



UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISION DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA Y METALURGIA

**PROTOTIPO EXPERIMENTAL PARA LA
CARACTERIZACION DE BOMBAS EN SERIE Y
EN PARALELO**

Tesis

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUIMICO

Presenta

VALENCIA MALDONADO JUAN CARLOS

Hermosillo, Sonora

Mayo 2019

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

DEDICATORIA

Este trabajo, así como cada logro a lo largo de mi carrera y adelante en mi camino profesional serán gracias a la determinación, fortaleza y convicciones que ellos forjaron en mi persona.

Por esta razón dedico este documento a mis padres, Manuela Maldonado Cruz y José Jesús Valencia Romero nunca el camino fue sencillo, pero gracias a ustedes hoy he llegado hasta aquí.

AGRADECIMIENTOS

Al culminar mis estudios de licenciatura quiero expresar un profundo agradecimiento a quien con su ayuda y orientación hicieron posible culminar esta etapa.

A mis padres. Que sin su apoyo incondicional esto no hubiera sido posible.

A mis hermanos. Por ser un pilar donde siempre pude apoyarme.

A mi novia Betsy Lugo. Por brindarme su apoyo día a día y durante la etapa experimental.

A mis amigos (as). Por darme su afecto y apoyo.

Al Dr. Juan Antonio Noriega Rodríguez. Por tomarse el tiempo de ser mi director de tesis durante su año sabático y tener la disponibilidad de trabajar a mi ritmo.

A todos aquellos maestros que durante mi formación académica despertaron curiosidad y amor hacia aprender.

ÍNDICE

1. INTRODUCCION	1
2. OBJETIVO GENERAL	3
2.1 Objetivos específicos.....	3
3. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	4
3.1 Bombas.	4
3.1.1 Clasificación.....	4
3.1.1.1 Bombas centrifugas.	4
3.1.3 Operación.	10
3.2 Aplicaciones.	13
4. MARCO TEÓRICO	15
4.1 Cabezal.	15
4.2 Potencia.....	15
4.3 Caudal.	15
4.4 Cabezal neto de succión positiva (NPSH).	16
4.5 Punto de operación.	16
5. MATERIALES Y MÉTODOS	17
5.1 Equipo comercial existente.....	17
5.2 Materiales de construcción.	18
5.2.1 Instrumentos de medición.	20
5.2.2 Diagrama del equipo.....	21
5.3 Equipo construido.....	21
6. DESARROLLO EXPERIMENTAL	23
6.1 Curva característica de bombas centrifugas.....	23
6.1.1 Curva característica de la Bomba 1.	23
5.1.2 Curva característica de la Bomba 2.	24
6.2 Operación de bombas centrifugas en paralelo.	25
6.2.1 Operación de bombas centrifugas idénticas en paralelo.....	25
6.2.2 Operación de bombas centrifugas diferentes en paralelo.	26
6.3 Operación de bombas centrifugas en serie	26

6.3.1 Operación de bombas centrífugas idénticas en serie.....	27
6.4 Cálculos realizados.	27
7.0 RESULTADOS.....	29
7.1 Resultados preliminares.	29
7.2 Bomba 1	30
7.3 Bomba 2.	32
7.4 Operación de bombas centrífugas en serie.	35
7.5 Operación de bombas centrífugas en paralelo.	38
8. CONCLUSIONES	47
9. BIBLIOGRAFIA	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cuerpo de una bomba centrífuga	5
Figura 2. Operación de una bomba centrífuga.....	6
Figura 3. Impulsor de flujo radial	6
Figura 4. Impulsor de flujo axial	7
Figura 5. Impulsor de flujo mixto.	7
Figura 6. Bomba rotatoria de engranes.....	8
Figura 7. Bomba rotatoria de tornillo.	9
Figura 8. Bomba reciprocante de pistón	9
Figura 9. Bomba reciprocante de diafragma	10
Figura 10. Representación gráfica del sistema operando en serie.	11
Figura 11. Representación gráfica del sistema operando en paralelo	12
Figura 12. Clasificación general de bombas para el manejo de fluidos	14
Figura 13. Equipos comerciales de bombas centrífugas con arreglos en serie y paralelo. A. Gunt (Alemania); B. Armfield (Reino Unido)..	17
Figura 14. Imagen 14B Diagrama de tuberías del equipo B de Armfield (Reino Unido). Imagen 14A diagrama de tuberías del equipo A de Gunt (Alemania)... ..	18
Figura 15. Bomba de velocidad variable Cole Parmer.	18
Figura 16. Válvula de control y válvula de conexión rápida.	19
Figura 17. Manómetro y rotámetro utilizados.	20
Figura 18. Diagrama del equipo construido.	21
Figura 19. Imagen del equipo construido.	22
Figura 20. Diagrama del prototipo experimental.	23
Figura 21. Curva base de operación de la bomba.	29
Figura 22. Curva característica del fabricante Cole Parmer.....	30
Figura 23. Curvas características Bomba 1 a diferente velocidad de giro.	31
Figura 24. Curvas características de la Bomba 2.....	33
Figura 25. Comportamiento del cabezal y el caudal a diferentes rpm.....	35
Figura 26. Curvas características operando en serie a diferentes velocidades. 37	
Figura 27. Curvas características del sistema en serie, bomba 1 y 2 a 1100rpm.	38
Figura 28. Grafica comparativa de los flujos operando en serie y en paralelo. . 39	
Figura 29. Curva característica operando en paralelo a diferentes velocidades.	41
Figura 30. Curvas características del sistema en serie, paralelo, bomba 1 y 2 a 1100rpm.....	42
Figura 31. Grafica de flujo manteniendo la bomba 2 a 1 GPM.....	43
Figura 32. Grafica de flujo manteniendo la bomba 2 a 1.5 GPM.....	44
Figura 33. Grafica de flujo manteniendo la bomba 2 a 2 GPM.....	45
Figura 34. Grafica de flujo manteniendo la bomba 2 a 2.5 GPM.....	46

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos experimentales para la Bomba 1 (950-1100 rpm).....	30
Tabla 2. Datos experimentales para la Bomba 1 (1150-1250 rpm).....	31
Tabla 3. Ecuaciones de ajuste de bomba 1.	32
Tabla 4. Datos de la bomba 2 (950-1100 rpm).....	32
Tabla 5. Datos de la bomba 2 (1150-1250 rpm).....	32
Tabla 6. Ecuaciones de ajuste de bomba 2.	34
Tabla 7. Datos del sistema operando en serie (950-1100 rpm).	36
Tabla 8. Datos del sistema operando en serie (1150-1250 rpm).	36
Tabla 9. Datos del sistema operando en serie y en paralelo.	39
Tabla 10. Datos del sistema operando en paralelo (950-1100 rpm).	40
Tabla 11. Datos del sistema operando en paralelo (1150-1250 rpm).	40
Tabla 12. Datos obtenidos manteniendo la bomba 2 a 1 GPM.	42
Tabla 13. Datos obtenidos manteniendo la bomba 2 a 1.5 GPM.	43
Tabla 14. Datos obtenidos manteniendo la bomba 2 a 2 GPM.	44
Tabla 15. Datos obtenidos manteniendo la bomba 2 a 2.5 GPM.	45

1. INTRODUCCION

La profesión del ingeniero químico se ocupa de la tecnología de los procesos e industrias químicas. Dentro de la misma se han admitido varias subdivisiones, una de ellas son las operaciones unitarias [1]. Las operaciones unitarias estudian principalmente la transferencia y los cambios de energía, la transferencia y los cambios de materiales que se llevan a cabo por medios físicos [2].

El comportamiento de los fluidos es importante para los procesos de ingeniería en general y constituye uno de los fundamentos para el estudio de las operaciones unitarias. El conocimiento de los fluidos es esencial, no sólo para tratar con precisión los problemas de movimiento de los fluidos a través de tuberías, bombas y otro tipo de equipos de proceso, sino también para el estudio del flujo de calor y de otras operaciones de separación que dependen de la difusión y transferencia de masa [3].

Los fluidos se transportan por lo general en tuberías o tubos, los cuales tienen una sección transversal disponible en una variedad de tamaños, espesores de pared y materiales de construcción. Las tuberías y los tubos están hechos de diversos materiales, incluyendo metales y aleaciones, madera, cerámica, vidrio y varios polímeros, entre los que se encuentran el cloruro de polivinilo, o PVC, es ampliamente utilizado como tubería en las conducciones de agua residual. En las plantas de proceso, el material más común es el acero de bajo contenido de carbono, con el que se fabrica la llamada tubería de hierro negro. Con frecuencia se utilizan también las tuberías de hierro forjado y de fundición para propósitos especiales [3].

Una bomba es un dispositivo físico que se emplea para impartir una fuerza de presión de empuje a los fluidos para ser transportados de una posición a otra a través de tuberías. Los requisitos básicos para definir su aplicación están

estrechamente relacionados con las presiones de succión y descarga, con la pérdida de presión transmitida y la velocidad de flujo especificada [4].

Al escoger bombas para cualquier servicio, es necesario tener conocimiento del líquido que se va a manejar, cual es la carga dinámica total, las cargas de succión y descarga y, en la mayor parte de los casos, la temperatura, la viscosidad, la presión vapor y la densidad relativa del líquido [4].

En la industria química, la tarea de selección de bombas es aún más complicada debido a la presencia de sólidos en suspensión en el seno del líquido y a los posibles fenómenos de corrosión de este líquido lo cual exige materiales especiales de construcción [4].

Cuando dos bombas o más operan de manera simultánea el nuevo sistema, tiene una característica de operación que tiene una relación directa con las características individuales de cada bomba y con la forma como estén dispuestas ya sea en serie o en paralelo [5].

Es aquí donde al estudiar estos dispositivos en ingeniería química es fundamental ver su operación para comprender a profundidad su comportamiento, con este fin diseñar un equipo con fines didácticos y a bajo costo implica que el estudiante lleve consigo una experiencia visual a pequeña escala de lo que está presente en la industria. Por otro lado, la experimentación posterior a haber estudiado a profundidad diferentes fenómenos de manera teórica, ofrece una perspectiva diferente y ayuda a afianzar el conocimiento adquirido de manera práctica [5].

2. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un prototipo experimental para la caracterización de bombas centrifugas en serie y en paralelo para el Laboratorio de Ingeniería Química.

2.1 Objetivos específicos.

1. Establecer las bases teóricas de la caracterización de bombas centrifugas
2. Construir un equipo portátil de tamaño mínimo y de fácil operación para estudiantes de licenciatura.
3. Establecer el comportamiento característico del funcionamiento individual y con interacción de dos bombas, llevadas a cabo en el equipo construido.

3. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

3.1 Bombas.

Un equipo de bombeo es un transformador de energía. Recibe energía mecánica, que puede proceder de un motor eléctrico, térmico, etc., y la convierte en energía que el fluido adquiere en forma de presión, de posición o de velocidad [4].

3.1.1 Clasificación.

Para clasificar las bombas existen varios criterios según “Hydraulic Institute” (2006) se dividen en dos grandes grupos, bombas de desplazamiento positivo, en las cuales la energía mecánica se transfiere a través de un embolo, engrane, aspa etc. Dentro de esta clasificación también podemos distinguir dos grupos, las reciprocantes que poseen un movimiento de pistón, y las rotatorias, que a través de un engrane o un mecanismo dentado similar proporciona la energía necesaria para desplazar al fluido. Las bombas centrífugas por otro lado poseen un impulsor el cual gira a alta velocidad La energía cinética aplicada al fluido por el impulsor se convierte en energía de presión cuando el líquido sale del impulsor y avanza a lo largo de la voluta o carcasa desplazando el fluido a un área de interés [4].

3.1.1.1 Bombas centrífugas.

Las bombas centrífugas son aquellas en que se aplica energía al fluido que se bombea con un impulsor que gira en un eje, la energía cinética aplicada al fluido por el impulsor se convierte en energía de presión cuando el líquido sale del impulsor y avanza a lo largo de la voluta o carcasa Figura 1.

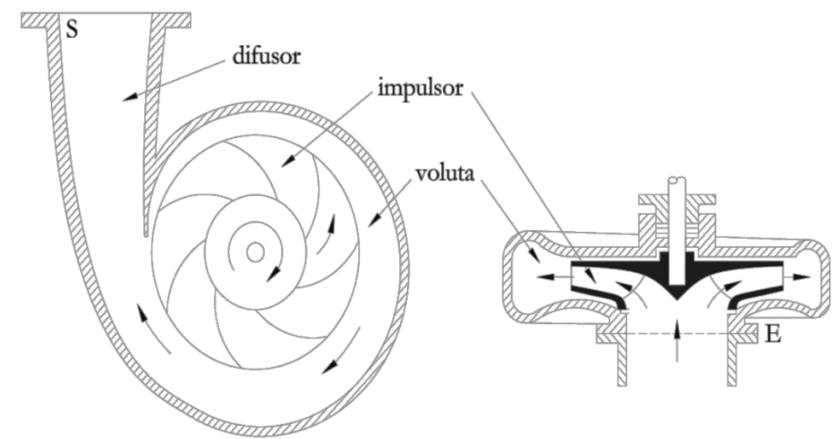


Figura 1. Cuerpo de una bomba centrífuga
Tomado de iagua [5].

El elemento rotativo de una bomba centrífuga se denomina rodete o impulsor. La forma del impulsor puede forzar al fluido a salir en un plano perpendicular a su eje y recibe el nombre de bomba centrífuga de flujo radial, puede dar al fluido una velocidad con componentes tanto axial como radial y se conoce como de flujo mixto o puede inducir al flujo en espiral según la dirección del eje [6].

Las bombas centrífugas sirven para el transporte de líquidos que contengan sólidos en suspensión, pero poco viscosos Figura 2. Su caudal es constante y elevado, tienen bajo mantenimiento. Este tipo de bombas presentan un rendimiento elevado para un intervalo pequeño de caudal, pero su rendimiento es bajo cuando transportan líquidos viscosos [6].

