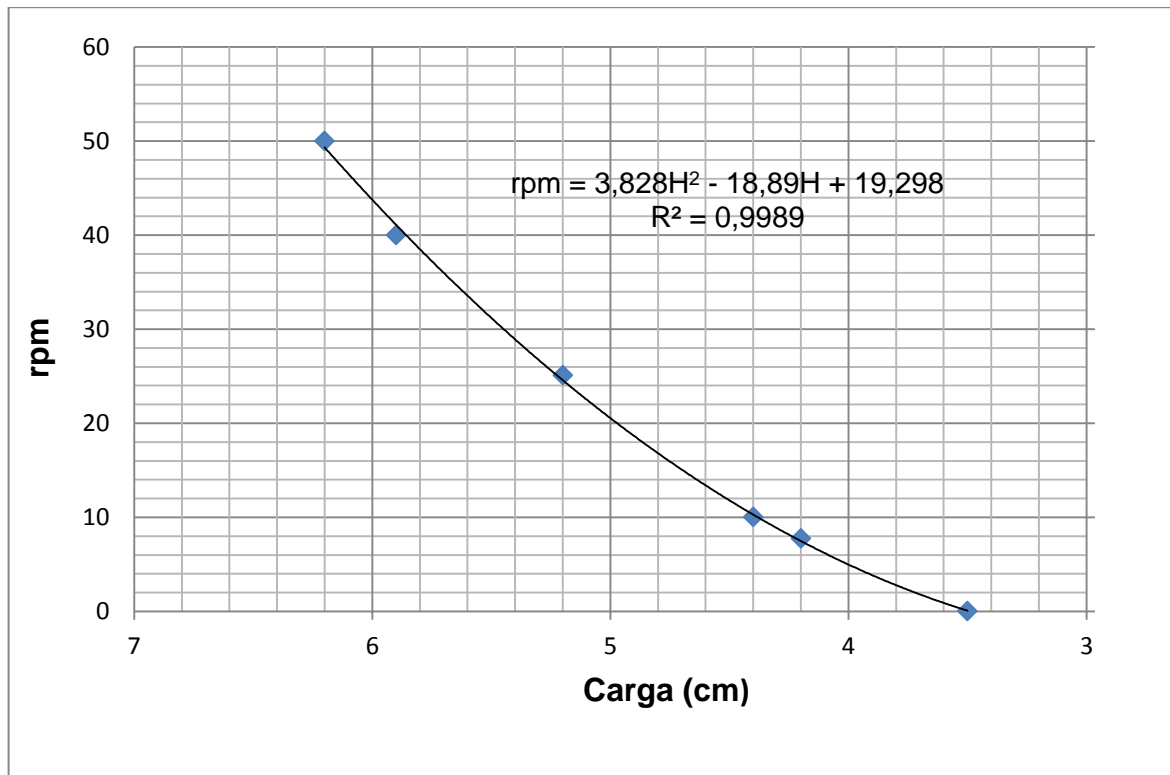


Figura 23. Contiene valores experimentales de rpm vs carga (cm)

En la figura 23, se observa la tendencia cuadrática de los datos experimentales obtenidos en el laboratorio de las rpm vs la carga (H) para el aspersor. Luego de graficar los valores obtenidos se encuentra que las rpm siguen la ecuación [65] polinómica de orden 2.

$$rpm = 3,828H^2 + 18,89H - 19,298 \quad [67]$$

Con esta ecuación se calcula las revoluciones por minuto del aspersor teniendo en cuenta la carga (H) del aforador triangular.

