



**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**

**Facultad de Ingeniería**

**Departamento de Ingeniería Mecánica**

**Estudio Hidráulico en Planta Satélite  
de Regasificación de  
Gas Natural Licuado**

**Seminario de Título presentado en  
conformidad a los requisitos para  
obtener el Título de Ingeniero de  
Ejecución en Mecánica.**

**Profesor Guía:**

**Sr. Vicente Pita Vives**

**Ingeniero Supervisor:**

**Sr. Juan Francisco Díaz Poblete**

**Pablo Andrés Medina Navarrete**

**2013**

## **Resumen**

En este trabajo se realiza un estudio general del proceso de regasificación de gas natural licuado en la Planta Satélite de Regasificación (PSR). Para cumplir con este objetivo, primero, se describirán cada una de las bombas criogénicas dando a conocer su funcionamiento, las precauciones que se deben tener en cuenta para ponerlas en marcha y la correcta forma de detención. Luego, se analizan las curvas características del funcionamiento de las bombas y de los circuitos y se hace una descripción de los vaporizadores de la Planta.

La Planta Satélite de Regasificación, perteneciente a la Refinería Bio Bio ENAP, está ubicada en Pemuco, Provincia de Ñuble, Región del Bio-Bio. Recibe gas natural licuado (GNL) mediante camiones que provienen del Puerto de Quintero, Provincia de Valparaíso, Región de Valparaíso.

### Glosario.

**Aguas Abajo:** Después de.

**Aguas Arriba:** Antes de.

**Barg:** Presión en bar manométrica.

**Criogenia:** Estudio de procesos que ocurren a temperaturas extremadamente bajas.

**D:** diámetro [m]

**f:** coeficiente de fricción

**g:** aceleración de gravedad  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

**GN:** Gas natural.

**GNL:** Gas natural licuado.

**$h_R$ :** pérdidas regulares [m]

**$h_S$ :** pérdidas singulares [m]

**$h_T$ :** altura estática [m]

**L:** largo [m]

**$\eta_v$ :** rendimiento volumétrico.

**$\rho$ :** densidad  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

**PSR:** Planta satélite de regasificación.

**Q:** caudal  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

**Q':** caudal perdido por fugas.  $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

**R:** excentricidad del cigüeñal. [m]

**Re:** Numero de Reynolds.

**V:** velocidad  $\left[\frac{m}{s}\right]$

**$V_D$ :** Volumen desplazado. [m<sup>3</sup>]

**$\gamma$ :** viscosidad  $\left[\frac{kg}{m \cdot s}\right]$

**$\dot{V}_t$ :** Caudal teórico  $\left[\frac{l}{min}\right]$

## Tabla de Contenido

1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. OBJETIVOS .....	3
2.1. Objetivo General .....	3
2.2. Objetivos Específicos.....	3
3. DESARROLLO.....	4
4. Bomba Centrífuga de Descarga .....	5
4.1. Descripción, diseño y cañerías. ....	5
4.2. Puesta en marcha .....	7
4.3. Apagado de la bomba.....	8
5. Bomba Booster (Aumentadora de presión). ....	10
5.1. Descripción, diseño y cañerías. ....	10
5.2. Puesta en marcha.....	12
5.3 Detención de la bombd.....	12
6. Bomba de Pistones de Alta Presión (Triplex).....	14
6.1. Descripción, diseño y cañerías. ....	14
6.2. Puesta en marcha de la bomba .....	15
6.3. Detención de la bomba.....	16
7. Vaporizadores ambientales.....	18
8. Cálculos Bomba de Descarga .....	19
8.1. Curva Característica de la Bomba de Descarga a 5250 rpm .....	20
8.2. Curva Característica del Sistema. ....	21
8.2.1. Pérdidas singulares. ....	23
8.2.2. Cálculo de pérdidas regulares. ....	25
8.2.3. Altura estática. ....	27
8.3. Punto de funcionamiento Bomba de Descarga .....	29
8.4. Cálculos de Potencia. ....	30
8.5. Cálculos de eficiencia .....	31
9. Cálculos Bomba Booster. ....	32
9.1 Curva característica real de la bomba.....	33
9.2. Curva característica del Sistema .....	33

9.2.1. Pérdidas singulares.....	34
9.2.2. Pérdidas Regulares.....	36
9.3. Punto de funcionamiento Bomba Booster.....	37
9.4. Cálculos de potencia.....	38
9.5. Cálculos de eficiencia .....	39
10. Cálculos Bomba Triplex.....	40
10.1. Cálculos de rendimiento.....	40
11. Proposición de mejoras en la Planta Satélite de Regasificación.....	43
11.1. Re organización de los vaporizadores.....	43
11.2. Manifold de los Vaporizadores.....	44
12. Conclusiones.....	46
13. Bibliografía.....	48

## 1. Introducción.

Para satisfacer el consumo de la Refinería Biobío de ENAP, se instaló una Planta de Regasificación de Gas Natural Licuado. Dicha Planta, operando a máxima capacidad, es capaz de entregar al Gasoducto  $600.000 \left[ \frac{m^3}{\text{día}} \right]$  de gas.

El proceso se basa en la recepción de GNL en camiones equipados especialmente para transportar líquidos criogénicos a  $-160^{\circ}\text{C}$ , aproximadamente. Los camiones son pesados a la entrada y a la salida de la PSR por medio de una romana de hormigón y de esta forma se controla la masa de producto recibido.

La Planta cuenta con cuatro estaciones o islas de descarga para recibir los camiones donde son descargados por medio de bombas centrífugas que envían el GNL a estanques de almacenamiento criogénicos (4 estanques de una capacidad de  $200 [m^3]$  cada uno). Estos estanques tienen doble pared, la interior de acero inoxidable y la exterior de acero al carbono, con un material de perlita expandida y vacío entre ambas paredes. De esta forma se asegura una transferencia de calor mínima evitando la gasificación del GNL dentro del estanque.

El GNL llega a los estanques de almacenamiento por dos cañerías:

- a) Una por la parte superior donde llega a la fase gaseosa. En su extremo tiene un sistema de aspersion y su flujo es ajustado por una válvula de globo.
- b) La otra línea entra por el fondo del estanque, a la fase líquida y el caudal es regulado por una válvula de globo. Ambas son operadas desde la Sala de Control.

Luego, el GNL de los estanques es tomado por bombas centrífugas booster sumergidas, las que envían el GNL a bombas reciprocantes tipo pistón para aumentarle la presión en fase líquida, re gasificarlo en los vaporizadores y luego inyectarlo al gasoducto. Este último trabaja en un rango de presión de 35 a 70 [barg].

El rendimiento de los vaporizadores varía según el clima de cada día, debido a que realizan transferencia de calor con el ambiente, es decir que en un día de verano estos son capaces de provocar el cambio de fase de gas natural

licuado a gas natural con menor dificultad que en invierno. Por lo que en verano o cuando se tienen altas temperaturas y un viento adecuado se puede tener una mayor producción de gas natural.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo General**

Estudiar el proceso de regasificación de GNL de la Planta Satélite de Regasificación, de ENAP operada por Innergy Transportes S.A.

### **2.2. Objetivos Específicos**

i) Realizar una descripción y caracterización de cada componente del proceso de regasificación de GNL, en especial la puesta en marcha, operación y detención de las tres bombas criogénicas.

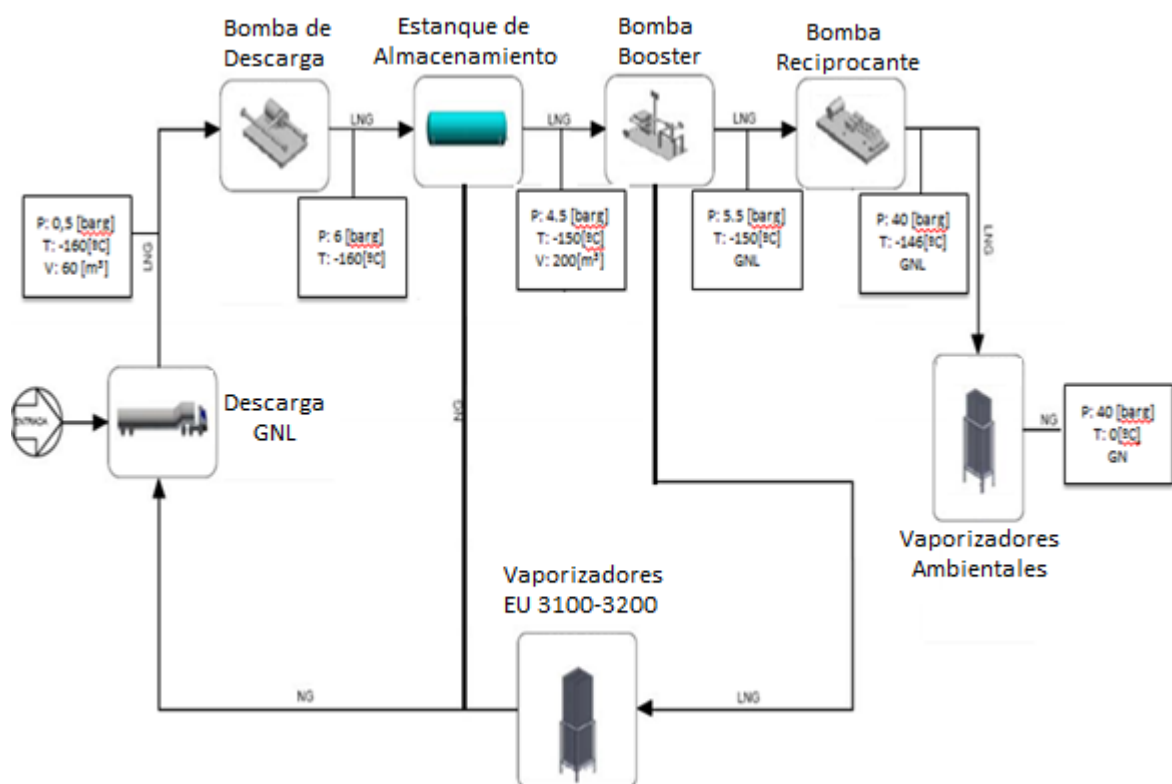
ii) Obtener la ecuación y curva característica de los circuitos de GNL y comparar su comportamiento con los datos medidos en terreno.

iii) Evaluar el punto de funcionamiento de las bombas, estudiar distintas condiciones de operación y comparar con la información de catálogo y/o de terreno.

iv) Proponer eventuales mejoras del proceso.



### 3. DESARROLLO.



**Figura 3.1.** Diagrama de flujo Proceso de Regasificación de la PSR.

En la figura 3.1. se muestra el proceso de regasificación de la PSR de manera simplificada. Se puede ver la trayectoria del GNL a lo largo del proceso y como se mantienen presurizados y ecualizados los estanques de almacenamiento y los camiones cisternas gracias a la inyección de gas natural en la línea de bypass. De igual manera se puede apreciar los vaporizadores ambientales E3100 y E3200 que se utiliza para realizar el cambio de fase de GNL y enviarlo como gas natural (GN) a los estanques, presurizándolos.

El proceso de regasificación descrito anteriormente será analizado por partes, entre una bomba y otra, con la finalidad de analizar las pérdidas de carga en cada tramo para obtener la curva característica del sistema en las distintas secciones del circuito y con esto encontrar el punto de funcionamiento de cada bomba. A continuación se hará una descripción de cada bomba explicando la

importancia de éstas y luego se darán a conocer los cálculos realizados para encontrar los puntos de funcionamiento.

## 4. Bomba Centrifuga de Descarga

### 4.1. Descripción, Diseño y Cañerías.

La Bomba centrifuga de descarga, es la primera bomba del sistema y la que impulsa el mayor caudal de la Planta. Ésta cumple la función de hacer la descarga de los camiones cisterna y enviar el GNL a los tanques de almacenamiento.

Se debe tener en cuenta que el fluido es Gas Natural Licuado por lo que se deberán tener ciertas precauciones. Esto se debe a que es altamente inflamable y además es inodoro e incoloro por lo que no es capaz de ser percibido por las personas. Por esta razón, las fugas son captadas con el uso de instrumentos que detectan el gas natural en el aire y se enciende una alarma con lo que se detienen las bombas y se humedece el sector de la fuga. Cualquier chispa puede provocar una gran explosión por lo que los camiones cisterna, al llegar a la zona de descarga, son conectados a tierra y se encuentran bajo un techo con splinllers de polvos químicos que deben ser accionadas en caso de emergencia.

La bomba es accionada por un motor eléctrico que disponen de un variador de frecuencia. La bomba está acoplada directamente al eje del motor por lo que cuenta con una gran precisión al variar las rpm del rodete y con esto el caudal. Para el soporte del rodete, los rodamientos del motor son de la más alta precisión y están completamente sellados externamente.

