**CAPÍTULO 2**

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En el presente capítulo se desarrollarán las bases teóricas para realizar varios análisis y selecciones que se exponen más adelante dentro del presente trabajo.

En la sección 2.1 se explican varios conceptos y términos utilizados en esta tesis. En la sección 2.2, 2.3 y 2.4 se desarrollan las bases teóricas de: La estimación del diámetro económico de la tubería de un sistema de bombeo, Parámetros de selección de una bomba y Fenómeno del golpe de ariete, respectivamente.

Los conceptos que se van a exponer en el presente capítulo, servirán como sustento teórico en parte de la metodología que se desarrollará en el capítulo 4.

1. **DEFINICIONES**

La definición de varios términos utilizados en el desarrollo de esta tesis, se los expondrá conceptualmente en esta sección para una mejor comprensión, y se los ha ordenado de acuerdo al área de estudio, tal como se desarrolla más adelante.

**Propiedades físicas de los fluidos**

Las características fundamentales de los fluidos deben ser consideradas cuando se diseña un sistema de tuberías. Sin embargo, sólo cuando las propiedades físicas afectan el almacenamiento de los combustibles en terminales y su flujo a través de tuberías, serán consideradas.

Estas características son:

* + - Densidad de peso
		- Peso específico
		- Viscosidad
		- Temperatura
		- Presión

La definición de estos términos se los desarrolla a continuación:

Densidad de Peso

La densidad es una medida de la concentración de materia, el peso es una medida de la fuerza de gravedad. La densidad de peso es el peso por unidad de volumen; el peso añadido hace el movimiento del fluido más difícil.

Peso específico

El peso específico (S), es una medida relativa de la densidad, también llamado gravedad específica (SG). Como la presión tiene un efecto insignificante sobre la densidad de los líquidos, la temperatura es la única variable que debe ser tenida en cuenta al sentar las bases para el peso específico. La densidad relativa de un líquido es la relación de su densidad a cierta temperatura, con respecto a la del agua a una temperatura normalizada. A menudo, estas temperaturas son las mismas y se suele utilizar a 60°F/60°F (15.6°C/15.6°C).

 2.1

Se usa un hidrómetro para medir directamente la densidad relativa de un líquido. Normalmente se utilizan dos escalas hidrométricas a saber:

* + La escala API, se utiliza para productos de petróleo.
	+ La escala Baumé, que a su vez usa 2 tipos: uno para líquidos más densos que el agua y otro para líquidos más ligeros que el agua.

Las relaciones entre estas escalas hidrométricas y el peso específico son:

* + Para productos de petróleo:

 2.2

* + Para líquidos más ligeros que el agua:

 2.3

* + Para líquidos más pesados que el agua:

 2.4

El peso específico es conocido por algunos autores como gravedad específica, con sus siglas en inglés SG, o también llamado densidad relativa.

Viscosidad

La viscosidad expresa la facilidad que un fluido tiene para fluir cuando le es aplicada una fuerza externa. El coeficiente de viscosidad absoluta, o simplemente la viscosidad absoluta de un fluido, es una medida de su resistencia al deslizamiento o a sufrir deformaciones internas. Las unidades de la viscosidad son en términos de la fuerza necesaria para mover una unidad de área una distancia.

La viscosidad absoluta o dinámica, es medida en el sistema internacional (SI) como pascal por segundo () o también newton por segundo por metro cuadrado , o sea kilogramo para metro por segundo . El poise es la unidad correspondiente en el sistema CGS de unidades y tiene dimensiones de dina segundo por centímetro cuadrado o de gramos por centímetro segundo. El submúltiplo centipoise (cP), 10-2 poises, es la unidad más utilizada para expresar la viscosidad dinámica. La relación entre el pascal segundo y el centipoise es:

1 Pa s = 1 N s/m2 = 1 kg/(m s) = 103 cP 2.5

1cP = 10-3 Pa s 2.6

El símbolo µ se utiliza para representar la viscosidad dinámica.

La viscosidad cinemática, es el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad. En el Sistema Internacional (SI) la unidad de viscosidad cinemática es el metro cuadrado por segundo (m/s). La unidad CGS correspondiente es el store (St), con dimensiones de centímetro cuadrado por segundo y el centistoke (cSt), 10-2 stokes, que es el submúltiplo más utilizado.

