**CAPÍTULO 5**

1. CASO DE ESTUDIO

La metodología y el planteamiento técnico propuesto en el capítulo 4 es utilizada en el presente capítulo para realizar los cálculos en las diversas etapas del diseño de un sistema de bombeo tipo búster.

Los parámetros y criterios de selección de esta metodología se han ordenado en tablas de cálculo, dando lugar al desarrollo de una hoja electrónica en cada etapa del diseño para el manejo de la información que resuelve un problema de esta aplicación.

La información inicial que se ha recopilado, es ingresada en una hoja electrónica para cada etapa del diseño, las cuales son: hoja electrónica para la selección del diámetro de tubería óptimo, hoja electrónica para la selección del diámetro más económico en una Línea de impulsión, hoja electrónica para la selección de una bomba tipo búster, y finalmente hoja electrónica para el cálculo del golpe de ariete.

* + 1. **DESARROLLO DE UNA HOJA ELECTRÓNICA**

La selección de los equipos hidráulicos para una estación de bombeo tipo búster, en el presente capítulo se propone desarrollarlo con la ayuda de hojas electrónicas estructuradas sobre la base de la metodología propuesta en la presente Tesis, de manera que se pueda manejar una información inicial para seguidamente ser manipulada por las ecuaciones de la Mecánica de fluidos, dando como resultado una alternativa de selección de: diámetro de tubería óptimo para la Línea de succión, diámetro mas económico de la Línea de descarga, bomba tipo búster y cálculo del golpe de ariete; el programa de Microsoft Excel es utilizado para la elaboración de la hoja electrónica.

Las hojas electrónicas que se desarrollan en el presente capítulo, se utilizan para resolver un caso de diseño del sistema de bombeo para una estación de bombeo tipo búster.

Para la identificación de cada hoja electrónica en el presente documento, se coloca en la parte superior derecha la siguiente identificación, dependiendo de la hoja que corresponda:

TABLA 15

IDENTIFICACIÓN DE LAS HOJAS ELECTRÓNICAS

|  |  |
| --- | --- |
| **Denominación** | **Descripción** |
| Hoja 1 | Hoja electrónica para la selección del diámetro de tubería óptimo. |
| Hoja 2 | Hoja electrónica para la selección del diámetro más económico en una Línea de impulsión. |
| Hoja 3 | Hoja electrónica para la selección de una bomba búster. |
| Hoja 4 | Hoja electrónica para el cálculo del golpe de ariete. |

Para obtener una alternativa de selección adecuada a los requerimientos del sistema, se puede hacer uso de una misma hoja electrónica para obtener los resultados de la iteración de una variable, para lo cuál, cada una de estas iteraciones se identifican en la parte superior derecha con el rótulo: Prueba 1, Prueba 2, Prueba 3, etc.

En una etapa preparatoria al diseño, se debe completar la información correspondiente a la pérdida de carga local. Para esta pérdida de carga, es necesario consultar un Manual de Hidráulica para colocar la longitud equivalente (Le) de los accesorios utilizados en el sistema de bombeo.

Las hojas electrónicas se encuentran ubicadas en el Apéndice 3, y la identificación de la hoja se encuentra en un rótulo ubicado en la parte superior derecha.

Desarrollo de análisis para un Caso de estudio

En un Terminal de distribución de productos blancos derivados de petróleo, se va a implementar la recepción de productos refinados desde los B/T que lo transportan y circulan en el país, para establecer un método de recepción diferente al método de recepción por tierra utilizado actualmente en el Terminal.

En un Terminal de recepción y despacho de producto, se debe garantizar que todo el combustible que los B/T ingresen a descargar, pueda ser almacenado en los tanques de almacenamiento en tierra. En este caso, la presión que suministran las bombas del B/T al fluido no es suficiente para vencer las pérdidas por fricción y de cabezal estático, por lo tanto, es necesario instalar una estación de bombeo búster para garantizar la recepción del producto.

Recolección de información

Para la implementación de la recepción de productos por vía marítima, se ha ampliado el Terminal para la colocación de nuevos tanques en los que se va a almacenar el producto, y se han realizado los estudios Topográficos del sector, así como los estudios Batimétricos del sector por donde recorrerá la tubería submarina.

La información de los Buques tanque que transportan los derivados de petróleo y que circulan en el país, e ingresarán a descargar al Terminal se resume en la Tabla 16, sobre la base de las condiciones extremas de bombeo que se puedan presentar.