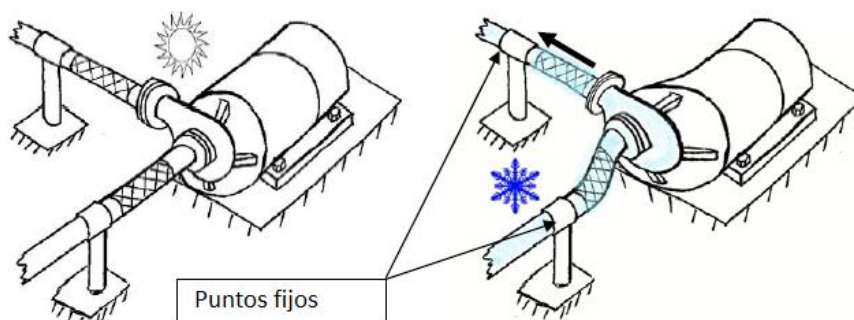


Figura 4.1 Conexión de cañerías a la bomba

Las cañerías deben ser diseñadas para no transmitir esfuerzos a la bomba durante el proceso de operación o mientras se encuentre parada. Se deberá considerar también la contracción y elongación ocasionadas por las temperaturas. Se deberán utilizar cañerías flexibles para disminuir la transmisión de vibraciones a la bomba o excesivos esfuerzos a los flanges de ésta. (ver fig. 4.1)

El NPSH es un requerimiento para asegurar la operación correcta de la instalación, por lo tanto las siguientes reglas deberán ser aplicadas en la línea de succión:

- El diámetro debe ser basado acorde al caudal succionado, la velocidad no deberá exceder  $1 \left[ \frac{m}{s} \right]$ . Una velocidad menor disminuye las pérdidas de presión pero tiene la desventaja de aumentar la penetración de calor.
- La cañería de succión conectada a la salida del estanque cisterna con la succión de la bomba, deberá ser lo más recta y corta posible.
- La pendiente descendiente desde el estanque a la bomba deberá ser constante para permitir que el gas en estado de vapor posiblemente formado se devuelva al estanque.
- Para prevenir la penetración de partículas extrañas en la bomba, la línea de succión debe contar con un filtro de 500 micrones con un área de al menos 1.5 veces el área de la cañería de succión.
- Para evitar pérdidas debidas a la evaporización se deben aislar las cañerías:
  - La línea de succión.
  - La parte externa de las válvulas.
  - Filtros y otros elementos.
- Accesorios necesarios:
  - \* Válvula de cierre.
  - \* Válvula de seguridad.
  - \* Sección de tubería flexible.
  - \* Válvula de retención en la descarga de la bomba.

La cañería de descarga debe tener el mismo diámetro que la conexión de descarga de la bomba, o algo mayor cuando el largo de la cañería sea excesivo y las pérdidas de presión sean excesivas y restrinjan el flujo demasiado.

La línea de descarga deberá ser considerada con la curva característica de la bomba y debe tener los siguientes accesorios y válvulas:

- 1.-Válvula de cierre
- 2.-Válvula anti retorno
- 3.-Medidor de presión

Para un enfriado de la bomba más rápido y una puesta en marcha más fácil se debe proporcionar una línea bypass. Ésta debe tener igual diámetro que el de descarga de la bomba o podría ser diseñado para el menor caudal de la bomba.

También gracias a línea de bypass se le aumenta la presión a la cisterna para asegurar el NPSH disponible.

Para la ventilación de oxígeno o gases dentro de la bomba y cañerías se proporciona una línea de venteo con una válvula de cierre.

## **4.2. Puesta en Marcha**

### **4.2.1 .Enfriamiento de la Bomba.**

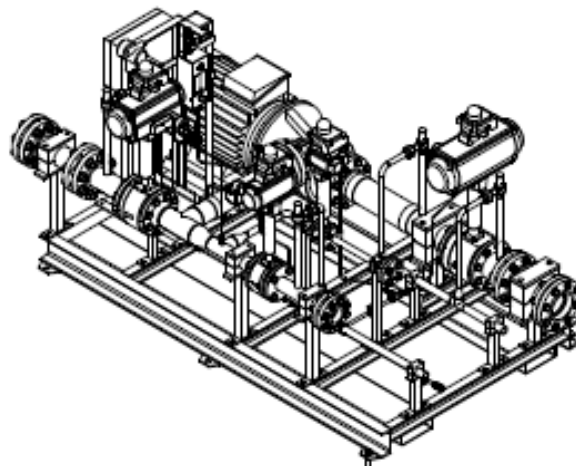


Figura 4.2. Instalación de bomba de descarga

Una vez que se ha realizado la conexión de la cisterna a la bomba y se halla realizado el desplazamiento de la humedad con  $N_2$ , se abre la válvula de succión (19) y de bypass (6) lentamente (Ver figura 4.3.). El caudal de GNL del estanque entrara a la bomba enfriándola. Durante el periodo de enfriamiento la válvula (4) se encuentra cerrada y la válvula de bypass (6) abierta.

Durante el proceso de enfriamiento la cisterna aumenta su presión con lo que ayuda al arranque de la bomba y ayuda al NPSH requerido. El periodo de enfriamiento para la bomba es aproximadamente 30 min, el cual puede tardar más si el aislamiento de las válvulas y cañerías se deteriora. Cuando esto sucede se hace necesario reparar los aislamientos existentes. Después que la bomba haya sido enfriada completamente, se cierra la válvula de by pass (6).

#### **4.2.2. Puesta en Marcha.**

Verificar que la válvula de cierre a la salida de la cisterna este abierta y que la válvula de bypass (6) este abierta también. Presionar el botón de encendido de la bomba para comenzar la entrega de GNL a la línea de bypass. Comprobar que la presión se haya estabilizado y luego abrir la válvula de descarga (4) y simultáneamente cerrar la válvula de bypass (6). Así comienza el envío de GNL al estanque de almacenamiento que se encuentre con el menor nivel de GNL.

Si luego de haber transcurrido 20 o 30 segundos la presión de descarga no aumente, se detiene la bomba automáticamente.

El gas natural licuado viene en las cisternas a una temperatura de  $-160^{\circ}\text{C}$ , que es la temperatura a la cual debe operar la bomba de descarga.

#### **4.2.3. Consumo de Presión (NPSH) y Sello de la Bomba.**

Algunas veces la altura estática de la cisterna no es suficiente para compensar la pérdida producida por la fricción y el impacto de calor en el ducto de admisión. En este caso se debe aumentar la presión del estanque. Esto variará de acuerdo al NPSH requerido, así como de la instalación.

La bomba mecánicamente fue diseñada para un rango de presión de entrada de entre 0 – 5 [barg].

### 4.3. Apagado de la Bomba.

Apagar el motor, se abre la válvula del bypass (6) y se cierra la válvula de descarga (4)

- a) Cerrar la válvula de succión (19)
- b) Luego que la bomba se haya descongelado, cerrar la válvula del bypass (6)

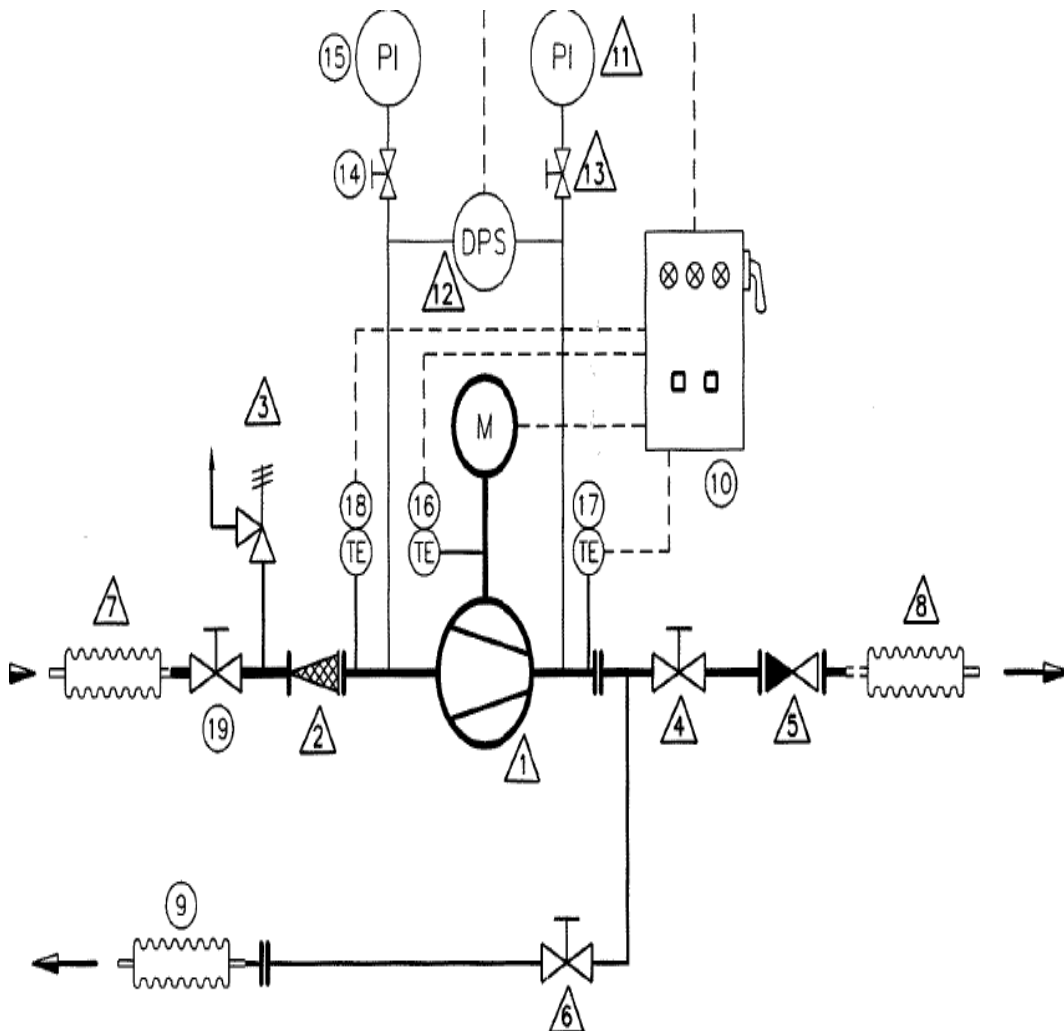


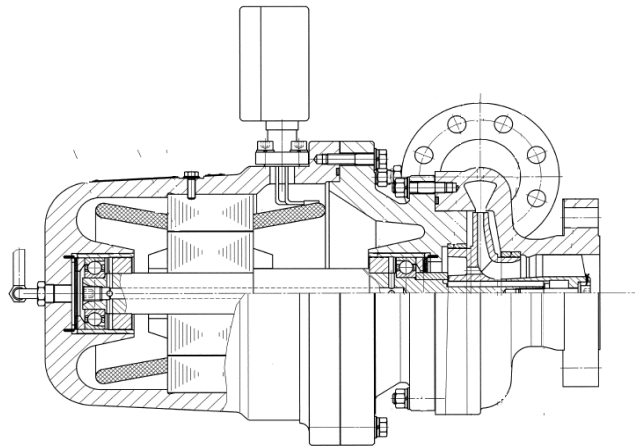
Figura 4.3. Esquema de instalación bomba de descarga

## 5. Bomba Booster (Aumentadora de presión).

### 5.1. Descripción, Diseño y Cañerías.

La bomba booster es una bomba de motor sumergido especialmente diseñada para funcionar con líquidos criogénicos. La bomba y el motor son una unidad integral, lo que elimina el uso de un sello en el eje. El eje del motor de la bomba está soportado por dos rodamientos de bola de contacto angular. Los rodamientos son especialmente diseñados para una larga vida útil cuando son enfriados con la cantidad necesaria de GNL. El líquido es limpiado por un filtro en el área de descarga de la carcasa de la bomba, pasa por el rodamiento superior y luego por el rodamiento inferior y después de esto llega al impulsor.

Por fuera la bomba se encuentra totalmente congelada y los rodamientos son lubricados gracias al eje hueco que presenta la bomba. (ver figura N° 5.1.)



**Figura 5.1. Bomba Booster**

La bomba booster lleva el GNL desde los estanques de almacenamiento hasta la bomba tríplex y la misión de ésta es aumentarle la presión al fluido para aumentar con esto el NPSH disponible y además asegurar un caudal constante para un buen funcionamiento de la bomba tríplex.

La bomba debe ser instalada lo más cerca posible del estanque de almacenamiento y la conexión de descarga del estanque debe ser por la parte inferior de éste y con un diámetro ajustado al caudal, este no debe ser tan



pequeño, el diámetro no debe ser menor al diámetro de succión de la bomba para mantener una baja caída de presión.

Al igual que en el caso de la bomba centrífuga las cañerías deben ser diseñadas para no transmitir esfuerzos a la bomba. Para esto se debe tener en consideración las elongaciones y contracciones provocadas por los cambios extremos de temperatura.

La línea de succión se conecta al estanque de almacenamiento de la manera más directa y corta posible, ésta debe tener una pendiente descendiente constante hacia la bomba para permitir que cualquier gas se retorne al estanque.