1 m2/s = 106 cSt 2.7

1 cSt = 10-6 m2/s 2.8

 2.9

Temperatura

Las características anteriores son afectadas por la temperatura. El volumen y la gravedad específica API incrementan con la temperatura mientras que la densidad, gravedad específica, y viscosidad varían inversamente. Debido a estos efectos de la temperatura, todas las medidas son corregidas a 60° F. Ésta es la temperatura normal para el diseño y operación de sistemas de tuberías.

Presión

En el diseño de sistemas de tuberías, la elevación de combustibles de algún nivel a otro, su movimiento desde un lugar hacia otro, o ambos, están regidos por principios hidráulicos. Para el diseño de los sistemas de tuberías, las áreas de interés son:

* Comportamiento de líquidos en reposo (presión y equilibrio hidrostático), como en tanques de almacenamiento o líneas inactivas.
* Fuerzas ejercidas sobre líquidos, realizados por objetos en movimiento (hidrodinámica), como equipos de bombeo.

En las aplicaciones actuales, todas las fuerzas que producen flujo en la tubería y aquellas opuestas pueden describirse en términos de presión o cabezal.

El Cabezal (o presión) en una tubería es estático o dinámico. Sin embargo, se debe considerar la presión atmosférica y la presión de vapor.

* 1. Cabezal estático.-El cabezal estático es una medición de presión en líquidos en reposo. Esta es además una medición de la energía potencial. El cabezal estático es el peso vertical de un punto dado en una columna o cuerpo de agua calmada a esa superficie (usualmente expresada en presión diferencial o en unidades de cabezal de líquido circulante).
	2. Cabezal dinámico.- El cabezal dinámico es una medida de presión o energía cinética de los líquidos en movimiento.
	3. Presión atmosférica.- La presión atmosférica es comparable con la presión estática de líquidos debido a que esta es causada por el peso de aire sobre la superficie de la tierra. La presión atmosférica es cercana a 14.7 psi al nivel del mar y disminuye un poco con la altitud.
	4. Presión de vapor.- Todos los líquidos, particularmente los combustibles livianos tienen una tendencia a vaporizarse. Esta tendencia a la evaporación (volatilidad), incrementa con la temperatura y disminuye con la presión. La presión de vapor de un sistema es una función de la temperatura y la presión del sistema. Sin embargo, el efecto de la presión total en la presión de vapor es pequeño, así que normalmente se considera sólo la presión de vapor de un sistema como una función de la temperatura

## Tuberías

La denominación que se utiliza para referirse a las tuberías en los diferentes tipos de industrias, dependen del fluido que transportan, como son:

|  |  |
| --- | --- |
| Acueducto →Oleoducto →Poliducto →Gasoducto → | AguaPetróleoVarios derivados de petróleo para la misma línea, generalmente diesel y gasolinaGLP (Gas licuado de petróleo), o gas natural |

Para simplificación de términos, cuando se hable de tuberías que se utilizan como Oleoducto, Poliducto y Gasoducto, se hará referencia a estas como líneas, la cuál es una denominación común entre los operadores de estos sistemas.

Tipos de Líneas

En la industria del petróleo o gas, la mayoría de las líneas utilizadas para la transportación, se pueden agrupar en tres grupos:

* Líneas de agrupación
* Líneas de transmisión (arterias)
* Líneas de distribución

Líneas de agrupación

Estas líneas se utilizan para reunir el producto desde los diferentes pozos que tiene un campo petrolífero, hasta la instalación central. Generalmente tienen diámetros menores a 8 in (20.32 cm), y de longitud no muy extensa. Sin embargo, un solo campo petrolífero puede tener miles de kilómetros de líneas.

El destino del petróleo es una batería de tanques, el cuál puede servir a varios pozos en un campo. Una vez aquí se almacena el petróleo y se realizan algunos procesos antes de ser transportado hacia la instalación central.

La instalación central, generalmente conocida como Tank Farm (Granja de Tanques), es un campo en el cual se encuentra un número significativo de tanques de gran capacidad. Este almacenamiento agrupa a varios campos petrolíferos.

Existen equipos de conteo que se utilizan durante el transporte entre las baterías de los tanques y las granjas de tanques, para realizar el control de la cantidad de producto que viene de cada pozo o campo petrolífero.

La presión de operación en estas tuberías son bajas, debido a la magnitud de los diámetros. El material de las tuberías utilizadas para la configuración de estas líneas, son normalmente de acero.

Líneas de Transmisión

Estas líneas se utilizan para transportar el Petróleo desde los grandes campos de tanques o granjas de tanques de almacenamiento, hacia refinerías u otros lugares donde se almacenará para su posterior distribución.