GRAFICA EXPERIMENTAL DE rpm vs CAUDAL (l/s)

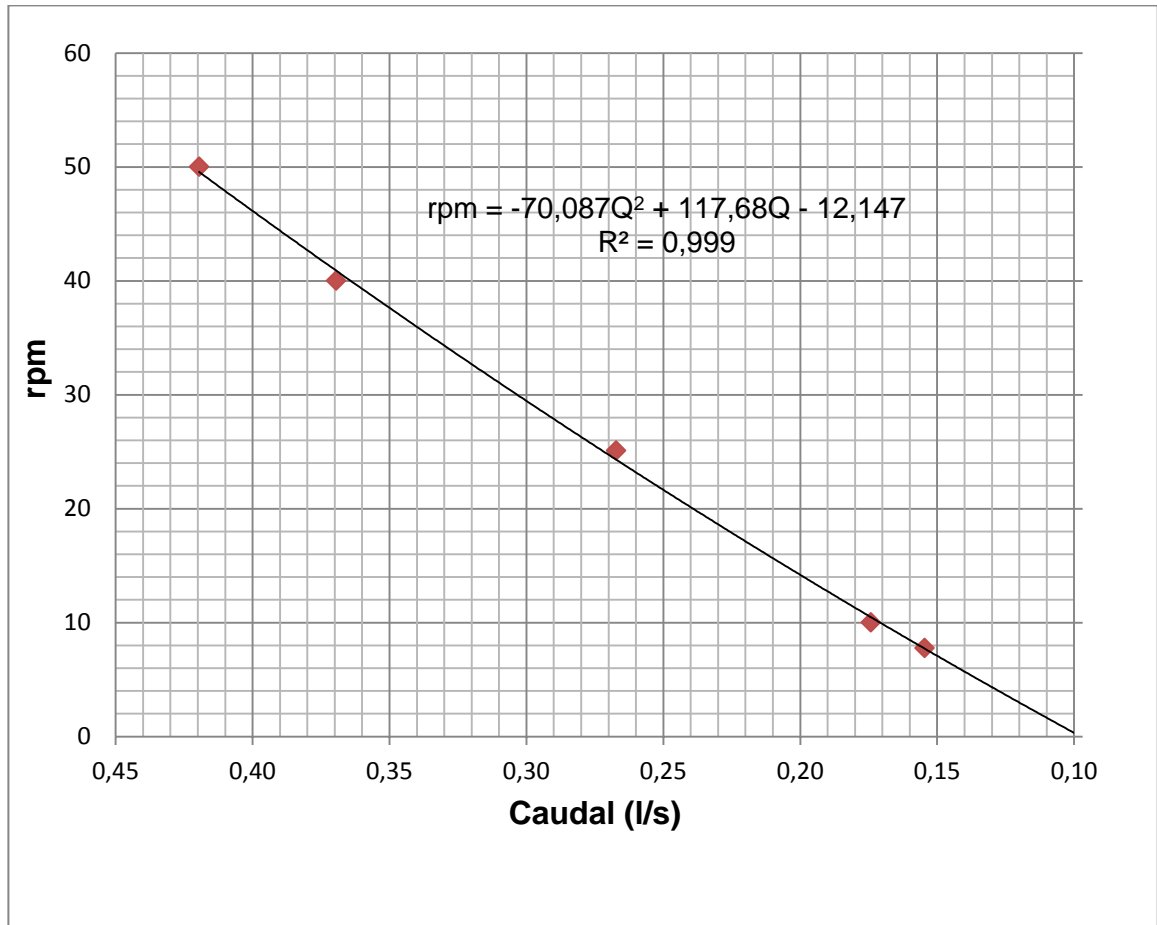


Figura 24. Contiene valores experimentales de rpm vs caudal (l/s)

La figura 24, muestra la ecuación para encontrar las revoluciones por minuto del aspersor teniendo en cuenta el caudal que circula por él, la ecuación es:

$$\text{rpm} = -70,087Q^2 + 117,68Q - 12,147 \quad [68]$$

Esta ecuación se cumplirá para cualquier caudal.

3.4 COMPARACIONES

Para cumplir con los objetivos planteados en esta investigación se desarrolló una prueba para cada modelo de brazos donde se midió el caudal que sale por cada orificio y se calculó las revoluciones por minuto con la ecuación [20],
$$\omega = \frac{2\pi}{60} \left(\frac{[V_{t1}R_1 + V_{t2}R_2 + V_{t3}R_3 + V_{t4}R_4]}{[R^2_1 + R^2_2 + R^2_3 + R^2_4]} \right)$$
 que fue desarrollada en el capítulo I y cuyos

valores fueron calculados según el anexo D que corresponde a la guía de laboratorio de este banco de pruebas.

