

# Diseño de un banco de prueba experimental de bombeo de flujo multifásico

Y. González\*, L. Patiño, H. Espinoza

*Centro de Termodinámica y Mantenimiento (CTYM), Universidad de Oriente. Puerto La Cruz. Venezuela*

---

## Resumen.-

En el trabajo se presenta el diseño de un banco multifásico de prueba experimental para realizar estudios de flujos bifásico líquido-gas en el comportamiento de bombas de disco. La finalidad del banco es el estudio y experimentación de este tipo de bombas bajo condiciones específicas de caudal, presiones de succión como de descarga, y fracciones de gas, utilizando flujos que presenten dos fases simultáneamente (agua y aire). La etapa de diseño comprende la selección de los componentes del banco determinando su función específica el dimensionamiento de las tuberías que lo conforman así como la selección y utilización de la instrumentación a utilizar en el mismo. Este trabajo incluye una documentación que consta de cálculos tipos, planos de conjunto, y características de los equipos seleccionados, los cuales permiten una futura construcción de este banco, para así obtener datos del proceso de bombeo multifásico con los cuales se podrán desarrollar modelos matemáticos de este fenómeno.

**Palabras clave:** Banco de prueba, bombeo, flujo multifásico

## Design of a Testing Bench of Multiphase Flow Pumping

### Abstract.-

In the present work is developed the design of a multiphase flow pumping testing bench; this design allows to realize studies in the multiphase pumping area, using a Disc Flow Pump. The design intention of the multiphase flow pumping bench is the testing of this type of pump under specific conditions of flow, inlet pressure, outlet pressure and different fractions of gas, using flows that present two phases (water and air). The design include the selection of the components present in the multiphase flow pumping bench determining their specific function, the sizing of the pipes, and also the selection of the instrumentation used. This work include the documentation including the calculus, types, set planes and characteristics of the selected equipment, all this permits a future construction of the pumping bench, so in this way we can obtain the data of the process of a multiphase flow pumping in witch it can be develop mathematics models of this action.

**Keywords:** Testing bench, Pumping, multiphase flow

### 1. Introducción

El inicio de los estudios para desarrollar una tecnología de flujo multifásico nace a partir de la década de los años 50, dada la necesidad de encontrar una herramienta que facilitara el control, medición y predicción de los patrones de flujo presentes en tuberías, para posteriormente aplicar los logros alcanzados por esta nueva tecnología en los sectores industriales donde se presente el fenómeno. En la actualidad sólo el transporte de flujo multifásico ha sido extensamente estudiado, debido a la necesidad de conocer su comportamiento dada la gran cantidad de aplicaciones industriales, sin embargo, el bombeo de flujo multifásico ha sido, relativamente, poco investigado.

En el presente se desarrolla el diseño de un banco experimental para el estudio del fenómeno de bombeo multifásico (gas-líquido) en bombas de discos. Las bombas de disco tienen la particularidad que utilizan el principio del arrastre del fluido por el disco a nivel de la capa límite. Esta bomba ha sido desarrollada para manejar fluidos con partículas sólidas y ha mostrado ser una alternativa para el transporte de crudo bifásico, especialmente para grandes relaciones gas/líquido. En esta última aplicación falta conocer mejor su comportamiento, de allí la necesidad de realizar mas investigación.

### 2. Descripción general del banco experimental

#### 2.1. Especificaciones de diseño del banco

El banco permitirá las siguientes especificaciones:

---

\*Autor para correspondencia

Correo-e: ygonzalez@anz.udo.edu.ve (Y. González)

- Permitir la variación (0 % – 80 %) de la fracción de gas ( $\lambda g$ ).
- El mecanismo de accionamiento de la bomba multifásica a ensayar deberá tener velocidad variable.
- Determinar parámetros de flujo (presión, temperatura y caudal) en distintas partes del sistema.
- Permitir que el flujo multifásico sea visualizado a la succión de la bomba a ensayar.