En estas líneas se requieren diámetros grandes de tuberías, debido a que en esta etapa su longitud de transporte es considerable, dependiendo de la ubicación de los campos petrolíferos con respecto a las refinerías u otros centros de distribución.

La energía de bombeo necesaria para circular a lo largo de toda la longitud de la línea, se suministra al inicio, y se complementa con estaciones de bombeo ubicadas entre la trayectoria entre los campos de petróleo y el destino final. Estas estaciones de bombeo son necesarias, para mantener la presión requerida en el sistema, la cual puede sufrir pérdidas debido a fricción, cambios en la elevación o los diferentes accesorios en la línea.

En estas líneas las presiones de operación son altas, y sus secciones son añadidas a la línea por medio de soldadura.

Líneas de distribución

Las líneas de distribución llevan los productos derivados de Petróleo entre las Refinadoras y los centros de distribución o centros de almacenamiento. Varios de estos segmentos son altamente flexibles, tanto en capacidad como en tipos de productos a transportar por una misma línea.

Algunos de los productos que se transportan por una misma línea incluyen varios grados de gasolina, gasolina de aviación, diesel y aceites.

Este tipo de línea es también conocido como líneas de producto, porque puede transportar variedades de productos en la misma línea. Este concepto de transportar varios productos por una misma línea, es conocido como Poliducto. A pesar de las cortas longitudes que existen en el recorrido de toda la línea, en las cuales dos lotes de diferentes productos pueden mezclarse, métodos operativos permiten mantener la pureza de cada producto.

Para la transportación de varios lotes de diferentes productos, se lo puede realizar utilizando o no barreras físicas entre cada producto. El uso de barreras físicas para que no se mezcle el producto puede incluir esferas de goma o poliuretano para separar dos productos en una misma línea. En caso de no existir ninguna barrera física, la diferencia en las densidades de cada producto mantiene la separación, en el cuál una longitud corta permite la mezcla.

Generalmente las líneas de producto deben operar a presiones más altas que las líneas que transportan crudo, debido a que fluidos con densidad más baja requiere presiones de operación más altas para evitar la formación de gas en las líneas. Se tener precaución con la presencia de gas en las bombas de las líneas, debido a que esto puede causar que la eficiencia de la bomba desminuya, o incluso producir daños a la misma.

Los diámetros que son más comunes en este tipo de línea, va desde las 8” (20.32 cm) hasta las 16” (40.64 cm).

1. **ESTIMACIÓN DEL DIÁMETRO ECONÓMICO DE LA TUBERÍA DE UN SISTEMA DE BOMBEO**

La estimación del diámetro económico de la tubería de un sistema de bombeo, consiste en determinar un diámetro de tubería que equilibre los gastos energéticos y los gastos de inversión, tal que proporcione una rápida amortización de los dispositivos utilizados en este sistema, así como un funcionamiento económico durante toda la operación de esta instalación.

Con esta premisa planteada, la necesidad de contar con un método que tenga en cuenta los factores que intervienen en un sistema de bombeo para la determinación del diámetro económico de la tubería de impulsión, es vital para la optimización de recursos en la industria.

Base económica de la selección de diámetros de tuberías grandes

La transportación de fluidos por tuberías, es el medio más eficiente y de bajo costo para recorrer grandes distancias, cuando las líneas son operadas a una tasa óptima para un tamaño de línea particular. En la industria de las tuberías, así como en muchas otras industrias se maneja el concepto de “economía de escala”. Al transportar grandes volúmenes en líneas grandes, es posible alcanzar las más bajas unidades de costo, o costos por el volumen de fluido despachado.

Una primera base de esta economía, es la diferencia que existe entre el incremento del caudal en la línea, con respecto al aumento del diámetro de la tubería para una presión de bombeo constante. Por lo tanto, en términos económicos se puede acotar que los costos de inversión por unidad de volumen bombeado disminuyen “rápidamente”, debido a la rapidez con que aumenta el caudal de bombeo.

A manera de ejemplo de esta relación, en la Tabla 4 se muestra el bombeo de Fuel Oil # 2 que circula en una línea de abastecimiento sin diferencias de elevación y recorre una longitud de 100 millas (169 kilómetros).

TABLA 4

RELACIÓN EMPÍRICA A PRESIÓN DE BOMBEO CONSTANTE, ENTRE: COSTO DE TUBERIA INSTALADA VS. CAUDAL

|  |  |
| --- | --- |
| **Presión de bombeo:** 600 psi | **Diámetro de la Línea, in** |
| **24** | **30** | **36** |
| Caudal**:**  | 9500 | 16900 | 28000 |
| **:** | 35.24 | 27.89 | 20.23 |

\* TOMADO DE OIL AND GAS PIPELININIG HANDBOOK

Una segunda base de esta economía se da analizando: La relación del aumento de caudal en la línea vs. La relación de aumento del diámetro de la línea, para una misma cantidad de unidades de potencia de bombeo aplicada. Comparando estas dos relaciones se puede notar que el aumento de caudal en la línea tiene una relación mayor a la proporcional.