El diámetro de la cañería debe ser diseñado para que la velocidad del GNL dentro de esta sea aproximadamente de  $1 \left[ \frac{m}{s} \right]$ .

La bomba debe ser protegida de cualquier partícula extraña con un filtro en la línea de succión el cual debe tener aproximadamente 200 a 300 micrones de malla y un área útil de 2 veces el área de la cañería de succión.

La línea de descarga debe tener el mismo diámetro que el de descarga de la bomba y debe contar con los siguientes accesorios y válvulas:

- Válvula de cierre.
- Válvula anti retorno.
- Medidor de presión (manómetro).

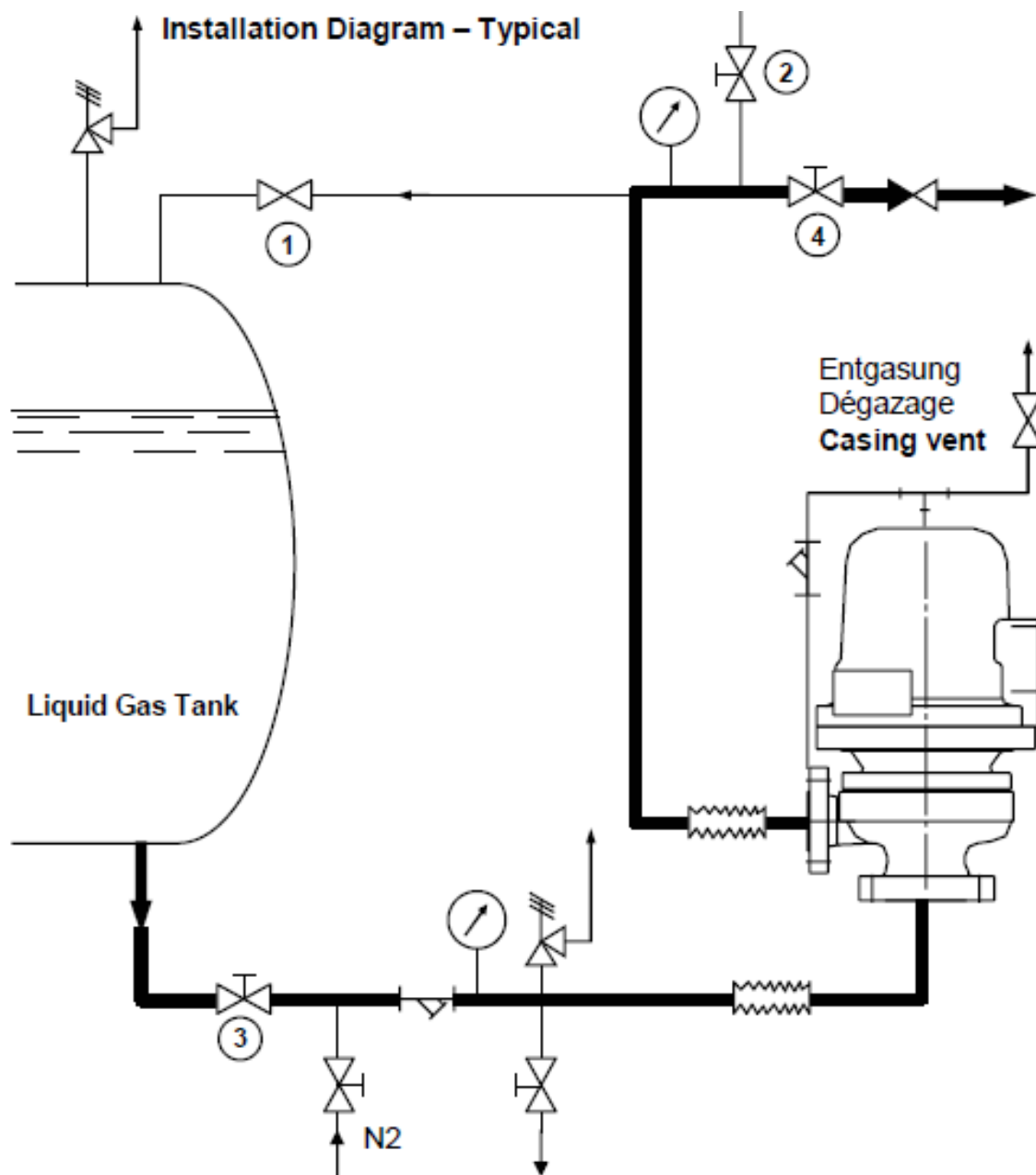
Todas las zonas que cuenten con una válvula de cierre deberían tener una válvula de alivio para evitar sobre presiones debido a la vaporización del GNL.

Para un enfriado más rápido y para una puesta en marcha más fácil una línea de bypass debe ser proporcionada.

También se necesitara una línea de ventilación hacia el estanque de almacenamiento con una válvula de cierre. La válvula de venteo debe estar en la carcasa de la bomba para que esta pueda inundarse con el GNL. Es ventajoso para la ventilación de la cañería y para un enfriado más rápido.

**5.2. Puesta en Marcha**

**5.2.1. Enfriamiento de la Bomba y Puesta en Marcha.**



**Figura 5.2 Esquema de instalación de Bomba Booster**

Abrir la válvula de succión (3) y la válvula de bypass (1) lentamente. El GNL irá desde el estanque de almacenamiento hasta la bomba y la enfriará. Durante el periodo de enfriamiento la válvula (4) está cerrada y la válvula de bypass (1) abierta (Ver figura 5.2). Durante el periodo de enfriamiento el estanque de almacenamiento incrementa su presión. Esto facilita las condiciones de partida de la bomba debido a que aumenta su NPSH disponible.

La bomba se considera lo suficientemente enfriada cuando la temperatura llega a los  $-110^{\circ}\text{C}$  y luego que han pasado 10 minutos del proceso de enfriamiento.

Después que la bomba fue enfriada, se cierra la válvula de bypass (1), se cierra la válvula de venteo (2) y se abre la válvula (4) en un 15% aproximadamente y luego se enciende la bomba.

### **5.3 Detención de la bomba.**

Se deberán seguir los siguientes pasos para el apagado de la bomba:

- I. Apagar el motor, cerrar la válvula (4) y abrir la válvula de bypass (1)
- II. Cerrar la válvula de succión (3)
- III. Abrir la válvula de venteo (2), para reducir la presión del estanque de almacenamiento a el valor requerido.

(Ver Figura 5.2)

## 6. Bomba de Pistones de Alta Presión (Triplex).

### 6.1. Descripción, Diseño y Cañerías Asociada.

La bomba tríplex es una bomba diseñada con la función de aumentarle la presión al GNL hasta un valor de entre 35 y 70 [barg], con esto pasa por los vaporizadores ambientales y el gas se inyecta al gasoducto.

La bomba está diseñada para trabajar con fluidos a bajas temperaturas (hasta  $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Esta bomba es de desplazamiento positivo y de simple efecto, consta de tres pistones de 75 [mm] de diámetro cada uno y un largo de carrera de 110 [mm], ésta tiene un motor eléctrico de 110 [kW] con un variador de frecuencia. La potencia es transmitida desde el motor al cigüeñal por una correa en V con una relación de transmisión de 1 : 3

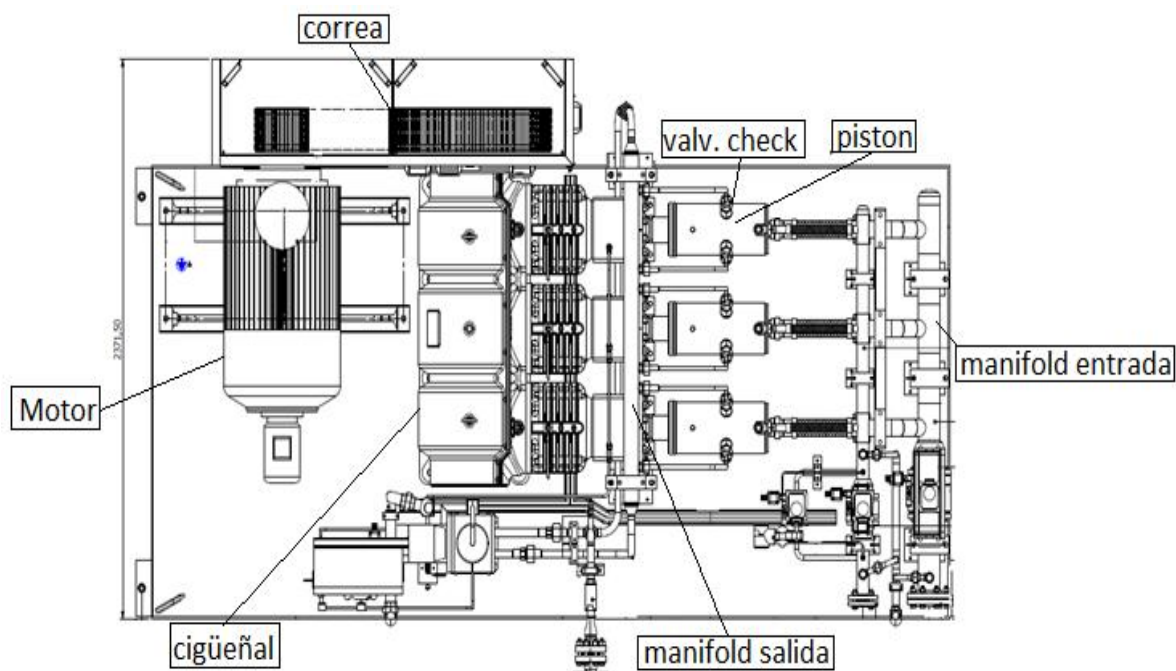


Figura 6.1. Bomba Triplex

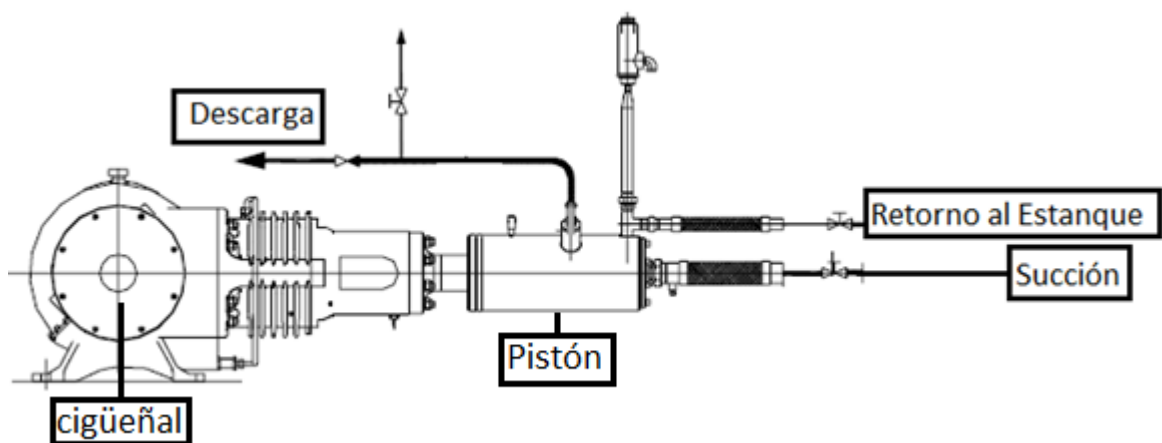
En este caso las cañerías deben ser diseñadas teniendo en cuenta los mismos factores vistos anteriormente en la bomba de descarga y en la bomba booster (esfuerzos provocados por la contracción y dilatación).

En cuanto al diámetro, se debe tener en cuenta las velocidades de trabajo, una velocidad muy baja del fluido reduce las pérdidas de presión de éste, pero sin embargo aumenta la penetración de calor y disminuye en NPSH disponible. Y velocidades muy grandes aumentan considerablemente las caídas de presión.

La bomba debe ser equipada de un filtro de un espesor aproximado de 450 micrones y un diámetro mínimo igual al diámetro de la cañería.

La cañería de succión ubicada entre la bomba booster y la bomba triplex debe ser tan corta como sea posible y deberá tener la menor cantidad de accesorios posible.

Una válvula de alivio debe ser instalada entre la descarga de la bomba y cualquier otro dispositivo de cierre o alguna obstrucción accidental que pudiera parar la circulación en la cañería como por ejemplo, una válvula.



**Figura 6.2 Esquema de cañerías de succión y descarga**

### **6.2. Puesta en marcha de la bomba**

Se debe iniciar de igual modo que las otras bombas, abriendo gradualmente la válvula de succión dejando que el GNL entre en la bomba y dejar que el gas se devuelva al estanque por las cañerías de retorno. Después de haber enfriado la bomba por 45 minutos, la bomba será encendida con las válvulas abiertas.

Nótese que al iniciar la bomba la línea de descarga se cubre de hielo, leves clicks indican que las que las válvulas están funcionando y los medidores de presión en la descarga indican un aumento notable de presión. Si no ocurre el aumento de presión, la bomba debe ser detenida y enfriada nuevamente. Si después de enfriarla la presión sigue sin aumentar se debe aumentar el NPSH disponible.