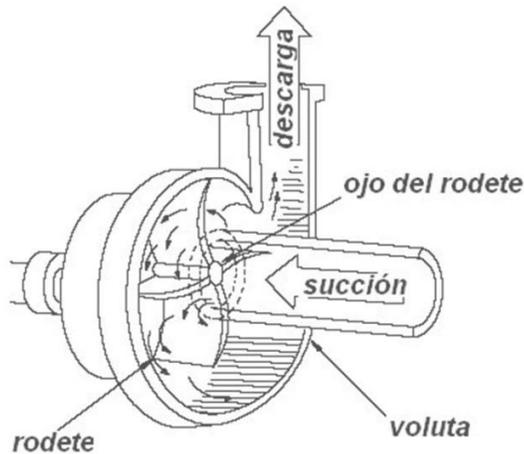


Figura 2. Operación de una bomba centrífuga
Tomado de fullmecanica [7]

3.1.1.1.1 Clasificación de las bombas centrífugas.

Las bombas centrífugas se clasifican de acuerdo con la trayectoria del fluido en el interior del impulsor en: a) flujo radial, b) flujo axial y c) flujo mixto.

a) Flujo radial. Las bombas centrífugas de flujo radial se utilizan para cargas altas y caudales pequeños, sus impulsores son por lo general angostos. El flujo es radial y la presión desarrollada es debida principalmente a la fuerza centrífuga Figura 3 [6].

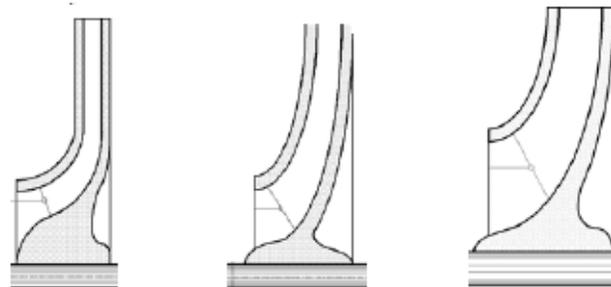


Figura 3. Impulsor de flujo radial
Tomado de mecánica de los fluidos BOMBAS CENTRIFUGAS [6].

b) Flujo axial. Estas bombas se utilizan para cargas pequeñas y grandes caudales, tienen impulsores tipo propela, de flujo completamente axial. Estos impulsores son los de mayor velocidad específica y este tipo de bombas es especialmente adecuado para drenaje en ciudades Figura 4 [6].

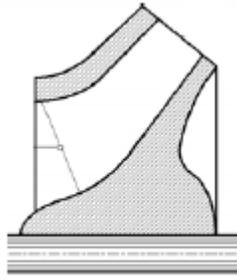


Figura 4. Impulsor de flujo axial

Tomado de mecánica de los fluidos BOMBAS CENTRIFUGAS [6]

c) Flujo mixto. El impulsor es más ancho que los de flujo radial y los alabes adquieren una doble curvatura, torciéndose en el extremo de la succión, la velocidad específica en este tipo de impulsores va aumentando y manejan líquidos con sólidos en suspensión [6].

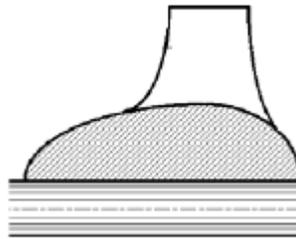


Figura 5. Impulsor de flujo mixto.

Tomado de mecánica de los fluidos BOMBAS CENTRIFUGAS [6]

3.1.1.2 Bombas de desplazamiento positivo.

Al hablar de bombas de desplazamiento positivo podemos subdividir dos grupos las rotatorias, en las cuales atrapan el líquido y lo empujan contra la carcasa manteniendo un flujo constante y las reciprocantes que descargan una cantidad definida de líquido durante el movimiento del pistón o émbolo a través de la distancia de la carrera.

Las bombas rotatorias se pueden utilizar en la dosificación de efluentes, en el bombeo de residuos viscosos, para la introducción de reactantes y catalizadores en un reactor, para manejar líquidos de diferentes viscosidades, líquidos que contengan aire o vapor, no tienen válvulas de succión y descarga,

más sin embargo no pueden trabajar con líquidos abrasivos ya que estos pueden ocasionar un desgaste prematuro en las piezas internas [6].

Entre las bombas rotatorias existen varios tipos algunos de ellos son las de engranes y las de tornillo, en la primera el funcionamiento consiste en dos ruedas dentadas que operan dentro de una carcasa, el líquido es transportado en el espacio comprendido entre dos dientes consecutivos y la carcasa, siendo desplazado hacia la zona de descarga. Su rango de aplicación es para caudales menores de 6 m³/min y presiones menores a 150 atm, Figura 6 [6].

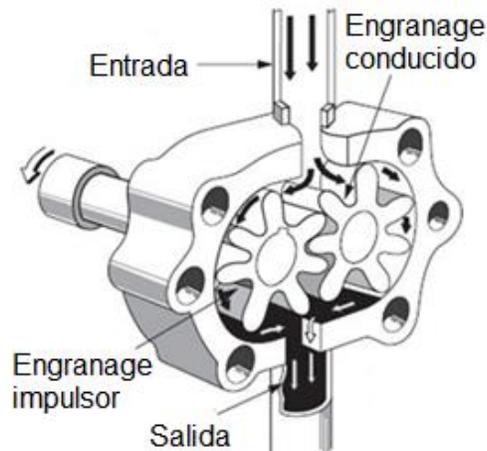


Figura 6. Bomba rotatoria de engranes.
Tomado de tecnologiamk4 [8]

Por otro lado, en las bombas de tornillo el rotor central se une fuertemente con los rotores libres creando una cavidad dentro de la estructura que se mueve en forma axial desde la succión hasta la descarga proporcionando un flujo uniforme y continuo Figura 7.

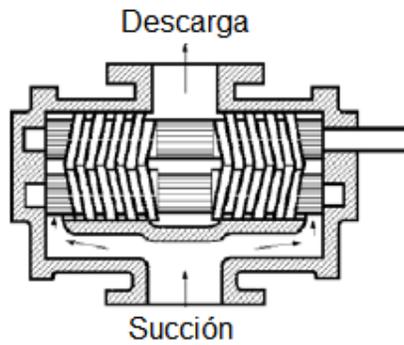


Figura 7. Bomba rotatoria de tornillo.

Tomado de mecánica de los fluidos BOMBAS CENTRIFUGAS [6]

En las bombas de un solo tornillo se logran presiones de 10-25 atm y caudales de hasta 7 m³/h, en las bombas de varios tornillos, se manejan caudales de hasta 300 m³/h.

En bombas reciprocantes destacan principalmente las de diafragma y las de pistón en esta última existen válvulas de succión y descarga que regulan el movimiento del líquido a través de la cámara de trabajo Figura 8 [6].

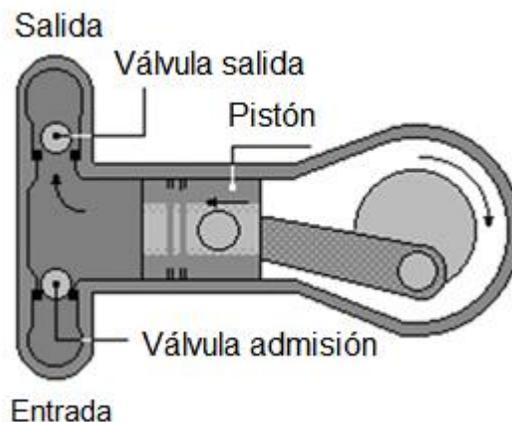


Figura 8. Bomba recíprocante de pistón

Tomada de tecnologiámk4 [8]

Mientras el émbolo se está llenando de líquido, la válvula de succión permanece abierta y la válvula de descarga cerrada, invirtiéndose la posición de las válvulas durante el desalojo del líquido. Este tipo de bombas se usan para

transportar líquidos con caudales pequeños menores de 40 L/min y cambios de presión entre 50 - 350 atm. En general se suelen utilizar en el transporte de líquidos viscosos, con los cuales las bombas centrífugas no son muy eficaces.

En las bombas de diafragma el movimiento del fluido es transmitido por medio de un diafragma flexible al líquido que se bombea las únicas partes móviles de la bomba que están en contacto con el líquido son las válvulas y pueden diseñarse de forma especial para tratar el material Figura 9 [6].

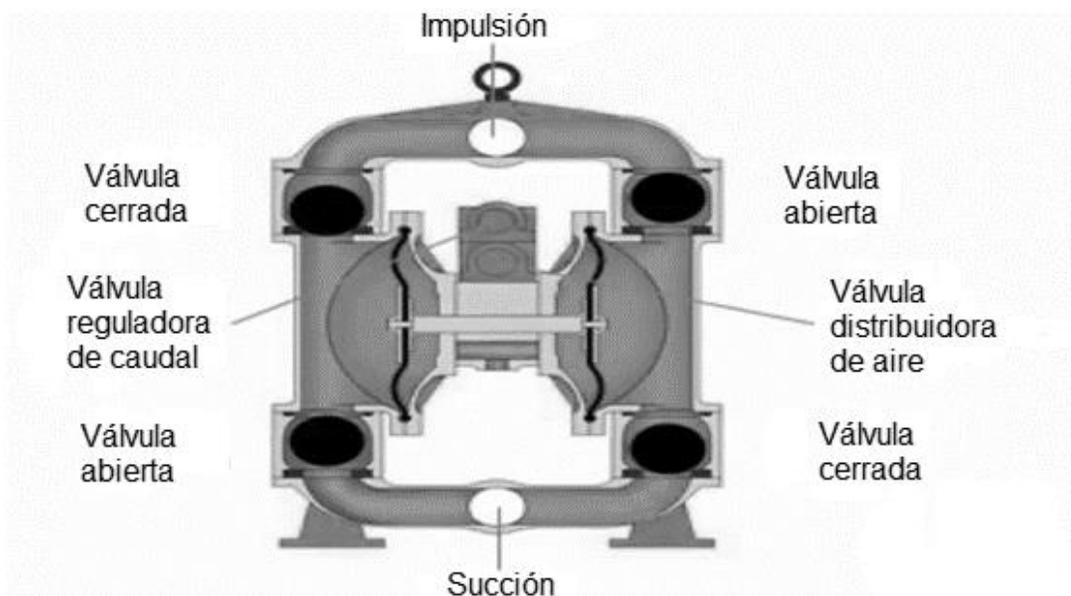


Figura 9. Bomba recíprocante de diafragma
Tomado de termetsa [9]

La bomba de diafragma se utiliza para tratar líquidos corrosivos o que contengan suspensiones de sólidos abrasivos. Su principal ventaja radica en la ausencia total de fugas en la bomba [6].

3.1.3 Operación.

En algunos casos, las instalaciones de bombeo podrían tener una amplia gama de necesidades de carga o descarga y una sola bomba tal vez no podría

satisfacerlas. En estas situaciones, las bombas pueden disponerse ya sea en serie o en paralelo para ofrecer una operación más eficiente [10].

3.1.3.1 Bombas en serie.

Con esta configuración se puede lograr una mayor altura de elevación, manteniendo constante el caudal. La característica fundamental de esta configuración se encuentra en que el caudal que descarga la primera bomba es captado por la segunda y el que ésta descarga es impulsado por la siguiente [10]. La figura 10 muestra la gráfica del sistema de operación de un sistema de bombas en serie.

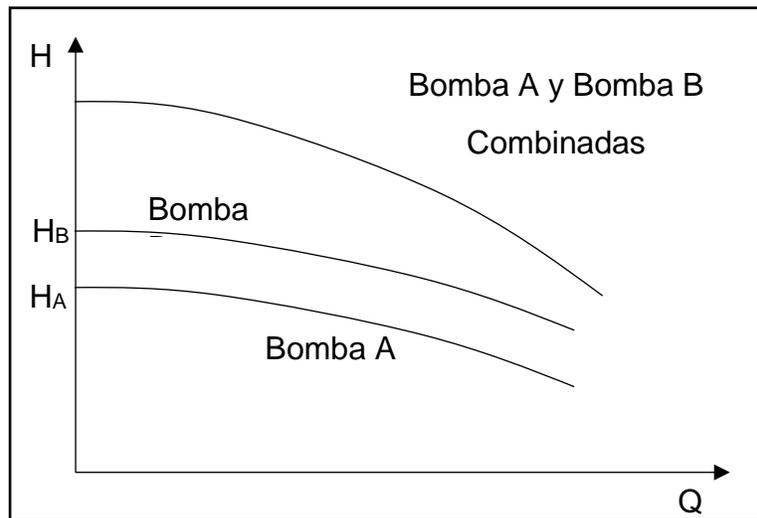


Figura 10. Representación gráfica del sistema operando en serie.

Tomado de mecánica de los fluidos BOMBAS CENTRIFUGAS [6]

Este tipo de acoplamiento se emplea en casos en los cuales se desea elevar un mismo caudal a distintas alturas, o para impulsar un determinado caudal, venciendo grandes resistencias. El cabezal para estos sistemas se puede estimar con la suma algebraica de los cabezales individuales [10].

3.1.3.2 Bombas en paralelo.

El otro sistema que comúnmente se utiliza, es el arreglo de bombas en paralelo, en este caso el caudal total manejado por el sistema es la contribución de los caudales individuales de cada bomba. Dado que tienen succión y descargas unidas, necesariamente, el cabezal desarrollado por cada una de las bombas debe ser igual [10].

Cuando se trata de satisfacer las necesidades o demandas, variables en el tiempo, como en sistemas de riego, o en redes de distribución de agua potable, se justifica el acoplamiento de dos o más bombas en paralelo [10].

En este tipo de sistemas si idealmente no se tuviera la resistencia al flujo de los materiales y pérdidas de carga en el bombeo el caudal siempre sería la suma de los caudales individuales de cada bomba por tal motivo el acoplamiento en paralelo es, casi siempre, menor que el doble del caudal que aportaría una sola bomba en la misma instalación [10].

