**CAPÍTULO 4**

1. METODOLOGÍA DE CÁLCULO Y SELECCIÓN

En el presente capítulo se desarrollará una metodología para la selección y la configuración de un sistema de bombeo que funcione como apoyo a la descarga de productos refinados de petróleo desde un B/T acoderado en un Terminal mar adentro.

En la sección 4.1 se explican los parámetros y especificación de operación en un Terminal de recepción y despacho. Para una mayor comprensión del tema, esta sección ha sido dividida en sub. secciones. En la sección 4.1.1, 4.1.2 y 4.1.3, se desarrollan los parámetros oceanográficos, parámetros geológicos y las condiciones de operación, respectivamente.

El análisis del sistema de tuberías que se comunica con la estación de bombeo búster, en la sección 4.2 se hace un estudio de la selección del diámetro de tubería óptimo para la Línea de succión, y en la sección 4.3 se hace un estudio de la selección del diámetro mas económico de la Línea de descarga (impulsión).

En la sección 4.4 y 4.5 se analiza el sistema de bombeo tipo búster, con los temas: selección del tipo de bomba búster, y descripción de la estación de bombeo, respectivamente.

Finalmente, para analizar una operación segura de la estación de bombeo en caso de existir una variación de presión desfavorable en el interior de las tuberías, en la sección 4.6 se estudia el fenómeno del golpe de ariete.

1. **PARÁMETROS Y ESPECIFICACIÓN DE OPERACIÓN**

Las actividades en un Terminal de recepción y despacho de productos blancos (productos refinados de petróleo), así como en toda industria, la reducción del tiempo en las operaciones constituye de vital importancia para mantener estándares de eficiencia. En un terminal de recepción y despacho, existen además operaciones en costa y fuera de costa que son consideradas para el desarrollo de las actividades de esta instalación, tales como: maniobras de los B/T, operaciones de amarre y cabotaje, bombeo de productos derivados de petróleo, entre otras.

La reducción en el tiempo de bombeo para la descarga de productos, proporciona un ahorro de dinero en multas para posibles demoras. La selección de los equipos de todo sistema de bombeo que se implemente en una estación de bombeo búster, debe estar orientada hacia la reducción en el tiempo de bombeo, con la finalidad de que las operaciones en el terminal sean eficientes. Las variables que condicionan el tiempo de bombeo se estudiarán mas adelante.

Los parámetros de operación se encuentran determinados por las características propias que cada Terminal de descarga posea. Estas características están relacionadas con la ubicación geográfica del sector donde se encuentra el Terminal, y para el desarrollo de la presente Tesis, se analizan las características oceanográficas y geológicas del sector que se encuentren relacionadas con el análisis hidráulico del sistema de bombeo, y con las variables que limitan el tiempo de bombeo.

* 1. **PARÁMETROS OCEANOGRÁFICOS**

Los parámetros oceanográficos del sector incluyen las condiciones de vientos, olas y mareas del sector donde funciona el Terminal, así como las características del lecho marino por donde recorre la tubería submarina que se conecta al PLEM submarino, y posteriormente al Terminal mar adentro.

La ubicación del lugar donde atracarán los B/T en un Terminal marítimo mar adentro se escoge de manera que todas las embarcaciones que ingresen al Terminal a descargar los derivados de petróleo puedan navegar libremente.

La distancia que separa la costa del Terminal en tierra con el Terminal mar adentro, es la distancia en la cuál se consigue la profundidad requerida para que los B/T puedan hacer su ingreso hasta el atracadero, de manera que se debe conocer el calado de estas embarcaciones.

Para conocer las características del suelo del lecho marino, así como los desniveles, y la profundidad lejos de costa, es necesario realizar un Levantamiento batimétrico del sector por donde se encuentra ubicado: la tubería submarina, el PLEM submarino, y el área destinada para acoderar a los B/T.

Estos estudios tienen como finalidad determinar la posición donde el B/T atracará, tomando en consideración el B/T de mayor calado que pueda llegar a descargar al Terminal.

Para el especialista en sistemas de bombeo, de los datos generados en el Levantamiento batimétrico, le debe ser suministrada la siguiente información.

* + 1. Longitud de la tubería submarina.
    2. Profundidad del mar en el PLEM submarino.
    3. Recorrido de la tubería.
  1. **PARÁMETROS GEOLÓGICOS**

Los estudios geológicos donde se plantea construir una estación de bombeo búster, deben confirmar la viabilidad de la cimentación y adecuación de las instalaciones de acuerdo a las normas correspondientes y a los requerimientos que el Terminal disponga.

Un estudio geológico generalmente utiliza la siguiente información:

Mapa geográfico del sector publicado por el IGM.

Levantamiento topográfico al detalle del sector en donde se realiza el proyecto.

Resultado del estudio hidráulico del sistema de bombeo a implementarse, lo cuál determina: la trayectoria, diámetro de la tubería, y la cota IGM donde va a estar ubicada la estación de bombeo búster.

Cuando se utiliza las siglas IGM, se hace referencia al Instituto Geográfico Militar, el cuál dispone las cotas del terreno en el país con referencia a la línea de mar.

Los estudios geológicos incluyen: Geología regional, Geología estructural y Geomorfología del sector, los mismos que deben ser desarrollados por expertos en el tema.

Para la selección del sitio de implantación de la estación de bombeo búster y del trazado de la vía de acceso, es necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

* + 1. El área requerida y la ubicación para la implantación de la estación de bombeo búster, debe estar a una altura no mayor de la cota que especifique el especialista.
    2. La estación de bombeo requiere de un fácil acceso vial desde tierra, y de un área adyacente pequeña para el estacionamiento de los vehículos.
    3. La estabilidad de los taludes de corte, y de la vía de acceso en el trazado seleccionado.

De la información generada por los estudios geológicos y en el Levantamiento topográfico, se debe obtener la siguiente información:

1. Longitud de la tubería en tierra, la Línea de succión y descarga (Línea de impulsión).
2. Trayectoria de la tubería en tierra.
3. Cota IGM de ubicación de la estación de bombeo, o en su defecto: rango de cotas donde sea más factible ubicar la estación de bombeo.

La información que se obtiene de los parámetros oceanográficos y geológicos del Terminal, se los puede presentar como se muestra en la Tabla 10.