Ahora, se describen los criterios generales para el diseño:

- El diseño del banco se rigió por los criterios establecidos por las normas de aplicación en Venezuela (PDVSA, ASME, ASTM, etc.), y por los fundamentos teóricos de la ingeniería mecánica.
- Utilizar instrumentos con la precisión y exactitud adecuada para trabajos de investigación.
- Para la zona de observación se debe utilizar sección transparente de *plexiglass* u otro material que resista una presión equivalente a 413,685 kPa.
- Flexibilidad del banco para adaptarlo a otros proyectos de investigación.
- Fácil ejecución, montaje y manejo del mismo.

## 2.2. Descripción del banco

El diseño fue dividido en cuatro unidades que se describen a continuación. (Figura 1)

### *Unidad de almacenaje, manejo y control de la línea de líquido monofásico*

Esta formada por un tanque de almacenamiento y separación de líquido, el cual está colocado como base del circuito del banco de lazo cerrado sin que se presente grandes cambios de temperatura por la recirculación del fluido. Como sistema de manejo de líquido se utiliza una bomba monofásica con una válvula de corte de flujo a la succión y a la descarga con una derivación (*bypass*) con el fin de controlar el fluido suministrado por la bomba. Luego vendrá la descarga, originándose la línea de manejo y medición de líquido monofásico, en el cual se cuenta con equipos de medición de caudal, presión, temperatura y una válvula *check* para evitar el contraflujo que se pueda presentar en el mezclador.

### *Unidad de almacenamiento y control de la línea de flujo de gas monofásico*

Para esta unidad se seleccionó un equipo compresor conectado a un pulmón que eliminará las pulsaciones que puedan generarse y además tener aire de reserva para las pruebas. Al pulmón se le conecta la línea de alimentación y control con su respectiva válvula de regulación (caudal y presión), y tomas de medición de presión, caudal y temperatura. También se tiene una válvula de retención para evitar el contraflujo.

### *Unidad de mezcla y línea de succión multifásica*

Aquí se cuenta con dos derivaciones en forma de *T* las cuales permiten la unión de los dos flujos monofásicos que crean el flujo bifásico. Estas derivaciones permitirán, si se requiere, la formación de patrones de flujo en la succión de la bomba multifásica. A la salida del segundo mezclador se coloca una derivación, una de las salidas tiene una válvula de corte de flujo para la desviación de patrones de flujo no deseados durante las pruebas. La otra salida está conectada a la succión de la bomba a ensayar; este tramo de tubería cuenta con medidores de presión y temperatura, además de contar con una sección de tubería transparente que permita la observación del flujo que se presente en dicho momento.

### *Unidad de bombeo y descarga multifásica*

La presente unidad está formada por un motor eléctrico calibrado para el accionamiento de la bomba a ensayar, con su variador de frecuencia. Por medio de esta unidad se determinarán los parámetros de potencia consumida, rpm, etc. A la descarga de la bomba multifásica, la tubería presenta una válvula de regulación de flujo, medidores de presión y temperatura, para luego retornar la mezcla al tanque y formar un lazo cerrado.

## 3. Diseño hidráulico del banco experimental

### 3.1. Selección de las bombas del sistema y equipo compresor

#### 3.1.1. Selección de la bomba de disco (multifásica)

La bomba en estudio es multifásica de tipo disco, la cual es la razón de este trabajo. La escogencia se realizó una vez fijado los niveles de operación máximos y mínimos (presión, caudal, etc.) en el banco de pruebas. Las características de la bomba de disco se tomaron en consideración para el desarrollo del banco experimental.