TABLA 5

RELACIÓN EMPÍRICA A POTENCIA APLICADA CONSTANTE, ENTRE: AUMENTO DEL CAUDAL VS. AUMENTO DEL DIÁMETRO

|  |  |
| --- | --- |
| **Potencia aplicada:** 5000 HP | **Diámetro de la Línea, in** |
| **24** | **30** | **36** |
| Caudal:  | 11600 | 17200 | 23600 |
| Relación de diámetros:24 – 30 in | 1.25 | -.- |
| Relación de caudales:11600 – 17200  | 1.48 | -.- |
| Relación diámetros:24 – 36 in | 1.5 |
| Relación de caudales:11600 – 23600  | 2.03 |

\* TOMADO DE OIL AND GAS PIPELINING HANDBOOK

Las condiciones de bombeo para la Tabla 5, son similares a las características anteriormente mencionadas para la Tabla 4.

**Diámetro económico**

La selección del diámetro económico de la tubería, se lo desarrolla a partir de la relación que existe entre: el diámetro de la línea, las pérdidas por fricción, los gastos de inversión, y los gastos por energía que acontecen en todo sistema de bombeo. Esta relación se ilustra en la Tabla 6.

TABLA 6

SENSIBILIDAD ECONÓMICA DEL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Diámetro** | **Pérdidas por****Fricción** | **Gastos de****Inversión** | **Gastos por****Energía** |
| *Aumenta* | Disminuye | Mayor | Menor |
| *Disminuye* | Aumenta | Menor | Mayor |

Como se puede notar, con el aumento del diámetro de la tubería, los gastos de inversión aumentan y las pérdidas por fricción disminuyen, lo cuál ocasiona que los gastos energéticos disminuyan también. Cuando el diámetro disminuye, el efecto es exactamente inverso.

Para determinar el diámetro económico, es necesario definir los gastos de inversión y los gastos por energía, así como el alcance que tiene cada una de estas variables.

Gastos de inversión

Los gastos de inversión, son aquellos que se realizan una sola vez durante la instalación, aunque también se incluye en este rubro al mantenimiento que se le da a los equipos del sistema de bombeo durante toda la vida útil, e involucra los siguientes parámetros:

* + Bomba, tubería y accesorios
	+ Obras civiles
	+ Montajes
	+ Mantenimiento (en valor presente)
	+ Reposición o depreciación

Gastos por energía

Los gastos por energía, son un gasto permanente en la industria debido al funcionamiento de los equipos hidráulicos en el sistema de bombeo. Para el análisis de la sensibilidad económica, se estudia el ahorro de energía que diariamente se puede obtener en la industria.

Los gastos por energía involucran los siguientes cálculos que deben ser determinados:

* + - Potencia de consumo
		- Potencia instalada

Costos totales en valor presente

Los costos totales se lo obtiene de la suma algebraica de los gastos de inversión más los gastos por energía. Para obtener los costos totales en valor presente, se debe conocer el tiempo de vida útil de los equipos, así como la tasa de amortización con que se va a trabajar.

Los costos a determinarse, son los siguientes:

* + - Costo total de la tubería instalada
		- Costo total del equipo de bombeo
		- Costo anual de operación de energía consumida
		- Costo anual de mantenimiento

Determinado el valor de los costos, se traslada estos rubros a Valor presente, obteniendo los siguientes valores presentes:

* + - Valor presente de inversiones totales
		- Valor presente de reposiciones totales
		- Valor presente de explotaciones totales

Obtenido los valores presentes, finalmente se determina:

* + Valor presente de los costos totales

El Valor presente total está conformado por la suma de todos los valores presente.

La relación que existe entre los gastos de inversión y los gastos por energía es inversa, y la suma de los gastos se los denomina como costos totales. Para analizar la sensibilidad económica del diámetro, se lo realiza transformando el valor de costos totales a valor presente.

El caudal de bombeo óptimo, fundamentalmente depende del diámetro de la Línea.



FIGURA 2.1. CURVA DE COSTOS TOTALES EN VALOR PRESENTE VS. CAUDAL DE BOMBEO. TOMADO DE OIL AND PIPELINE HANDBOOK.