TABLA 16

INFORMACIÓN DE LOS B/T QUE INGRESARÁN A DESCARGAR AL TERMINAL

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Condiciones extremas de**  **Trabajo** | **Tiempo de**  **bombeo,**  **horas** | **Capacidad,**  **barriles** | **Caudal,**  **l/s** | **Presión**  **Descarga,**  **Pa** |
| Máxima | 50 | 225000 | 198,74 | 688446.6 |
| Mínima | 50 | 100000 | 88.33 | 344223.3 |

El sistema de amarre mar adentro de los B/T, es un sistema de amarre por Multiboya.

De los estudios topográficos y batimétricos del sector, se ha obtenido la siguiente información:

TABLA 17

LONGITUD DE LA LÍNEA ENTRE: B/T - ESTACIÓN DE BOMBEO

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Recorrido de la Línea de Succión, metros** | | | |
| **Manguera** | **Tubería Submarina** | **Tubería en Tierra** | **Total** |
| 30 | 1600 | 50 | 1680 |

La Línea se utilizará para descargar los productos blancos derivados de petróleo desde los B/T. En el Terminal se va a almacenar Diesel y Gasolina de 80 octanos; para operaciones de limpieza generalmente se utilizará agua de mar.

Selección del diámetro de tubería óptimo para la Línea de succión

Para seleccionar el diámetro óptimo en la Línea de succión se necesita calcular la pérdida de carga a lo largo de toda esta Línea, y seleccionar un diámetro de tubería para el que la presión de ingreso en el ojo de impulsión de la bomba sea mayor o igual a cero.

El fluido para el que se analizará la pérdida de carga en la Línea será el agua de mar, por ser el líquido de mayor densidad que va a circular en la línea, y con el cuál se producirá la mayor pérdida de carga.

Para obtener el diámetro óptimo en la Línea de succión se utiliza la Hoja 1, y una vez llenada la información inicial que se solicite, los cálculos se realizan automáticamente. Para esta línea se iterará con los diámetros de tubería comercial de 253,81 mm (10 in), 304.57 mm (12 in), 355.33 mm (14 in), y así sucesivamente hasta obtener una presión de ingreso positiva en el ojo de impulsión de la bomba búster.

Para el cálculo de la pérdida de carga local en los accesorios, se utiliza un Manual de Hidráulica para colocar la longitud equivalente de los dispositivos utilizados en este recorrido.

TABLA 18

LONGITUD EQUIVALENTE DE ACCESORIOS UTILIZADOS EN LA LÍNEA DE SUCCIÓN

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Accesorios** | **Cantidad** | **Diámetro nominal (DN), mm** | | | | | |
| **253,81** | | **304,57** | | **355,33** | |
| **Le** | **Total** | **Le** | **Total** | **Le** | **Total** |
| Codo 90° | 2 | 4,63 | 9,26 | 5,55 | 11,1 | 6,13 | 12,26 |
| Codo 45° | 2 | 2,96 | 5,92 | 3,54 | 7,08 | 3,9 | 7,8 |
| Válvula de Compuerta Submarina | 1 | 1,62 | 1,62 | 1,95 | 1,95 | 2,29 | 2,29 |
| Válvula de Compuerta | 2 | 1,62 | 3,24 | 1,95 | 3,9 | 2,29 | 4,58 |
| Tee | 1 | 15,55 | 15,55 | 18,59 | 18,59 | 21,64 | 21,64 |
| **Sumatoria** | | **Total** | 35,59 | **Total** | 42,62 | **Total** | 48,57 |

Le: Longitud equivalente de los accesorios de tubería, en metros.

Debido a la variedad de embarcaciones que pueden ingresar a descargar al Terminal, para seleccionar el sistema de bombeo búster se toma en cuenta las condiciones extremas de presión y caudal que las bombas de los B/T suministran al fluido para circular en la Línea.

Para efectos de análisis, los cálculos se realizarán considerando varias condiciones de caudal.

TABLA 19

CONDICIONES DE CAUDAL Y CAÍDA DE PRESIÓN EN EQUIPOS, PARA ITERACIÓN EN LA HOJA 1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Condición** | **Caudal (Q),**  **l/s** | **Caída de presión en Equipos, Pa** | |
| **Filtro** | **Varios** |
| 1.a | 75,71 | 1500 | 0 |
| 2.a | 82,02 | 2000 | 0 |
| Mínima | 88,33 | 2098 | 0 |
| 1.b | 176,66 | 17500 | 0 |
| 2.b | 182,97 | 19000 | 0 |
| Máxima | 198,74 | 21200 | 0 |