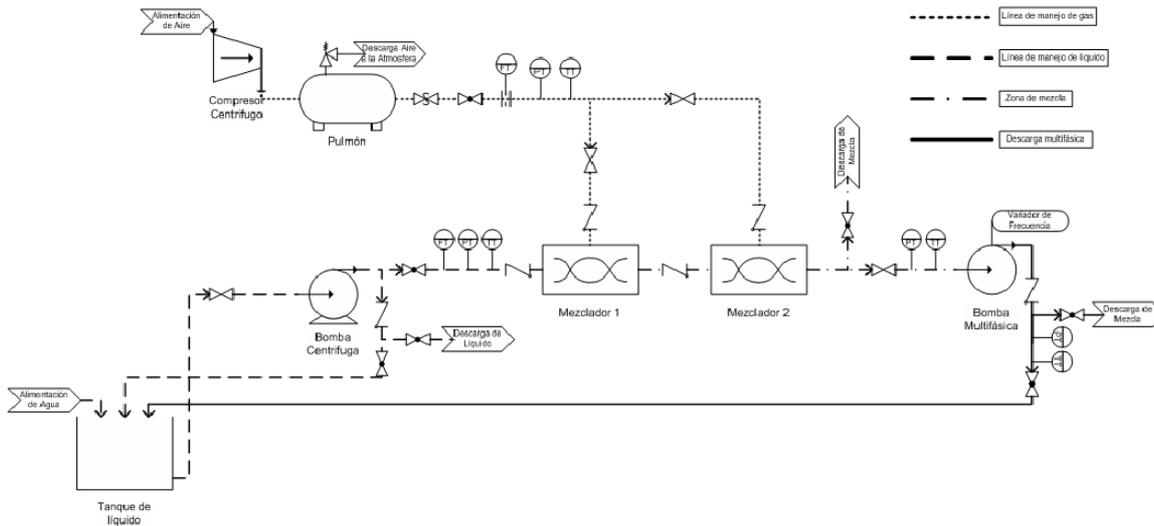


Figura 1: Esquema del banco de pruebas.

### 3.1.2. Selección de la bomba de manejo de líquido (monofásica)

La bomba seleccionada es de tipo centrífuga, debido a que ésta no presenta problemas en cuanto al control de pulsaciones, lo cual sería una ventaja en comparación con otras bombas. A partir de la ecuación de Bernoulli (Ec. 1) se verificó a través de la altura de bombeo que la bomba satisface los requerimientos en el banco de pruebas.

### 3.1.3. Selección del equipo compresor

La escogencia se realizó una vez conocido la presión, caudal y calidad de aire a manejarse en la línea de flujo gas, por medio de cálculos realizados para obtener las características de la tubería de manejo de gas. El compresor es de tipo tornillo y 100 % exento de aceite, debido a que este no presenta problemas en cuanto al control de pulsaciones y no requieren fundaciones y/o anclajes, a demás, puede ser instalado cerca del usuario, debido a que no genera mucho ruido y se evita inconvenientes con la presencia de humedad, aceite y partículas sólidas en el aire comprimido.

## 4. Diseño de tuberías y selección de accesorios

### 4.1. Diseño de la línea de tubería de transporte de agua

Los criterios para el diseño son los siguientes: La máxima presión ( $P_2$ ) que presentará la línea de distribución de agua esta determinada por la presión máxima que se fija al final de la red (mezclador), la cual es 275,79 kPa. El caudal máximo de diseño que circula

por la red de la tubería es el máximo caudal que suministra la bomba de manejo de líquido ( $0,022 \text{ m}^3/\text{s}$ ). El método utilizado para el diseño de este tramo de tubería consistió en determinar el diámetro de la misma a partir de un diámetro supuesto (4 pulg.), que por medio de la ecuación de Bernoulli aplicado al sistema de manejo de líquido (Ec. 1), se verificó que la caída de presión en el sistema fuese menor al 10 % de la máxima presión.

$$Z_1 + H_b = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \sum H \quad (1)$$

### 4.2. Diseño de la línea de tubería de transporte de agua

Los criterios para el diseño son: La máxima presión ( $P_2$ ) que presentará esta línea está determinada por la presión máxima que se fijó al final de la red (mezclador), la cual es 275,79 kPa. Se asume un proceso adiabático de compresión y se calcula la temperatura de descarga del compresor. El caudal de diseño que circula por la red de la tubería en cualquier punto es de  $13 \text{ m}^3/\text{min}$ . el cual es el máximo caudal que suministra el equipo compresor. Para el diseño del tramo de tubería de gas se procedió en forma similar a la sección 4.1. El diámetro de tubería fue de 2 pulg.