En la “parte intermedia” de la curva de los costos para cada diámetro de tubería, la curva toma la forma de “U”. Esta forma se debe a la relación inversa entre los gastos de inversión ( I ) y los gastos por energía ( E ), lo cuál indica que existe un diámetro para el que la suma de los gastos es mínima.

Para obtener la curva de: “Costos totales en valor presente” vs. “Diámetro de la línea”, debe estar establecido el caudal de operación para determinar el valor de los costos totales para los diferentes diámetros de tubería que se van a considerar dentro del análisis de sensibilidad económica de la tubería.



FIGURA 2.2. CURVA DE LOS COSTOS TOTALES EN VALOR PRESENTE VS. DIÁMETRO DE LA LÍNEA.

* + 1. **PARÁMETROS DE SELECCIÓN DE UNA BOMBA**

La selección de una bomba es la más importante de los elementos del sistema de bombeo; se escoge dependiendo de las necesidades del proceso en que funcionará, y se realiza sobre la base del conocimiento completo del sistema.

En la industria, se pueden presentar diversas condiciones de bombeo, lo cuál implica la existencia de diferentes tipos de bombas, dependiendo de la aplicación que se analice. Por lo tanto, la selección de una bomba que funcione adecuadamente en un sistema de bombeo, se la realiza dentro de un amplio grupo de alternativas y opciones de diferentes tipos de bombas.

Los parámetros de selección de una bomba que se desarrollan en esta tesis, se refieren a una bomba centrífuga que trabaja con productos blancos derivados de petróleo.

Antes de desarrollar de los parámetros de selección de una bomba, es necesario definir los siguientes conceptos:

***Caudal de bombeo (Q).-*** Es el caudal de circulación en el interior de la Línea, depende del caudal de despacho en los B/T y el diámetro de la Línea; en el caso de descargar productos desde los B/T.

***Altura dinámica total (TDH)*.-** Representado por la diferencia geométrica del nivel de cotas entre la línea de mar y los tanques de almacenamiento en tierra, las pérdidas de carga totales (fricción, locales y en equipos) desarrolladas durante la succión y descarga, y se resta la presión de bombeo suministrada por las bombas de los B/T.

***Altura de impulsión***.- Se lo obtiene por: la diferencia de nivel entre la estación de bombeo búster y los tanques de almacenamiento, y las pérdida de carga total (fricción, local y en equipos) durante dicho tramo.

***Altura de succión***.- A la presión de bombeo suministrada por las bombas de los B/T se le resta las siguientes caídas de presión: la diferencia de nivel entre la línea de mar y la estación de bombeo búster, las pérdida de carga total (fricción, local y en equipos) durante dicho tramo. Esta altura de succión debe ser mayor a cero, en unidades de cabezal o presión.

La altura de succión esta condicionada por el valor de la presión barométrica en el lugar de instalación del equipo y de la presión que se origina en la entrada del impulsor el cual debe ser mayor a la presión de evaporación del fluido para que no se produzca el fenómeno de cavitación, que causa en los alabes del impulsor impactos que pueden provocar su destrucción en las zonas donde ello ocurre.

Curva característica del sistema

La curva característica del sistema, presenta gráficamente el requerimiento de carga del sistema para diferentes condiciones de caudal. La ecuación general del sistema es el primer paso para determinar el requerimiento de bombeo, y esta ecuación expresa la carga de energía requerida en unidades de cabezal de una columna de líquido.

En general, la ecuación general del sistema de bombeo puede contener los siguientes términos:

* Cabezal de carga estática
* Cabezal de presión
* Pérdidas de cabezal de fricción
* Pérdidas de cabezal menores
* Cabezal de velocidad

La ecuación general del sistema se puede escribir como:

2.10

, en donde:

HSISTEMA: Carga total de cabezal requerida para el proceso, medida en metros de columna de líquido.

z2, z1: Desniveles de altura estática, en metros.

V2, V1: Velocidad de circulación del líquido en diferentes puntos, en m/seg.

V: Velocidad nominal de circulación del líquido, en m/seg.

ρ: Densidad del fluido, en Kg/m3.

g: Gravedad, en m/seg2.

f: Coeficiente de fricción, sin dimensiones.

L: Longitud de la tubería

D: Diámetro de la tubería

K: Rugosidad absoluta, en mm.