TABLA 20

RESULTADOS DE LA ITERACIÓN EN LA HOJA ELECTRÓNICA 1,

PARA UN DIÁMETRO DE TUBERÍA DE 254.32 mm (10 in)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Condición** | **Caudal (Q),**  **l/s** | **Presión de las**  **bombas B/T,**  **m c. f.** | **Total**  **Pérdida carga**  **m c. f.** | **Cota IGM,**  **m** | **Energía de ingreso al**  **ojo de impulsión** | |
| **m c. f.** | **Pa** |
| 1.a | 75,71 | 31,90 | 12,38 | 15 | 4,52 | 48788,41 |
| 2.a | 82,02 | 31,90 | 14,43 | 15 | 2,47 | 26662,30 |
| Mínima | 88,33 | 31,90 | 16,59 | 15 | 0,31 | 3344,84 |
| 1.b | 176,66 | 63,80 | 63,55 | 15 | -14,75 | -159188,94 |
| 2.b | 182,97 | 63,80 | 68,04 | 15 | -19,24 | -207633,48 |
| Máxima | 198,74 | 63,80 | 79,75 | 15 | -30,96 | -334050,32 |

TABLA 21

RESULTADOS DE LA ITERACIÓN EN LA HOJA ELECTRÓNICA 1,

PARA UN DIÁMETRO NOMINAL DE TUBERÍA DE 304.57 mm (12 in)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Condición** | **Caudal (Q),**  **l/s** | **Presión**  **bombas B/T,**  **m c. f.** | **Total**  **Pérdida carga,**  **m c. f.** | **Cota IGM,**  **m** | **Energía de ingreso al**  **ojo de impulsión** | |
| **m c. f.** | **Pa** |
| 1.a | 75,71 | 31,90 | 5,13 | 15 | 11,77 | 126991,53 |
| 2.a | 82,02 | 31,90 | 5,99 | 15 | 10,91 | 117758,40 |
| Mínima | 88,33 | 31,90 | 6,86 | 15 | 10,04 | 108296,55 |
| 1.b | 176,66 | 63,80 | 26,52 | 15 | 22,28 | 240455,55 |
| 2.b | 182,97 | 63,80 | 28,39 | 15 | 20,41 | 220247,77 |
| Máxima | 198,74 | 63,80 | 33,18 | 15 | 15,62 | 168586,33 |

Para un diámetro de tubería de 304,57 mm (12 in), la presión de ingreso en el ojo de impulsión de la bomba búster es positiva, por lo que este diámetro de tubería se escoge como el diámetro de tubería óptimo para la Línea de succión, y la tubería submarina que recorre el lecho marino que comunica al PLEM submarino con la estación de bombeo búster debe construirse para este valor de diámetro.

Selección del diámetro más económico para la Línea de descarga

Para la selección del diámetro mas económico para la Línea de descarga o impulsión, adicionalmente al cálculo de la pérdida de carga, la selección de este diámetro de tubería se realiza sobre la base de un ahorro en los costos totales de operación e inversión.

El fluido que se considera para el cálculo de la pérdida de carga en la Línea será el agua de mar, por ser el líquido de mayor densidad.

El análisis de la Línea se va a realizar utilizando la distribución que se muestra en la Figura 4.2.

El diámetro de tubería del Tramo 1 se lo considera fijo, y se refiere a la tubería que se encuentra entre la descarga de la bomba búster y la salida de la estación de bombeo. En la salida de la estación de bombeo se conecta con el Tramo 2, y esta tubería se conecta con los tanques de almacenamiento.

Para determinar el diámetro más económico a instalar en la Línea de descarga, se utiliza la hoja 2. En este caso se va a iterar con los diámetros comerciales de tubería de: 304,57 mm (12 in), 355,33 mm (14 in), 406,09 mm (16 in) y 456,85 mm (18 in).

El diámetro de la tubería que se está iterando, corresponde al tramo 2 de la Línea de descarga o impulsión.

Para el cálculo de la pérdida de carga local en los accesorios se utiliza un Manual de Hidráulica para colocar la longitud equivalente de los dispositivos utilizados en este recorrido.

En base al diámetro de tubería de la Línea de succión, se va a colocar en el Tramo 1 una tubería de diámetro 253,81 mm (10 in), que es el inmediato diámetro comercial inferior para las tuberías de acero.

En el Terminal se van a presentar dos condiciones de bombeo, pero el análisis del diámetro más económico se lo realiza sobre la base de la máxima condición de presión y caudal de bombeo.

TABLA 22

LONGITUD EQUIVALENTE DE ACCESORIOS UTILIZADOS EN EL TRAMO 1 DE LA LÍNEA DE DESCARGA O IMPULSIÓN

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Accesorios** | **Cantidad** | **Diámetro Nominal** | |
| **253,81 mm** | |
| **Le, m** | **Total, m** |
| Codo 90° | 3 | 4,63 | 13,89 |
| Válvula de retención | 1 | 19,81 | 19,81 |
| Válvula de compuerta | 1 | 1,62 | 1,62 |
| **Sumatoria** | | **Total ( m )** | 35,32 |

Le: Longitud equivalente de accesorios, en metros.