$$P_2 - P_1 = \gamma \sum H \quad (2)$$

### 4.3. Diseño de la línea de tubería de transporte de aire comprimido

Los criterios de selección de esta línea son: la presión máxima de la red de distribución de flujo multifásico (agua y aire) está determinada por la máxima presión

que se genera en el sistema a la descarga de la bomba de disco, la cual es 930,79 kPa (135 Psi). El caudal de diseño que circula por la red de la tubería en cualquier punto es de 0,022 m<sup>3</sup>/seg (0,780 pie<sup>3</sup>/seg.), el cual es el máximo caudal que suministra la bomba. Cuando se trata de tuberías que transportan flujo bifásico, las pérdidas que se generan en estas son influenciadas por la formación de la interfase entre el líquido y el gas, además de los efectos de fricción, elevación y aceleración. Para el diseño de esta línea de tubería, se fijó un diámetro de 2,5 pulg. y se realizaron verificaciones mediante las correlaciones empíricas de flujo bifásico (Ec. 3) expuestas por Dukler, por ser la más usada para el cálculo de tuberías, con la finalidad de juzgar su aceptabilidad con relación a las caídas de presiones obtenidas. Las verificaciones se realizaron bajo distintas fracciones de gas y líquido.

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{friccion} \cdot L + \Delta P_{aceleracion} \cdot LH \quad (3)$$

#### 4.4. Selección de válvulas y accesorios

##### 4.4.1. Válvula de retención (check)

Dispositivo destinado a mantener el flujo en una sola dirección, preservar las bombas de sobrepresiones e impedir contraflujo en la sección de mezcla. El diámetro y presión de operación está determinada por el diámetro de la tubería y la máxima presión de trabajo.

##### 4.4.2. Válvula de compuerta

Tipo de válvula de cierre de baja resistencia al flujo que interrumpirá la corriente de agua que suministra el tanque de almacenamiento de líquido hacia la bomba. La válvula de accionamiento es manual y el diámetro y presión de operación de la válvula está determinada por el diámetro de la tubería y la máxima presión de trabajo.

##### 4.4.3. Válvula de globo

Tipo de válvula de cierre de alta resistencia al flujo. Durante el servicio, el flujo debe ser regulado, por lo que este tipo de válvulas permite un ahogamiento parejo de la descarga. Es una válvula de accionamiento manual, el diámetro y presión de operación de la válvula está determinada por el diámetro de la tubería y la máxima presión de trabajo en ella.

##### 4.4.4. Válvula de seguridad

Será instalada después del recipiente estabilizador, calibrada de tal forma, que abra cuando se sobrepase la presión máxima permisible del compresor. La válvula utilizada en este sistema será del tipo tapón, con ajuste de presión de tornillo y resorte.

#### 4.4.5. Bridas

Empleadas para unir tuberías con válvulas, equipos, etc.; con el fin de facilitar el montaje y desmontaje, y evitar las fugas de fluido transportado. Serán de acero forjado al carbono ANSI 150.

#### 4.5. Diseño de tuberías

Una vez diseñado hidráulicamente las tuberías que conforman el banco de pruebas se procede a la verificación de estas en base a las normas establecidas por ASME/ANSI. Línea de líquido (Ec. 4)

$$t = \frac{P_d \cdot D_{int}}{2 \cdot S} + A \quad (4)$$

Línea de gas (Ec. 5)

$$t = \frac{P_d \cdot D_{ext}}{2 \cdot S \cdot F \cdot E \cdot T} + C \quad (5)$$