TABLA 10

PARÁMETROS OCEANOGRÁFICOS Y GEOLÓGICOS

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Descripción** | **Longitud** | **Accesorios** | |
| Tubería Submarina | LTS | # | Codos |
| Línea de succión  en tierra | LST | # | Codos |
| Línea de descarga  en tierra | LDT | # | Codos |
| **Descripción** | **Máxima** | **Mínima** | |
| Cota (IGM) de la  Estación de bombeo | n MAX | n MIN | |

, donde:

LTS: Longitud de la tubería submarina.

LST: Longitud de la Línea de succión en tierra.

LDT: Longitud de la Línea de descarga en tierra.

n MAX: Altura de la cota máxima de la estación de bombeo.

n MIN: Altura de la cota mínima de la estación de bombeo.

* 1. **CONDICIONES DE OPERACIÓN**

Las condiciones de operación en un Terminal marítimo que se definen en este capítulo, se refieren a las variables sobre las cuales se realiza la selección de los equipos del sistema de bombeo tipo búster. En un Terminal de recepción y despacho, se consideran como condiciones de operación a las capacidades de almacenamiento y las condiciones extremas de bombeo que se pueden presentar por el ingreso de los B/T al Terminal para realizar la descarga del producto.

La capacidad de almacenamiento en el Terminal, depende del espacio físico disponible para la ubicación de un Tanque de almacenamiento en tierra de gran capacidad, y la frecuencia de descarga de los B/T.

Las características de los B/T que ingresen al Terminal mar adentro, deben ser conocidas para la selección de la bomba búster más adecuada que funcione en estas condiciones, entre las cuales se tiene:

* + 1. Calado de los B/T.
    2. Volumen del producto que transportan.
    3. Presión de bombeo.
    4. Caudal de las bombas.

La información de los B/T que descarguen en el Terminal, se la puede tabular de la siguiente manera:

TABLA 11

INFORMACIÓN DE LOS B/T QUE INGRESAN AL TERMINAL MAR ADENTRO

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Ítem | Calado de B/T | Volumen | Presión de Bombeo | Caudal |
| 1 | D1 | V1 | P1 | Q1 |
| 2 | D2 | V2 | P2 | Q2 |
| 3 | D3 | V3 | P3 | Q3 |
| n | Dn | Vn | Pn | Qn |

, donde:

D1, D2, D3, Dn : Calado de los B/T.

V1, V2, V3, Vn : Volumen de producto que transportan los B/T.

P1, P2, P3, Pn : Presión de bombeo en las bombas de los B/T.

Q1, Q2, Q3, Qn : Caudal de las bombas de los B/T.

Para cuestión de diseño y selección, se toma las condiciones máxima y mínima de las condiciones de operación.

TABLA 12

CONDICIONES EXTREMAS DE BOMBEO DE LOS B/T QUE INGRESAN AL TERMINAL MAR ADENTRO

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Condición de Trabajo | Volumen | Presión  Bombeo | Caudal |
| Inferior | VI | PI | QI |
| Superior | VS | PS | QS |

, donde:

VI, VS: Volumen de producto que transportan los B/T.

PI, PS: Presión de bombeo en las bombas de los B/T.

QI, QS: Caudal de las bombas de los B/T.

El caudal de bombeo al que se selecciona las bombas búster, tal como se mencionó en el capítulo 1, debe ser de al menos un caudal igual al caudal de bombeo de las bombas de los B/T.

En caso de no poseer el dato del caudal de las bombas de los B/T, se puede establecer un caudal de bombeo en base al volumen que transportan los B/T, y el tiempo en que se descarga todo el producto en otros Terminales.

 4.1

, donde:

: Caudal de la bomba búster

: Volumen de producto que transportan los B/T

td: Tiempo de descarga del producto.

El aumento del caudal de bombeo ocasiona que el tiempo de descarga disminuya, pero la velocidad del fluido y las pérdidas por fricción en la tubería aumentan. Por lo tanto, la reducción en el tiempo de descarga para el cálculo del caudal de bombeo se la puede realizar al tener en cuenta no exceder la velocidad recomendada para combustibles en tuberías, y que las pérdidas por fricción no originen presiones negativas en el interior de la tubería.

La capacidad de almacenamiento de los tanques en tierra depende de la frecuencia, y de la cantidad de combustible que se descargue en el Terminal. En el apéndice 2 se adjunta una tabla que contiene las dimensiones de varios tamaños de los tanques de almacenamiento API.

El Terminal mar adentro al que se hace referencia en este capítulo, utiliza un sistema de amarre para acoderar a los B/T que ingresan al Terminal, y se debe especificar el tipo de sistema de amarre que se utiliza, para determinar la pérdida de carga.

* 1. **SELECCIÓN DEL DIÁMETRO DE TUBERÍA ÓPTIMO PARA LA LÍNEA DE SUCCIÓN**

La selección de un diámetro de tubería óptimo para la Línea de succión, reduce el tiempo en la operación de bombeo a un valor mínimo permisible, reduciendo así las pérdidas por fricción a valores aceptables, de manera que se pueda llegar con presión positiva hasta la estación de bombeo búster.

El análisis de pérdidas de carga para la Línea de succión, se lo realiza para la tubería submarina que comunica al Terminal mar adentro por medio del PLEM submarino, con el Manifold de la estación de bombeo búster ubicada en tierra.

Debido a que la Línea de descarga del B/T debe llegar hasta la cota donde se conecta al Manifold común de distribución que se comunica con los tanques de almacenamiento, en el desarrollo de la presente tesis se analiza el sistema de bombeo para una estación de bombeo búster, y se va a analizar el caso en que la presión de bombeo suministrada por los B/T no es suficiente para vencer las pérdidas de carga que existe en la longitud total de la tubería. Por lo tanto, la tubería que conecta a los B/T con el Manifold de distribución que va hacia los tanques de almacenamiento se ha dividido en dos, las cuales son: Línea de succión, que es la tubería submarina que comunica el PLEM submarino con la estación de bombeo búster, y la Línea de descarga o de impulsión, que es la tubería que comunica a las bombas búster con los tanques de almacenamiento.