La temperatura de operación a la entrada de la bomba es aproximadamente de  $-146^{\circ}\text{C}$ , la cual va aumentando desde el comienzo del proceso hasta el final, al pasar por las bombas y también debido a las pérdidas producidas a lo largo sistema.

Es obligatorio instalar una válvula de alivio en la línea de descarga. Si la bomba produce sonidos inusuales o si la presión esta fuera del rango normal, se debe detener la bomba e identificar el motivo de dicha anomalía. Cualquier fuga de presión, de gas o de líquido debe ser investigada y luego ser eliminada inmediata mente después de detener la bomba.

### **6.3. Apagado de la bomba**

- I. Presionar el botón de apagado
- II. Cerrar la válvula de succión (1)
- III. Abrir completamente la válvula de retorno de gas (2)
- IV. Abrir la válvula de alta presión de desgasificación (3)
- V. Después del descongelado, cerrar la válvula de desgasificación (3)

(Ver figura N° 6.3.)

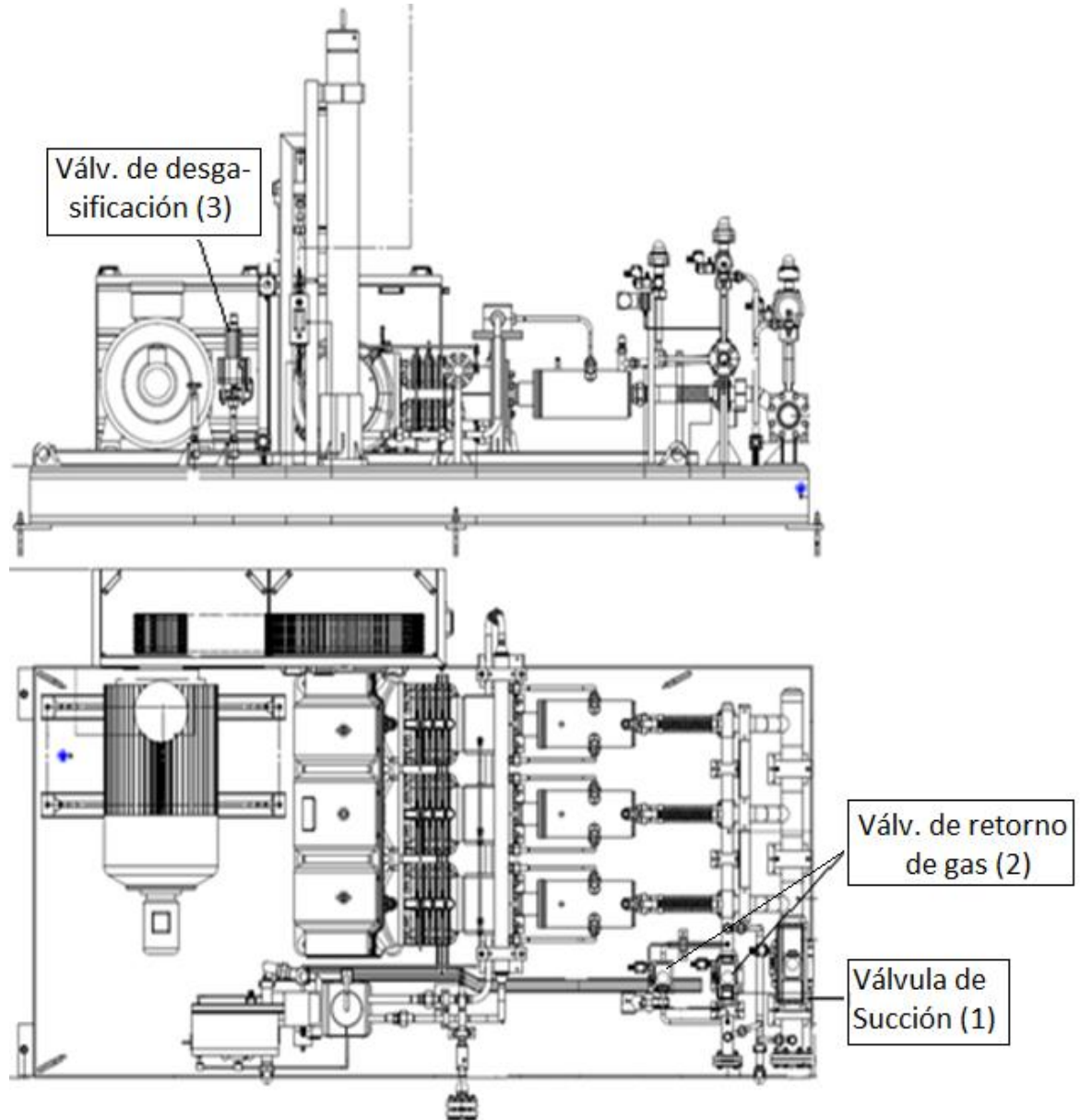


Figura 6.3. Esquema de instalación de bomba triplex.

## 7. Vaporizadores Ambientales

Los vaporizadores ambientales son equipos que constan de un haz de tubos provisto de aletas de aluminio, las que toman el calor del ambiente y lo transfieren al GNL que circula por los tubos, vaporizándolo. Cada uno es capaz de vaporizar  $2500 \left[ \frac{Nm^3}{h} \right]$ , si se dan las condiciones de diseño: temperatura superior a  $4^{\circ}C$ , humedad relativa de 75% y una velocidad del aire sobre  $1 \left[ \frac{m}{s} \right]$ .

A medida que están operando los vaporizadores, se les va depositando la humedad ambiente, formando una capa de hielo que va disminuyendo su capacidad de intercambio de calor. Esto obliga a sacarlos de servicio momentáneamente para retirarles el hielo y luego volver a ponerlos en servicio cuando sea necesario. Ciclo de regeneración ( un grupo en servicio y otro en regeneración).

Los vaporizadores se encuentran en grupos de 10 cada uno, para operar en forma alternada. En la operación normal, se trabaja con 10 vaporizadores, mientras el otro grupo de 10 se encuentra descongelándose para entrar en operación cuando sea necesario.

Las salidas, de los grupos de 5 vaporizadores cada uno, se unen en una línea común que va hacia el patín de medición de caudal de salida.

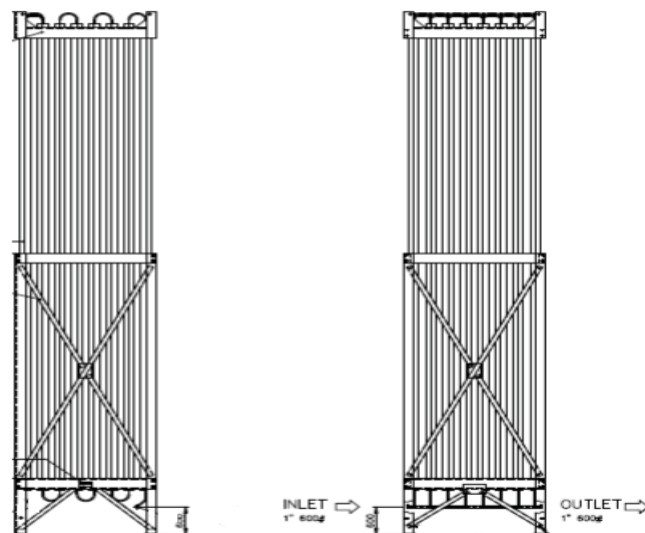


Figura 7.1 Vaporizadores Ambientales



## 8. Cálculos Bomba de Descarga

### 8.1. Curva Característica de la Bomba de Descarga a 5250 rpm

CUSTOMER CONDITIONS : Inverter : Yes Impeller diam (mm) : 225 Liquid : Natural Gas  
 Orifice : No Orifice diam (mm) : Density (kg / m3) : 422  
 Frequency [Hz] : adjust on site Speed (rpm) : 5250

EXTRAPOLATION DATA :

Flow Qv [l/min]	Head H [m]	Current Amp	Voltage V	Motor power Nmi [kW]	Total eff ηt [%]	Hydraul power Npo [kW]	motor eff ηm [%]	Pump power Npi [kW]	Pump efficy ηp [%]
2161,5	190,9			45,0	62,03%	27,9	93,23%	41,9	66,54%
1756,1	205,5			40,3	60,52%	24,4	92,94%	37,5	65,11%
1341,6	210,7			35,0	54,33%	19,0	92,61%	32,4	58,67%
1042,6	212,8			31,4	47,34%	14,9	92,39%	29,0	51,24%
718,7	215,9			27,4	37,89%	10,4	92,15%	25,2	41,12%
356,7	214,3			22,5	22,61%	5,1	91,52%	20,6	24,70%

TEST VALIDATION : Test validation by the person responsible for tests Date : 08 juillet 2010 Signature : O. Margi - Test PGI

CUSTOMER VALIDATION : The pump performances found to be in accordance with pump sales data Date : 08 juillet 2010 Signature : O. Margi - Test PGI

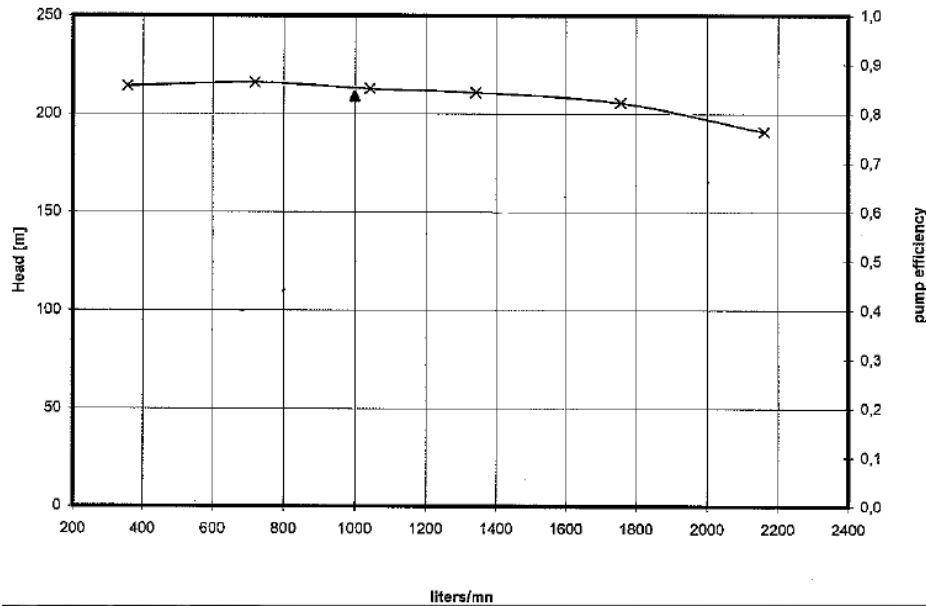


Gráfico 8.1. Curva Característica de la bomba a 5250 rpm

El motor de la bomba posee con un variador de frecuencia y en la práctica esta opera a 3587 [rpm], por lo que la curva de la bomba observada en el manual ser modificada. Aplicando las siguientes leyes de semejanza se obtuvo la nueva curva de la bomba:

$$\frac{Q_a}{Q_b} = \frac{rpm_a}{rpm_b} \times \left[ \frac{D_a}{D_b} \right]^3 \quad \frac{H_a}{H_b} = \left[ \frac{rpm_a}{rpm_b} \right]^2 \times \left[ \frac{D_a}{D_b} \right]^2$$

Como el diámetro del rodete permanece constante  $\frac{D_a}{D_b}=1$  por lo tanto:

$$\frac{Q_a}{Q_b} = \frac{rpm_a}{rpm_b} \quad y \quad \frac{H_a}{H_b} = \left[ \frac{rpm_a}{rpm_b} \right]^2$$

A continuación se presentan las coordenadas de la bomba operando en las condiciones que se indica en el manual de ésta:

Tabla 8.1. Caudal y altura correspondiente para la Bomba Centrífuga operando a 5250 RPM

<b>Caudal <math>\left[ \frac{l}{min} \right]</math></b>	<b>Altura [m]</b>
<b>2161.5</b>	190.9
<b>1756.1</b>	205.5
<b>1341.6</b>	210.7
<b>1042.6</b>	212.8
<b>718.7</b>	215.9
<b>356.7</b>	214.3

Aplicando leyes de semejanza se obtuvo la siguiente curva característica de la bomba:

Tabla 8.2. Caudal y altura correspondiente para la Bomba Centrífuga operando a 3587 RPM.