Los resultados obtenidos indican que las tuberías seleccionadas en el diseño hidráulico cumplen con los requerimientos, debido a que los espesores seleccionados fueron mayores que los obtenidos por la norma, por lo tanto las tuberías resistirán las presiones que pudieran generarse en el sistema. La selección de la clase y diámetro de la tubería a emplear, se ajustaron a la máxima economía. Para estas líneas la norma recomienda usar acero al carbono, norma de fabricación ASTM A-53, grado B. Línea de multifásica (Ec. 6)

$$t = \frac{P_d \cdot D_{int}}{2[S \cdot E - P_d(1 - Y)]} + C \quad (6)$$

#### 4.6. Diseño del recipiente estabilizador de aire

El recipiente estabilizador de aire (pulmón) es un tanque que tendrá la capacidad de recibir y despachar aire. Preverá picos de cargas y así evitar flujos pulsantes. El recipiente cumple con la función de amortiguador de pulsaciones y regulador del fluido y la forma de este elemento es cilíndrica. El diseño de este equipo se basó en las especificaciones de la norma ASME sección VIII División I, la cual permitió definir los siguientes parámetros que determinan la construcción de este equipo:

Espesor de chapa (Ec. 7)

$$t = \frac{P_d \cdot R_{int}}{S \cdot E - 0,6P_d} \quad (7)$$

Espesor de cabezales (Ec. 8)

$$t = \frac{P_d \cdot D_{int} \cdot K_c}{2 \cdot S \cdot E - 0,2P_d} \quad (8)$$

Relación de diámetro-longitud (Ec. 9)

$$K_c = \frac{1}{6} \left[ 2 + \left( \frac{D_{int}}{2 \cdot h} \right)^2 \right] \quad (9)$$

Presión máxima de trabajo (Ec. 10)

$$P_t = \frac{S \cdot E \cdot t}{R_{int} + 0,6 \cdot t} \quad (10)$$

#### 4.7. Diseño del tanque de almacenamiento de líquido

El tanque de almacenamiento es un equipo atmosférico que tendrá la capacidad de recibir, separar, despachar y almacenar el líquido de trabajo. Preverá que la fase gaseosa continúe el recorrido de la fase líquida y así evitar que el gas llegue al sistema de manejo de líquido. La forma de este elemento es rectangular. El diseño de este equipo se basó en las especificaciones de la norma ASME A-71, la cual permite definir cada uno de los parámetros que determinan la construcción de este equipo:

Espesor de placa (Ec. 11):

$$t = \frac{b}{200} \sqrt{0,036 \cdot G \cdot H_2} \quad (11)$$

Sección transversal del tirante (Ec. 12):

$$t = \frac{P_1}{S} \quad (12)$$

Carga que actúa sobre tirantes (Ec. 13):

$$t = a \cdot b \cdot 0,036 \cdot G \cdot h_1 \quad (13)$$

## 5. Selección de los instrumentos de medición

El criterio de selección de estos instrumentos es que se permita la interconexión con una computadora, con la finalidad adquirir las distintas medidas de manera simultánea, y posteriormente exista la posibilidad de su procesamiento para su posterior análisis (tabla 1).

## 6. Curvas características del banco experimental

En una primera parte (Figura 2), se obtuvieron curvas características del sistema de manejo de líquido, bajo condiciones de flujo homogéneo para tener una referencia básica del comportamiento del sistema cuando se varía el caudal. Estos cálculos se realizaron a partir de la ecuación general del flujo de fluido (fórmula de Darcy Weisbach).

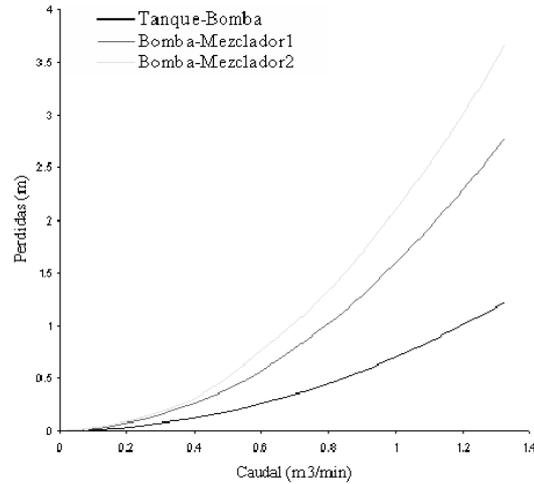


Figura 2: Curvas del sistema de manejo de líquido

En una segunda parte (Figura 3) se obtuvieron las curvas características de la sección a la cual se presentará régimen bifásico (agua-aire), calculándose estas curvas para distintas condiciones de flujo bifásico (se varió la fracción de gas  $\lambda_g$ ). Estas curvas se derivaron a partir de las relaciones matemáticas planteadas en la ecuación 3.