De esta forma, el comportamiento del arreglo como un sistema, se puede representar como se muestra en la Figura 11.

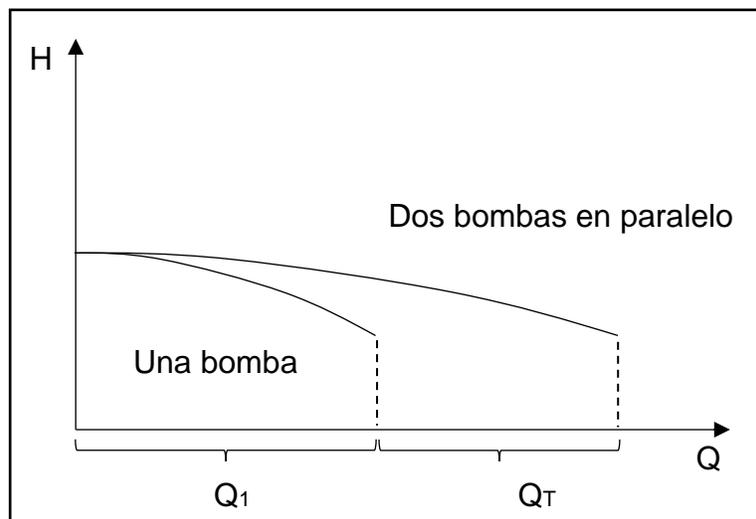


Figura 11. Representación gráfica del sistema operando en paralelo
Tomado de mecánica de los fluidos BOMBAS CENTRIFUGAS [6]

Así mismo se recomienda también utilizar bombas de las mismas características, ya que la bomba de mayor potencia puede impedir el buen funcionamiento de bombas de menor potencia [10].

3.2 Aplicaciones.

Las aplicaciones de un equipo de bombeo son sumamente diversas, cada bomba puede ser diseñada con características específicas para su aplicación tal como manejo de líquidos de cualquier viscosidad, procesos químicos, enfriamiento para maquinas térmicas, etc. [4].

Algunas de las limitaciones de estos equipos son la presencia de sustancias abrasivas o corrosivas lo cual puede causar un desgaste prematuro de las partes, así como también se debe considerar no aplicarse en sistemas donde pudieran ser expuestos a que el impulsor quede girando en seco [4].

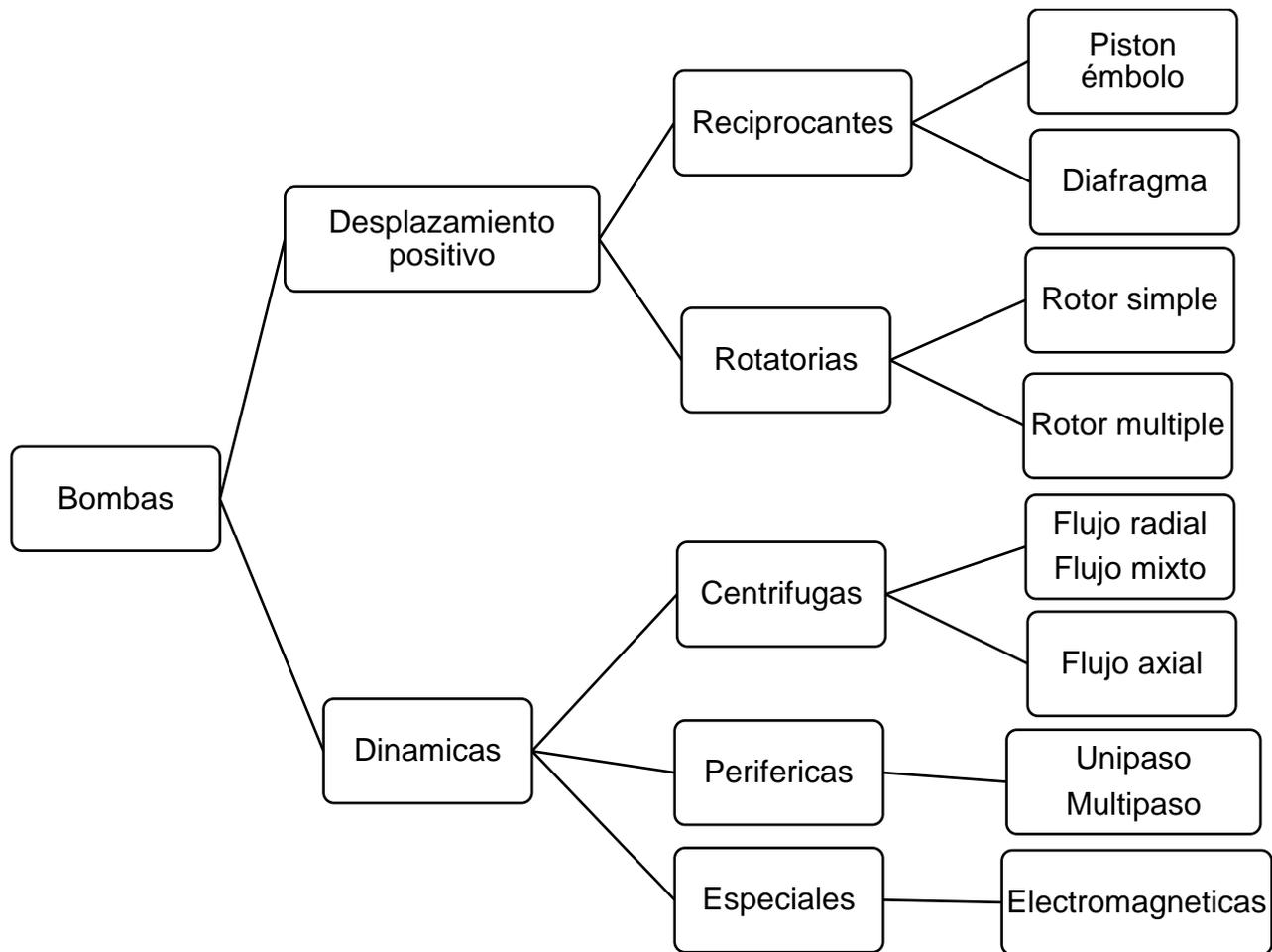


Figura 12. Clasificación general de bombas para el manejo de fluidos
 Tomado de BOMBAS, TEORIA, DISEÑO Y APLICACIONES [4].

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Cabezal.

El cabezal de la bomba es un parámetro que nos indica la altura a la cual el fluido sería elevado en determinadas condiciones dadas, la siguiente ecuación proviene de la simplificación de un balance de energía potencial, cinética y del flujo [11].

$$H = z + \frac{\overline{v^2}}{2g} + \frac{P}{\gamma} \quad \text{EC. (1)}$$

Donde:

H = cabezal

g = aceleración de la gravedad

z = altura del sistema

P = presión del fluido en el sistema

v = velocidad del fluido

γ = peso específico del fluido

4.2 Potencia.

La potencia es la energía necesaria para alimentar a la bomba y que esta cumpla su función, este parámetro depende de la eficiencia el caudal y el cabezal [11].

$$W_P = \frac{HQ\gamma}{n} \quad \text{EC.2}$$

Donde:

W_P = potencia

γ = peso específico del fluido

H = cabezal

n = eficiencia

Q = caudal

4.3 Caudal.

El caudal es una medida del volumen desplazado en un tiempo determinado, experimentalmente puede ser determinado con diferentes corridas midiendo el tiempo de llenado en un volumen conocido, matemáticamente hay

varios métodos para determinarlo, el más sencillo de ellos es conociendo el diámetro de la tubería y la velocidad del flujo [11].

$$Q = A \vec{v} \quad \text{EC.3}$$

Donde:

Q = caudal

v = velocidad del fluido

A = área del conducto

4.4 Cabezal neto de succión positiva (NPSH).

Este parámetro es un factor que nos indica si al operar la bomba bajo las condiciones de operación existentes esta presentara problemas de cavitación [11].

$$NPSH = \frac{P}{\gamma} \pm z - h_{LS} - \frac{P_v}{\gamma} \quad \text{EC. 4}$$

Donde:

P_v = presión vapor del fluido

g = aceleración de la gravedad

z = altura del sistema

P = presión del fluido en el sistema

h_{LS} = pérdidas de carga en la tubería de succión

γ = peso específico del fluido

4.5 Punto de operación.

El punto de operación es el conjunto de los parámetros de cabezal, potencia, caudal y NPSH [11].

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Equipo comercial existente.

En el mercado se encuentran varias compañías que fabrican equipo similar al propuesto, solamente que los costos tan altos hacen difícil su adquisición. La Figura 13B muestra un equipo comercial de la marca Armfield de Inglaterra [12]. La Figura 13A muestra el equipo compacto de la marca Gunt de Alemania [13].



Figura 13. Equipos comerciales de bombas centrifugas con arreglos en serie y paralelo. A. Gunt (Alemania); B. Armfield (Reino Unido).

Tomado de discoverarmfield [12] y gunt [13].

Cabe mencionar que, aunque estos no son los únicos equipos en el mercado son los referentes ya que estas marcas tienen presencia en otros equipos dentro de las instalaciones del laboratorio de ingeniería química. A continuación, se muestran los respectivos diagramas del flujo de cada equipo.

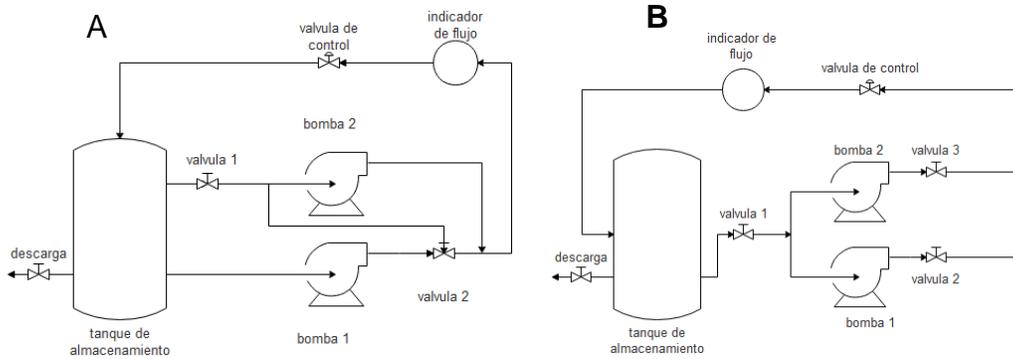


Figura 14. Imagen 14B Diagrama de tuberías del equipo B de Armfield (Reino Unido). Imagen 14A diagrama de tuberías del equipo A de Gunt (Alemania). Tomado de discoverarmfield [12] y gunt [13]

5.2 Materiales de construcción.

Las bombas centrífugas que se utilizaron en este prototipo son de carcasa metálica de velocidad variable marca Cole Parmer 75211-60 que provee flujos desde 0 Hasta 26.5 L/min con velocidades de giro de 90 a 9000 rpm Figura 15 [14].

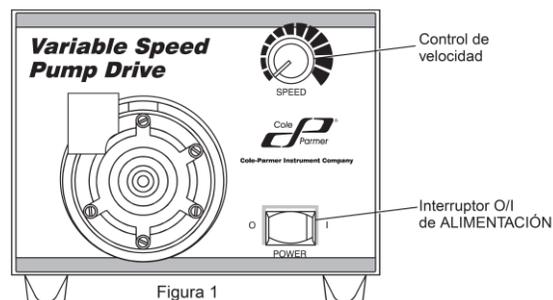


Figura 15. Bomba de velocidad variable Cole Parmer. Tomado de manual de operación de Cole Parmer [14]

Para la construcción del sistema de bombas se utilizó aproximadamente 2 metros tubería de cpvc clase c de 1/2 pulgada o 13mm marca anbec, 8 codos de 90° de 1/2 pulgada, 3 tee de 1/2 pulgada, 7 tuercas unión de 1/2 pulgada, un mezclador, accesorios de marca ERA. Para unir la tubería se requirió utilizar

pegamento para cpvc marca rugo. Adicionalmente, se necesitó adaptar la succión y descarga de la bomba, esta última con un par de niples de acero inoxidable de 3/8 de pulgada que son roscados a una reducción roscada de 3/8 a 1/2 pulgada, por otro lado, para la succión se realizó el mismo procedimiento, pero con niples de acero inoxidable de 1/4 a 1/2 pulgada.

Para el depósito de agua se utilizó un cubo armado de material de acrílico de 25x25x30 cm haciéndole un par de perforaciones requeridas para colocar las válvulas de control de entrada a la succión. En estas perforaciones se colocaron tuercas con rosca contraria para apretarlas al tanque y así roscar en el interior la salida para las válvulas.

Las válvulas que se emplearon en el equipo son de cpvc de 1/2 pulgada 2 de ellas en conexión rápida y dos simples además de una válvula de control marca GripWerks Figura 16.



Figura 16. Válvula de control y válvula de conexión rápida.

De manera adicional se utilizaron 2 codos, 30cm de tubo, una conexión hembra, todo en diámetro de 3/4 de pulgada y en cpvc, además de un niple de 1/2 pulgada y una reducción de 3/4 a 1/2 pulgada, esto debido al diámetro de la tubería de descarga, se utilizó como opción para operar en paralelo y evitar la turbulencia generada dentro del sistema y así poder observar el efecto.

5.2.1 Instrumentos de medición.

Para llevar a cabo las mediciones pertinentes a los experimentos que se requieran llevar a cabo en el equipo se necesitaran instrumentos de medición de flujo y presión.

Para medir la presión de agua en el sistema se empleó un manómetro de baja presión de diafragmas de bronce marca Instrutek modelo serie 200 63.200 que provee lecturas de 0 a 100 inH₂O y el cual posee una conexión de 1/4 de pulgada por lo cual también se requirió adaptar una reducción roscada de 1/2 a 1/4 pulgada, Figura 17.