Información inicial

El diseño hidráulico de la tubería, se lo realiza sobre la base de: las capacidades de almacenamiento, y las condiciones extremas de bombeo que se pueden presentar en los B/T. La información inicial que debe ser suministrada al especialista, es la siguiente:

* + Fluido de bombeo
  + Sistema de amarre
  + Densidad del fluido
  + Viscosidad dinámica
  + Diámetro interior de la tubería
  + Longitud de la tubería
  + Presión mínima de las bombas de los B/T
  + Presión máxima de las bombas de los B/T
  + Longitud equivalente de los accesorios
  + Rugosidad absoluta de la tubería
  + Gravedad
  + Cota IGM de análisis
  + Caudal de bombeo

La información suministrada en la sección 4.1.3 correspondiente al tipo de B/T que opera, se puede utilizar para establecer la máxima capacidad de los B/T que ingresan a descargar al Terminal. Además, se debe prever que a futuro puedan ingresar a operar en una flota B/T de mayor o menor toneladas de peso muerto; es necesario estar informados de futuras inversiones de las compañías que manejan estas flotas.

Análisis de pérdidas en la Línea de succión

El cálculo de las pérdidas permite establecer si las bombas con las que descargan normalmente los B/T pueden cumplir con este propósito, o si necesita una estación auxiliar de bombeo, así como adecuar las perdidas de presión que se producen, realizando una variación del diámetro de tubería.

El cálculo de las pérdidas de presión se lo realiza para diferentes diámetros de tuberías, realizando las siguientes consideraciones:

* Sistema de amarre utilizado en el Terminal mar adentro.
* PLEM submarino y mangueras de despacho.
* Longitud de tubería hasta la línea de playa.
* Longitud de tubería adicional en tierra para llegar hasta la ubicación de la estación de bombeo.
* Accesorios utilizados en la tubería.
* Filtro de combustible.
* Equipos
* Cabezal estático.

La longitud total de la tubería a considerar puede variar de acuerdo al sistema de amarre que se utilice en el terminal, y del recorrido hasta la posible estación de bombeo búster. El sistema de amarre puede ser: un sistema de amarre por Multiboyas, o un sistema de amarre por Monoboya.

La caída de presión en el atracadero debe ser analizada para cada uno de los casos que se pueden dar:

* Para un sistema de amarre por Monoboyas, existen pérdidas de presión que se producen dentro del sistema de la Monoboya, por lo tanto, esta información debe ser proporcionada por el fabricante del equipo.
* Para el sistema de amarre por Multiboyas, las perdidas de presión por el sistema son nulas.

La caída de presión en el PLEM submarino y las mangueras de despacho, cuando sea tratada en esta tesis, se refiere a la caída de presión producida en:

* La válvula submarina, y
* La manguera flexible, que es la interfase entre el buque y la válvula submarina para un amarre por Multiboyas, mientras que en el caso de Monoboyas, la válvula se conecta a la Monoboya por medio de la manguera submarina.

Para realizar el cálculo de la caída de presión en los filtros o algún otro equipo que se pueda emplear en la estación de bombeo, se utiliza la hoja del fabricante del equipo.

Procedimiento de cálculo para la selección del diámetro óptimo

Para seleccionar el diámetro óptimo en la tubería submarina, es necesario establecer todos los datos de pérdidas de presión que se producen a lo largo de toda la Línea.

La información reunida para realizar los cálculos de la caída de presión en la Línea de succión, será expuesta en unidades del Sistema Internacional (SI).

Debido a que es más común encontrar los valores de gravedad específica o peso específico al tratarse de combustibles, la densidad del combustible se la determina a partir del peso específico por medio de la siguiente ecuación:

 2.1

, donde:

S: Peso específico

ρ AGUA: Densidad del agua, 1000 Kg/m3 en SI.

ρ LÍQUIDO: Densidad de líquido (Kg/cm2)

Despejando la densidad de combustible de la ecuación 2.1, se obtiene:

 4.2

Para determinar la altura de la columna de combustible con presión estática igual a la presión atmosférica, se lo determina con la siguiente ecuación:

 4.3

, donde:

hCOMBUSTIBLE: Altura de cabezal de presión, en metros.

PATMOSFÉRICA : Presión atmosférica, equivale a 101300 Pa en SI.

ρCOMBUSTIBLE: Densidad de combustible, en Kg/m3.

g: Gravedad, en m/s2.

Diámetro de la tubería

Para obtener las primeras aproximaciones del diámetro de tubería, se establece una velocidad máxima de circulación del flujo, y se escoge para iteración a los diámetros que tengan las velocidades de circulación más altas.

Velocidad media del flujo

Para determinar la velocidad media del flujo en la tubería escogiendo para el cálculo diámetros comerciales, se utiliza la ecuación de continuidad:

 4.4

, donde:

V: Velocidad media del fluido a través de la tubería, en m/s.

D: Diámetro interior comercial de la sección transversal de la tubería, en metros.

Q: Caudal de bombeo igual al de diseño, en litros/segundo.

La velocidad obtenida para el bombeo se debe evitar que exceda los 3,6 m/s, y es aconsejable seleccionar un diámetro de tubería para producir una velocidad de circulación alta en la tubería, superior a 1 m/s.

Pérdida de carga en la tubería

Las pérdidas de carga que se presentan en las Líneas de succión, se dividen básicamente en tres tipos.

* Pérdida de carga por fricción
* Pérdida de carga local
* Caída de presión en equipos

Pérdida de carga por fricción

Para determinar la pérdida de carga por fricción, se puede utilizar la ecuación de Darcy – Weisbach:

 4.5

, donde:

HL: Pérdidas de presión por fricción, en metros.

f : Coeficiente de fricción, adimensional.

V : Velocidad de circulación del fluido, en m/s.

L : Longitud de la tubería, en metros.

g : Gravedad, en m/s².

D : Diámetro de tubería, en metros.

El valor del coeficiente de fricción se lo determina por medio de la ecuación de Colebrook:

 4.6

, donde:

f : Coeficiente de fricción, adimensional.

K : Rugosidad absoluta, en mm.

D : Diámetro interior de la tubería, en mm.

Re : Número de Reynolds-

El número de Reynolds se lo determina con la siguiente ecuación:

 4.7

, donde:

ρ : Densidad de fluido

V : Velocidad del fluido, en m/s.

D : Diámetro interno de la tubería, en milímetros.

µ : Viscosidad dinámica, en .

Pérdidas de carga local

Además de la pérdida de carga por fricción también se presenta en la Línea de succión pérdidas de carga denominadas locales, producto del paso de flujo a través de los accesorios instalados en la Línea y/o al cambio de dirección y/o sección en sus tramos.

La determinación de las pérdidas locales es evaluada, sólo en el caso de ser necesarias por la cantidad de accesorios o velocidades altas en la Línea.

Para esta evaluación se utiliza el teorema de Borde-Belanger.