<b>Caudal <math>\left[ \frac{l}{min} \right]</math></b>	<b>Altura [m]</b>
<b>1476.8</b>	89.1
<b>1199.8</b>	95.9
<b>916.6</b>	98.3
<b>712.3</b>	99.3
<b>491.0</b>	100.8
<b>243.7</b>	100.0

## 8.2. Curva Característica del Sistema.

Para obtener la curva del sistema se hizo un estudio completo de las conexiones de las cañerías desde la descarga hasta el estanque de almacenamiento. Usando los planos de la planta de regasificación considerando para esto, el coeficiente de fricción, las pérdidas causadas por el largo de la cañería, las pérdidas singulares (codos, válvulas, cambios de diámetros, etc). Para lograr esto se aplicaron las siguientes formulas:

Pérdidas regulares:

Para cañerías de un mismo diámetro:

$$h_R = \left\langle f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \right\rangle [m] \quad \text{o bien,} \quad h_R = \left[ f \cdot \frac{L}{D^5} \cdot \frac{8Q^2}{\pi^2 g} \right] [m]$$

En el caso de que existan cambios de diámetros:

$$h_R = \frac{8Q^2}{\pi^2 g} \cdot \left[ f_1 \frac{L_1}{D_1^5} + f_2 \frac{L_2}{D_2^5} + \dots + f_n \frac{L_n}{D_n^5} \right] [m]$$

Donde:

Q= caudal  $\left[ \frac{m^3}{s} \right]$

D = diámetro [m]

L= largo [m]

g = aceleración de gravedad.  $9.81 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$

f = coeficiente de fricción. Se obtiene de diagrama de Moody o bien iterando la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

$$\varepsilon = \frac{k}{D}$$

k = rugosidad de la cañería [mm]

f es función del diámetro, rugosidad de la cañería y el número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho \cdot D \cdot V}{\gamma}$$

$$\rho = \text{densidad} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$V = \text{velocidad} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

$$\gamma = \text{viscosidad absoluta} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]$$

Re = Adimensional.

Pérdidas singulares:

$$h_s = \sum k \cdot \frac{v^2}{2g} \text{ [m]}$$

La curva característica del sistema se expresa con la siguiente ecuación

$$H_m = h_t + h_R + h_s$$

$$h_t = \frac{\Delta p \cdot 10^5}{\rho \cdot g} + \Delta z \text{ [m]}$$

Donde:

$\Delta p$  = variación de presión [barg]

$\Delta z$  = variación de altura [m]

Los cálculos fueron realizados mediante el programa de Microsoft office, Excel 2007.

Esquema Isométrico cañerías desde bomba descarga LP 1200 a estanque de almacenamiento VU 2200.

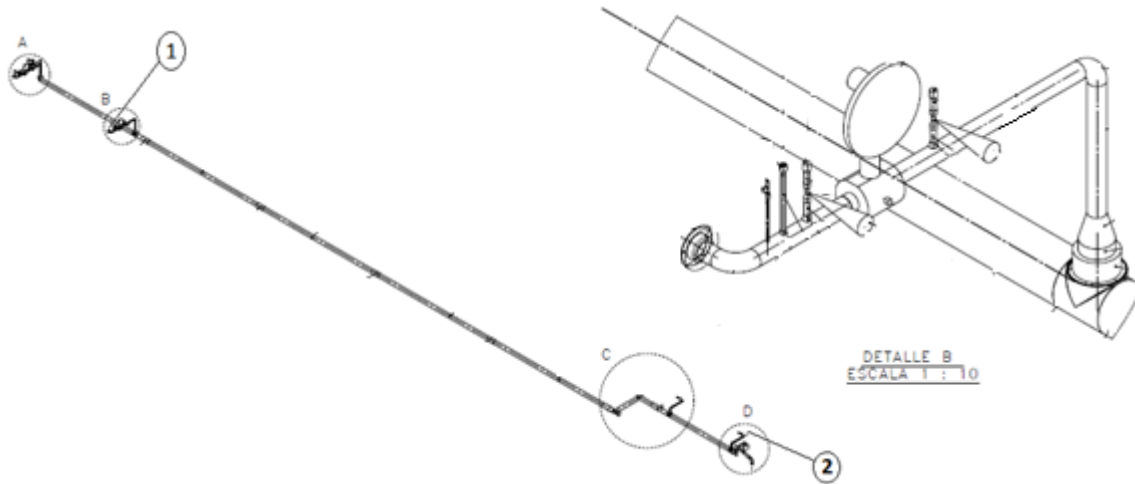


Figura 8.1. Cañería de la bomba de descarga.

### 8.2.1. Pérdidas singulares

Cálculo de Velocidades.

Tabla 8.3. Cálculo de velocidades.

diámetro[pulg]	diámetro[m]	caudal [ $\frac{l}{min}$ ]	caudal [ $\frac{m^3}{s}$ ]	Área [ $m^2$ ]	Vel. [ $\frac{m}{s}$ ]
2.5	0.063	1000	0.016	0.003	5.4
3	0.078	1000	0.016	0.0047	3.49
6	0.154	1000	0.016	0.0186	0.893

Tabla 8.4. Pérdidas Singulares de Bomba Centrífuga (LP 1200) a Estanque de almacenamiento (VU 2200)

	CTE $\left[\frac{s^2}{m}\right]$	Diam. [pulg]	K	Vel. $\left[\frac{m}{s}\right]$	Resultado [m]			
Reducc. 2.5" x 3"	0.051	2.5	0.2	5.40	0.297			
T paso direct. Valv. Globo	0.051	2.5	0.2	5.40	0.297			
100% abierta	0.051	2.5	0	5.40	0			
50% abierta	0.051	2.5	3.8	5.40	5.65			
25% abierta	0.051	2.5	15	5.40	22.33			
Reducc. 3" x 6"	0.051	3	0.3	3.49	0.187			
2 codos 90°	0.051	3	1.4	3.49	0.872			
T salida lado	0.051	3	1.8	3.49	1.12			
1 valv. Bola	0.051	3	10	3.49	6.23			
2 codos 90°	0.051	3	1.4	3.49	0.872			
Reducc. 6" x 3"	0.051	6	0.3	0.89	0.012			
T paso direc.	0.051	6	0.2	0.89	0.008			
Codo 45°	0.051	6	0.4	0.89	0.016	Total		
T 45°	0.051	6	1	0.89	0.041	100% ab.	50% ab.	25% ab.
2Tsalida lado	0.051	6	3.6	0.89	0.146	10.11	15.76	32.43

Para la obtención de las pérdidas singulares se programó una planilla Excel donde se ingresó los coeficientes de pérdidas k, el diámetro D y asignando diferentes valores de caudal se obtienen las pérdidas singulares para cada caudal.

### 8.2.2. Cálculo de Pérdidas Regulares.

Para obtener las pérdidas regulares es necesario antes calcular el número de Reynolds, para esto se ingresó la ecuación en una planilla Excel, donde ingresando los datos de viscosidad, diámetro, velocidad y densidad se podía obtener éste. Luego, se obtuvo el coeficiente de fricción de la cañería por el diagrama de Moody y/o también iterando. Los valores encontrados por ambos métodos fueron siempre muy parecidos.

Cálculos para la obtención del Coeficiente de Fricción.

#### Diagrama de Moody

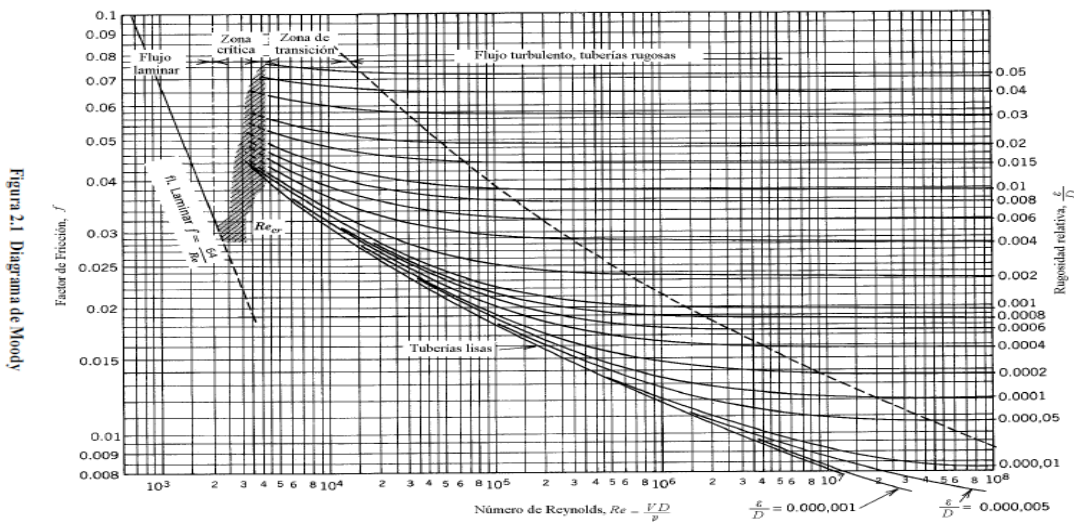


Figura 8.2. Diagrama de Moody

Luego de obtener el coeficiente de fricción de la cañería se pueden calcular las pérdidas regulares del sistema mediante una ecuación que es función de una constante, el largo, el caudal y el diámetro de la cañería.

Tabla 8.5. Cálculos para obtención del coeficiente de fricción f

<b>Q= 1000</b> <b>[l/min]</b>	$\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$	$\gamma \left[ \frac{kg}{m \cdot s} \right]$	$D [mm]$	$v \left[ \frac{m}{s} \right]$	$e [mm]$	Re	$e/D$	f	f Iterando
<b>Diámetro</b> <b>3"</b>	450	0.001187	0.083	3.05	0.2	96445	0.0024	0.026	0.026
<b>Diámetro</b> <b>6"</b>	450	0.001187	0.161	1.632	0.2	99728	0.0012	0.023	0.023
<b>Q=1500</b> <b>[l/min]</b>									
<b>Diámetro</b> <b>3"</b>	450	0.001187	0.083	4.575	0.2	144674	0.0024	0.026	0.026
<b>Diámetro</b> <b>6"</b>	450	0.001187	0.161	2.45	0.2	149727	0.0012	0.022	0.022
<b>Q=750</b> <b>[l/min]</b>									
<b>Diámetro</b> <b>3"</b>	450	0.001187	0.0834	2.287	0.2	72337	0.0024	0.026	0.026
<b>Diámetro</b> <b>6"</b>	450	0.001187	0.1612	1.225	0.2	74863	0.0012	0.0235	0.023
<b>Q= 500</b> <b>[l/min]</b>									
<b>Diámetro</b> <b>3"</b>	450	0.001187	0.0834	1.525	0.2	48224	0.0024	0.027	0.027
<b>Diámetro</b> <b>6"</b>	450	0.001187	0.1612	0.816	0.2	49909	0.0012	0.025	0.026



**Pérdidas Regulares.**

Tabla 8.6. Cálculo de pérdidas regulares.

TRAMO BOMBA- ESTANQUE	Cte. $\left[\frac{s^2}{m}\right]$	Coef. Fricc. (f)	Largo [m]	Caudal $\left[\frac{m^3}{s}\right]$	Diámetro [m]	Resultados [m]	Total [m]
DIAMETRO 3"	0.083	0.025	3.26	0.016	0.078	0.652	
DIAMETRO 6"	0.083	0.022	53.05	0.016	0.154	0.308	
DIAMETRO 3" (SUCCIÓN)	0.083	0.025	4.8	0.016	0.078	0.959	1.921

8.2.3. Altura estática.

La altura estática fue obtenida de la variación de presión y de la variación de alturas realizando un Bernulli al comienzo y al final del sistema cuando el caudal es  $0\left[\frac{m^3}{s}\right]$ .

Tabla 8.7. Cálculos para obtención de la presión estática.

p1 [barg]	z1 [m]	p2 [barg]	z2 [m]	h <sub>t</sub> [m]
1.92	4.6	5.71	1.4	83.788

Tabla 8.8. Caudal para cada altura del sistema con válvula de control 100% abierta.

Caudal $\left[\frac{l}{min}\right]$	Altura [m]
750	91.5
1000	97.4
1500	114.4
2000	138.0
3000	205.1

Curva característica del sistema (válvula de control 100% abierta)

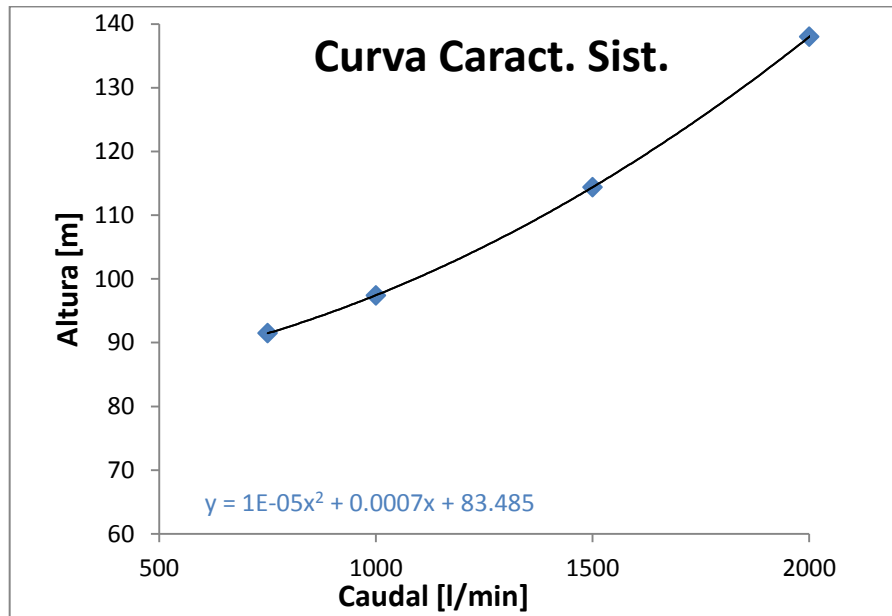


Gráfico 8.2. Curva característica del sistema

Luego de haber obtenido la curva característica del sistema, se incorpora la curva característica de la bomba y se obtiene el punto de funcionamiento de la bomba que corresponde al de intersección de dichas curvas.