Además estas revoluciones fueron comparadas con las revoluciones calculadas con las curvas de calibración de cada modelo con su respectiva ecuación.

Por otra parte en el capítulo I se especificó una solución para cada modelo de aspersor cuyos valores de “ ω ” se calcularon y fueron comparados con las curvas de calibración de cada modelo.

Para finalizar los cálculos en cada modelo se calculó el momento resistente (Γ_r) que se puede definir como la oposición al movimiento giratorio debido al peso de los brazos, la inercia de la cabeza giratoria y la fricción interna entre las partes del sistema giratorio, el cual se asumió como cero en la deducción teórica, este momento fue calculado con la diferencia entre las rpm teóricas y las rpm experimentales, obtenidas con las curvas de calibración para cada modelo. Uno de los significados de este momento es que es el momento resistente al giro en la práctica, el cual no es posible reducirlo a cero.

3.5 CÁLCULO DE ERRORES

3.5.1 Modelo N° 1:

a. Datos de entrada tomados del capítulo I

- $Q = 0,38$ l/s
- ω teóricas = 41,92 rpm calculadas con la ecuación [20]
- ω experimental calculada con las curvas de calibración:
 $\omega = -187.52 (0,38)^2 + 244.9 (0,38) - 26.884 = 39,12$ rpm
- $\Delta\omega = 41,92$ rpm – 39,12 rpm
- $\Delta\omega = 2,8$ rpm = 0.0467 rps

Cálculo del error según las revoluciones por minuto (rpm):

$$\text{Error} = (39,12 - 41,92) / 41,92 = 7\%$$

Cálculo del momento resistente (Γ_r) aplicando la ecuación [1.11] del anexo D:

$$\Gamma_r = \frac{\gamma}{g} 2[(Q_1(V_{t1} - \Delta\omega R_1)R_1 + (Q_2(V_{t2} - \Delta\omega R_2)R_2 + (Q_3(V_{t3} - \Delta\omega R_3)R_3 + (Q_4(V_{t4} - \Delta\omega R_4)R_4]$$

$$\Gamma_r = \frac{1000}{9,8} * 2([0.09(3 - 0.046 * 0.15)0.15] + [0.095(2.3 - 0.046 * 0.3)0.3] + [0.1(1.5 - 0.046 * 0.45)0.45] + [0.088(0.7 - 0.046 * 0.6)0.6])$$

$$\Gamma_r = 0.043 \text{ kg} - \text{m}$$

- **Caudal con el que se trabajó en el laboratorio: Q =0,19 l/s**

Tabla 7. Valores experimentales tomados según anexo D (guía de laboratorio) para el modelo n° 1

Orificio 1 (0,15)			Orificio 2 (0,3)			Orificio 3 (0,45)			Orificio 4 (0,6)		
t (s)	V (ml)	Q ₁ (ml/s)	t (s)	V (ml)	Q ₂ (ml/s)	t (s)	V (ml)	Q ₃ (ml/s)	t (s)	V (ml)	Q ₄ (ml/s)
0,94	32	34,04	1,06	44	41,51	3,02	143	47,35	3,84	258	67,19
1,05	37	35,24	1,32	56	42,42	1,66	79	47,59	2,63	176	66,92
1,26	41	32,54	0,95	42	44,21	3,19	147	46,08	3,59	238	66,30
1,48	49	33,11	1,05	41	39,05	2,39	112	46,86	2,57	171	66,54
0,79	27	34,18	0,98	39	39,80	2,2	105	47,73	2,76	185	67,03
Q₁ Prom		33,82	Q₂ Prom		41,40	Q₃ Prom		47,12	Q₄ Prom		66,79

$$\omega \text{ calculada con fórmulas} = \frac{(2*\pi)(33,82*0,15+41,40*0,3+47,12*0,45+60,79*0,6)}{127*(0,15^2+0,3^2+0,45^2+0,6^2)} = 11,64 \text{ rpm}$$