TABLA 23

INFORMACIÓN DE LA LONGITUD DE LA LÍNEA

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Sección** | **DN**  **( mm )** | **DI**  **( mm )** | **Tubería** | |
| **Longitud ( m )** | **Le ( m )** |
| Succión | 304,57 | 302,99 | 1680 | 42,62 |
| Tramo 1 | 253,81 | 254,32 | 20 | 35,32 |
| Tramo 2 | -.- | -.- | 250 | -.- |

DN: Diámetro nominal, en milímetros

DI: Diámetro interior, en milímetros.

Le: Longitud equivalente de los accesorios, en metros.

TABLA 24

DIÁMETROS PARA ITERACIÓN EN LA HOJA 2, CORRESPONDIENTES AL TRAMO 2 DE LA LÍNEA DE IMPULSIÓN

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Ítem** | **DN**  **( mm )** | **DI**  **( mm )** | **Le**  **Tramo 2 ( m )** |
| 1ero | 304,57 | 302,99 | 139,8 |
| 2do | 355,33 | 333,096 | 159,3 |
| 3ero | 406,09 | 380,71 | 182,1 |
| 4to | 456,85 | 428,33 | 205,6 |

DN: Diámetro nominal, en milímetros

DI: Diámetro interior, en milímetros.

Le: Longitud equivalente de accesorios, en metros.

TABLA 25

LONGITUD EQUIVALENTE DE ACCESORIOS UTILIZADOS EN EL TRAMO 2 DE LA LÍNEA DE DESCARGA O IMPULSIÓN.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Accesorios** | **Cantidad** | **Diámetro nominal (DN), mm** | | | | | | | |
| **304,57** | | **355,33** | | **406,09** | | **456,85** | |
| **Le** | **Total** | **Le** | **Total** | **Le** | **Total** | **Le** | **Total** |
| Codo 90° | 2 | 5,5 | 11 | 6,13 | 12,26 | 7,04 | 14,08 | 7,99 | 15,98 |
| Codo 45° | 2 | 3,54 | 7,08 | 3,9 | 7,8 | 4,48 | 8,96 | 5,09 | 10,18 |
| Válvula de Compuerta | 3 | 1,95 | 5,85 | 2,29 | 6,87 | 2,59 | 7,77 | 2,93 | 8,79 |
| Te | 1 | 18,59 | 18,59 | 21,64 | 21,64 | 24,69 | 24,69 | 27,74 | 27,74 |
| **Sumatoria** | | **Total** | 42,62 | **Total** | 48,57 | **Total** | 55,5 | **Total** | 62,69 |

Le: Longitud equivalente de los accesorios de tubería, en metros.

Utilizando la Hoja electrónica 2, en la primera sección de cálculos se determina el TDH para los diámetros de tubería que se están analizando en la condición de máximo caudal.

TABLA 26

RESULTADO DEL CÁLCULO DEL TDH EN LA SECCIÓN 1 DE LA HOJA 2

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Ítem** | **DN**  **, mm** | **Caudal**  **, l/s** | **TDH**  **, m** |
| 1ero | 304,57 | 198,74 | 27,40 |
| 2do | 355,33 | 198,74 | 25,55 |
| 3ero | 406,09 | 198,74 | 24,06 |
| 4to | 456,85 | 198,74 | 23,38 |

DN: Diámetro nominal, en milímetros.

TDH: Altura dinámica total, en metros.

Con la obtención del TDH para los diámetros de tubería iterados en la sección 1 de la hoja 2, se introduce los datos que solicita la sección 2 para realizar el análisis de sensibilidad económica del diámetro de tubería, y los resultados se muestran en la Tabla 27.

TABLA 27

DIÁMETROS DE ANÁLISIS PARA LA TUBERÍA DEL TRAMO 2

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ítem | DN  ( mm ) | TDH  ( m ) | Peso unitario  ( Kg/m ) | Eficiencia bomba  η bomba ( % ) | Eficiencia motor  η motor ( % ) |
| 1ero | 304,57 | 27,40 | 73,84 | 83 | 80 |
| 2do | 355,33 | 25,55 | 81,31 | 83 | 80 |
| 3ero | 406,09 | 24,06 | 93,24 | 83 | 80 |
| 4to | 456,85 | 23,38 | 105,18 | 83 | 80 |

DN: Diámetro nominal, en milímetros

TDH: Altura dinámica total, en metros

η bomba: Eficiencia de la bomba, en porcentaje (%).