### 8.3. Punto de Funcionamiento Bomba de Descarga

Tabla 8.9. punto de funcionamiento.

$Q \left[ \frac{l}{min} \right]$	$h [m]$
1150	97.87

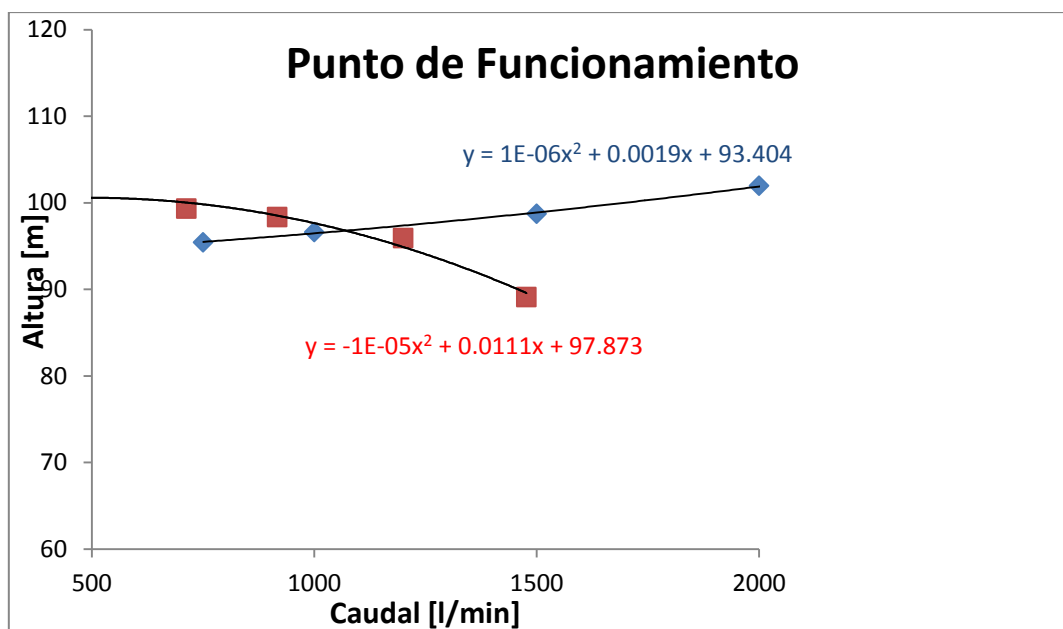


Gráfico 8.3. Punto de funcionamiento, Bomba de Descarga.

La curva creciente representa la curva característica del sistema mientras que la curva decreciente representa la curva característica de la bomba. Al igualar las ecuaciones de ambas curvas se obtiene el caudal entregado por la bomba y la altura que es capaz de levantar, en este caso la bomba entrega un caudal de  $1150 \left[ \frac{l}{min} \right]$  para una altura de 97.8 [m].

En la práctica la bomba centrífuga de descarga, entrega un caudal de descarga de aproximadamente  $1120 \left[ \frac{l}{min} \right]$ . Lo que se acerca bastante al valor obtenido por los cálculos realizados anteriormente.

### 8.4. Cálculos de Potencia.

Potencia del fluido:

La potencia del fluido se calculó aplicando la siguiente ecuación:

$$P_f = \left( \frac{Q \cdot h \cdot g \cdot \rho}{1000} \right) [kW]$$

Donde:

$$Q = \text{Caudal} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

$$h = \text{Altura} [m]$$

$$g = \text{Aceleración de gravedad.} \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

$$\rho = \text{Densidad} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

Potencia de Fluido de la Bomba de Descarga:

Cálculo de Potencia de Bomba y rendimiento.

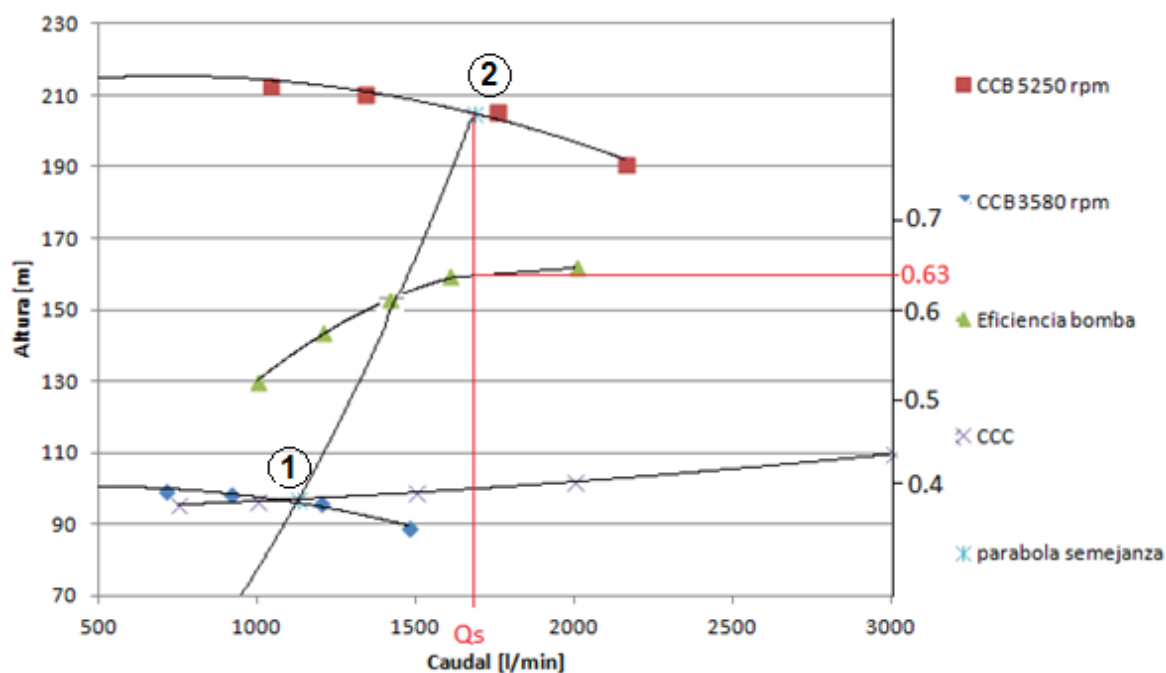
Tabla 8.10. Cálculos de potencia y rendimiento.

Densidad $\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$	Gravedad $\left[ \frac{m}{s^2} \right]$	Altura [m]	Caudal $\left[ \frac{m^3}{s} \right]$	Rendimiento	Potencia de fluido [kW]	Potencia Eje [kW]
450	9.81	97.87	0.019	0.686	8.28	12.06

### 8.5. Eficiencia de la bomba

Para calcular la eficiencia de la bomba se aplicaron leyes de semejanza para poder utilizar la curva de eficiencia de la bomba obtenida de catalogo, utilizando el caudal semejante al del punto de funcionamiento de la bomba.

Caudal 1	Caudal 2	Rpm 1	Rpm 2
1150	1683.16	3587	5280



Gráfica 8.4. Curva de eficiencia de Bomba de Descarga.

Luego se aplica la conversión de rendimiento entre puntos semejantes que está dada por:

$$\eta_1 = 1 - (1 - \eta_2) \cdot \left(\frac{rpm_1}{rpm_2}\right)^{\frac{1}{10}}$$

Y obtenemos que la eficiencia de la bomba para el punto de funcionamiento es:

$$\eta_1 = 0.62$$

Del gráfico se puede ver que la bomba presenta una eficiencia casi perfecta.

## 9. Cálculos Bomba Booster.

Para los cálculos de la bomba booster y del sistema se usaron las mismas fórmulas que en el caso de la bomba de descarga, primero se aplicó las leyes de semejanza para conocer la curva característica real de la bomba debido a que tiene un variador de frecuencia y se encuentra operando a 3108 rpm no a las que indica el catálogo (3880rpm), luego se calcularon las pérdidas de carga entre el estanque y la bomba triplex, para poder obtener la curva característica del sistema y con esto el punto de funcionamiento de la bomba. La altura estática fue calculada con la diferencia de presión en el sistema y la diferencia de alturas.

Luego de haber obtenido el punto de funcionamiento de la bomba se calculó la potencia de la bomba y su rendimiento.

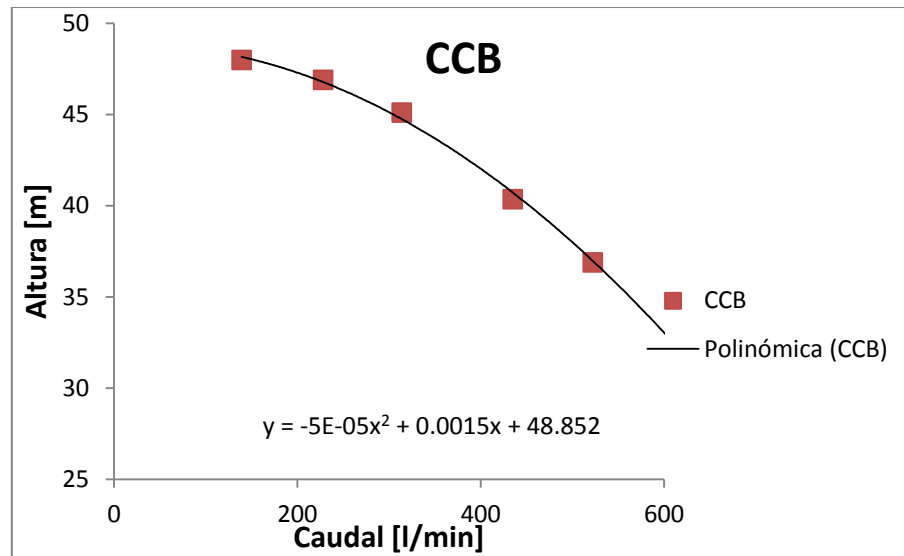
Resultados.

### 9.1 Curva característica real de la bomba

Tabla 9.1 Caudal y altura correspondiente para la Bomba Booster operando a 3108 RPM.

Caudal $\left[\frac{l}{min}\right]$	Altura [m]
625.4	31.8
522.2	36.9
434.9	40.4
313.8	45.1
228.0	46.9
139.2	47.9

Curva característica real de la bomba Booster.



Gráfica 9.1. Curva característica de la bomba Booster.

## 9.2. Curva Característica del Sistema

Esquema Isométrico Punto 1 (estanque de descarga) – Bomba Booster

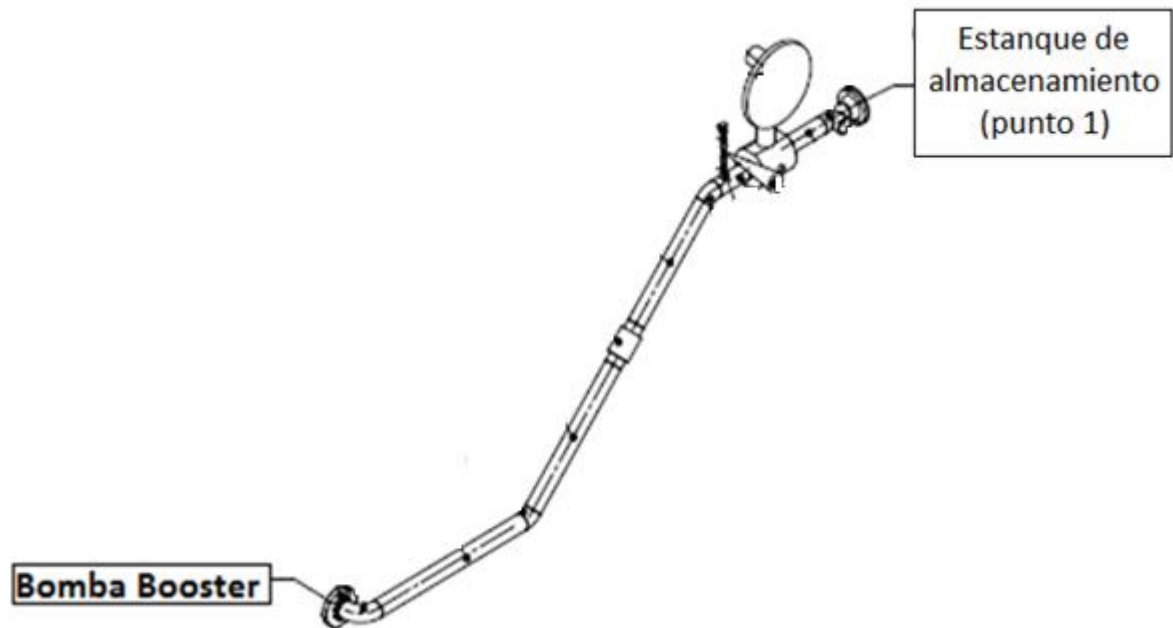


Figura 9.1. Línea de succión, Estanque a bomba booster

Esquema Isométrico desde la descarga de la Bomba Booster al Punto 2 (succión bomba de pistones Triplex).