ω experimental calculada con las curvas de calibración:

$$\omega \text{ experimental} = -187.52 (0,19)^2 + 244.9 (0,19) - 26.884 = 12,89 \text{ rpm}$$

$$\text{Error según las revoluciones por minuto} = (12,89 - 11,64) / (11,64) = 10\%$$

3.5.2 Modelo N° 2:

a. Datos de entrada tomados del capítulo I:

- Q = 0,40 l/s
- ω teóricas = 47,61 rpm calculadas con la ecuación [20]
- rpm experimental calculada con las curvas de calibración:
 $\omega = 15,651(0,4)^2 + 145,5(0,4) - 14,605 = 46,1 \text{ rpm}$
- $\Delta\omega = 47,61 \text{ rpm} - 46,1 \text{ rpm}$
- $\Delta\omega = 1,51 \text{ rpm} = 0.0252 \text{ rps}$

Cálculo del error según las revoluciones por minuto (rpm):

$$\text{Error} = (47,61 - 46,1) / 47,61 = 1\%$$

Cálculo del momento resistente (Γ_r) aplicando la ecuación [1.11] del anexo D:

$$\Gamma_r = \frac{1000}{9,8} * 2 ([0,08(3,24 - 0,025 * 0,1)0,1] + [0,09(2,56 - 0,025 * 0,2)0,2] + [0,1(1,82 - 0,025 * 0,4)0,4] + [0,11(1 - 0,025 * 0,6)0,6])$$

$$\Gamma_r = 0,044 \text{ kg} - \text{m}$$

- **Caudal con el que se trabajó en el laboratorio: Q = 0,16 l/s**

Tabla 8. Valores experimentales tomados según anexo D (guía de laboratorio) para el modelo 2

Orificio 1 (0,10)			Orificio 2 (0,20)			Orificio 3 (0,40)			Orificio 4 (0,60)		
t (s)	V (ml)	Q ₁ (ml/s)	t (s)	V (ml)	Q ₂ (ml/s)	t (s)	V (ml)	Q ₃ (ml/s)	t (s)	V (ml)	Q ₄ (ml/s)
1,72	50	29,07	1,69	52	30,77	1,08	44	40,74	0,62	31	50,00
1,4	41	29,29	1,32	40	30,30	0,96	40	41,67	0,52	27	51,92
1,46	43	29,45	1,85	59	31,89	1,13	47	41,59	1,02	52	50,98
1,51	45	29,80	2,08	63	30,29	0,89	38	42,70	1,12	58	51,79
1,32	39	29,55	1,21	37	30,58	1,11	45	40,54	1,21	62	51,24
Q₁ Prom		29,43	Q₂ Prom		30,77	Q₃ Prom		41,45	Q₄ Prom		51,19

$$\omega \text{ calculada con fórmulas} = \frac{(2 * \pi)(29,43 * 0,1 + 30,77 * 0,2 + 41,45 * 0,4 + 51,19 * 0,6)}{127 * (0,1^2 + 0,2^2 + 0,4^2 + 0,6^2)} = 9,79 \text{ rpm}$$

ω experimental calculada con las curvas de calibración:

$$\omega \text{ experimental} = 15,651(0,16)^2 + 145,5(0,16) - 14,605 = 9,1 \text{ rpm}$$

$$\text{Error según las revoluciones por minuto} = (9,79 - 9,1) / (9,79) = 2\%$$

3.5.3 Modelo N° 3:

a. Datos de entrada tomados del capítulo I:

- Q = 0,52 l/s

- ω Teóricas = 32,05 rpm calculadas con la ecuación [20]
- ω experimental calculada con las curvas de calibración:
 $\omega = -70,087(0,52)^2 + 117,68(0,52) - 12,147 = 30,1$
- $\Delta\omega = 32,05 \text{ rpm} - 30,1 \text{ rpm}$
- $\Delta\omega = 1,95 \text{ rpm} = 0.0325 \text{ rps}$