En la mayoría de las aplicaciones se pueden tener condiciones de bombeo que simplifican la ecuación general, tales como:

* + Flujo estable: V2 ~ V1 ~ 0
	+ Presión estática: P2 = P1 = Patmosférica

Aplicando estas condiciones, la ecuación general del sistema puede reducirse a:

 2.11

La magnitud de la pérdida de carga, está en función de las propiedades del fluido de bombeo, la condición del flujo, así como de las características superficies de la tubería y accesorios.

La condición de flujo del fluido que se bombea, puede ser laminar, en transición o turbulento. En caso de presentarse un flujo turbulento, se debe determinar si es un flujo dominado o no por la rugosidad.

La forma de la curva de carga del sistema varía con respecto al flujo, en forma diferente si el flujo es laminar o turbulento. En caso de presentarse un flujo turbulento, se debe determinar si es un flujo dominado o no por la rugosidad. Considerando además que la velocidad es proporcional al caudal, la curva de la ecuación se puede modelar con las ecuaciones que se presentan en la Tabla 7.

TABLA 7

FORMA DE LA CURVA DE CARGA DEL SISTEMA EN FUNCIÓN DE LA CARACTERÍSTICA DEL FLUJO EN LA TUBERÍA

|  |  |
| --- | --- |
| HSISTEMA = a + bQ | Flujo Laminar |
| HSISTEMA = a + cQ1.75 | Flujo turbulento con paredes lisas |
| HSISTEMA = a + dQ2 | Flujo turbulento con dominio de la rugosidad |

, donde:

HSISTEMA: Pérdidas de carga en el sistema, en metros.

a, b, c, d: Constantes de la ecuación.

Q: Caudal, en litros/segundo.

Cuando el cabezal total del sistema HSISTEMA es graficado en función del caudal Q, se obtiene la curva del sistema. Esta curva muestra el cabezal requerido por la bomba para transportar el fluido desde una posición inicial, hasta una final para diferentes caudales.

Selección de la bomba centrífuga

La bomba centrífuga es una de las bombas más usadas a nivel mundial, porque es la más adecuada para manejar mayor cantidad de líquido que la bomba de desplazamiento positivo. Las necesidades de una bomba específica, es generalmente determinada sobre la base de caudales y presiones a partir de un análisis completo del proceso. Aunque la presión y el caudal o flujo pueden variar entre un valor de operación y el de diseño, una de las características de la bomba se suele basar en presión diferencial o en unidades de cabezal de líquido circulante, esta se debe considerar como solo un valor de referencia.

Realizados los cálculos hidráulicos de los requerimientos de carga del sistema, se procede a la selección de la bomba. La selección de una bomba centrífuga puede ser un problema complejo en el caso de no tener la información suficiente para relacionar todos los datos pertinentes.

En las bombas centrífugas esta relación tiene el siguiente orden:

* + Curva característica tipo de la bomba.
	+ Diseño del impulsor.
	+ Número de etapas.
	+ Carga neta positiva de succión.
	+ Diseño de las carcasas y caracol.
	+ Diseño del difusor y montajes.

A continuación, se van a desarrollar alguno de los ítems mencionados anteriormente.

Curva característica tipo de la bomba

La curva característica tipo de una bomba la representa un conjunto de curvas de las características de funcionamiento. Las curvas de funcionamiento son proporcionadas por el fabricante, y en condiciones de funcionamiento a su velocidad de diseño, es decir, la capacidad, carga, eficiencia y entrada de potencia con las cuales la curva de eficiencia llega a su máximo, se consideran como norma de 100% para comparación.

Estas curvas se pueden utilizar para predecir la forma aproximada de las características de una bomba cuando se conoce la velocidad específica de ella. La principal curva es la de H vs. Q. Esta curva representa el cabezal que es capaz de entregar una bomba en particular a diferentes condiciones de caudal. Este cabezal será el necesario para vencer el cabezal estático, de velocidad, de presión y las pérdidas del sistema hidráulico donde se va a instalar este elemento.

Otras curvas que forman parte de la curva característica tipo, y que también se deben considerar durante el proceso de selección de una bomba son:

* Eficiencia ( η ) vs. Caudal de bombeo ( Q )
* Potencia de la bomba vs. Caudal de bombeo ( Q )
* Carga neta positiva de succión ( NPSH ) vs. Caudal de bombeo ( Q ).

La información de la capacidad de la bomba en una curva: “Pérdidas de presión ( H )” vs. “Caudal de bombeo ( Q )”, es proporcionada por el fabricante, y para determinar el punto de operación se puede modelar esta curva utilizando la ecuación 2.12.