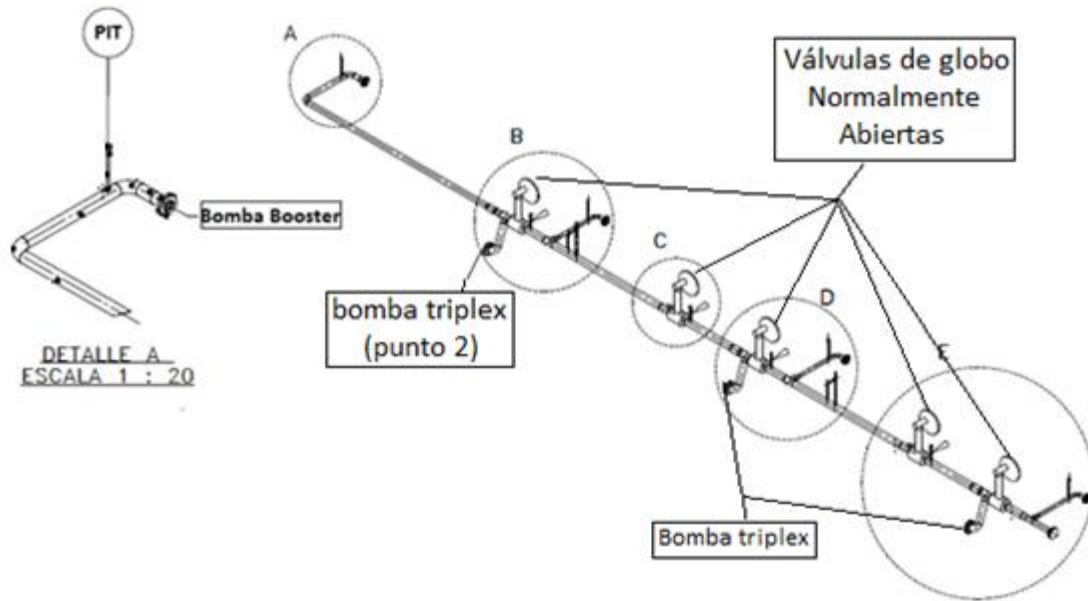


Figura 9.2. Línea de descarga bomba booster a bomba triplex

**9.2.1. Pérdidas Singulares.**

Tabla 9.2. Cálculos de Velocidades.

Díámetro [pulg]	Díámetro [m]	Caudal [ $\frac{l}{min}$ ]	Caudal [ $\frac{m^3}{s}$ ]	Vel. [ $\frac{m}{s}$ ]
2	0.052	360	0.006	2.77
3	0.078	360	0.006	1.26
4	0.108	360	0.006	0.65



Cálculo de Pérdidas Singulares.

Tabla 9.3. Cálculo de pérdidas singulares

	$CTE \left[ \frac{s^2}{m} \right]$	Diam. [pulg]	K	Veloc. $\left[ \frac{m}{s} \right]$	Resultados [m]	
T paso de lado	0.051	3	0.2	1.26	0.016	
Codo 90°	0.051	3	0.7	1.26	0.056	
2 Codos 45°	0.051	3	0.8	1.265	0.065	
1 Valv. Globo	0.051	3	0	1.26	0	
1 Valv. Bola	0.051	3	10	1.26	0.807	
Booster - PIT						
Placa Orificio	0.051	2	64.5	2.77	25.31	
Reducc. 2x3	0.051	3	0.24	1.26	0.0194	
1 Codo 90°	0.051	3	0.7	1.26	0.056	
PIT- Pto 2						
1 Codo 90°	0.051	3	0.7	1.26	0.056	
Reducc. 4x3	0.051	4	0.24	0.65	0.005	
T paso de lado	0.051	4	1.8	0.65	0.039	
					TOTAL	26.4 [m]

### 9.2.2. Pérdidas Regulares

Tabla 9.4 Cálculo de pérdidas regulares.

Pto 1 – Pto 2	Cte $\left[\frac{s^2}{m}\right]$	F	Largo [m]	Q $\left[\frac{m^3}{s}\right]$	Diam. [m]	Resultados [m]
Diam. 3"	0.0827	0.0315	8.38	0.006	0.0834	0.195
PIT – pto 2						
Diam. 4"	0.0827	0.032	0.427	0.006	0.1083	0.0027
					Total	0.197 [m]

### 9.2.3 Altura estática.

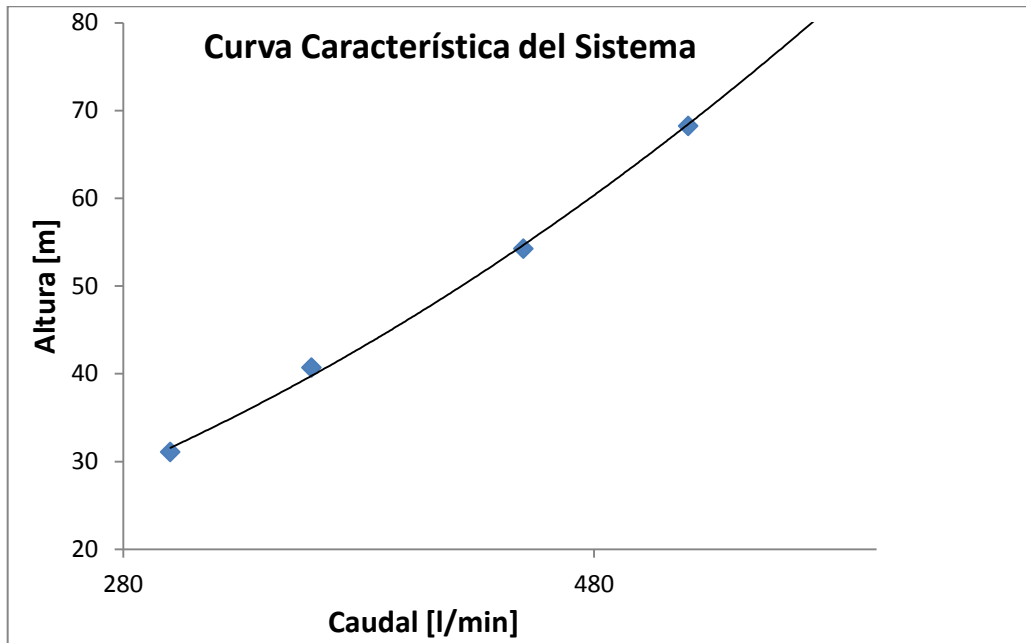
Tabla 9.5. Cálculo de la altura estática.

Q	p1	z1	p2	z2	P	Hs
$\left[\frac{l}{min}\right]$	[bar]	[m]	[bar]	[m]	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	[m]
0	4.5	4.94	5.2	1.4	450	12.54

### Curva característica del sistema.

Tabla 9.6. Caudal para cada altura del sistema.

caudal $\left[\frac{l}{min}\right]$	Altura [m]
300	31.09
360	40.70
450	54.26
520	68.24
600	86.68

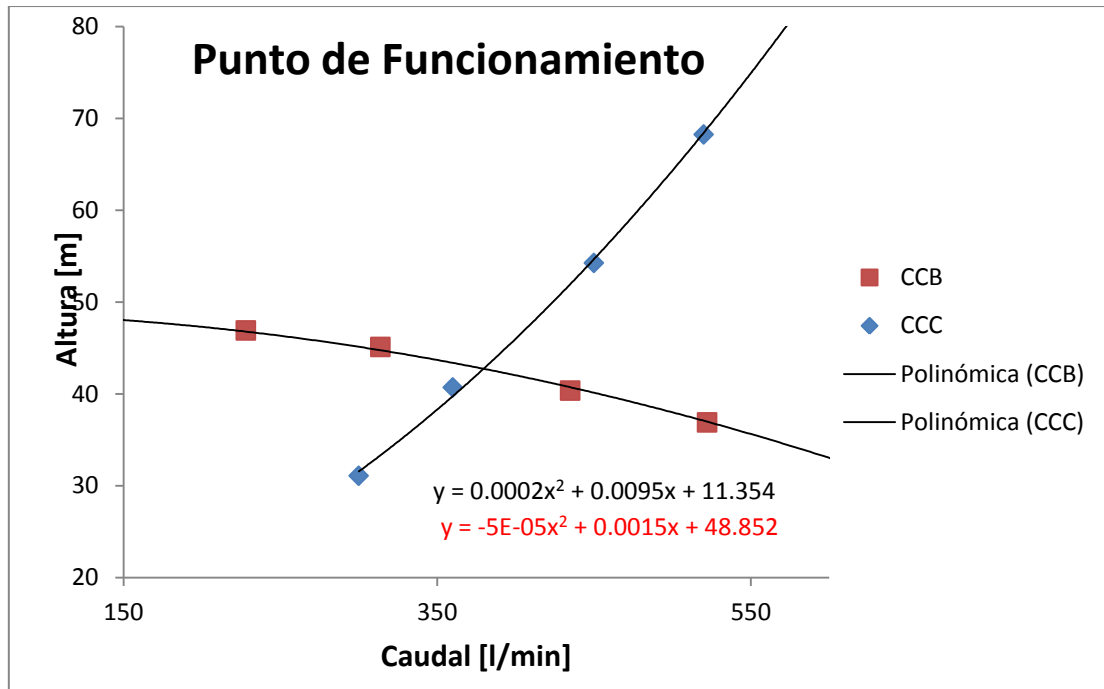


Gráfica 9.2 Curva característica del sistema

**9.3. Punto de funcionamiento Bomba Booster.**

Tabla 9.7. Punto de funcionamiento bomba booster.

Cauda $\left[\frac{l}{min}\right]$	Altura [m]
363.77	42.84



Gráfica 9.3. Punto de funcionamiento Bomba Booster.

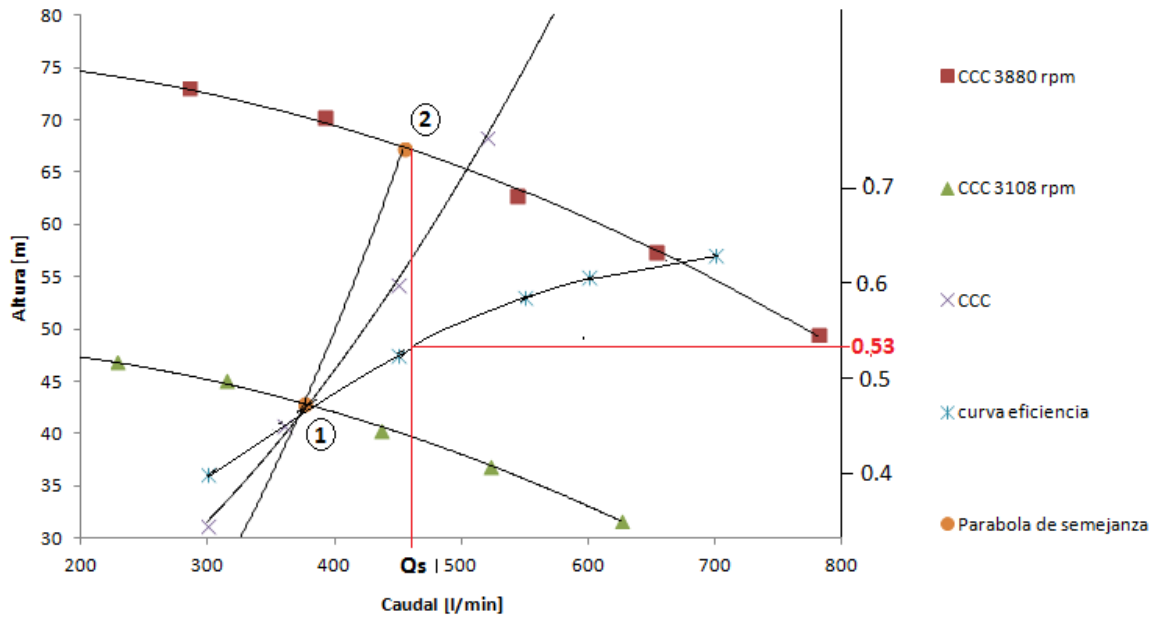
**9.4. Potencia del fluido.**

Tabla 9.8. Cálculos de potencia y rendimiento.