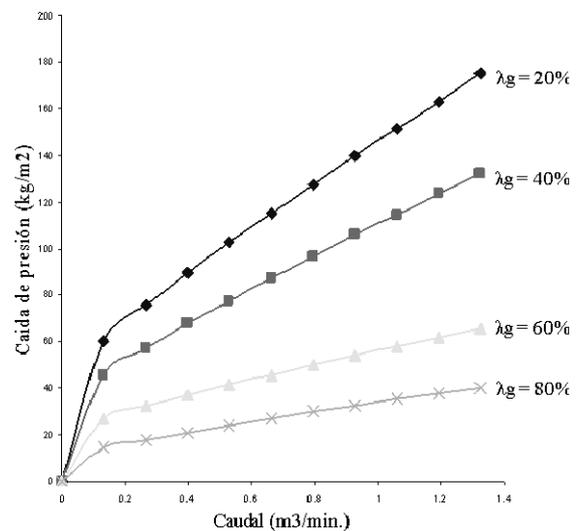


Figura 3: Curvas del sistema multifásico

En una tercera parte (Figura 4) se obtuvieron las curvas características del banco para obtener el caudal máximo del sistema (tomando en cuenta que la bomba monofásica y multifásica trabajando en serie), utilizándose como fluido solamente el agua y considerándose en el transporte la línea de manejo de líquido y flujo multifásico. Como en las secciones anteriores, se ob-

Tabla 1: Instrumentación seleccionada para el banco de pruebas

Variable	Línea de proceso	Intrumentación	características
Flujo	Línea de líquido	Medidor flujo volumétrico tipo electromagnético	Flexibles y aplicables. Proporciona medición sin obstruir el flujo. Prácticamente insensible a las propiedades del fluido. Comunes para medición de gases. La placa orificio es de tipo concéntrico, y el elemento secundario mide la caída de presión y proporciona una señal de transmisión a un sistema de indicación o control.
	Línea de gas	Medidor de flujo diferencial de placa orificio	
Presión	Línea de líquido,Línea de gas,Línea de succión y descarga multifásica	Equipos de medición de presión electrónica	Gran capacidad de respuesta, menor desgaste, y una salida, la cual es una señal eléctrica proporcional al movimiento del elemento de presión.
Temperatura	Línea de líquido,Línea de gas,Línea de succión y descarga multifásica	Termopar de Hierro-Constatan	Tiene una relación lineal con la curva de la termopar. El elemento secundario mide la Fem. y proporciona una señal de transmisión a un sistema de indicación o control.
Potencia	Bomba multifásica	- Motor calibrado, Convertidor de frecuencia	Permite ajustar parámetros, leer valores actuales y controlar el accionamiento del motor desde una computadora por medio de elementos opcionales de Drivers Window

tuvieron las curvas de perdidas para los distintos tramos de tuberías, el procedimiento consistió en montar en una sola gráfica las curvas de las bombas del banco de pruebas; para así proyectar la curva de estas bombas operando en serie y cruzarlas con la curva del sistema