η motor: Eficiencia del motor, en porcentaje (%).

TABLA 28

RESUTADOS DE LA ITERACIÓN EN LA HOJA 2

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Ítem | DN  ( mm ) | Costos totales  ( US$ ) |
| 1ero | 304,57 | 163515,38 |
| 2do | 355,33 | 163231,35 |
| 3ero | 406,09 | 168051,16 |
| 4to | 456,85 | 175794,10 |

DN: Diámetro nominal, en milímetros.

Obtenidos los resultados de la Hoja electrónica 2, para mejor visualización se colocan en la Figura 5.1.



FIGURA 5.1. COSTOS TOTALES VS. DIÁMETRO DE TUBERÍA EN LA LÍNEA DE IMPULSIÓN.

En la Figura 5.1 se puede visualizar fácilmente que para un diámetro de tubería de 355,33mm (14 in) en la Línea de descarga o impulsión, la curva de Costos totales vs. Diámetro de tubería, se encuentra en el menor valor.

El desarrollo de cálculo de la hoja electrónica, se puede obtener en el Apéndice 3.

Selección de la Bomba búster

Para la selección de la bomba búster, en primer lugar se elige a un fabricante de bombas que cumpla con la norma API estándar 610, luego se establece el tipo de bomba adecuada sobre la base de la curva característica del sistema, y la curva de la bomba.

La marca de bombas Goulds Inc., en su modelo 3700 proporciona a la industria del petróleo bombas centrífugas que cumplen con la norma API estándar 610. Para la resolución del problema planteado en este caso de estudio, este es el fabricante de bombas del que se seleccionará la bomba búster.

Para la construcción de la curva característica del sistema, una vez determinados los diámetros en la Línea de succión y la Línea de descarga o impulsión, se determina la carga total o TDH (altura dinámica total) para varias condiciones de caudal.

Debido a que este sistema de bombeo tipo búster, debe adaptarse al sistema de bombeo de los B/T que descarguen en el Terminal; el caudal y la presión de bombeo de ingreso son independientes del sistema de bombeo tipo búster, y ya han sido establecidos en 2 condiciones extremas de caudal y presión.

En el cálculo de las pérdidas de carga, se considera como fluido de bombeo al agua de mar por ser el líquido de mayor densidad.

Para construir la curva característica de carga del sistema, se determina el TDH para varios caudales alrededor de las condiciones máxima y mínima de descarga desde los B/T.

La selección de la bomba búster se la realiza con la ayuda de la Hoja 3. En la primera parte se determina el TDH del sistema para las condiciones de bombeo establecidas previamente y utilizando los diámetros de tubería para la succión y descarga ya establecidos.