 4.8

Donde k depende del accesorio por donde transita el flujo (codos, válvulas, entradas, salidas, reducciones, tees, uniones, etc.)

También se puede evaluar estas pérdidas con la ecuación de Darcy – Weisbach, y utilizando un Manual de hidráulica para obtener la longitud de tubería equivalente para cada accesorio.

Caída de presión en equipos

El uso de equipos en la Línea origina una caída de presión que debe ser considerada en la caída de presión total del sistema, para determinar esta pérdida de presión se utiliza el manual del equipo, y se revisa para las condiciones de bombeo en que se encuentra funcionando.

La selección del diámetro óptimo para la Línea de succión, debe poder evaluar la conveniencia del caudal de bombeo y la posible cota de ubicación de la estación de bombeo búster. Las pérdidas de presión se las calcula para los diferentes diámetros de tubería, considerando el aumento de la cota desde 0, hasta una cota +n IGM, tal como se muestra en la Tabla 13.

TABLA 13

PRESIÓN DE BOMBEO REQUERIDA POR EL AUMENTO DE LA COTA IGM DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | ***Aumento de cota + IGM*** | | | |
| **Elevación, m** | *1* | *2* | *3* | *n* |
| **Presión, m c. f.** | PC1 | PC2 | PC3 | PCN |

, donde:

PC1, PC2, PC3, PCN: Presión estática para varias cotas, en m c. f.

Los B/T que ingresan a descargar en el Terminal tienen diferentes características y capacidades; al tener diferentes capacidades para descargar el producto, la estación de bombeo búster debe ser capaz de bombear para el grupo de B/T que se ha escogido, teniendo en cuenta el no seleccionar un sistema de bombeo que despache el producto a un caudal mayor al de ingreso proporcionado por las bombas de los B/T, en cuyo caso se produciría cavitación al interior de las bombas búster y un desabastecimiento de flujo.

Para resolver este inconveniente se ha dividido en una condición máxima y una mínima condición de bombeo, tal como se mencionó anteriormente, lo cuál abarca una gama de condiciones de bombeo dando versatilidad a la estación búster siempre y cuando las condiciones de operación satisfagan eficientemente las condiciones de diseño del sistema.

Obtenidas las pérdidas de presión por fricción, pérdidas locales y en los equipos para las diferentes condiciones de caudales, seguidamente se procede a calcular el aumento de la caída de presión debido al aumento de cabezal estático con la ubicación de la cota IGM donde va a estar ubicada la estación de bombeo búster, tal como se muestra en la Tabla 14.

TABLA 14

CAÍDA DE PRESIÓN PARA DIFERENTES COTAS CON TUBERÍA DE DIÁMETRO ø1

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Caudal | Pérdidas de presión,  m c. f. | Cota de Estación de bombeo búster | | | |
| 1 | 2 | 3 | n |
| Q1 | **P1** | P1,1 | P1,2 | P1,3 | P1,n |
| Q2 | **P2** | P2,1 | P2,2 | P2,3 | P2,n |
| Q3 | **P3** | P3,1 | P3,2 | P3,3 | P3,n |
| Qm | **Pm** | Pm,1 | Pm,2 | Pm,3 | Pm,n |

Q1, Q2, Q3, Qm: Caudales de bombeo, en litros/segundo.

P1, P2, P3, Pm: Caída de presión en la Línea de succión, en m c. f..

P1,1, …, P1,n; P2,1, …, P2,n; P3,1, …, P3,n; Pm,1, …, Pm,n: Caída de presión total en la Línea para diferentes cotas y para varias condiciones de bombeo.

Con la información generada en la Tabla 14 se realiza un gráfico para visualizar la caída de presión que se produce en la Línea de succión para diferentes caudales de bombeo, y para el diámetro de tubería escogido, tal como se muestra en la Figura 4.1.



FIGURA 4.1. CAÍDA DE PRESIÓN PARA DIFERENTES COTAS CON TUBERÍA DE DIÁMETRO ø1.

La Figura 4.1 se debe realizar para los diámetros de tubería con los que se consiga despachar el producto en el menor tiempo de bombeo, y este gráfico permite determinar visualmente si el caudal de bombeo seleccionado permite llegar hasta la cota +n IGM donde se encuentra la estación de bombeo búster.

Cuando se resta la caída de presión total a lo largo de la Línea de succión a la presión de bombeo proporcionada por las bombas de los B/T, se debe tener en cuenta que el ingreso de combustible en la estación de bombeo búster debe alcanzar una succión con presión positiva en el ojo de impulsión de la bomba, para lo cuál, el cálculo del cabezal neto de succión positiva (NPSH) no necesita ser calculado, lo que equivale a decir:

PINGRESO EN BOMBA BÚSTER (Pa) ≥ 0 4.9

El diámetro de tubería óptimo, se lo determina iterando para varios diámetros de tubería comercial hasta que se encuentra el menor diámetro que cumpla la condición expuesta con la ecuación 4.8. La energía con que ingresa el fluido al ojo de impulsión al ser positiva, reduce la potencia requerida de la bomba que va a seleccionarse para la estación de bombeo búster, y también debe estar tabulada para el cálculo del TDH o altura dinámica total.

1. **SELECCIÓN DEL DIÁMETRO MAS ECONÓMICO DE LA LÍNEA DE DESCARGA**

Para la selección del diámetro de tubería para la Línea de descarga o impulsión, la Línea se ha dividido en 2 tramos para su análisis, como se muestra en la Figura 4.2.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Línea de Succión | |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  | Tramo 1 |
| Línea de Descarga o Impulsión | |  |  |
|  |  |  | Tramo 2 |

FIGURA 4.2. DISTRIBUCION DE LA LÍNEA.

El recorrido de cada tramo de tubería consiste en:

* Tramo 1.- Desde la boquilla de descarga de la bomba, hasta la salida de la estación de bombeo búster.
* Tramo 2.- Desde la salida de la estación de bombeo búster, hasta el ingreso al Tanque de almacenamiento.

En el análisis que se realizará, la selección del diámetro de tubería del tramo 2 se analizará en el presente capítulo.

Diámetro de la Tubería

Para determinar las primeras aproximaciones del diámetro de tubería, se establece una velocidad máxima de circulación del flujo, y se escoge para iteración a los primeros diámetros que tengan las velocidades de circulación más altas, de manera similar al procedimiento realizado para la Línea de descarga.