Para obtener las medidas de flujo se utilizó un rotámetro de cuerpo de vinil marca Hidronix Water Technology modelo IFM-55 que puede medir el flujo de agua de 2 hasta 18 LPM o bien 0.5 a 5 GPM, Figura 17.



Figura 17. Manómetro y rotámetro utilizados.
Tomado de instrutek [15] y carbotecnia [16].

5.2.2 Diagrama del equipo.

Una vez teniendo todos los elementos necesarios para la construcción del equipo se llevó a cabo la construcción basándose en el siguiente diagrama.

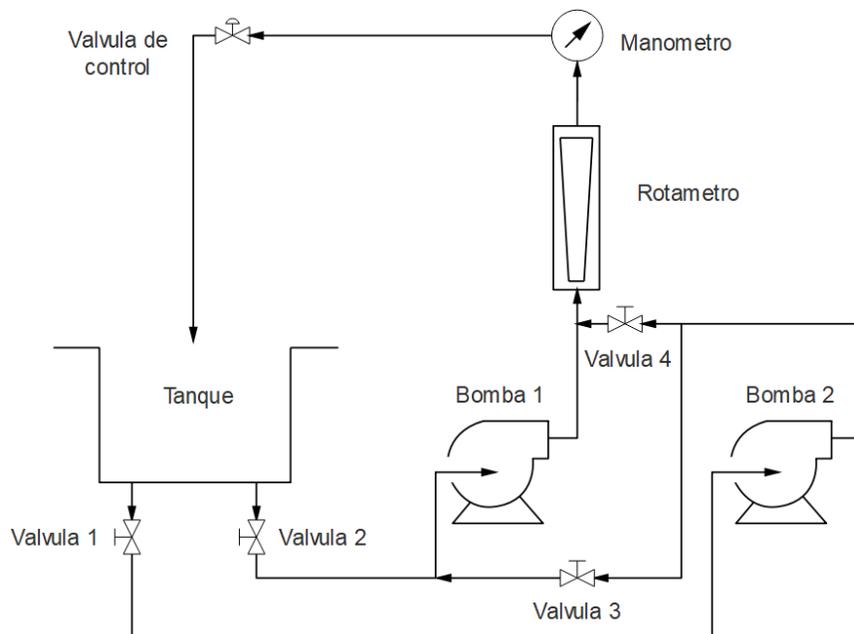


Figura 18. Diagrama del equipo construido.

5.3 Equipo construido.

Como se puede observar en la Figura 19 el diseño final del equipo contiene los elementos necesarios para desarrollar practicas experimentales de bombas centrifugas operando en serie y en paralelo.

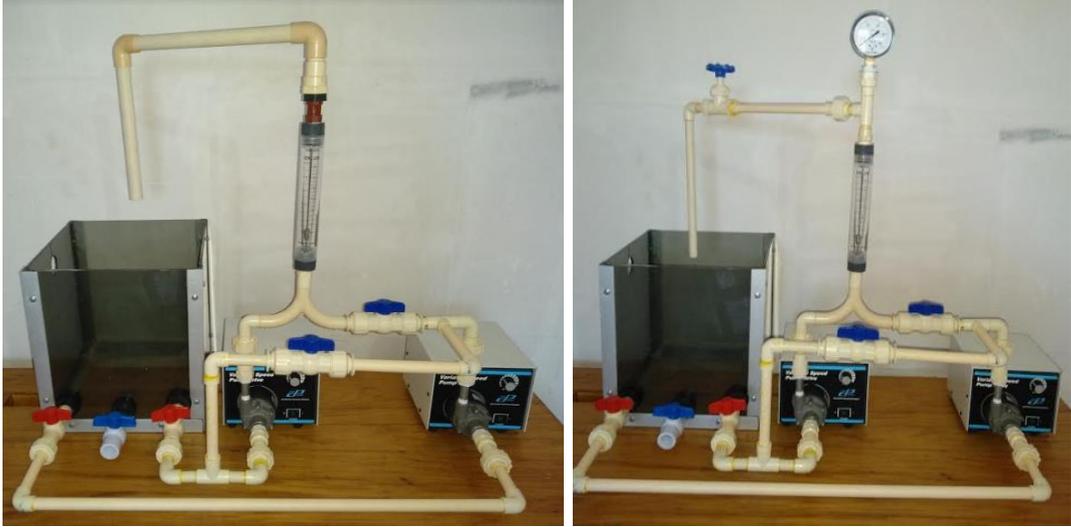


Figura 19. Imagen del equipo construido.

6. DESARROLLO EXPERIMENTAL

6.1 Curva característica de bombas centrifugas.

La Figura 20 muestra el diagrama del prototipo experimental utilizado en la experimentación. Para obtener los datos necesarios para obtener la curva característica correspondiente a cada bomba es necesario operar como se describe a continuación:

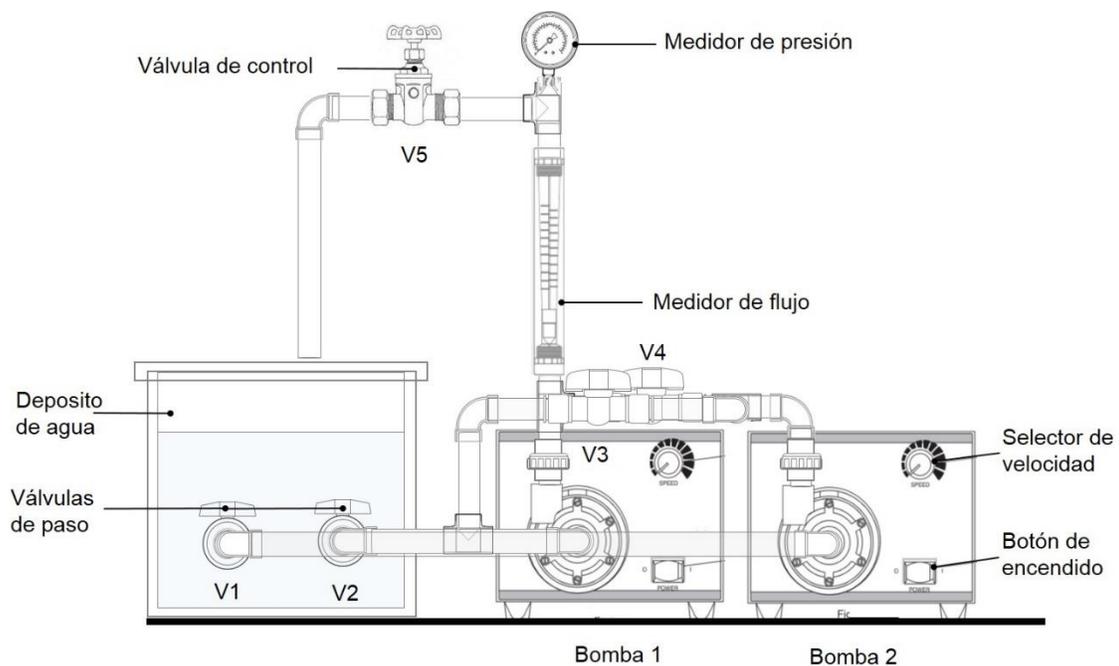


Figura 20. Diagrama del prototipo experimental.

6.1.1 Curva característica de la Bomba 1.

- Cerrar las válvulas V1, V3 y V4 procurando que la válvula V2 y la válvula de control V5 se encuentren completamente abiertas.
- Energizar la Bomba 1 con el botón de encendido y girar la perilla del selector de velocidad gradualmente para iniciar lentamente la

alimentación de agua desde el depósito a la descarga de la bomba, procurando que el fluido ascienda por la tubería en forma de un flujo laminar y no se generen burbujas de aire en el rotámetro.

- Seleccionar una velocidad de giro de la bomba con el selector de velocidad.
- Registrar los datos del caudal y la presión de los medidores, con la válvula de control V5 completamente abierta.
- Disminuir el flujo de agua girando la válvula de control, procurando que la presión aumente del orden de 2 inH₂O y registrar los nuevos datos del caudal y la presión de los medidores.
- Repetir el paso anterior hasta alcanzar a cerrar completamente la válvula de control V5. (deberá obtener por lo menos 5 datos).
- Después se procede a repetir el experimento y apagar la bomba.

Se recomienda operar este equipo en presiones un rango de presión de 5 a 16 in H₂O las cuales corresponden a velocidades de giro de 950 a 1250 rpm, aproximadamente.

5.1.2 Curva característica de la Bomba 2.

- Cerrar las válvulas V2 y V3 procurando que la válvula V1, V4 y la válvula de control V5 se encuentren completamente abiertas.
- Energizar la Bomba 1 con el botón de encendido y girar la perilla del selector de velocidad gradualmente para iniciar lentamente la alimentación de agua desde el depósito a la descarga de la bomba, procurando que el fluido ascienda por la tubería en forma de un flujo laminar y no se generen burbujas de aire en el rotámetro.
- Seleccionar una velocidad de giro de la bomba con el selector de velocidad.
- Registrar los datos del caudal y la presión de los medidores, con la válvula de control V5 completamente abierta.

- Disminuir el flujo de agua girando la válvula de control, procurando que la presión aumente del orden de 1.0 a 2.0 inH₂O y registrar los nuevos datos del caudal y la presión de los medidores.
- Repetir el paso anterior hasta alcanzar a cerrar completamente la válvula de control V5. (deberá obtener por lo menos 5 datos).
- Después se procede a repetir el experimento y apagar la bomba.

Se recomienda operar este equipo en presiones un rango de presión de 5 a 16 in H₂O las cuales corresponden a velocidades de giro de 950 a 1250 rpm, aproximadamente.

6.2 Operación de bombas centrifugas en paralelo.

- Colocar la tubería de descarga de 3/4 de pulgada
- Mantener cerrada la válvula V3 y abiertas todas las demás válvulas (V1, V2 y V4).
- Energizar las Bombas 1 y 2 con el botón de encendido y girar la perilla del selector de velocidad gradualmente para iniciar lentamente la alimentación de agua desde el depósito a la descarga de la bomba, procurando que el fluido ascienda por la tubería en forma de un flujo laminar y no se generen burbujas de aire en el rotámetro.

6.2.1 Operación de bombas centrifugas idénticas en paralelo.

- Con las bombas operando a iguales condiciones y libre de aire en el sistema, registrar los datos del caudal.
- Cerrar las válvulas V3 y V4 para cambiar la velocidad de flujo de la bomba 1 y registrar el caudal.
- Para establecer el flujo de la bomba 2 cerrar la válvula V2 y V3, abrir la V4 y establecer el mismo flujo que la bomba 1.
- Se cierra la válvula V4 y se observa el comportamiento respecto al flujo.

- Después se procede a repetir el experimento aumentando gradualmente la velocidad de giro.

Para operar en paralelo es de suma importancia primero asegurarse de operar a las mismas condiciones en la bomba 1 y 2.

6.2.2 Operación de bombas centrifugas diferentes en paralelo.

- Con las bombas operando a las condiciones deseadas y libre de aire en el sistema, registrar los datos del caudal.
- Cerrar las válvulas V3 y V4 para cambiar la velocidad de flujo de la bomba 1 y registrar el caudal.
- Para establecer el flujo de la bomba 2 cerrar la válvula V2 y V3, abrir la V4 y establecer el flujo que se desee.
- Se cierra la válvula V4 y se observa el comportamiento respecto al flujo.
- Después se procede a repetir el experimento aumentando gradualmente la velocidad de giro.

6.3 Operación de bombas centrifugas en serie

- Mantener cerrada las válvulas V2 y V4 y dejar abiertas todas las válvulas V1, V3 y V5.
- Energizar las Bombas 1 y 2 con el botón de encendido y girar la perilla del selector de velocidad gradualmente para iniciar lentamente la alimentación de agua desde el depósito a la descarga de la bomba, procurando que el fluido ascienda por la tubería en forma de un flujo laminar y no se generen burbujas de aire en el rotámetro.
- Seleccionar una misma velocidad de giro para cada bomba con el selector de velocidad. Registrar los datos del caudal y la presión de los medidores, con la válvula de control V5 completamente abierta.

6.3.1 Operación de bombas centrifugas idénticas en serie.

- Con las bombas operando a iguales condiciones y libre de aire en el sistema, registrar los datos del caudal y la presión de los medidores, con la válvula de control V5 completamente abierta.
- Disminuir el flujo de agua girando la válvula de control, procurando que la presión aumente del orden de 1.0 a 2.0 inH₂O y registrar los nuevos datos del caudal y la presión de los medidores.
- Repetir el paso anterior hasta alcanzar a cerrar completamente la válvula de control V5. (deberá obtener por lo menos 5 datos).
- Después se procede a repetir el experimento y apagar las bombas.

Para operar en serie es importante no operar a más de 16 inH₂O de presión inicial o 1250 rpm cada bomba ya que sobrepasan la capacidad de los medidores utilizados.

6.4 Cálculos realizados.

Con los datos obtenidos de caudal (Q) y presión se procedió a determinar el cabezal para construir la curva característica de cada experimento con la EC. 1 dado que los datos están en galones por minutos (GPM) y la presión en pulgadas de agua (inH₂O), se realizó una conversión de unidades al sistema internacional a metros cúbicos por minuto (m³/min) y pascales (Pa) respectivamente, así como también una conversión necesaria de minutos (min) a segundos (s).

El peso específico del agua a temperatura ambiente es de 9,807 N/m³

Siendo:

$$1 \text{ GPM} = 0.0037854 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$1 \text{ inH}_2\text{O} = 248.84 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ min} = 60\text{s}$$

Así el desglose de unidades en la EC 1 es de la siguiente manera:

$$H[=]m + \frac{(m^3/min)(m^2)(min/60s)}{m/s^2} + \frac{N/m^2}{N/m^3}$$

$$H[=]m$$

7.0 RESULTADOS

7.1 Resultados preliminares.

Inicialmente se realizaron pruebas para establecer dentro de los parámetros del fabricante las rpm para cada flujo la cual representa un ajuste lineal desde 0 GPM y 0 rpm hasta 7 GPM y 9000 rpm obteniendo la pendiente como factor.