Cálculo del error según las revoluciones por minuto (rpm):

$$\text{Error} = (32,05 - 30,1) / 32,05 = 1\%$$

Cálculo del momento resistente (Γ_r) aplicando la ecuación [1.11] del anexo D:

$$\Gamma_r = \frac{1000}{9,8} * 2 ([0.17(1.86 - 0.0325 * 0.1)0.1] + [0.175(1.2 - 0.0325 * 0.2)0.2] + [0.18(0.65 - 0.0325 * 0.5)0.5])$$

$$\Gamma_{\text{resistente}} = 0.027 \text{ kg} - \text{m}$$

- **Caudal con el que se trabajó en el laboratorio: Q = 0,22 l/s**

Tabla 9. Valores experimentales tomados según anexo D (guía de laboratorio) para el modelo 3

Orificio 1 (0,10)			Orificio 2 (0,20)			Orificio 3 (0,50)		
t (s)	V (ml)	Q ₁ (ml/s)	t (s)	V (ml)	Q ₂ (ml/s)	t (s)	V (ml)	Q ₃ (ml/s)
1,92	65	33,85	3,12	118	37,82	1,76	79	44,89
1,94	66	34,02	4,03	142	35,24	1,72	79	45,93
2,41	79	32,78	3,53	132	37,39	1,78	81	45,51
3,46	110	31,79	3,78	136	35,98	2,03	92	45,32
1,32	44	33,33	1,21	44	36,36	1,11	52	46,85
Q₁ Prom		33,16	Q₂ Prom		36,56	Q₃ Prom		45,70

$$\omega \text{ Calculada con fórmulas} = \frac{(2 * \pi)(33,16 * 0,1 + 36,56 * 0,2 + 45,70 * 0,5)}{127 * (0,1^2 + 0,2^2 + 0,5^2)} = 11,04 \text{ rpm}$$

ω Experimental calculada con las curvas de calibración:

$$\omega \text{ Experimental} = -70,087(0,22)^2 + 117,68(0,22) - 12,147 = 10,35 \text{ rpm}$$

$$\text{Error según las revoluciones por minuto (rpm)} = (11,04 - 10,35) / (11,04) = 6\%$$

4. CONCLUSIONES

Se logró construir y calibrar el banco de pruebas para el estudio de la cantidad de movimiento angular, el cual es didáctico y fácilmente operable, donde los estudiantes de mecánica de fluidos de los diferentes programas de la Universidad de Nariño podrán hacer sus prácticas de laboratorio con un alto estándar académico.

Las revoluciones calculadas con el procedimiento teórico descrito en el capítulo I y las revoluciones obtenidas con las curvas de calibración son similares, con una pequeña diferencia, debido al par resistente que ejercen los componentes mecánicos, los cuales no son tenidos en cuenta en la deducción de la ecuación. Siendo las revoluciones medidas en el banco de pruebas un poco menores que las calculadas, como se esperaba.

El momento resistente (Γ_r) es similar para el modelo de brazos 1 y 2 debido a que presentan dimensiones similares de longitud, diámetro y la misma cantidad de orificios, a diferencia del momento resistente (Γ_r) calculado para el modelo 3, ya que este modelo presenta otra longitud otra distribución de orificios y diámetro de orificios diferente.

Si se observa el valor del caudal promedio que sale por cada orificio en la tabla N°7, N°8 y N°9 se puede inferir que se satisface la teoría de líneas de presión en un brazo distribuidor de agua. (Arboleda, 2000). Donde los caudales que salen por el orificio más cercano al punto pivote es menor que el caudal que sale por el orificio situado al extremo opuesto del punto pivote.

Las rpm del aspersionador y para cada juego de brazos se pueden calcular con la curva de calibración de rpm vs Q o rpm vs H sin que exista variación notable entre ambos cálculos. Además estas correlaciones arrojaron un valor R^2 muy cercano a 1.0.

Los datos experimentales mostrados permiten determinar que el diseño, la construcción y la calibración del dispositivo para comprobar la ecuación de momento de momentum (cantidad de movimiento angular), se efectuaron de una manera adecuada de acuerdo a lo planteado en la parte teórica del proyecto.