Pérdida de carga en la tubería

Para el cálculo de la pérdida de carga en la Línea de descarga o impulsión, se realiza el mismo procedimiento que se expuso para la Línea de succión cuando se necesitaba determinar el diámetro óptimo.

**Potencia de Impulsión**

Establecidas las pérdidas de presión, se procede a calcular la potencia necesaria para impulsar la columna de fluido desde la estación de bombeo búster hasta los Tanques de almacenamiento.

Las pérdidas de carga por fricción y locales son fundamentales en la determinación de la altura dinámica total para la obtención de la potencia que se empleará en el equipo de bombeo.

Potencia de consumo (PC)

La Energía que requiere la bomba para su normal funcionamiento es conocida como Potencia de Consumo (Pc) y es calculada por la expresión:

 4.10

, donde:

PC: Potencia de consumo, en Kilowatios.

TDH: Altura dinámica total (TDH), en pies.

Q: Caudal de bombeo, en litros.

SG: Gravedad específica, adimensional.

ηB: Eficiencia de la bomba, en porcentaje.

Potencia instalada (PI)

El motor que se acopla a la bomba para su funcionamiento necesita una energía denominada potencia Instalada (Pi) y es calculada por la expresión:

 4.11

 4.12

, donde:

PI: Potencia instalada, en Kilowatios.

ηM: Eficiencia del motor, en porcentaje.

ηC: Eficiencia del sistema en conjunto bomba – motor, en porcentaje,

Eficiencia de la bomba obtenida por la transformación de la energía mecánica de rotación en energía potencial de fluido y la eficiencia del motor obtenida de la transformación de la energía eléctrica en energía mecánica de rotación componen la eficiencia del sistema de conjunto que describe el grado de aprovechamiento energético que tiene un sistema al suministrarle una energía determinada, y como este llega a convertirla en energía útil ganada por el fluido.

Análisis de sensibilidad económica

Al ser el diseño de la Línea de impulsión un problema básicamente de costos relativos al diámetro de la tubería, calidad y potencia del sistema de bombeo, es necesario realizar el análisis económico entre varias alternativas de diseño para resolverlas y escoger la que proporcione el menor costo total.

Los costos totales se componen de varios tipos de costos en el sistema:

Para el tramo 2 de la Línea de impulsión, se procede a calcular los costos totales y sus respectivos Valores Presentes.

* **Costo total de la tubería instalada** (adquisición, transporte, instalación y prueba), se calcula como:

 4.13

, donde:

CTTI: Costo total de tubería instalada, en dólares americanos.

CT: Costo de tubería, en ($ U.S./metro).

LTT: Longitud total de tubería, en metros.

* **Costo total del Equipo de bombeo** (adquisición, transporte, instalación y prueba mecánica e hidráulica) se calcula utilizando los coeficientes de costo del equipo (K,a) y su Potencia instalada (en Kilowatios)

 4.14

, donde:

CTEB: Costo total del equipo de bombeo, en dólares.

PI: Potencia instalada, en Kilowatios.

K, a: Coeficientes del equipo.

Los coeficientes del equipo establecen la relación no lineal entre la potencia instalada y el costo total del equipo de bombeo, pero en caso de no conocer estos coeficientes se puede establecer una proporcionalidad lineal con un rango pequeño de uso, y utilizando valores de costos reales determinados por la parte interesada para establecer una ecuación que relacione la potencia con el costo total del equipo de bombeo.

* **Costo Anual de Operación** (Energía consumida), se calcula de acuerdo a la potencia instalada y al costo de energía por (kW-hr/año).

 4.15

, donde:

CAO: Costo anual de operación, en dólares.

HBS: Horas de bombeo por semana.

PI: Potencia instalada, en Kilowatios.

CPI: Costo de la potencia instalada 

* **Costo Anual de Mantenimiento** (Repuestos, insumos, personal, herramientas, etc).

Para la obtención de la mejor alternativa de menor costo es necesario llevar los costos anteriores a sus valores presentes de acuerdo al horizonte de anualidades considerado por el tiempo de vida útil del equipo de bombeo y tubería.

* **Valor Presente de Inversiones Totales**.- Conformado por el costo total de tubería más el costo total del equipo.
* **Valor Presente de Reposiciones totales**.- Conformado por la diferencia del Costo de Inversiones totales en un plazo de anualidades, a la tasa de descuento y el valor presente de inversiones totales.

 4.16

, donde:

VPRT: Valor presente de Reposiciones totales, en dólares.

VPIT: Valor presente de Inversiones totales, en dólares

i : Tasa de descuento.

N: Número de anualidades (tiempo de vida útil del equipo de bombeo).

* **Valor Presente de explotaciones totales**.- Conformado por el Valor presente de la suma de los costos de operación y mantenimiento anualizados de acuerdo a la tasa de descuento. Está regido por la siguiente expresión:

 4.17

, donde:

VPET: Valor presente de explotación total, en dólares.

CAO: Costo anual de operación, en dólares

CAM: Costo anual de mantenimiento, en dólares.

i : Tasa de descuento.

N: Número de anualidades.

Finalmente la elección del diámetro se realiza en función del menor Valor presente total, siendo este el resultado de la sumatoria de todos los Valores presentes anteriores.

* 1. **SELECCIÓN DEL TIPO DE BOMBA BÚSTER**

La bomba búster se selecciona de las alternativas de bombas del fabricante que cumpla con la norma API estándar 610 para bombas centrífugas. Para la selección de la bomba búster, primero se construye la curva de característica del sistema obteniendo el valor de la altura dinámica total o TDH para varias condiciones de caudal.

Curva característica del sistema y de la bomba búster

Realizada la selección del diámetro óptimo para la Línea de succión y la selección del diámetro mas económico para la Línea de descarga o impulsión, se puede construir la curva característica del sistema, y confrontarla con la curva característica del equipo de bombeo escogido en el desarrollo del análisis de sensibilidad económica para el diámetro económico, y así determinar el punto óptimo de operación del sistema.

La curva característica del sistema HSISTEMA, se determina mediante la ecuación:

 4.18

, donde:

HSISTEMA: Pérdida de carga en el sistema o TDH, en metros.

HL: Pérdida de carga en la Línea de succión y la Línea de impulsión, en metros.

Hl: Pérdida de carga locales, en metros.

HEQUIPOS: Pérdida de carga en equipos, en m c. f.

HESTÁTICO: Pérdida de presión por el cabezal estático que debe vencer, en metros.

HBB/T: Presión de bombeo suministrada por las bombas del B/T, en m c. f.