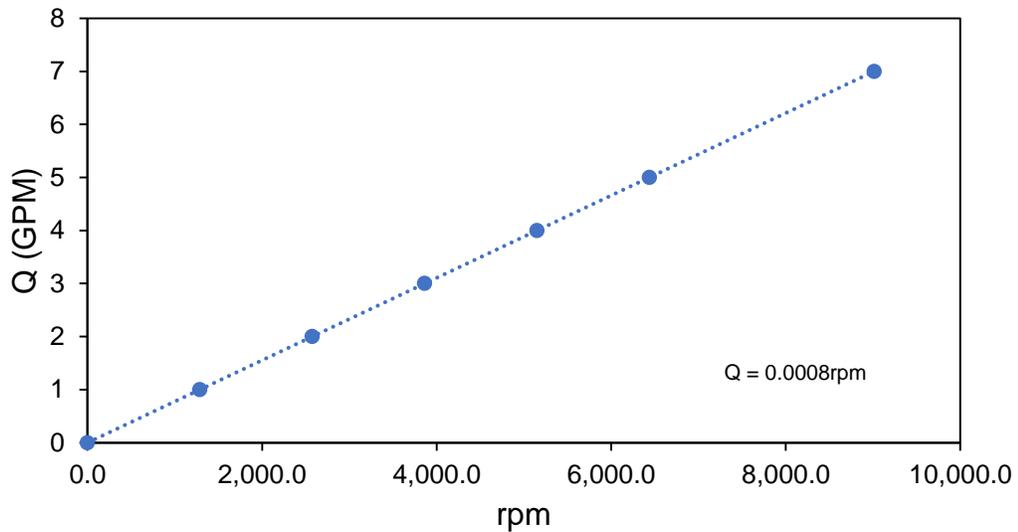


Figura 21. Curva base de operación de la bomba.

Con estos resultados es posible establecer las rpm exactas a las que opera cada bomba.

Así bien el fabricante provee una curva característica operando a la máxima capacidad Figura 22.

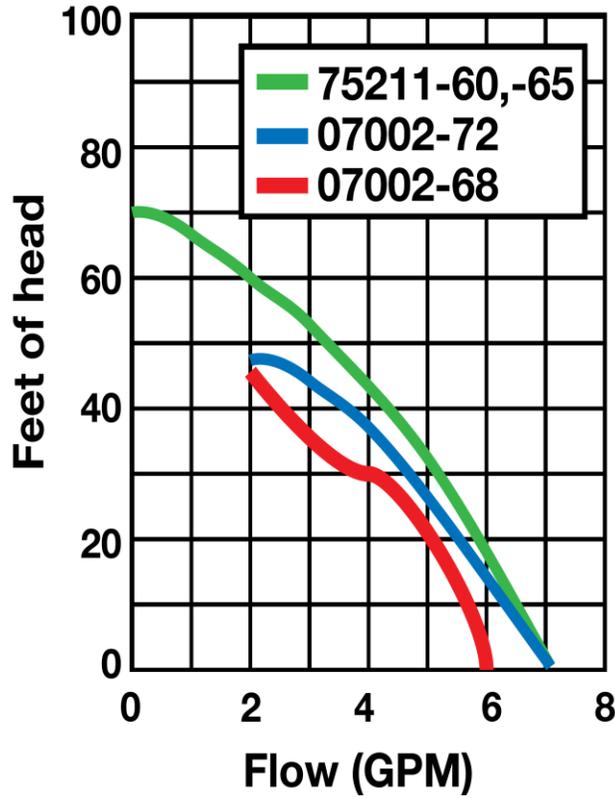


Figura 22. Curva característica del fabricante Cole Parmer.
Tomado de manual de operación de Cole Parmer [14].

7.2 Bomba 1

Datos obtenidos.

Tabla 1. Datos experimentales para la Bomba 1 (950-1100 rpm).

950 rpm		1000 rpm		1050 rpm		1100 rpm	
Q (GPM)	P (inH ₂ O)	Q (GPM)	P (inH ₂ O)	Q (GPM)	P (inH ₂ O)	Q (GPM)	P (inH ₂ O)
0.750	5	0.779	7.5	0.830	10	0.867	12
0.691	7.5	0.705	10	0.779	12	0.823	14
0.617	10	0.647	12	0.705	14	0.764	16
0.529	12	0.558	14	0.617	16	0.676	18
0.000	18	0.000	20	0.529	18	0.588	20
--	--	--	--	0.000	24	0.000	27

Tabla 2. Datos experimentales para la Bomba 1 (1150-1250 rpm).

1150 rpm		1200 rpm		1250 rpm	
Q (GPM)	P (inH ₂ O)	Q (GPM)	P (inH ₂ O)	Q (GPM)	P (inH ₂ O)
0.882	14	0.926	16	0.941	18
0.794	17	0.838	19	0.852	22
0.683	20	0.779	21	0.808	24
0.602	22	0.632	25	0.647	28
0.529	24	0.544	27	0.529	30
0.000	30	0.000	33	0.500	31
--	--	--	--	0.000	36

Con los datos obtenidos se procedió a graficar las correspondientes curvas características para cada velocidad de giro.

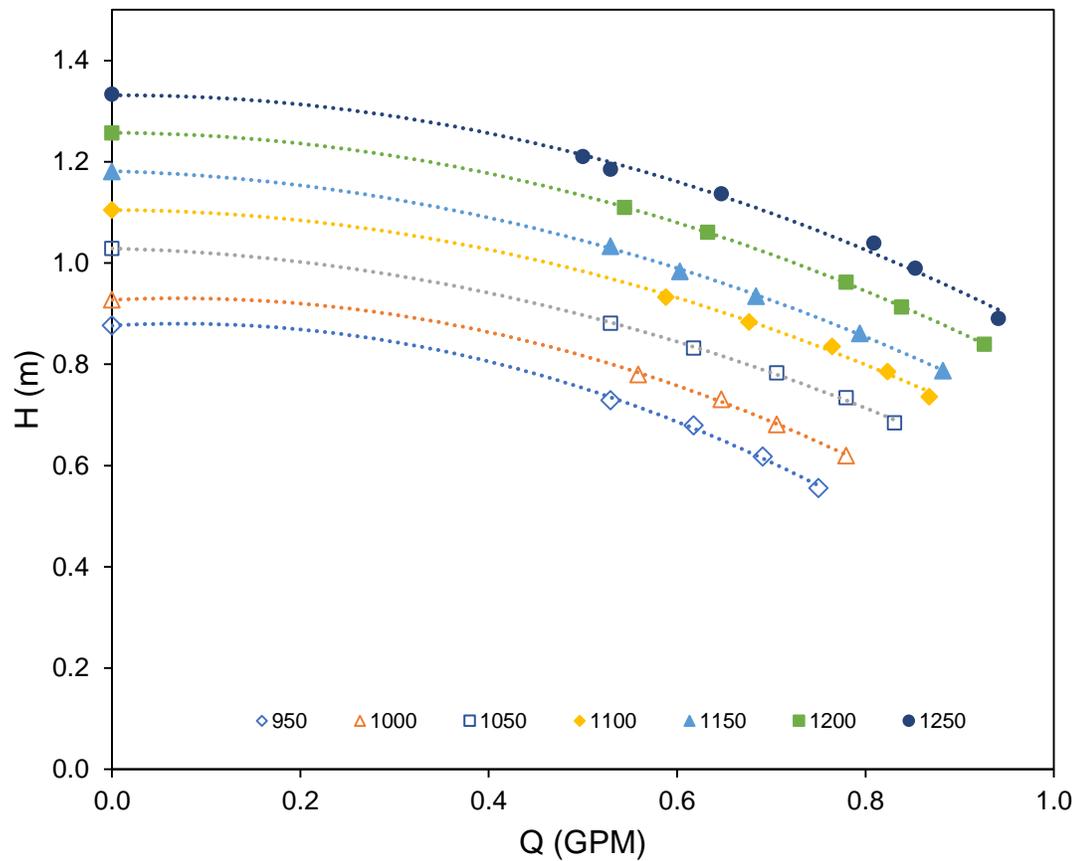


Figura 23. Curvas características Bomba 1 a diferente velocidad de giro.

Tabla 3. Ecuaciones de ajuste de bomba 1.

rpm	R ²	Ecuación de ajuste cuadrático
950	0.998	$H = -0.6963Q^2 + 0.1012Q + 0.8764$
1000	0.999	$H = -0.6135Q^2 + 0.0856Q + 0.9273$
1050	0.998	$H = -0.4356Q^2 - 0.0456Q + 1.0287$
1100	0.997	$H = -0.4663Q^2 - 0.0091Q + 1.1047$
1150	0.999	$H = -0.4479Q^2 - 0.0507Q + 1.1814$
1200	0.999	$H = -0.47Q^2 - 0.0115Q + 1.2572$
1250	0.993	$H = -0.4856Q^2 + 0.007Q + 1.3312$

7.3 Bomba 2.

Datos obtenidos.

Tabla 4. Datos de la bomba 2 (950-1100 rpm).

950 rpm		1000 rpm		1050 rpm		1100rpm	
Q (GPM)	P (inH ₂ O)						
0.750	5	0.779	7.5	0.831	10	0.868	12
0.691	7.5	0.721	10	0.779	12	0.809	14
0.618	10	0.676	12	0.676	16	0.735	16
0.559	12	0.544	16	0.529	20	0.691	18
0.000	18	0.000	23	0.000	26	0.559	22
--	--	--	--	--	--	0.000	28

Tabla 5. Datos de la bomba 2 (1150-1250 rpm).

1150 rpm		1200 rpm		1250 rpm	
Q (GPM)	P (inH ₂ O)	Q (GPM)	P (inH ₂ O)	Q (GPM)	P (inH ₂ O)
0.882	13	0.926	16	0.956	18
0.809	16	0.912	18	0.897	22
0.706	19	0.809	22	0.838	24
0.647	21	0.691	26	0.779	26
0.544	24	0.544	30	0.647	30
0.000	31	0.000	36	0.529	33
--	--	--	--	0.000	39

Tal como en la bomba 1 con los datos obtenidos se procedió a graficar las correspondientes curvas características para cada velocidad de giro.

Como se puede observar en la Figura 23 y 24 las curvas características de la bomba 2 no son exactamente iguales a las de la bomba 1 más sin embargo durante la experimentación se trató de ajustar lo mejor posible.

Cabe mencionar que los datos obtenidos para las bombas 1 y 2 fueron el punto de partida para la experimentación siguiente, la operación de bombas en serie, por tal motivo y como base de partida se buscó operar ambas bombas en condiciones iguales o, lo más parecidas posibles.

Las ecuaciones de ajuste de las Tablas 3 y 6 hacen directamente referencia al cabezal máximo en cada velocidad que se puede relacionar con el termino constante, así mismo el termino cuadrático se relaciona con la energía cinética y el termino lineal con la energía asociada a la presión que ejerce el fluido.

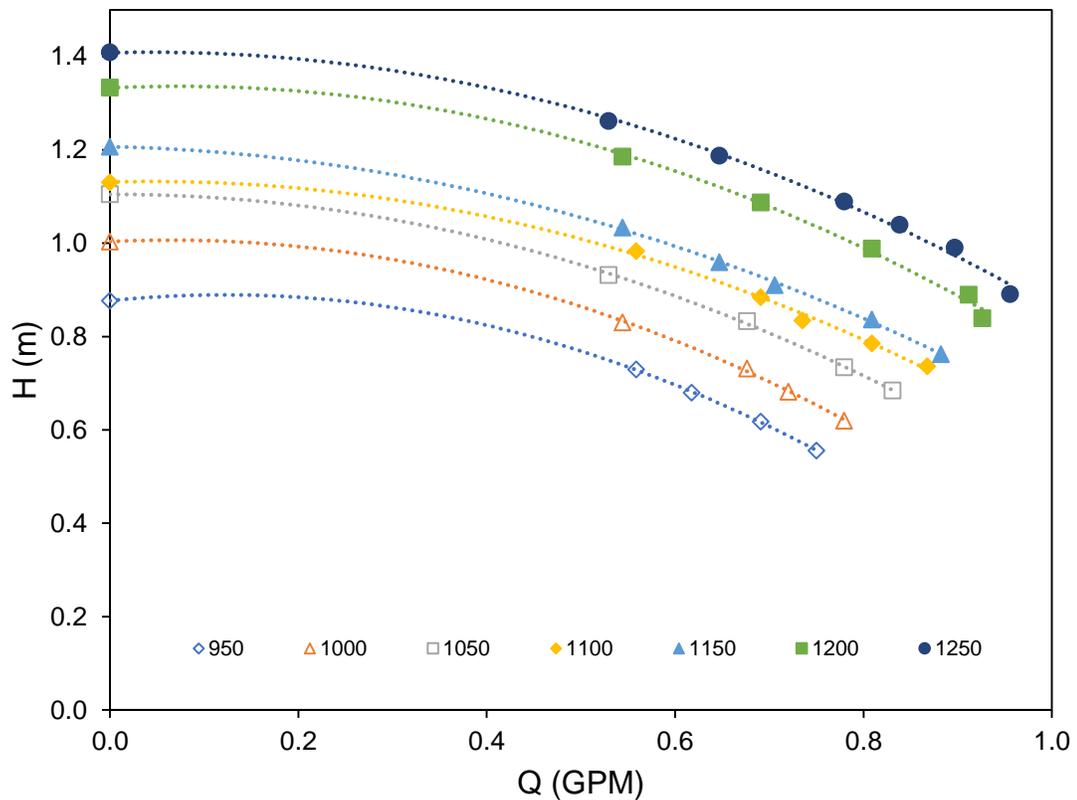


Figura 24. Curvas características de la Bomba 2.