$\rho$ $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	$g$ $\left[\frac{m}{s^2}\right]$	$H$ [m]	$Q$ $\left[\frac{m^3}{s}\right]$	Rendimiento	Potencia De fluido [kW]	Potencia del Eje [kW]
450	9.81	42.84	0.006	0.64	1.15	2.02

9.5. Eficiencia de la bomba

Caudal 1	Caudal 2	Rpm 1	Rpm 2
363.67	454.12	3108	3880



Gráfica 9.4. Curva de eficiencia Bomba Booster.

$$\eta_1 = 1 - (1 - \eta_2) \cdot \left(\frac{rpm_1}{rpm_2}\right)^{\frac{1}{10}}$$

$$\eta_1 = 0.52$$

Se puede ver que la bomba booster a pesar que satisface las condiciones de operación, su eficiencia no está en un punto óptimo como en el caso de la bomba de descarga, que se encuentra operando casi en su eficiencia máxima.

La eficiencia máxima de la bomba esta en el orden del 0.63 – 0.64 y esta se encuentra operando con un eficiencia de 0.52.

## 10. Cálculos Bomba Triplex.

La bomba triplex a diferencia de las otras dos bombas es una bomba de desplazamiento positivo de pistones. En el caso de las bombas de desplazamiento positivo tanto el caudal como la presión que entregue la bomba son totalmente independiente del sistema. Las bombas de desplazamiento positivo están diseñadas para levantar altas presiones, solo necesitan una carcasa con un espesor capaz de soportar la presión ejercida por la bomba y un motor que sea capaz de entregar la potencia necesaria.

En cuanto al caudal estas bombas por lo general no son utilizadas para desplazar caudales muy elevados y este depende del volumen de los cilindros y de la velocidad que gire el eje.

### 10.1. Cálculos de Rendimiento.

El volumen desplazado por el cilindro de diámetro D esta dado por la siguiente fórmula:

$$V_D = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot 2R$$

Donde:

$V_D$  = Volumen desplazado

$R$  = excentricidad del cigüeñal

$2R$  = Largo de la carrera del pistón

Datos:

$D = 75 \text{ [mm]} \rightarrow 0.075 \text{ [m]}$

$2R = 110 \text{ [mm]} \rightarrow 0.11 \text{ [m]}$

Por lo tanto

$$V_D = \frac{\pi}{4} \cdot 0.075^2 \cdot 0.11 = 0.00048597 \text{ [m}^3\text{]}$$

Para una bomba de Z cilindros en paralelo, con el cigüeñal girando a velocidad angular constante N (revoluciones por unidad de tiempo), el caudal teórico será:

$$\dot{V}_t = V_D \cdot N \cdot Z$$

Donde:

$\dot{V}_t$  : Caudal Teórico

En este caso como el nombre de la bomba lo señala “triplex” la bomba consta con 3 cilindros en paralelo.

$$\dot{V}_t = 0.00048597 \cdot 233.76 \cdot 3 = 0.3408 \left[ \frac{m^3}{min} \right]$$

$$\dot{V}_t = 340.8 \left[ \frac{l}{min} \right]$$

### Rendimiento de la Bomba.

Caudal real de la bomba a 233.76 rpm.

Tabla 10.1. Caudal entregado por la bomba en terreno.

Caudal GNL $\left[ \frac{l}{min} \right]$	RPM Motor	RPM Bomba	Caudal GN $\left[ \frac{Nm^3}{h} \right]$
346	868	292	12500
277	694	233.7	10000

Esta tabla fue creada con valores tomados en terreno, en la tabla se ingresa el caudal en  $\left[ \frac{Nm^3}{h} \right]$  (caudal a 0°C y 1 [atm]) y la tabla nos entrega las rpm necesaria del motor, las rpm de la bomba y el caudal entregado por ésta.

La bomba triplex en la práctica trabajando a las rpm que se utilizaron en el cálculo anterior (233.7) entrega un caudal de 277.1  $\left[ \frac{l}{min} \right]$  con lo que se puede obtener el caudal perdido por las fugas y en base a esto el rendimiento

volumétrico de la bomba. Se entiende como rendimiento volumétrico a las pérdidas volumétricas, las cuales se pueden deber a distintos factores, entre ellos:

- Fugas entre el pistón y el cilindro.
- Válvulas de anti retorno, debido a no tener un cierre instantáneo

Rendimiento Volumétrico:

Sea  $Q'$  el caudal perdido por las fugas, se llama rendimiento volumétrico al cociente:

$$\eta_v = \frac{Q}{Q+Q'}$$

$$Q' = Q_{teorico} - Q_{real}$$

$$Q' = 63.68 \left[ \frac{l}{min} \right]$$

$$\eta_v = \frac{340.8}{340.8+63.68}$$

$$\eta_v = 0.8424$$



## 11. Proposición de Mejoras en la Planta Satélite de Regasificación.

### 11.1. Llevar a cabo un Estudio de una Re organización de los Vaporizadores Ambientales en la Planta Satélite de Regasificación.

Como se mencionó anteriormente la planta cuenta con vaporizadores que transmiten el calor del ambiente al GNL. Para un buen funcionamiento de estos se deben dar ciertas condiciones climáticas, una temperatura de 4° C, humedad relativa de 75 % y una velocidad del aire sobre 1 [m/s]. En la planta hay 2 grupos de vaporizadores de 10 vaporizadores cada uno los cuales fueron agrupados de la siguiente manera.

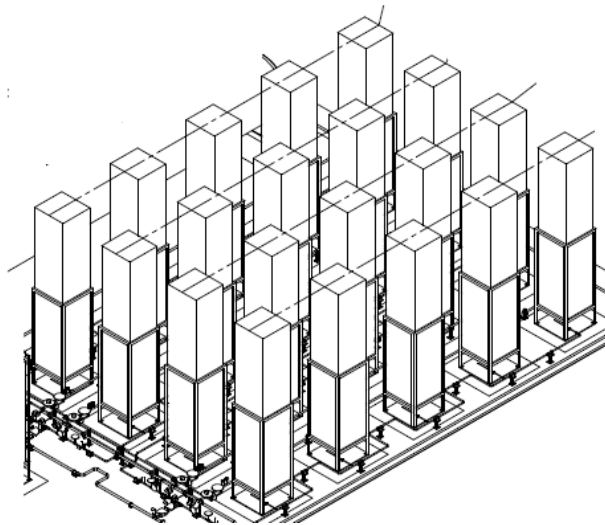


Figura 11.1. Esquema de los vaporizadores ambientales.

El problema a simple vista de colocar de este modo los vaporizadores es que el viento antes de llegar al grupo de vaporizadores que se encuentre trabajando va a chocar con los que se encuentren en su camino, los cuales probablemente van a estar descongelándose y con esto van a quitarle calor al viento y además le quitará velocidad a éste. Por esto convendría realizar un estudio de transferencia de calor para ver si es conveniente para la empresa realizar una re organización de los vaporizadores de tal modo que funcionen de una manera más óptima.

### 11.2. Mejoras en Manifold de los Vaporizadores.

Luego de que GNL pasa por la bomba triplex y se encuentra a una presión suficiente para ser inyectado al gasoducto este es enviado a un manifold donde se encuentran los 5 vaporizadores conectados a este. Donde la presión va cayendo a lo largo del manifold y el primer vaporizador (B) siempre es el primero en congelarse por lo que se debe dejar de usar el grupo de vaporizadores.

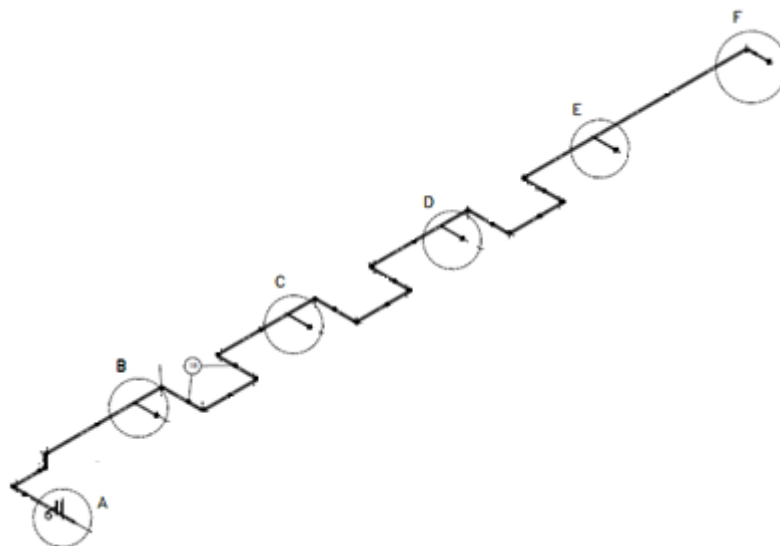


Figura 11.2. Esquema de manifold en los vaporizadores

Al realizar el estudio de las pérdidas de carga desde el comienzo del manifold hasta el último vaporizador utilizando el caudal entregado por la bomba de pistones se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 11.1. Caídas de presión manifold.

	Perd. Regulares + Perd. Singulares [m]	Caídas de Presión [bar]
Tramo A-B	1.25	0.055
Tramo A-C	2.65	0.117
Tramo A-D	4.06	0.18
Tramo A-E	5.62	0.25
Tramo A-F	6.13	0.271

La tabla 11.1 muestra como va cayendo la presión a lo largo del manifold, con esto el primer vaporizador “B” recibe un mayor caudal y lo mismo sucede hasta llegar al último vaporizador.

Para solucionar esto se podrían utilizar válvulas criogénicas reguladoras de presión y regularlas de tal modo que en la entrada de cada vaporizador se tenga la misma presión.

La empresa que suministró los equipos a la PSR presentó una solución a este problema la cual fue la instalación de placas orificios a la salida de cada evaporador.

## 12. Conclusión.

Luego de haber finalizado el estudio de la planta satélite de regasificación se pudo comprobar que los estudios analíticos sobre sistemas hidráulicos son muy precisos y confiables, ya que al encontrar las curvas características de cada bomba centrífuga e interceptarlo con la curva característica del sistema correspondiente ésta nos entregó caudales muy similares a los caudales reales entregados por cada bomba. En el caso de la bomba de pistones triplex también se calculó el caudal entregado por ésta y fue similar.

En el trabajo se pudo observar la diferencia entre una bomba centrífuga o también llamadas bombas de presión limitada y una bomba de desplazamiento positivo. Las bombas centrífugas son diseñadas con el fin de desplazar un gran caudal sin aumentar considerablemente la presión al fluido y por otro lado la bomba de desplazamiento positivo es capaz de trabajar a presiones muy elevadas por lo que se hace indispensable el uso de válvulas de alivio en la descarga para evitar sobrepresiones en las cañerías. Por otro lado durante la práctica se pudo notar la diferencia del mantenimiento de las bombas de pistones triplex y las bombas sumergidas booster. A las bombas triplex se les debe hacer mantenimiento, cambiar el kit de sellos y revisar el estado de los pistones cada 1500 o 2000 horas de funcionamiento mientras que a las bombas booster solo se le cambian los rodamientos del rodete cada 4000 horas de funcionamiento, estos mantenimientos son aplazados algunas veces realizando análisis de vibraciones a las bombas.

También se observó que las bombas criogénicas trabajan de igual forma que una bomba normal y que lo que marca las diferencias son los materiales del cual son construidas debido a las bajas temperaturas de operación. Las Bombas deben ser enfriadas para que los materiales dentro de ellas se contraigan térmicamente y se pueda obtener un buen funcionamiento de éstas.

Se puede concluir que las bombas en la PSR presentan un buen funcionamiento y que las bombas están dimensionadas para poder inyectar Gas Natural al gasoducto en el rango de diseño de la planta.

Durante la práctica se pudo ver que las bombas triplex operan según la temperatura de salida del gas natural, si se inyecta un mayor caudal disminuye la transferencia de calor y viceversa.

Las bombas triplex son diseñadas para trabajar sin las bombas booster pero como medida de seguridad y para asegurar el NPSH disponible de éstas fueron instaladas las bombas booster.

### 13. Bibliografía.

- CRYOSTAR, “Instructions for operation and Maintenance of centrifugal pumps for liquefied gases.”
- CRYOSTAR, “Instructions for operation and Maintenance of centrifugal pumps for liquefied gases, type: Sumerged Motor Pump.”
- CRYOSTAR, “High-Preassure Liquid Gas Piston Pump Commissioning and Maintenance Instrucctions.”
- Universidad del Cauca, Flujos a Presión. [en línea]  
<[http://artemisa.unicauca.edu.co/~hdulica/ayudas\\_fpresion.pdf](http://artemisa.unicauca.edu.co/~hdulica/ayudas_fpresion.pdf)>  
*[consulta: 07 mayo 2013]*
- VICTOR L. STREETER y E. BENJAMIN WYLIE. Mecánica de los Fluidos, 8° ed. Mexico, McGraw-Hill/Interamericana, 1988. 11.