La ecuación de la curva característica del sistema se calcula para diferentes caudales con la finalidad de obtener información suficiente acerca de la relación entre las pérdidas de carga del sistema y el caudal del sistema de bombeo.

La curva característica de la bomba búster es proporcionada por el fabricante o proveedor dependiendo de la aplicación que se de al equipo.

Confrontando estas curvas se obtiene un punto en donde ambas curvas se interceptan, es decir, existe un valor de caudal Q para el que se obtiene un único valor de H, a este punto se le denomina punto óptimo de operación.

La variedad de embarcaciones que puedan ingresar a descargar al Terminal los derivados de petróleo, hace necesario que el sistema de bombeo tipo búster funcione eficientemente dentro del grupo de condiciones de bombeo para el que previamente se diseñe la estación búster, para lo cuál en esta sección se plantean algunas alternativas de selección y configuración que deben ser establecidas a implementarse de acuerdo a la conveniencia del usuario.

* + 1. **ALTERNATIVAS DE SELECCIÓN Y CONFIGURACIÓN**

Se pueden tener muchas alternativas que solucionen un problema de bombeo, y está a criterio del diseñador establecer la configuración que opere más eficientemente.

En el Terminal mar adentro pueden ingresar a descargar B/T que posean distintos sistemas de bombeo, y para establecer el sistema de bombeo tipo búster se ha determinado que la estación de bombeo debe ser capaz de bombear al menos a 2 condiciones de bombeo:

* Condición máxima de bombeo.
* Condición mínima de bombeo.

Para satisfacer la gama de condiciones de bombeo que pueden presentarse en la estación de bombeo búster, se ha propuesto las alternativas que se muestran en la Figura 4.3.



FIGURA 4.3. ALTERNATIVAS DE SELECCIÓN DE LA BOMBA BÚSTER; A) BOMBA BÚSTER SOLA, B) UNA BOMBA BÚSTER PARA CADA CONDICIÓN DE BOMBEO, C) ARREGLO DE BOMBAS EN PARALELO.

Alternativa 1

El sistema de bombeo tipo búster se encuentra conformado por una sola bomba, esta alternativa es la selección ideal cuando se tiene una única condición de bombeo en el Terminal, pero para dos condiciones de bombeo la bomba es seleccionada para cumplir la condición de bombeo máxima, y luego es adecuada por un sistema de válvulas para satisfacer las condiciones de caudal y presión cercanas a la condición máxima. Para satisfacer la condición de bombeo mínima y obtener una eficiencia alta, se utiliza un dispositivo que modifique la frecuencia de la corriente, así como un arreglo de válvulas para afinar el caudal y la presión de bombeo en esta condición.

Para determinar el punto de operación de la bomba se utiliza un gráfico H vs. Q, donde se representa la relación entre la carga del sistema y el caudal de bombeo, respectivamente.

El punto de operación también puede ser determinado analíticamente con las ecuaciones de la carga del sistema y la bomba, pero en caso de no tener estas ecuaciones se las puede determinar con los datos de operación a varios caudales y realizando una aproximación por regresión polinomial. Para el cálculo se plantea a una potencia de orden 2, pero el orden de la potencia puede ser mayor, el cálculo se realiza de la siguiente manera:

HSISTEMA (Q) = A + B x Q + C x Q2  4.19

HBOMBA (Q) = D + E x Q + F x Q2 4.20

, donde:

A, B, C, D, E, F: Constantes de la ecuación

HSISTEMA (Q): Carga total del sistema en función del caudal, en metros de columna de fluido.

HBOMBA (Q): Carga de operación de la bomba en función del caudal, en metros de columna de fluido.

Las constantes de las ecuaciones son conocidas, para obtener el caudal de operación se iguala las ecuaciones 4.19 y 4.20, dejando ambos lados de la ecuación en función de Q, el valor del caudal de operación corresponde al valor positivo de las dos soluciones. El valor de carga de operación se obtiene reemplazando el caudal obtenido en cualquiera de las ecuaciones 4.19 y 4.20.

Alternativa 2

El sistema de bombeo para esta alternativa consiste en seleccionar una bomba para la condición máxima, y una bomba para la condición mínima.

Las conexiones en el Manifold permiten utilizar la bomba búster adecuada, de acuerdo al B/T que ingrese a descargar.

El punto de operación de la bomba búster se lo puede determinar gráfica y analíticamente, tal como se detalla en la alternativa 1; de manera individual para la condición máxima y la condición mínima, lo cuál implica dos selecciones de bombas.

Alternativa 3

El sistema de bombeo para esta alternativa utiliza un arreglo de 2 bombas en paralelo. En un arreglo de bombas en paralelo el caudal con que se despacha es aproximadamente la suma algebraica de los caudales individuales de las bombas. La manera de determinar el punto de operación de la bomba en la condición mínima, se determina de manera similar a la realizada en la alternativa 1.

Para determinar el punto de operación en un arreglo de bombas en paralelo de iguales características, se utiliza las ecuaciones de carga del sistema y la ecuación del funcionamiento de la bomba búster. Los valores de los caudales para los cuales se va a construir la curva del sistema para la condición máxima, son reemplazados en la ecuación de la curva de la bomba unitaria, pero previamente se cambia la variable del caudal (Q) por caudal sobre dos , para cada valor de caudal.

HBOMBA UNITARIA (Q) = C1 + C2 x Q + C3 x Q2 4.21

HARREGLO EN PARALELO (Q) = C1 + C2 x  + C3 x  4.22

, donde:

C1, C2, C3: Constantes de la ecuación (conocidas).

HBOMBA UNITARIA (Q): Carga de operación de la bomba unitaria en función del caudal, en metros de columna de fluido.

HARREGLO EN PARALELO (Q): Carga de operación del arreglo en paralelo en función del caudal, en metros de columna de fluido.

La ecuación 4.22 corresponde al arreglo de bombas en paralelo, y permite obtener la carga del sistema para la máxima condición. Se puede determinar analíticamente el punto de operación del arreglo de bombas en paralelo igualando la ecuación de carga de la bomba y del sistema, obtenida cada una en función del caudal de operación.

* + 1. **ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS**

La conveniencia de alguna de las alternativas planteadas en la sección 4.4.1 queda a elección del diseñador. En esta sección se plantea un análisis sobre la base de un ahorro energético durante la operación del sistema de bombeo tipo búster, y se lo desarrolla de manera individual para cada una de las alternativas anteriormente planteadas.