Tabla 6. Ecuaciones de ajuste de bomba 2.

rpm	R ²	Ecuación de ajuste cuadrático
950	0.999	$H = -0.8454Q^2 + 0.2069Q + 0.8767$
1000	0.999	$H = -0.7535Q^2 + 0.0984Q + 1.0034$
1050	0.999	$H = -0.6118Q^2 + 0.0036Q + 1.1048$
1100	0.997	$H = -0.5943Q^2 + 0.0532Q + 1.1311$
1150	0.999	$H = -0.5231Q^2 - 0.0415Q + 1.2069$
1200	0.996	$H = -0.6583Q^2 + 0.0979Q + 1.3328$
1250	0.995	$H = -0.599Q^2 + 0.053Q + 1.4082$

Si bien durante la experimentación se trató de obtener curvas características iguales, existe una diferencia que si bien es mínima vale la pena mencionarse. Es debido a las pérdidas de carga por fricción a la descarga de la bomba 2 donde se presentan las condiciones para obtener este comportamiento ya que, por este fenómeno, se requiere una velocidad de giro un poco mayor para obtener similares condiciones de operación, esto se observa con mayor facilidad a altas rpm.

Si la finalidad es analizar los datos proporcionados por el fabricante se puede hacer un análisis respecto al cabezal y el flujo máximo a diferentes rpm resultando en la siguiente grafica Figura 25.

De esta manera haciendo un ajuste lineal se puede extrapolar el comportamiento del sistema para el flujo máximo de la bomba.

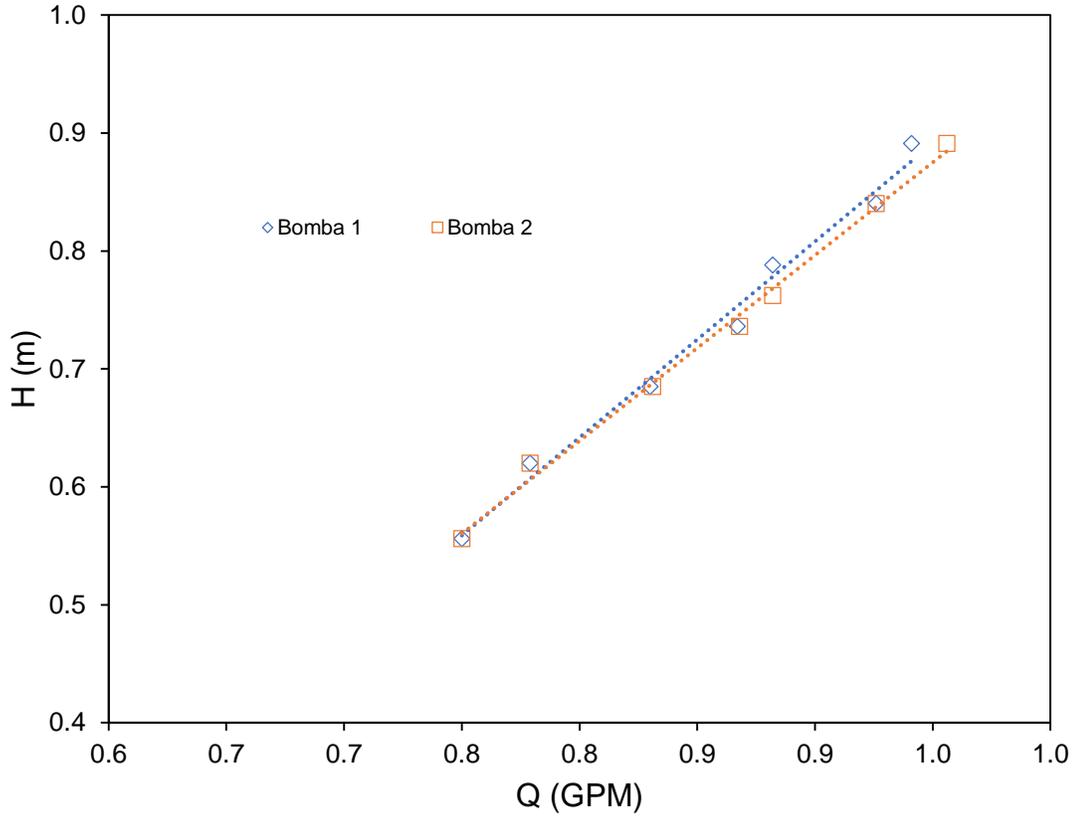


Figura 25. Comportamiento del cabezal y el caudal a diferentes rpm.

7.4 Operación de bombas centrífugas en serie.

Datos obtenidos operando las bombas 1 y 2 en serie ambas a las condiciones de velocidad, flujo y cabezal antes presentadas en la sección 6.1, 6.2 y 6.3

Tabla 7. Datos del sistema operando en serie (950-1100 rpm).

950 rpm		1000 rpm		1050 rpm		1100 rpm	
Q (GPM)	P (inH ₂ O)						
0.956	18	1.000	22	1.073	25	1.104	28
0.926	22	0.912	30	0.956	35	0.956	38
0.882	26	0.809	38	0.824	45	0.846	48
0.838	30	0.676	46	0.676	55	0.676	58
0.779	34	0.618	50	0.529	62	0.559	64
0.706	38	0.544	53	0.000	71	0.000	75
0.647	42	0.000	63	--	--	--	--
0.559	46	--	--	--	--	--	--
0.000	58	--	--	--	--	--	--

Tabla 8. Datos del sistema operando en serie (1150-1250 rpm).

1150 rpm		1200 rpm		1250 rpm	
Q (GPM)	P (inH ₂ O)	Q (GPM)	P (inH ₂ O)	Q (GPM)	P (inH ₂ O)
1.146	29	1.208	34	1.250	38
1.042	38	1.083	44	1.125	48
0.941	46	0.956	54	1.000	58
0.838	54	0.838	64	0.868	68
0.721	62	0.676	74	0.706	78
0.544	70	0.544	80	0.529	87
0.000	80	0.000	89	0.000	94

En el caso que se presenta a continuación (Figura 26) el objeto de análisis es el cabezal dado a que presenta un cambio significativo en este parámetro, en algunos casos incluso supero al cabezal sumado de ambas bombas.

Este efecto de operar en serie es el esperado basado en la teoría ya que en esta se estima el cabezal como la suma de los cabezales individuales, la discrepancia del cabezal total puede ser atribuido a errores en la medición ya que se emplearon dispositivos analógicos.

Para observar de manera más evidente en la Figura 27 se presenta la gráfica de la bomba 1 y 2 con la respectiva grafica operando en serie, todo esto a una

velocidad de 1100 rpm. Es aquí donde podemos observar de manera clara como el cabezal alcanza los valores previstos.

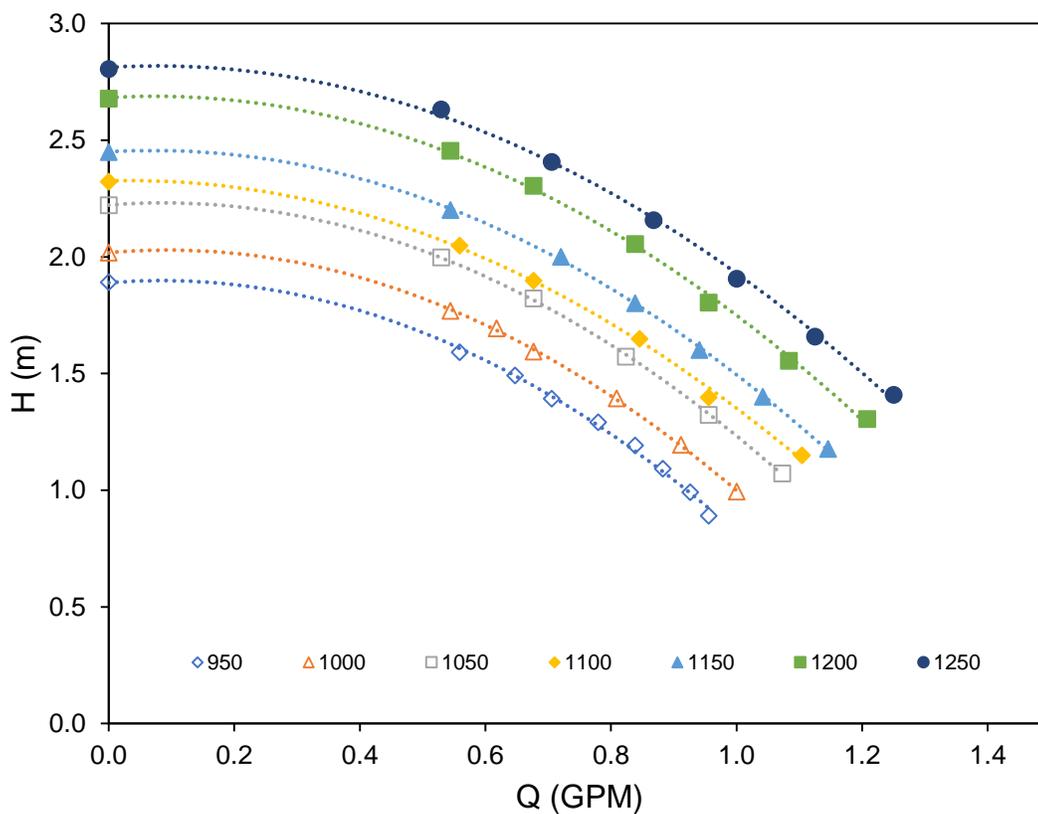


Figura 26. Curvas características operando en serie a diferentes velocidades.

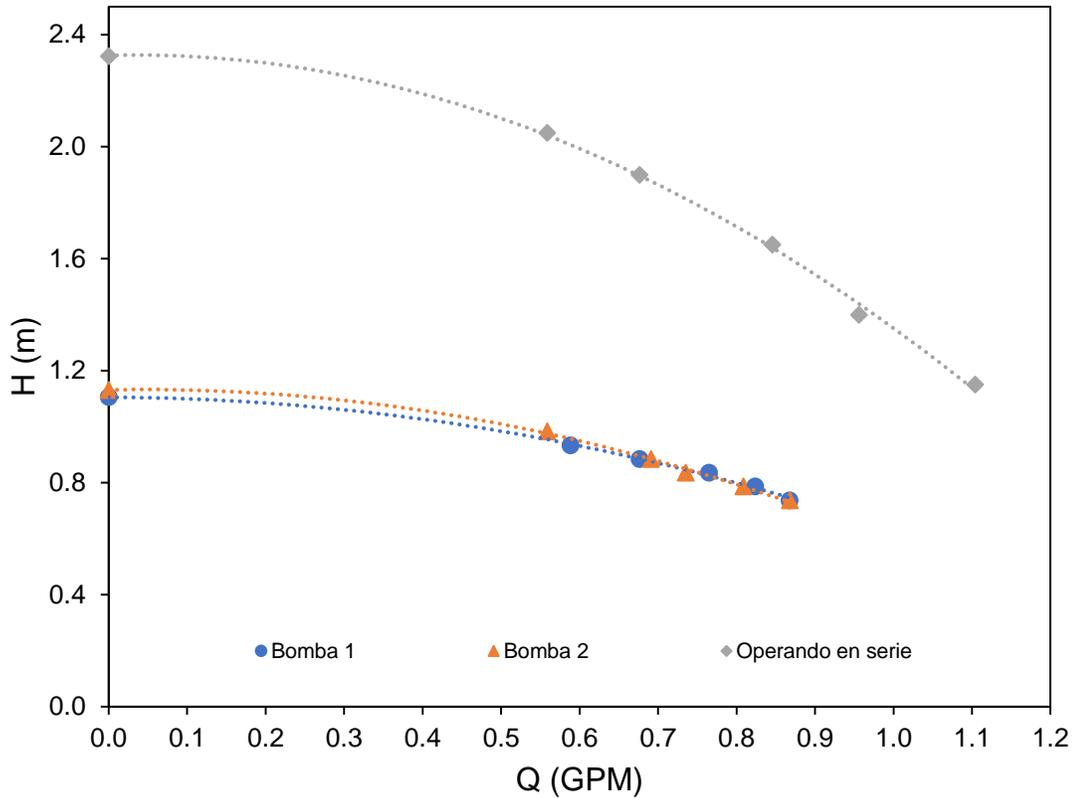


Figura 27. Curvas características del sistema en serie, bomba 1 y 2 a 1100rpm.

7.5 Operación de bombas centrífugas en paralelo.

Como se planteó anteriormente en la sección 5.2 y 6.2 para desarrollar esta operación y visualizar los efectos en lo que al flujo se refiere, es necesario recurrir al accesorio adicional con tubería en 3/4 de pulgada debido a las restricciones que el diámetro de tubería y la válvula de control imponen por tal motivo se prescindirá de estos instrumentos.

Tomando en cuenta lo antes dicho, para dos bombas operando a iguales condiciones se obtuvieron los siguientes datos.

Tabla 9. Datos del sistema operando en serie y en paralelo.