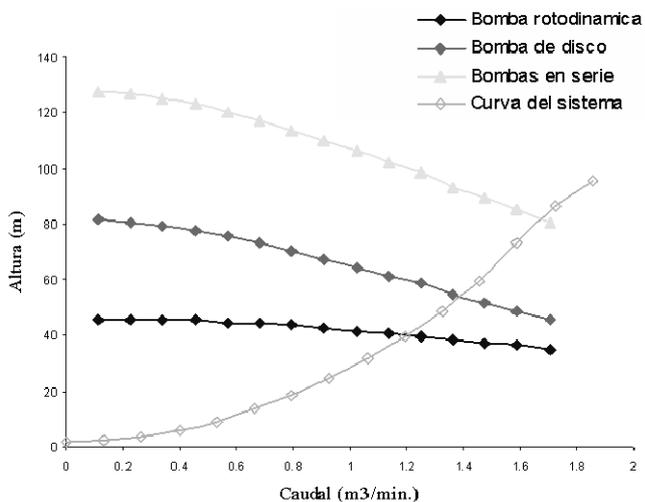


Figura 4: Curvas del sistema operando las bombas en series

### 7. Conclusiones

1. En el presente trabajo se obtiene el diseño de un banco de prueba experimental para el estudio de bombas de disco, el cual será utilizado con agua y aire como fluidos de trabajo. La utilización de otros fluidos en el banco modificaría considerablemente los resultados aquí mostrados en las curvas características.
2. Los sistemas de tuberías y el recipiente a presión cumplen con las presiones máximas exigidas, dado a que los espesores se encuentran dentro de los rangos de las presiones máximas permitidas por la Norma ASME/ANSI. Estos equipos cumplen con todos los requerimientos mínimos exigidos.
3. El sistema de adquisición de datos fue seleccionado por la necesidad de la simultaneidad de la lectura y procesamiento de los distintos parámetros de interés a ser medido (presión, caudal, etc.) dado que las variaciones con el tiempo de algunos de estos parámetros conllevaría a realizar interpretaciones erróneas del proceso de bombeo.

4. El parámetro de mayor interés tomado para el presente trabajo, fue el de la variación de la fracción de gas ( $\lambda g$ ) debido al interés de establecer correlaciones al variar la fracción de gas y el rendimiento reportado por la bomba a ensayar.
5. El banco fue diseñado para operar con un rango de caudal limitado entre 0 y 0,780  $\text{pies}^3/\text{seg}$ .
6. La línea de succión y descarga multifásica cuenta con doble sistema de medición de presión, por la necesidad de obtener una buena precisión de este parámetro a la hora de ensayar la bomba en estudio.
7. La caída de presión en la línea de tubería a la descarga de la bomba multifásica es insignificante cuando la fracción de gas es mucho mayor que la fracción de líquido en el flujo multifásico.

## Referencias

- [1] Pocello, J., Hames, P. (2000). *Disc Pump-Type Pump Technology for Hard-to-Pump Applications*, U.S.A., Proceedings of 17th International Pump Users Symposium.
- [2] Hernández, L., y Maestu, A. (2001). *Diseño, Construcción y Operación de un Banco de Ensayos para Bombeo Bifásico Gas-Líquido Viscoso*. Caracas, Venezuela. Trabajo Especial de Grado, U.S.B.
- [3] Brill, P., y Beggs, D. (1998). *Two phase flow in pipes*, 6th edition, U.S.A, University of Tulsa, Vol. I.
- [4] Martínez, M. . *Cálculo de Tuberías de Gas y Redes de Gas*. Maracaibo, Venezuela. Editorial Ediluz.
- [5] Vidal, A. (1998). *Diseño de un Banco de Experimentación para el Estudio del Bombeo Multifásico*. Caracas, Venezuela. Trabajo Especial de Grado, U.C.V., Facultad de Ingeniería.
- [6] PDVSA. (1994). Norma PDVSA No. L-TP. 1.5, Venezuela. *Manual de ingeniería de Diseño*. Vol. 13-III.
- [7] American National Standard ANSI/ISA, S5.1-(1984). *Instrumentation Symbols and Identification*.
- [8] Brandt, J.U., y Wietstock, P. (1992). *Screw Pumps for Multi-phase Pumping*, Alemania, 4ta EC Symposium.
- [9] Noghrehkar, G., Kawaji, M., Chan, A. M., Nakamura, H. y Kukita, Y. (1995). *Investigation of Centrifugal Pump Performance Under Two Phase Flow Conditions*, En Journal of Fluids Engineering, Vol. 117.
- [10] Shoham, Ovadia, (1998). *Two Phase Flow Modeling*, USB.