Alternativa 1

Para la primera alternativa se utiliza una bomba para satisfacer las 2 condiciones de bombeo. La aplicación de esta solución implica un derroche de energía durante la operación para la condición mínima, así como un funcionamiento con eficiencia baja.

Desventajas:

* La inversión inicial de la bomba puede ser muy costosa si la bomba búster requerida en esta condición tiene una potencia elevada.
* Puede necesitar un arrancador para encender la bomba.
* Valor del pico de energía de arranque es alto.
* Necesita un dispositivo que modifique la frecuencia de la corriente, para funcionar en la condición mínima de bombeo en la estación de bombeo búster.
* Derroche de energía durante la operación de la bomba en la condición mínima.
* La fuente de alimentación de la red eléctrica al sistema necesita de mayor protección para evitar la inflamación del combustible que se bombea, debido a que maneja voltajes elevados.
* Poca versatilidad del equipo para realizar operaciones de bombeo en diferentes condiciones.
* Tiempo de amortización del equipo es relativamente largo.

Ventajas:

* Ahorro de dinero en transporte e instalación.
* Funciona eficientemente para la condición de bombeo máxima.

Alternativa 2

Para la segunda alternativa, se satisfacen los requerimientos de carga para cada una de las condiciones de bombeo de manera independientemente. Aunque esta alternativa es la que mejor satisface las condiciones de bombeo, resulta ser una solución poco ingeniosa.

Desventajas:

* Inversión inicial del equipo es elevada.
* Puede necesitar un arrancador para encender la bomba búster de mayor capacidad.
* Valor del pico de energía para el arranque de la bomba búster de mayor potencia es elevado.
* La fuente de alimentación de la red eléctrica al sistema necesita de mayor protección para evitar la inflamación del combustible que se bombea, debido a que maneja voltajes elevados por el consumo de energía de la bomba búster de mayor capacidad.
* Tiempo de amortización del equipo es relativamente largo.

Ventajas:

* No necesita un dispositivo que modifique la frecuencia para operar a diferentes condiciones de bombeo.
* Versatilidad en la operación.

Alternativa 3

Para la tercera alternativa, el uso de este arreglo de bombas en paralelo proporciona un sistema de bombeo que puede funcionar adaptándose a las condiciones de bombeo que se generen en el Terminal, y proporciona un funcionamiento a eficiencia alta, así como un ahorro de energía en la operación.

Desventajas:

* Aumenta la cantidad de válvulas, accesorios y los dispositivos de control en el sistema de bombeo.

Ventajas:

* Ahorro de dinero en transporte e instalación.
* No necesita arrancadores para encender la bomba búster.
* No necesita un dispositivo que modifique la frecuencia de la corriente.
* Valor pico de la energía para el arranque de las bombas es pequeño.
* La fuente de alimentación de la red eléctrica al sistema no necesita mucha protección para evitar la inflamación del combustible que se bombea, debido a que se maneja voltajes más pequeños.
* Versatilidad del sistema de bombeo para realizar operaciones.
* Tiempo de amortización del equipo es relativamente corto.

La elección de la alternativa de configuración de las bombas búster que mejor se adecue al sistema, queda a elección del diseñador.

En el caso de ingresar a descargar al Terminal buques tanque con una condición de bombeo aproximadamente estable o similar entre sí, la alternativa 1 sería la opción más apropiada en una primera instancia, pero en caso de tener un sistema de alimentación eléctrica insuficiente para abastecer a bombas con un consumo de potencia elevado se debe buscar otra alternativa.

La alternativa 3 que se expone en esta sección, proporciona al sistema de bombeo ventajas en la operación durante toda la vida útil de los elementos. En los casos para los que el sistema tenga una carga por pérdida de presión elevada a una única condición de bombeo, el uso de un arreglo de bombas pequeñas en paralelo reduce el valor pico de la corriente requerida para el arranque de la bomba, y adicionalmente proporciona versatilidad al sistema para realizar maniobras de bombeo durante la operación.

De lo expuesto anteriormente, la alternativa 3 proporciona mayores ventajas al sistema de bombeo para el caso en que la estación tenga que satisfacer 2 condiciones de bombeo.

1. **DESCRIPCIÓN DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO**

La estación de bombeo está conformada por varios elementos y dispositivos de control, seleccionados para que al operar garanticen la recepción o despacho completa del producto en los tanques de almacenamiento.

Los sistemas de válvulas y tuberías conectan y desconectan a la bomba con la línea de succión y la línea de descarga (impulsión). Entre otros, un sistema de bombeo cuenta con los siguientes elementos:

* Tubería API.
* Válvulas de compuerta.
* Codos.
* Tee.
* Brida ciega.
* Acoples embridados
* Reducción excéntrica.
* Reducción concéntrica.
  + Válvula de pie.
  + Filtro.
  + Bomba búster.
  + Válvula de retención.

La configuración de estos elementos se expone en la siguiente sección.

* + 1. **CONFIGURACIÓN**

Antes de realizar la configuración de los elementos que conforman la estación de bombeo, se debe haber realizado un proceso de selección que garantice el normal funcionamiento para las condiciones de bombeo que se presenten en el Terminal.

En la succión, la línea de la tubería conduce al fluido desde el PLEM submarino hasta la estación de bombeo, los accesorios de tubería utilizados durante este recorrido permiten a la tubería seguir la ruta seleccionada durante la etapa de diseño.

En la estación de bombeo, adicionalmente a la aplicación que tengan las válvulas en el sistema de tuberías estas se utilizan para aislar secciones de la estación de bombeo para los casos en que se realice el mantenimiento o cambio de algún elemento. Los filtros de fluido se instalan en la línea de succión antes de la bomba, en el caso de que la línea de succión tenga un diámetro mayor al de la boquilla de succión de la bomba se coloca una reducción excéntrica instalada con la protuberancia de la reducción hacia abajo. En la descarga se debe instalar una reducción concéntrica del diámetro de la tubería, en caso de ser requerido para conectar la boquilla de descarga de la bomba con la tubería secundaria. En secuencia a estos elementos se encuentra la válvula de retención que mantiene protegida a la bomba de cualquier flujo en dirección contraria al de despacho de la bomba

En la descarga, la línea de la tubería conduce al fluido desde la estación de bombeo hasta los tanques para el almacenamiento del producto. Al igual que en la succión, los accesorios de tubería que se utilicen en esta sección permiten a la tubería seguir la ruta seleccionada durante la etapa de diseño.