TABLA 29

RESULTADO DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DEL SISTEMA PARA LA CONDICIÓN MÍNIMA EN LA SECCIÓN 1 DE LA HOJA 3.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Nivel en la succión: | 15 | m s. n. m. |  | Nivel en la descarga: | | 50 | m s. n. m. |
|  | Caudales ( l/s ) |  | 12,62 | 37,85 | 63,09 | 88,33 | 100,95 | 113,56 |
|  | Presión del B/T ( m c. f. ) | | 31,90 | 31,90 | 31,90 | 31,90 | 31,90 | 31,90 |
|  | Altura geométrica ( m ) | | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 |
|  | Altura del Tanque (m ) | | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 |
|  | ΔP equipos (m c. f.) | | 0,000 | 0,023 | 0,093 | 0,278 | 0,315 | 0,626 |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Caudales ( l/s ) | 12,62 | 37,85 | 63,09 | 88,33 | 100,95 | 113,56 |
|  | | Diámetro interior (mm) | 304,57 | 304,57 | 304,57 | 304,57 | 304,57 | 304,57 |
|  | | Factor de fricción | 0,02197 | 0,01792 | 0,01660 | 0,01589 | 0,01564 | 0,01544 |
| Línea de | | Longitud total (m) | 1680 | 1680 | 1680 | 1680 | 1680 | 1680 |
| Succión | | Velocidad (m/s) | 0,17 | 0,52 | 0,87 | 1,21 | 1,39 | 1,56 |
|  | | Le ( m ) | 42,62 | 42,62 | 42,62 | 42,62 | 42,62 | 42,62 |
|  | | Pérdidas locales (m c. f.) | 0,00 | 0,03 | 0,09 | 0,17 | 0,21 | 0,27 |
|  | | Pérdida por fricción (m c. f.) | 0,19 | 1,36 | 3,50 | 6,57 | 8,44 | 10,54 |
|  | | Diámetro interior (mm) | 254,32 | 254,32 | 254,32 | 254,32 | 254,32 | 254,32 |
| Línea de | | Factor de fricción | 0,02129 | 0,01762 | 0,01645 | 0,01583 | 0,01562 | 0,01545 |
| Impulsión | | Longitud total (m) | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| (Tramo 1) | | Velocidad (m/s) | 0,25 | 0,75 | 1,24 | 1,74 | 1,99 | 2,24 |
|  | | Le ( m ) | 35,32 | 35,32 | 35,32 | 35,32 | 35,32 | 35,32 |
|  | | Pérdidas locales (m c. f.) | 0,01 | 0,07 | 0,18 | 0,34 | 0,44 | 0,55 |
|  | | Pérdida por fricción (m c. a.) | 0,01 | 0,04 | 0,10 | 0,19 | 0,25 | 0,31 |
|  | Caudales ( l/s ) | | 12,62 | 37,85 | 63,09 | 88,33 | 100,95 | 113,56 |
|  | Diámetro interior (mm) | | 336,29 | 336,29 | 336,29 | 336,29 | 336,29 | 336,29 |
| Línea de | Factor de fricción | | 0,02236 | 0,01813 | 0,01672 | 0,01596 | 0,01569 | 0,01547 |
| Impulsión | Longitud total (m) | | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 |
| (Tramo 2) | Velocidad (m/s) | | 0,14 | 0,43 | 0,71 | 0,99 | 1,14 | 1,28 |
|  | Le ( m ) | | 48,57 | 48,57 | 48,57 | 48,57 | 48,57 | 48,57 |
|  | Pérdidas locales (m c. f.) | | 0,00 | 0,02 | 0,06 | 0,12 | 0,15 | 0,19 |
|  | Pérdida por fricción (m c. f.) | | 0,02 | 0,12 | 0,32 | 0,60 | 0,77 | 0,96 |
|  | TDH del sistema ( m ) | | 19,33 | 20,78 | 23,44 | 27,36 | 29,67 | 32,54 |

TABLA 30

RESULTADO DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DEL SISTEMA PARA LA CONDICIÓN MÁXIMA EN LA SECCIÓN 1 DE LA HOJA 3.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Nivel en la succión: | 15 | m s. n. m. |  | Nivel en la descarga: | | 50 | m s. n. m. |
|  | Caudales ( l/s ) | | 126,18 | 141,96 | 157,73 | 173,50 | 198,74 | 205,05 |
|  | Presión del B/T (m c. f.) | | 63,80 | 63,80 | 63,80 | 63,80 | 63,80 | 63,80 |
|  | Altura geométrica ( m ) | | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 |
|  | Altura de Tanque (m ) | | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 |
|  | ΔP equipos (m c. f.) | | 0,741 | 0,927 | 1,158 | 1,529 | 1,853 | 2,085 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | Caudales ( l/s ) | 126,18 | 141,96 | | 157,73 | | 173,50 | | 198,74 | | 205,05 | |
|  | | | Diámetro interior (mm) | 304,57 | 304,57 | | 304,57 | | 304,57 | | 304,57 | | 304,57 | |
|  | | | Factor de fricción | 0,01526 | 0,01509 | | 0,01494 | | 0,01481 | | 0,01464 | | 0,0146 | |
| Línea de | | | Longitud total (m) | 1680 | 1680 | | 1680 | | 1680 | | 1680 | | 1680 | |
| Succión | | | Velocidad (m/s) | 1,73 | 1,95 | | 2,17 | | 2,38 | | 2,73 | | 2,81 | |
|  | | | Le ( m ) | 42,62 | 42,62 | | 42,62 | | 42,62 | | 42,62 | | 42,62 | |
|  | | | Pérdidas locales (m c. f.) | 0,33 | 0,41 | | 0,50 | | 0,60 | | 0,78 | | 0,83 | |
|  | | | Pérdida por fricción (m c. f.) | 12,87 | 16,10 | | 19,68 | | 23,61 | | 30,63 | | 32,53 | |
|  | | | Diámetro interior (mm) | 254,32 | 254,32 | | 254,32 | | 254,32 | | 254,32 | | 254,32 | |
| Línea de | | | Factor de fricción | 0,01531 | 0,01516 | | 0,01504 | | 0,01493 | | 0,01479 | | 0,01477 | |
| Impulsión | | | Longitud total (m) | 20 | 20 | | 20 | | 20 | | 20 | | 20 | |
| (Tramo 1) | | | Velocidad (m/s) | 2,48 | 2,79 | | 3,11 | | 3,42 | | 3,91 | | 4,04 | |
|  | | | Le ( m ) | 35,32 | 35,32 | | 35,32 | | 35,32 | | 35,32 | | 35,32 | |
|  | | | Pérdidas locales (m c. f.) | 0,67 | 0,84 | | 1,03 | | 1,23 | | 1,60 | | 1,70 | |
|  | | | Pérdida por fricción (m c. a.) | 0,38 | 0,47 | | 0,58 | | 0,70 | | 0,91 | | 0,96 | |
|  | Caudales ( l/s ) | | 126,18 | 141,96 | 157,73 | | 173,50 | | 189,27 | | 205,05 | |
|  | Diámetro interior (mm) | | 336,29 | 336,29 | 336,29 | | 336,29 | | 336,29 | | 336,29 | |
| Línea de | Factor de fricción | | 0,01528 | 0,01509 | 0,01492 | | 0,01478 | | 0,01460 | | 0,01456 | |
| Impulsión | Longitud total (m) | | 250 | 250 | 250 | | 250 | | 250 | | 250 | |
| (Tramo 2) | Velocidad (m/s) | | 1,42 | 1,60 | 1,78 | | 1,95 | | 2,24 | | 2,31 | |
|  | Le ( m ) | | 48,57 | 48,57 | 48,57 | | 48,57 | | 48,57 | | 48,57 | |
|  | Pérdidas locales (m c. f.) | | 0,23 | 0,28 | 0,35 | | 0,42 | | 0,54 | | 0,57 | |
|  | Pérdida por fricción (m c. f.) | | 1,17 | 1,46 | 1,78 | | 2,14 | | 2,77 | | 2,94 | |
|  | TDH del sistema ( m ) | | 3,59 | 7,70 | 12,28 | | 17,43 | | 26,28 | | 28,82 | |