5. RECOMENDACIONES

Realizar la solución hidráulica de los diferentes modelos de brazos propuestos los cuales se muestran en los anexos A, B Y C, y tener en cuenta los siguientes aspectos.

El caudal inicial Q del tramo 2 resulta de la diferencia entre el caudal inicial del tramo 1 y el caudal de salida del mismo tramo.

La presión inicial del tramo 2 es la presión final del tramo 1

Los cálculos para todos los modelos de brazos terminan cuando las iteraciones demuestren que la suma de caudales de salida es igual al caudal inicial del tramo 1, (caudal de entrada).

Haciendo el mismo procedimiento anterior para los 3 modelos, se obtienen las tablas mostradas en los anexos A, B, Y C.

BIBLIOGRAFÍA

ARBOLEDA, A. Teoría y Práctica de la purificación del agua. 3ª ed. México: McGraw-Hill, 2000. 320 p.

GÓMEZ, C. Estudio y Patronamiento de vertederos. Laboratorio 9. México: s.n 2010. 150 p.

GÓMEZ, H.J; SÁNCHEZ, I. y GARCÍA R. Guía de laboratorios de mecánica de fluidos. San Juan de Pasto: Universidad de Nariño, 2010. 220 p.

SOTELO, Gilberto. Hidráulica General; Volúmenes I y II. México: Limusa S.A., 2002. 561 p.

STREETER, Victor; WYLIE, Benjamin y BEDFORD, Keith. Mecánica de los Fluidos. 9ª ed. Bogotá: McGraw-Hill, 2000. 740 p.

NETGRAFIA

Disponible en Internet:

http://www.mecanicadefluidos/Velocidad_angular (21 mayo 2012)

<http://www.mecanicadefluidos/Factordefriccion> (22 mayo 2012)

http://www.hidráulica.org/numero_de_Reynolds (22 mayo 2012)

<http://www.hidráulica.org/Densidad> (22 mayo 2012)

<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/flujoentuberias> (23 mayo 2012)

<http://www.mecanicadefluidos/Aspersor> (31 mayo 2012)

www.fisicaenflash.es/dinamica/dinamicahtm. (23 mayo 2012)

<http://filtrospec.blogspot.com/2012/03/distribucion-de-los-filtros.html> (23 mayo 2012)

http://www.ecured.cu/index.php/Riego_por_Aspersi%C3%B3n (23 mayo 2012)

ANEXOS

ANEXO A: SOLUCIÓN HIDRÁULICA PARA EL MODELO N° 1

Características del modelo:

1. Diámetro del tubo del aspersor = 1/2"
2. Diámetro del orificio de salida del agua = 1/4"
3. Diámetro del tubo principal 2"

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Número de tramos	Nudo inicial (i)	Nudo final (f)	L _o (m)	K _s (m)	D _b (m)	Q (m ³ /s)	At (m ²)	velocidad (m/s)
1	0	1	0,15	0,0000015	0,0127	0,00038	0,000127	3,000
2	1	2	0,15	0,0000015	0,0127	0,00029	0,000127	2,297
3	2	3	0,15	0,0000015	0,0127	0,00020	0,000127	1,544
4	3	4	0,15	0,0000015	0,0127	0,00009	0,000127	0,696

10	11	12	13	14	15	16	17	18
T (°C)	V _w (m ² /s)	NR	f (fricción)	H _f (m)	V ² /2g	P _i (m)	P _f (m)	D _o (m)
18	1,0168E-06	37467,7	0,0222	0,1203	0,4591	1,335	0,756	0,00635
18	1,0168E-06	28695,8	0,0236	0,0751	0,2693	0,756	0,870	0,00635
18	1,0168E-06	19281,7	0,0261	0,0374	0,1216	0,870	1,101	0,00635
18	1,0168E-06	8693,7	0,0322	0,0094	0,0247	1,101	1,263	0,00635

19	20	21	22	23
A _o (m)	C _d	Q _s (m ³ /s)	Q _s (l/s)	w (rpm)
0,000032	0,73	0,000089	0,089	42
0,000032	0,73	0,000095	0,095	
0,000032	0,73	0,000107	0,107	
0,000032	0,73	0,000088	0,088	
Σ TOTAL =		0,00038	0,38	