Tanto la línea principal de succión, como la línea de descarga o impulsión, inician en un extremo con una brida ciega para futuras conexiones. El empalme entre la línea secundaria del interior de la estación de bombeo y las líneas principales, para formar el Manifold de succión y descarga se lo realiza con el sistema soldado llamado boca de pescado.

La configuración gráfica de estos elementos se puede observar en el apéndice 5, lámina 3.

* + 1. **OPERACIÓN**

El caudal de diseño para llenar los tanques de almacenamiento en el Terminal depende del sistema de bombeo de los B/T y el diámetro de la tubería, tal como se lo ha mencionado anteriormente. El equipo de bombeo para este caso esta conformado por un arreglo de bombas en paralelo, elegido entre las alternativas 1, 2 y 3; expuesto en la sección 4.4.

Las unidades de bombeo forman un todo o paquete, por medio de un Manifold tanto en la succión como en la descarga, accionados y monitoreados tanto manual como automáticamente por dispositivos, tales como: manómetros, medidor de flujo, termómetros, sensores de flujo del nivel máximo y mínimo de almacenamiento en el tanque, controles, mandos eléctricos y electrónicos, sensores de desalineamiento; la información recibida desde estos dispositivos se las recepta en un tablero master de control.

El tablero de control ejecuta el arranque, funcionamiento y protección del motor; este trabajo es visualizado en un monitor dentro del cuarto de control, y se acciona por un software que controla toda la estación de bombeo. Estas operaciones las debe realizar personal técnico, entrenado en los rigores más exigentes de trabajo, el mismo que se encarga de solucionar cualquier problema que se presente en la estación.

* 1. **ANÁLISIS DEL GOLPE DE ARIETE**

El fenómeno del golpe de ariete ocurre cuando súbitamente se interrumpe la energía que propulsa la columna de fluido en la línea de impulsión, o también debido al cierre rápido de la válvula de regulación de flujo a la salida de la bomba ocasionando una presión interna a todo lo largo de la tubería, la cual es recibida en las paredes de la tubería y los accesorios como un impacto.

En esta sección se va a estudiar el caso en que debido al corte del suministro de energía eléctrica se produce el fenómeno del golpe de ariete, y se calculará las presiones que se originan en el interior de la tubería.

* + 1. **DATOS DE LAS INSTALACIONES A CONSIDERARSE**

Para el cálculo del fenómeno del golpe de ariete en la Línea de impulsión que consiste en el recorrido desde la estación de bombeo búster, hasta los tanques de almacenamiento en tierra, se debe conocer la siguiente información:

* + - Longitud de la Línea de descarga o impulsión.
    - Cota de ubicación de la estación de bombeo búster.
    - Cota de ubicación de los tanques de almacenamiento.
    - Altura del tanque.
    - Diámetro interior de la tubería.
    - Máximo caudal de bombeo en la Línea.
    - Máxima presión de bombeo en la Línea.
    - Cédula de la tubería.
    - Material y propiedades mecánicas de la tubería.

Recopilando esta información básica, se procede al cálculo del golpe de ariete en la línea de descarga o impulsión.

* + 1. **MÉTODO DE CÁLCULO**

El primer paso es realizar un cálculo estructural de la tubería de la línea de impulsión para establecer la máxima presión que puede soportar, para seguidamente compararla con la máxima presión que puede producir el fenómeno del golpe de ariete.

Cálculo estructural de la tubería

El cálculo estructural de la tubería se realiza para determinar si las características mecánicas de la tubería pueden soportar la máxima presión de operación en la línea.

Las siguientes cargas se producen sobre la Línea durante la operación:

* Peso de la tubería.
* Presión interna y externa.
* Expansión y temperatura de la tubería.

Determinación de la presión de operación

Utilizando la Norma API-RP-1111, las presiones a considerar en la tubería son:

 4.23

 4.24

, donde:

Pb: Presión de reventamiento, en MPa.

Di: Diámetro interior de la tubería, en mm.

D: Diámetro exterior de la tubería, en mm.

SMYS: Resistencia a la fluencia., en MPa.

SMTS: Resistencia última a la tensión, en MPa.

t: Espesor de la tubería, en mm.

Las ecuaciones 4.23 y 4.24 son equivalentes para >15. Pero se recomienda utilizar la ecuación 4.23 para valores de <15.

 4.26

 4.27

, donde:

Pop: Presión máxima de operación, en MPa.

Cálculo del golpe de ariete

Para determinar el golpe de ariete en las líneas de impulsión, en los casos en que se corta el suministro de energía eléctrica que alimenta al motor de las bombas, se va a utilizar un método práctico utilizando las ecuaciones de Michaud y la de Allievi.

El valor de la velocidad de las ondas al interior de la tubería cuando se produce el golpe de ariete se denomina celeridad, y se calcula con la ecuación 2.15 :

 2.15

, donde:

a: Celeridad, en m/seg.

γ: Peso específico del líquido, en Kg/m3.

g: Aceleración de la gravedad, igual a 9.8 m/s2.

E: Módulo de elasticidad del material, en Kg/cm2.

E1: Módulo de elasticidad del agua, en Kg/cm2.

K: Factor, sin dimensiones.

D: Diámetro interior de los tubos, en mm.

e: Espesor, en mm.

Para el cálculo del golpe de ariete con la fórmula de Michaud, se utiliza la ecuación 2.18:

 2.18

Para el cálculo del golpe de ariete con la fórmula de Allievi se utiliza la ecuación 2.19:

 2.19

, donde:

a: Celeridad, en m/seg.

V: Velocidad, en m/seg.

g: Aceleración de la gravedad 9.8 m/seg2.

Pg: Golpe de ariete, en metros de columna de agua.

La elección entre la fórmula de Allievi o la de Michaud en el cálculo del golpe de ariete, se lo realiza en función de T.

El valor de T se obtiene de la fórmula empírica calculada por E. Mendiluce, la cuál se calcula con la ecuación 2.20:

 2.20

, donde:

T: Tiempo de cese de circulación del fluido al parar la bomba, en segundos.

L: Longitud de la tubería, en m.

V: Velocidad de la circulación, en m/s.

g: Aceleración de la gravedad, 9.8 m/s.

Hm: Altura manométrica, en m.c.f.

K: Coeficiente adimensional, se detalla en la Tabla 9.

La elección de la fórmula de Michaud o la de Allievi, se la realiza en función de la Tabla 9.