H = C0 + C1Q + C2Q2 + C3Q3 + C4Q4 2.12

Esta ecuación generalmente representa bastante bien esta relación. La aproximación es suficientemente buena hasta el término de segundo grado, y los coeficientes C0, C1, C2, C3, y C4 son constantes que pueden ser determinadas a través de un análisis de regresión lineal, a partir de los datos dados por el fabricante en una tabla de datos, o de forma gráfica.

Diseño del impulsor

Se debe prever que la forma de la curva característica de la bomba se reflejará en el diseño físico y, además, que puede haber cierto grupo o clase de curvas relacionadas con una clase o tipo de construcción de bomba. En el caso de la relación con los impulsores, las curvas se identifican en forma matemática en la expresión para la velocidad específica.

 2.13

, en donde:

NS: Velocidad específica de la bomba, en RPM.

N: Velocidad de rotación o revoluciones del equipo de bombeo, en RPM

Q: Caudal de bombeo, en litros/segundo.

H: Altura dinámica total, en metros.

La velocidad específica es un parámetro adimensional.



FIGURA 2.3. VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD ESPECÍFICA CON EL TIPO DE BOMBA. TOMADO DE FUNDAMENTOS DE MECÁNICA DE FLUIDOS.

Número de etapas

Una bomba de etapas múltiples en caso de ser requerida, puede proporcionar un diseño más fácil de la bomba, reducir los elevados empujes axiales que se desarrollarían en otra configuración por la elevada carga diferencial a través de los impulsores, y mantener los valores de velocidad específica cerca de valores para los cuales la eficiencia es alta.

En las bombas de etapas múltiples se emplean varios impulsores en un eje común, y la carcasa dirige la descarga desde la periferia de un impulsor hasta la succión del siguiente.

Carga neta positiva de succión

La finalidad de especificar la NPSH, es evitar la cavitación que ocurre si el líquido cae a una presión inferior a la de ebullición en cualquier lugar dentro de la bomba.

Curva general del fabricantes

Para la selección de la bomba, los fabricantes de bombas proporcionan una curva general que contiene todos los modelos de bombas de un mismo tipo, en las que una de otra difiere de las siguientes características:

* + Frecuencia de la corriente.
	+ Velocidad de rotación del eje (RPM).
	+ Diámetro del impulsor.
	+ Arreglo entre el diámetro de succión, y el diámetro en la descarga.

La nomenclatura utilizada por los fabricantes, es la siguiente:

ØA x ØB - ØC 2.14

, donde:

ØA: Diámetro en la succión

ØB: Diámetro en la descarga

ØC: Diámetro del impulsor

La curva general de un fabricante de bombas, para un tipo de bomba, es una curva de “Cabezal total” vs. “Capacidad”, como se muestra en la Figura 2.4.



FIGURA 2.4. CURVA GENERAL DEL FABRICANTE: “CAUDAL” VS. “ALTURA DINÁMICA TOTAL”

1. **FENÓMENO DEL GOLPE DE ARIETE**

El fenómeno del golpe de ariete puede ser causa de accidentes en un sistema de bombeo, a causa de un exceso de presión al interior de un conducto. Estos accidentes, deben ser prevenidos en los diseños, para evitar errores en la operación o equipos en mal funcionamiento.

Importancia de la consideración del golpe de ariete en las tuberías

La consideración del análisis del fenómeno del golpe de ariete en el diseño hidráulico de un sistema de tuberías, va a proporcionar que la industria tenga un sistema de protección para una variación de presión al interior de la tubería, dando mayor seguridad en la operación de este sistema y aumentando la vida útil de los equipos.

## Cálculo general del golpe de ariete

El golpe de ariete se produce al variar la velocidad del líquido que circula por la tubería, y esta perturbación de la velocidad del líquido conducido en la tubería se puede presentar por diferentes circunstancias, pero especialmente a los dos casos siguientes:

* 1. Puesta en marcha o parada de la bomba (En tuberías de impulsión).
	2. Apertura o cierre de la válvula (En circulación por gravedad).

TABLA 8

MANIOBRAS EN LOS SISTEMAS DE BOMBEO Y CARACTERÍSTICAS DEL GOLPE DE ARIETE (\*)

|  |  |
| --- | --- |
| *Maniobra* | *Características del golpe de ariete* |
| *Comunes* | *Particulares* |
| Apertura de la Válvula | Propagación instantánea | Pg negativo |
| Cierre de la válvula | Valor máximo en el tiempo, al cesar el régimen variable.( t = T ) | Pg positivo |
| Puesta en marchade la bomba | Pg positivo |
| Parada de la bomba | Valor máximo según posición, en la tubería ( l = L ). | Pg negativo |

\*TOMADO DE TUBERÍAS 1.