ANEXO B: SOLUCIÓN HIDRÁULICA PARA EL MODELO N° 2

Características del modelo:

1. Diámetro del tubo del aspersor = 1/2"
2. Diámetro del orificio de salida del agua = 1/4"
3. Diámetro del tubo principal 2"

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Número de tramos	Nudo inicial (i)	Nudo final (f)	Lo (m)	Ks (m)	D _b (m)	Q (m ³ /s)	At (m ²)	velocidad (m/s)
1	0	1	0,1	0,0000015	0,0127	0,00041	0,000127	3,237
2	1	2	0,1	0,0000015	0,0127	0,00032	0,000127	2,558
3	2	3	0,2	0,0000015	0,0127	0,00023	0,000127	1,816
4	3	4	0,2	0,0000015	0,0127	0,00013	0,000127	0,993

10	11	12	13	14	15	16	17	18
T (°C)	V _w (m ² /s)	NR	f (fricción)	H _f (m)	V ² /2g	P _i (m)	P _f (m)	D _o (m)
18	1,0168E-06	40425,6	0,0218	0,0917	0,5345	1,331	0,705	0,00635
18	1,0168E-06	31953,1	0,0230	0,0605	0,3339	0,705	0,845	0,00635
18	1,0168E-06	22677,1	0,0250	0,0663	0,1682	0,845	1,036	0,00635
18	1,0168E-06	12405,2	0,0292	0,0232	0,0503	1,036	1,191	0,00635

19	20	21	22	23
A _o (m)	Cd	Q _s (m ³ /s)	Q _s (l/s)	w (rpm)
0,000032	0,73	0,000086	0,086	47,65
0,000032	0,73	0,000094	0,094	
0,000032	0,73	0,000104	0,104	
0,000032	0,73	0,000112	0,112	
		0,00040	0,40	

ANEXO C: SOLUCIÓN HIDRÁULICA PARA EL MODELO N° 3

Características del modelo:

1. Diámetro del tubo del aspersor = 3/4"
2. Diámetro del orificio de salida del agua = 1/3"
3. Diámetro del tubo principal 2"

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Número de tramos	Nudo inicial (i)	Nudo final (f)	Lo (m)	Ks (m)	D _b (m)	Q (m ³ /s)	At (m ²)	velocidad (m/s)
1	0	1	0,1	0,0000015	0,01905	0,00053	0,000285	1,859
2	1	2	0,1	0,0000015	0,01905	0,00036	0,000285	1,267
3	2	3	0,3	0,0000015	0,01905	0,00019	0,000285	0,652

10	11	12	13	14	15	16	17	18
T (°C)	V _w (m ² /s)	NR	f (fricción)	H _f (m)	V ² /2g	P _i (m)	P _f (m)	D _o (m)
18	1,0678E-06	33174,0	0,0228	0,0211	0,1764	1,313	1,115	0,00794
18	1,0678E-06	22597,5	0,0250	0,0108	0,0819	1,115	1,199	0,00794
18	1,0678E-06	11630,7	0,0297	0,0102	0,0217	1,199	1,270	0,00794

19	20	21	22	23
A _o (m)	Cd	Q _s (m ³ /s)	Q _s (l/s)	w (rpm)
0,000050	0,73	0,000169	0,169	32,05
0,000050	0,73	0,000175	0,175	
0,000050	0,73	0,000180	0,180	
		0,00052	0,52	

ANEXO D: GUÍA DE LABORATORIOS

Con base al banco de pruebas construido y con el análisis teórico realizado, se elaboró la guía de laboratorio, para que sea desarrollada por los estudiantes de Mecánica de fluidos, que se dicta en los diferentes programas académicos de la Universidad de Nariño. Esta guía se indica en el Anexo D, en el formato dado por la unidad de laboratorios, para elaboración de guía.

ANEXO E: PLANOS DETALLADOS DEL MONTAJE DE LABORATORIO