Bomba 1		Bomba 2		paralelo	serie	Q ideal (GPM)
Q (GPM)	RPM	Q (GPM)	RPM	Q (GPM)	Q (GPM)	
0	0	0	0	0.00	0.00	0
0.5	650	0.5	650	0.80	0.78	1
0.75	950	0.75	950	1.29	0.96	1.5
1	1300	1	1300	1.79	1.21	2
1.5	199	1.5	199	2.60	1.69	3
2	2550	2	2550	3.45	2.15	4
2.5	3200	2.5	3200	4.15	2.63	5
3	3850	3	3850	4.85	3.15	6

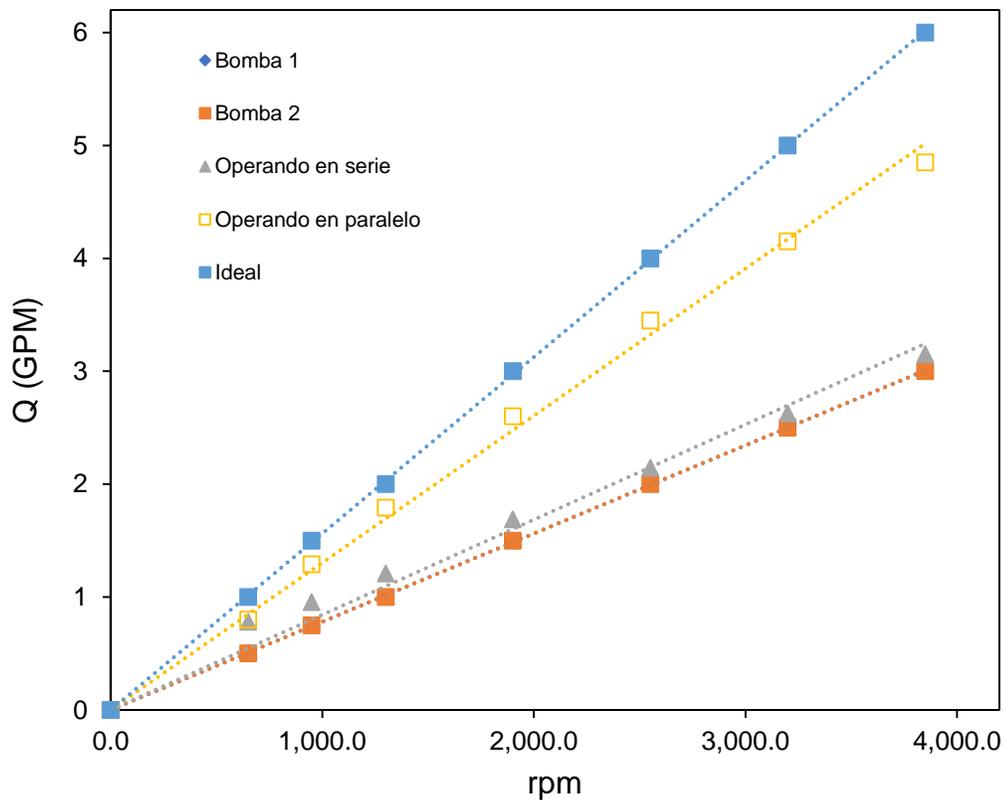


Figura 28. Grafica comparativa de los flujos operando en serie y en paralelo.

Ahora bien, para visualizar el comportamiento respecto al cabezal en comparación a una bomba y a la operación en serie se realizó el experimento con el accesorio de 1/2 obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 10. Datos del sistema operando en paralelo (950-1100 rpm).

950 rpm		1000 rpm		1050 rpm		1100 rpm	
Q (GPM)	P (inH ₂ O)						
0.868	12	0.897	15	0.926	17	0.980	19
0.669	13	0.735	16	0.824	18	0.926	20
0.522	14	0.529	17	0.647	19	0.838	21
0.000	18	0.000	22	0.529	20	0.676	22
--	--	--	--	0.000	25	0.529	23
--	--	--	--	--	--	0.000	28

Tabla 11. Datos del sistema operando en paralelo (1150-1250 rpm).

1150 rpm		1200 rpm		1250 rpm	
Q (GPM)	P (inH ₂ O)	Q (GPM)	P (inH ₂ O)	Q (GPM)	P (inH ₂ O)
1.000	22	1.063	25	1.292	28
0.926	23	0.956	26	0.926	29
0.838	24	0.838	27	0.809	30
0.706	25	0.588	29	0.706	31
0.544	26	0.529	30	0.544	32
0.000	30	0.000	36	0.000	38

En la Figura 27 se puede observar como en el sistema operando con el accesorio de 1/2 pulgada no se obtiene el resultado esperado en lo que al flujo se refiere, sin embargo, se puede apreciar el comportamiento respecto al cabezal del sistema como anteriormente se planteó. En la Figura 28 se puede observar el efecto en el flujo respecto a una bomba y dos bombas operando tanto en serie como en paralelo, así mismo podemos ver una curva de comportamiento ideal esperado.

Aunque el resultado obtenido en el sistema respecto al ideal representa el 80% del cambio esperado, es apreciable el efecto de operar en paralelo en el accesorio de 3/4 pulgada.

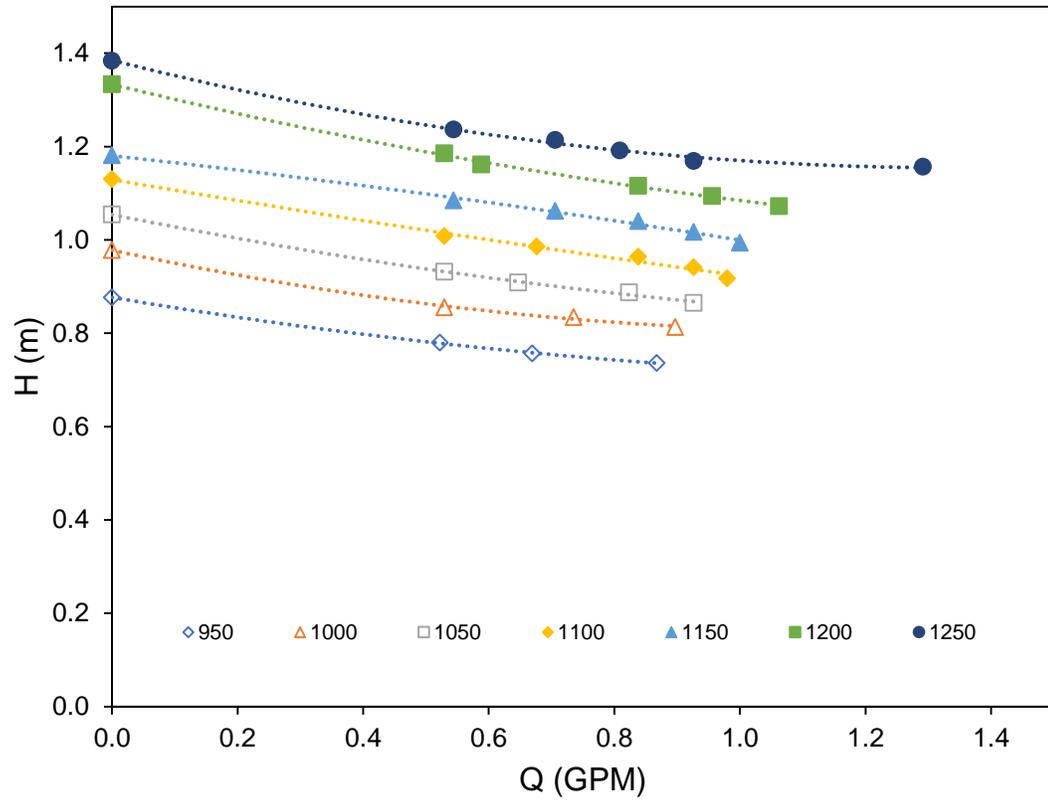


Figura 29. Curva característica operando en paralelo a diferentes velocidades.

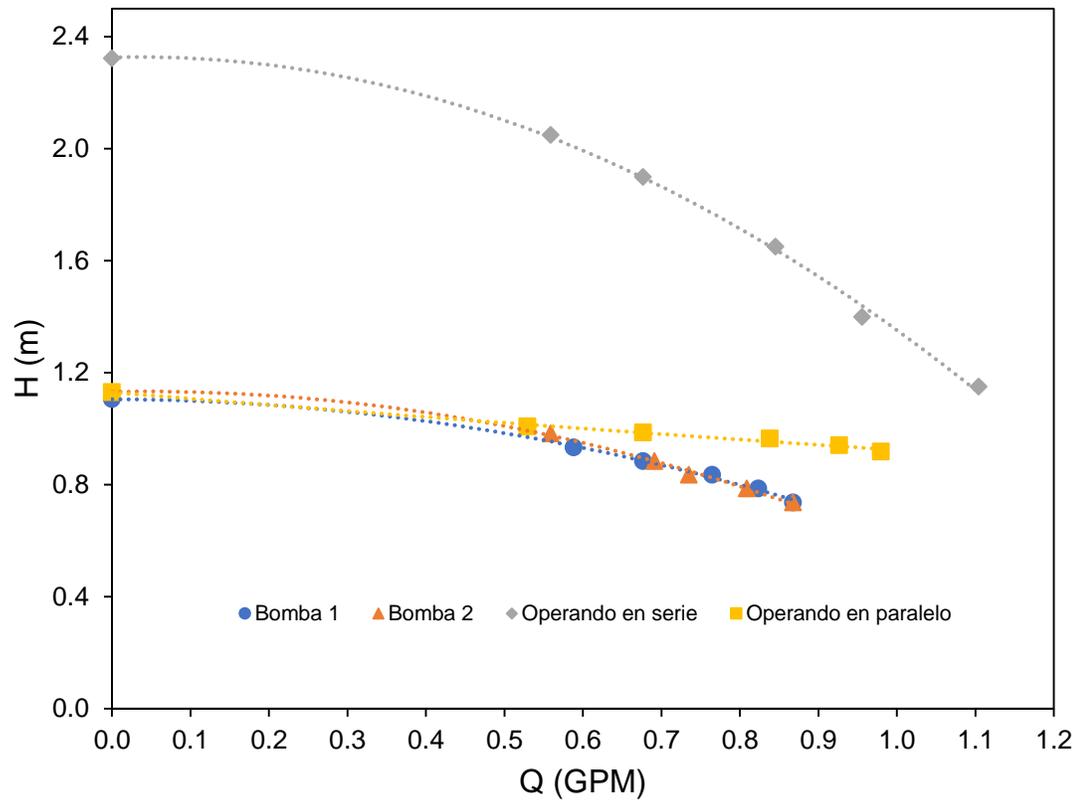


Figura 30. Curvas características del sistema en serie, paralelo, bomba 1 y 2 a 1100rpm.

Planteado el por qué operar con accesorios diferentes en el equipo se procede a experimentar en el sistema manteniendo el flujo de una bomba constante.

Tabla 12. Datos obtenidos manteniendo la bomba 2 a 1 GPM.

Bomba 1		Bomba 2		paralelo	serie	Q ideal
Q (GPM)	RPM	Q (GPM)	RPM	Q (GPM)	Q (GPM)	(GPM)
0	0	0	0	0.00	0.00	0
0.5	650	1	1300	1.17	1.00	1.5
0.75	950	1	1300	1.58	1.13	1.75
1	1300	1	1300	1.79	1.21	2
1.5	1900	1	1300	2.23	1.33	2.5
2	2550	1	1300	2.65	1.75	3
2.5	3200	1	1300	3.00	2.00	3.5
3	3850	1	1300	3.30	2.28	4

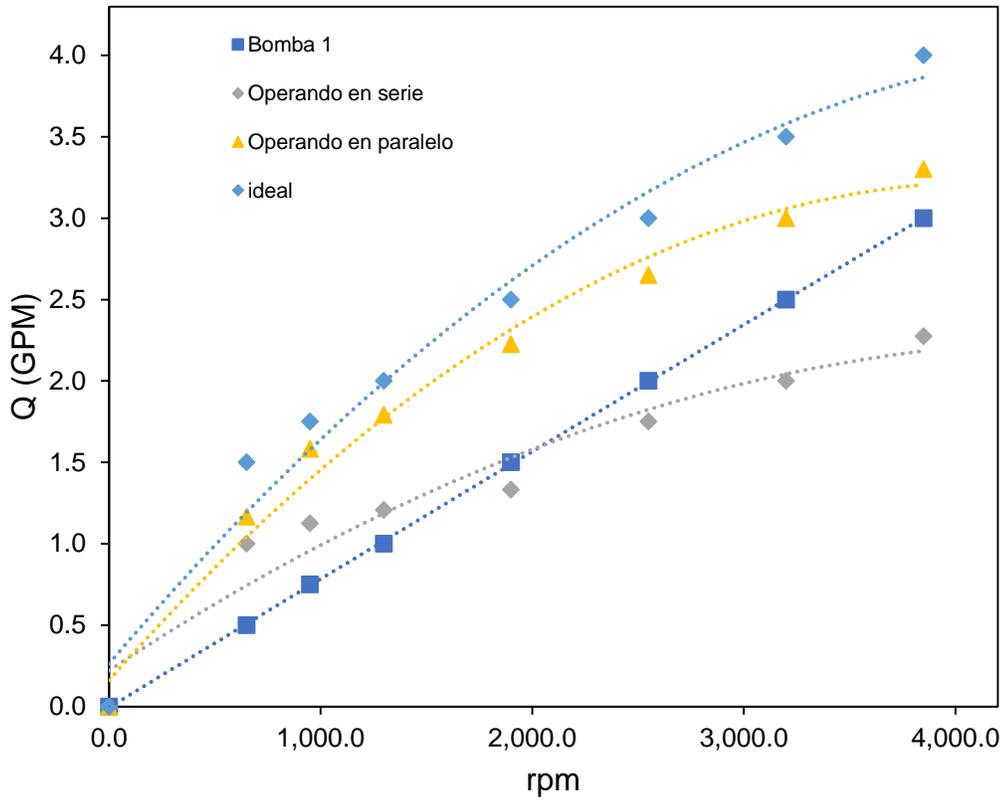


Figura 31. Grafica de flujo manteniendo la bomba 2 a 1 GPM.

Tabla 13. Datos obtenidos manteniendo la bomba 2 a 1.5 GPM.