Con ayuda de la hoja 3 en la selección de la bomba búster y al tener 2 condiciones de bombeo extremas en este caso de estudio establecidas por las bombas de los B/T, las alternativas planteadas son las siguientes:

* 1. Operación en la estación de bombeo con una sola bomba.
  2. Operación en la estación de bombeo con una bomba para la condición máxima, y una bomba para la condición mínima.
  3. Operación en la estación de bombeo con un arreglo de 2 bombas en paralelo.

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.

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

En la tercera alternativa, el uso de un arreglo de bombas en paralelo proporciona a la estación de bombeo un sistema que puede funcionar adaptándose a las condiciones de bombeo que se generen en el Terminal, además de un funcionamiento a una eficiencia alta, y ahorro de energía durante la operación.

Para asignar la bomba búster a cada una de las alternativas planteadas anteriormente, se utiliza la curva general del fabricante que se encuentra en el Apéndice 4.

Los resultados de los puntos de operación de las bombas seleccionadas, se muestran en las siguientes Tablas:

TABLA 31

ALTERNATIVA 1: OPERACIÓN EN LA ESTACIÓN DE BOMBEO CON UNA SOLA BOMBA.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Información de la curva de la bomba búster | | | |
| Condición mínima | | Condición máxima | |
| Caudal ( l/s ) | TDH ( metros ) | Caudal ( l/s ) | TDH ( metros ) |
| 31,56 | 37,18 | 126,18 | 32,31 |
| 47,82 | 36,27 | 141,96 | 31,39 |
| 63,09 | 35,36 | 157,73 | 29,56 |
| 78,86 | 34,74 | 173,50 | 27,74 |
| 94,64 | 34,14 | 198,74 | 25,91 |
| 110,41 | 33,53 | 205,05 | 24,38 |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Punto de operación | | | |
| Condición mínima | | Condición máxima | |
| TDH (m) | 32,99 | TDH (m) | 24,31 |
| Caudal (l/s) | 114,15 | Caudal (l/s) | 203,58 |
| Pot. (Kw.) | 74,57 | Pot. (Kw.) | 74,57 |
| Ef. (%) | 70 | Ef. (%) | 81 |
| Tamaño | 8 x 10 - 13 | Tamaño | 8 x 10 – 13 |

TABLA 32

ALTERNATIVA 2: OPERACIÓN EN LA ESTACIÓN DE BOMBEO CON UNA BOMBA PARA LA CONDICIÓN MÁXIMA, Y UNA BOMBA PARA LA CONDICIÓN MÍNIMA