En el caso de bombeo, el fenómeno se presente de la siguiente manera:

Al cortar el suministro de energía eléctrica al motor, la bomba sigue girando por inercia de las partes móviles pero disminuyendo sus revoluciones y, en consecuencia, la aportación de caudal a la tubería de impulsión.

1. Al cesar la aportación de líquido, éste se estira junto a la bomba y la tubería se contrae produciendo una disminución de presión (onda negativa) que se propaga hasta el depósito.
2. Al llegar al depósito, la onda aumenta la presión en la correspondiente a la altura del depósito cambiando de signo, pasando a positiva y propagándose hasta la bomba, recuperando la tubería su diámetro primitivo.
3. Al chocar la onda contra la válvula de retención, se refleja sin cambiar de signo (sigue positiva). El líquido se comprime y el tubo se dilata. La onda se propaga nuevamente hacia el depósito.
4. Al llegar al depósito la onda se refleja, cambiando de signo y la tubería recupera su dimensión y nuevamente se repiten los ciclos anteriores.

El fenómeno en los dos casos presentados, es completamente cíclico si el cierre de la válvula o el cese de impulsión de la bomba se realizan instantáneamente . Si se realiza en un tiempo superior existen unas perturbaciones (durante el tiempo de maniobra de la válvula o de anulación de la velocidad de impulsión).

### Determinación de la celeridad

La celeridad es la velocidad de propagación de las ondas, y se indica por la siguiente ecuación:

 2.15

Para el caso en que el líquido conducido sea agua, el módulo del agua es: , reemplazando en la fórmula anterior, se tiene:

 2.16

 2.17

, donde:

a: Celeridad en conducción de agua a presión, 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.

K: Factor, sin dimensiones.

D: Diámetro interior de los tubos, en mm.

e: Espesor, en mm.

En esta tesis se va a desarrollar el análisis para el golpe de ariete producido por las bombas.

Cálculo del golpe de ariete en las tuberías de impulsión

Existe un método práctico para calcular el golpe de ariete en las tuberías de impulsión, y se lo desarrolla a continuación:

Los valores máximos para los golpes de ariete positivo y negativo, tienen lugar en los instantes siguientes a la variación de la velocidad, estos coinciden en valor absoluto y se los calcula según el caso por las fórmulas de Michaud o de Allievi.

La fórmula de Michaud es:

 2.18

, y la de Allievi vale:

 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 m de columna de agua.

Para la elección entre la fórmula de Allievi o de Michaud en el cálculo del golpe de ariete, se lo realiza en función de T, siendo esta variable el tiempo de cese de la circulación de fluido luego de parada la bomba (que no debe ser confundida con el tiempo de parada de la bomba). La circulación de fluido cesa con una ligera reducción de las revoluciones de la bomba (del orden del 15 por ciento)

El valor de T se obtiene de la fórmula empírica calculada por E. Mendiluce, la cuál se escribe a continuación:

 2.20

, donde:

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.

TABLA 9

INFLUENCIA DE LA LONGITUD DE LA TUBERÍA EN LA ELECCIÓN DE LA FÓRMULA PARA EL CÁLCULO DEL GOLPE DE ARIETE.

|  |
| --- |
| *Coeficiente K* |
| K = 2 | L< 500 m |
| K = 1.5 | 500 m < L < 1500 m |
| K = 1 | L > 1500 m |
| *Fórmula para el cálculo del Golpe de ariete* |
| Michaud | L< (Impulsiones cortas) |
| Allievi | L> (Impulsiones largas) |

Para que una impulsión sea corta o larga, no depende únicamente de la longitud física de la misma, sino también del tiempo en que concluya la circulación del fluido luego de la parada de la bomba o en su defecto de la puesta en circulación del fluido en la arrancada de la bomba ( T ).

Para el caso en que se deba aplicar Michaud, el golpe de ariete es constantemente creciente desde el final hasta el origen junto a la bomba, y el valor máximo queda expresado por el valor obtenido en la fórmula de Michaud.

En el caso de aplicar Allievi, el golpe de ariete es creciente desde el final hasta la longitud L1 , y a partir de este punto se mantiene constante, y se cumple la fórmula de Allievi.

El golpe de ariete positivo se adiciona a la presión estática (altura geométrica) sin considerarse la pérdida de carga ya que en estos instantes el agua está parada, y el golpe de ariete negativo se resta de la presión estática. Para el caso en que la curva resultante quede debajo del perfil del terreno, se produce depresión.