Bomba 1		Bomba 2		paralelo	serie	Q ideal
Q (GPM)	RPM	Q (GPM)	RPM	Q (GPM)	Q (GPM)	(GPM)
0	0	0	0	0.00	0.00	0
0.5	650	1.5	1900	1.46	1.29	2
0.75	950	1.5	1900	1.83	1.38	2.25
1	1300	1.5	1900	2.25	1.46	2.5
1.5	1900	1.5	1900	2.60	1.69	3
2	2550	1.5	1900	3.10	1.92	3.5
2.5	3200	1.5	1900	3.43	2.15	4
3	3850	1.5	1900	3.78	2.45	4.5

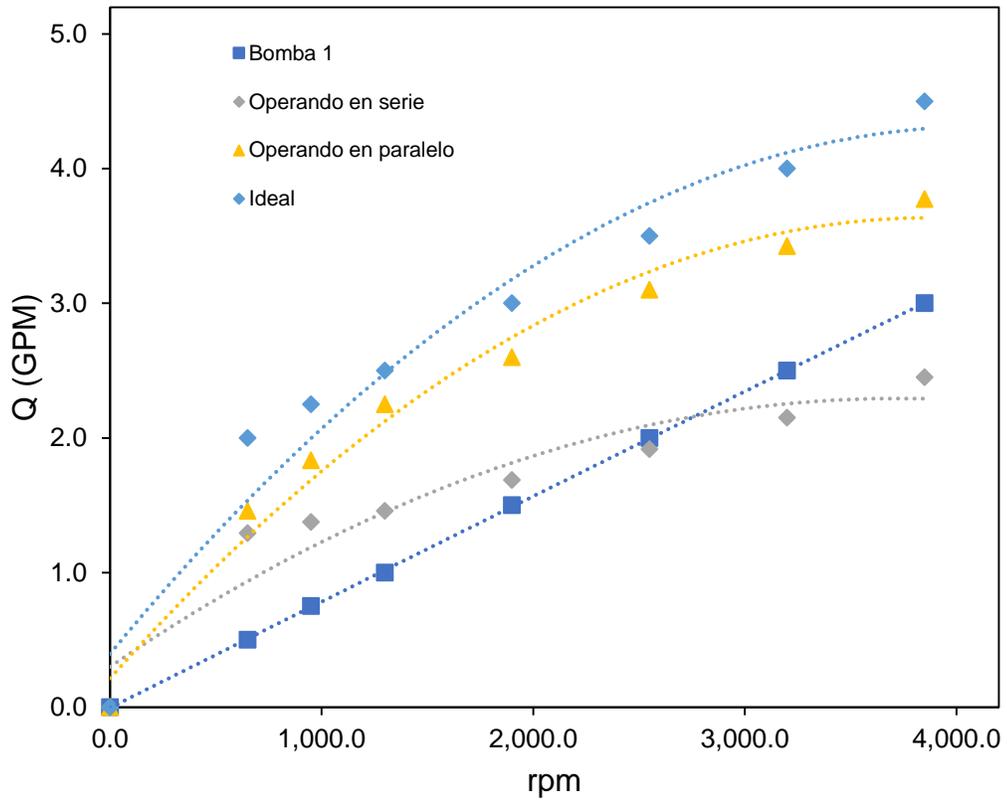


Figura 32. Grafica de flujo manteniendo la bomba 2 a 1.5 GPM.

Tabla 14. Datos obtenidos manteniendo la bomba 2 a 2 GPM.

Bomba 1		Bomba 2		paralelo	serie	Q ideal
Q (GPM)	RPM	Q (GPM)	RPM	Q (GPM)	Q (GPM)	(GPM)
0	0	0	0	0.00	0.00	0
0.5	650	2	2550	1.88	1.63	2.5
0.75	950	2	2550	2.13	1.69	2.75
1	1300	2	2550	2.60	1.77	3
1.5	1900	2	2550	3.08	1.91	3.5
2	2550	2	2550	3.45	1.92	4
2.5	3200	2	2550	3.80	2.40	4.5
3	3850	2	2550	4.35	2.68	5

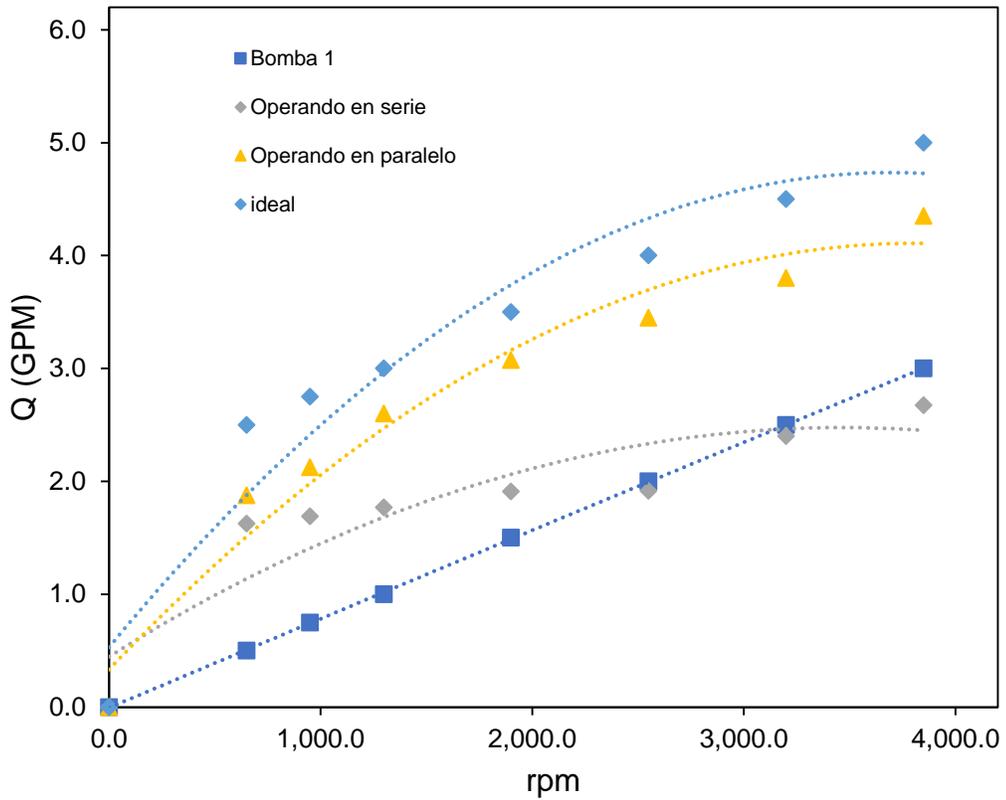


Figura 33. Grafica de flujo manteniendo la bomba 2 a 2 GPM.

Tabla 15. Datos obtenidos manteniendo la bomba 2 a 2.5 GPM.

Bomba 1		Bomba 2		paralelo	serie	Q ideal
Q (GPM)	RPM	Q (GPM)	RPM	Q (GPM)	Q (GPM)	(GPM)
0	0	0	0	0.00	0.00	0
0.5	650	2.5	3200	2.30	1.92	3
0.75	950	2.5	3200	2.40	2.00	3.25
1	1300	2.5	3200	2.90	2.08	3.5
1.5	1900	2.5	3200	3.40	2.25	4
2	2550	2.5	3200	3.83	2.40	4.5
2.5	3200	2.5	3200	4.15	2.63	5
3	3850	2.5	3200	4.50	2.88	5.5

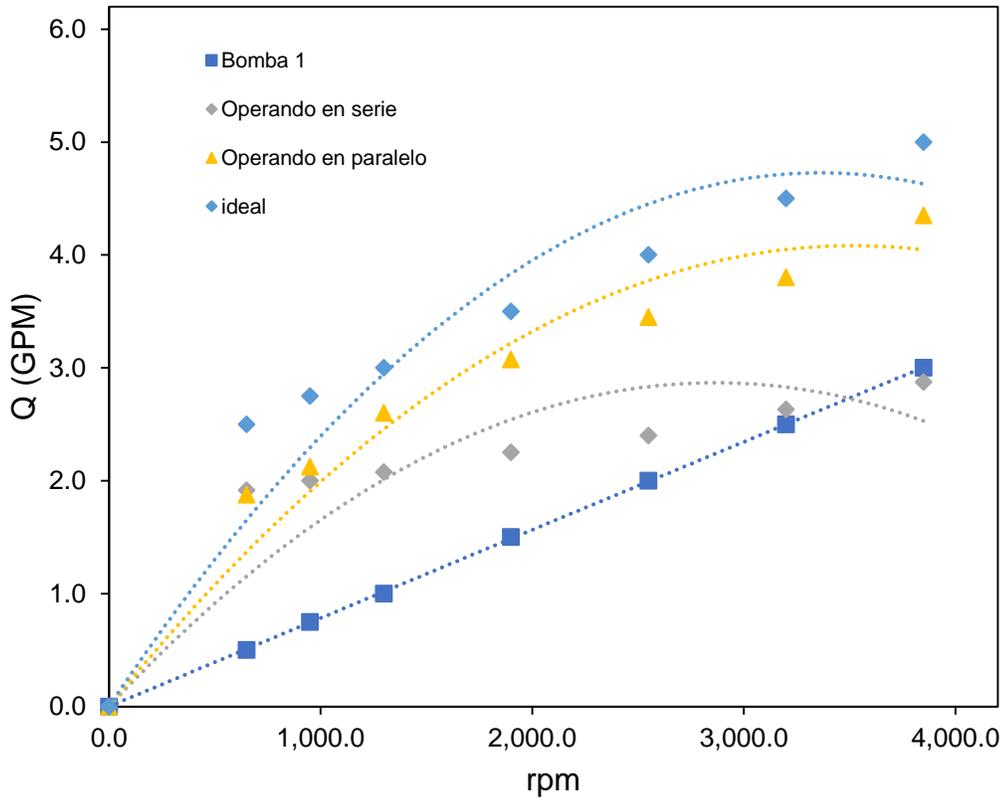


Figura 34. Grafica de flujo manteniendo la bomba 2 a 2.5 GPM.

En las Figuras 31, 32, 33 y 34 se observa como a altas revoluciones no es tan pronunciado el efecto de operar en paralelo en comparación con una bomba respecto al flujo, incluso el efecto es más pronunciado mientras más parecido sea el flujo de las bombas, por tal motivo el operar en paralelo se recomienda siempre utilizar dos bombas idénticas.

8. CONCLUSIONES

En las plantas de procesos así como en cualquier industria donde se requiera equipo de bombeo es siempre importante conocer el cómo operarlas ya que como se ha podido demostrar en este trabajo el operar en serie significa aumentar en consideración el cabezal del sistema, es decir la altura a la cual se podrá desplazar el fluido más sin embargo el flujo no se ve afectado con mayor importancia, por el contrario, al operar en paralelo nos encontramos con una variación de cabezal mínima frente a la extensa variación de flujo.

- Efectivamente se pudo construir las curvas características tanto del sistema operando en serie y paralelo, como la de cada bomba individualmente y así poder observar las diferencias entre cada modo de operación auxiliándose de un accesorio de mayor diámetro en el caso de la operación en paralelo.
- El equipo construido se realizó efectivamente del tamaño mínimo para los mecanismos de medición disponibles y así fabricarlo en materiales económicos y a su vez funcional para los fines del laboratorio de ingeniería química de la universidad de Sonora.
- Durante la experimentación se estableció la metodología aquí descrita en la sección 5 la cual fue la utilizada para obtener los resultados presentados.

Este equipo permitirá a los alumnos de ingeniería química realizar la experimentación complementaria a la teoría de mecánica de fluidos y afianzar de mejor manera el conocimiento adquirido en clase.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] Walter L. Badger, INTRODUCCION A LA INGENIERIA QUIMICA. Primera edición McGraw Hill. Año 1970
- [2] Christie J. Geankoplis, PROCESOS DE TRANSPORTE Y OPERACIONES UNITARIAS. Tercera edición Compañía editorial continental. Año 1998
- [3] J. M. Coulson, INGENIERIA QUIMICA. Tercera edición Editorial Reverté. Año 1979.
- [4] Manuel Viejo Zubicaray, BOMBAS TEORIA, DISEÑO Y APLICACIONES. Tercera edición Limusa. Año 2006
- [5] Miguel Angel Monge Arredondo iagua <https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/que-es-y-como-se-calcula-npshdisp-bomba-centrifuga> consultado en marzo de 2019
- [6] Instituto Universitario de Tecnología, Departamento de Procesos Químicos Dr. Federico Rivero Palacio, Mecánica de los fluidos BOMBAS CENTRIFUGAS. Año 2008
- [7] Lo que hay que saber de una bomba centrifuga, full mecánica <http://www.fullmecanica.com/definiciones/b/1677-bombas-centrifugas> consultado en marzo de 2019
- [8] BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO <http://tecnologiamak4.blogspot.com/2015/09/bomba-desplazamiento-positivo-la-bomba.html> consultado en marzo de 2019
- [9] BOMBAS NEUMATICAS A DIAFRAGMA <http://termetsa.net/blog/bombas-neumaticas-a-diafragma/> consultado abril de 2019
- [10] ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE BOMBEO DE TANQUES

ELEVADOS CONTROLADO POR UN PLC, Quiroz Farias Darwin Fernando.
Año 2016

[11] División de ingeniería de CRANE, FLUJO DE FLUIDOS EN VALVULAS, ACCESORIOS Y TUBERIAS primera edición McGraw Hill. Año 1989

[12] Armfield, Series and Parallel Pumps Demonstration Unit – Issue 3.
<http://discoverarmfield.com/en/products/view/fm51/series-and-parallel-pumps-demonstration-unit> consultado en octubre de 2018

[13] GUNT Hamburg, Conexión en serie y en paralelo de bombas.
<https://www.gunt.de/es/productos/maquinas-fluidomecanicas/turbomaquinas/bombas-centrifugas/conexion-en-serie-y-en-paralelo-de-bombas/070.28400/hm284/glct-1:pa-150:ca-723:pr-843> consultado en octubre de 2018.

[14] Manual de operación de bomba Cole Parmer 75211-60 <https://pim-resources.coleparmer.com/instruction-manual/a-1299-0852.pdf> consultado en noviembre de 2018

[15] manómetros de baja presión instrutek
http://www.instrutek.com.mx/uploads/2/4/0/0/24001852/instrutek_manmetros_serie_200.pdf consultado en marzo de 2019

[16] carbotecnia rotámetros de montaje en línea
<https://www.carbotecnia.info/producto/rotametros-de-montaje-en-linea/> consultado en marzo de 2019