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Información de la curva de la bomba búster | | | |
| Bomba búster pequeña | | Bomba búster grande | |
| Caudal ( l/s ) | TDH ( metros ) | Caudal ( l/s ) | TDH ( metros ) |
| 12,62 | 35,05 | 126,18 | 32,31 |
| 37,85 | 34,44 | 141,96 | 31,39 |
| 63,09 | 32,92 | 157,73 | 29,56 |
| 88,33 | 29,87 | 173,50 | 27,74 |
| 100,95 | 28,35 | 198,74 | 25,91 |
| 113,56 | 26,52 | 205,05 | 24,38 |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Punto de operación | | | |
| Bomba búster pequeña | | Bomba búster grande | |
| TDH (m) | 28,99 | TDH (m) | 24,31 |
| Caudal (l/s) | 95,77 | Caudal (l/s) | 203,58 |
| Pot. (Kw.) | 37,29 | Pot. (Kw.) | 74,57 |
| Ef. (%) | 81,5 | Ef. (%) | 81 |
| Tamaño | 6 x 8 - 13B | Tamaño | 8 x 10 – 13 |

TABLA 33

ALTERNATIVA 3: OPERACIÓN EN LA ESTACIÓN DE BOMBEO CON UN ARREGLO DE 2 BOMBAS EN PARALELO

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Información de la curva de la bomba búster | | | |
| Bomba búster sola | | Arreglo en paralelo | |
| Caudal ( l/s ) | TDH ( metros ) | Caudal ( l/s ) | TDH ( metros ) |
| 12,62 | 35,05 | 126,18 | 32,70 |
| 37,85 | 34,44 | 141,96 | 31,96 |
| 63,09 | 32,92 | 157,73 | 31,12 |
| 88,33 | 29,87 | 173,50 | 30,18 |
| 100,95 | 28,35 | 189,27 | 29,15 |
| 113,56 | 26,52 | 205,05 | 28,01 |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Punto de operación | | | |
| Bomba búster sola | | Arreglo en paralelo | |
| TDH (m) | 28,99 | TDH (m) | 27,53 |
| Caudal (l/s) | 95,77 | Caudal (l/s) | 211,27 |
| Pot. (Kw.) | 37,29 | Pot. (Kw.) | 74,57 |
| Ef. (%) | 81,5 | Ef. (%) | --.-- |
| Tamaño | 6 x 8 - 13B | Tamaño | 6 x 8 - 13B |

La alternativa 3 en este caso de estudio es la que se escoge para aplicar en la estación de bombeo búster, por las siguientes razones: por las ventajas en el ahorro de suministro de energía, la versatilidad para realizar maniobras de bombeo y un menor tiempo de amortización de las bombas, entre otras.

Cálculo del golpe de ariete

Para el cálculo del golpe de ariete en la tubería, en primer lugar se realiza un cálculo estructural para determinar la presión de operación de la tubería y la máxima presión que esta resiste. Luego se determina el valor de la presión debida al golpe de ariete, con lo cuál se puede obtener la presión máxima y mínima al interior de la tubería.

Estos cálculos se los realiza con la Hoja electrónica 4, que se muestra en el apéndice 3.

Utilizando la Hoja 4, la presión de operación y la presión de reventamiento para la línea de impulsión (Tramo 2), es la que se muestra en la Tabla 34.

TABLA 34

CÁLCULO DE LAS PRESIÓNES QUE SOPORTA LA TUBERÍA

|  |  |
| --- | --- |
| Utilizando la ecuación 4.23 | |
| Presión de reventamiento | 1622456368.02 Pa (150352.74 m c.f.) |
| Presión de operación | 846922224.11 Pa (78484.13 m c.f.) |
| Utilizando la ecuación 4.24 | |
| Presión de reventamiento | 16220455.73 Pa (1503.15 m c.f.) |
| Presión de operación | 8467077.89 Pa (784.64 m c.f.) |

En la sección 2 de la Hoja 4 se determina la altura dinámica total (TDH) para la línea de impulsión, que para el presente caso de estudio tiene el valor de 26.28 metros de columna de fluido. En la sección 3 de la Hoja 4 se realiza el cálculo del golpe de ariete, con los siguientes resultados:

TABLA 35

RESULTADOS DEL CÁLCULO DEL GOLPE DE ARIETE EN LA HOJA 4

|  |  |
| --- | --- |
|  | Impulsión corta |
|  | Ecuación Michaud |
| originada por el golpe de ariete | 56,15 m c.f. |
| originada por el golpe de ariete | 13,85 m c.f. |

Comparando el valor del golpe de ariete máximo de 56,15 metros de columna de fluido, con la presión de operación dada por la ecuación 4.23 de 784.64 metros de columna de fluido que es el valor mínimo, se determina que la tubería resiste sin problemas la sobre presión máxima que se puede producir en la línea.

Para el valor mínimo de presión al interior de la tubería, el valor obtenido es de 13,85 metros de columna de fluido, con lo cuál se determina que no existe una presión negativa y el sistema no necesita un sistema de protección para este caso.