

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE DESCARGA DE CRUDO PESADO DESDE  
CARROTANQUES PARA CAMPO RUBIALES, META EN LA EMPRESA  
INGENIERÍA STRYCON, LTDA.**

**NELSON RAMIRO BLANCO MÁRQUEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2010**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE DESCARGA DE CRUDO PESADO DESDE  
CARROTANQUES PARA CAMPO RUBIALES, META EN LA EMPRESA  
INGENIERÍA STRYCON, LTDA.**

**NELSON RAMIRO BLANCO MÁRQUEZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director:  
ALFONSO GARCÍA CASTRO  
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2010**

## DEDICATORIA

DIOS, por la vida y por mi familia.

A mis padres Pedro y Angelina, por sus enseñanzas y su crianza.

A mi esposa Alejandra por su apoyo incondicional y su compañía.

A mi hija Jennifer, por ser la luz de mi vida.

A mis doce hermanos, por acompañarme en todo momento.

A mis suegros y mi cuñado, por acogerme en su familia.

**Nelson Blanco Márquez.**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Alfonso García Castro, Ingeniero Mecánico, director del proyecto, por su confianza y colaboración oportuna.

A la UIS, por acogerme en su claustro.

A Ricardo Striedinger, Ingeniero Gerente de Proyectos de Ingeniería Strycon, por su respaldo y confianza.

A Ingeniería Strycon, empresa que me ha brindado la oportunidad de ejercer la ingeniería.

Gracias.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. OBJETIVOS	18
1.1 OBJETIVO GENERAL	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2. BASES DE DISEÑO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LAS TUBERÍAS Y LA SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS ROTATIVOS (BOMBAS)	20
2.1 INFORMACIÓN DE ENTRADA	20
2.2 CONDICIONES AMBIENTALES	21
2.3 SISTEMA DE UNIDADES	21
2.4 ESPECIFICACIONES DEL CRUDO	22
2.5 CRITERIOS DE DISEÑO	24
2.6 SELECCIÓN DE BOMBAS	24
2.7 LÍNEAS	25
2.8 ACCESORIOS Y VÁLVULAS	26
3. CÁLCULO HIDRÁULICO	28
3.1 METODOLOGÍA	28
3.2 DATOS DE INICIO	29
4. EQUIPOS ROTATIVOS (BOMBAS)	33
4.1 PRESIÓN DE SUCCIÓN	33
4.2 NPSHA –CARGA NETA POSITIVA DISPONIBLE A LA SUCCIÓN	33
4.3 PRESIÓN DE DESCARGA	34
4.4 CÁLCULO DE LA POTENCIA DE LA BOMBA	35
5. RESULTADOS	36
5.1 CÁLCULO HIDRÁULICO DE LÍNEAS	36
5.2 SELECCIÓN DE LAS BOMBAS	39

5.3 SELECCIÓN DEL MOTOR	46
CONCLUSIONES	48
BIBLIOGRAFÍA	50
ANEXOS	52

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Datos generales.	20
Tabla 2. Típicas velocidades para fluidos con viscosidad $> 10$ cP, para diferentes diámetros "d".	20
Tabla 3. Condiciones ambientales Campo Rubiales.	21
Tabla 4. Viscosidad (cP) del Crudo Rubiales a diferentes temperaturas y % crudo-agua.	23
Tabla 5. Propiedades del Crudo Rubiales a condiciones críticas de descarga.	24
Tabla 6. Caudales obtenidos para descargar un carrotanque de 9500 galones con Crudo a diferentes tiempos, asumidos teniendo como referencia el actual tiempo de descarga de 45 minutos.	28
Tabla 7. Diámetros de tubería.	29
Tabla 8. Resultados de velocidades para diferentes diámetros y caudales, para transporte de Crudo Rubiales.	36
Tabla 9. Resumen de cálculos de pérdidas para Crudo Rubiales de 40 BSW y 140 °F.	38
Tabla 10. Datos generales	40
Tabla 11. Accesorios en el tramo de succión y descarga.	40
Tabla 12. Datos para el cálculo de velocidad	42
Tabla 13. Cálculo de pérdidas en la succión.	42
Tabla 14. Cálculo de pérdidas en la descarga.	43

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Curva de Viscosidades del Crudo Rubiales.	23
Figura 2. Gráfica Velocidad Vs Caudal.	36
Figura 3. Gráfica Pérdidas Vs Caudal para crudo 40% BSW y 120 °F.	37
Figura 4. Gráfica Pérdidas Vs Caudal para crudo 40% BSW y 140 °F.	38
Figura 5. Esquema de descarga de carrotanque y envío hacia la troncal.	41
Figura 6. Tabla de Factores de Fricción $f_t$	53
Figura 7. Fórmulas para el Cálculo del Coeficiente $K_{acces}$	53
Figura 8. Coeficientes de Resistencia válidos para válvulas y accesorios.	54
Figura 9. Sistema de Descarga diseñado.	57
Figura 10. Curva de funcionamiento de las bombas del descargadero, para una bomba tipo paletas deslizantes.	58
Figura 11. Catálogo de motores.	59

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. TABLAS PARA CÁLCULO DE COEFICIENTES DE FRICCIÓN EN VÁLVULAS Y ACCESORIOS	53
Anexo B. SISTEMA DE DESCARGA DISEÑADO	57
Anexo C. CURVA DE FUNCIONAMIENTO DE LAS BOMBAS	58
Anexo D. CATÁLOGO DE MOTORES	59
Anexo E. REGISTRO FOTOGRÁFICO	60
Anexo F. PLANOS DE DISEÑO DEL DESCARGADERO	64

## GLOSARIO

**ACCESORIOS:** los accesorios para tubería son piezas especialmente diseñadas con el objeto de unir o cerrar los extremos de los tubos, existiendo una gran variedad de estos, todos con funciones específicas y fabricados de una gran variedad de materiales.

**API:** (*American Petroleum Institute*). Instituto Americano del Petróleo.

**API 676:** norma aplicable a las bombas de desplazamiento positivo de tipo rotatorias.

**BOMBAS ROTATORIAS:** son bombas de desplazamiento positivo que descargan una cantidad determinada de líquido por cada revolución o movimiento del eje. En esta clase de bomba el líquido se desplaza por medio del movimiento giratorio de engranajes, paletas, tornillos, espirales o excéntricas dentro de un cuerpo cubierto o casco.

**BSW:** cantidad de agua mezclada en solución con el petróleo.

**CARROTANQUE:** carro cisterna usado para el transporte de fluidos.

**CAVITACIÓN:** forma especial de corrosión por erosión y la ocasiona el aplastamiento o implosión de las burbujas de gas contra la superficie del metal en las zonas de alta presión.

**CPF:** Centro de Facilidades de Producción.

**CRUDO PESADO:** petróleo crudo con un índice API inferior a 22°.

**DESCARGADERO:** facilidad para el recibo de crudo transportado en carrotanques.

**KBOPD:** Kilo Barril de crudo (Oil-aceite) Por Día.

**LÍNEA:** es la tubería del sistema que tiene por objeto transportar el fluido y se clasifica de acuerdo con el diámetro de su sección transversal y el espesor de pared.

**LINEAS TRONCALES:** tubería principal utilizada para el transporte de Crudo.

**NPSH:** (*Net Positive Suction Head*), es la carga mínima de líquido necesaria en la succión de la bomba para evitar la vaporización cuando funciona a un régimen dado y se expresa en metros o en pies de columna de líquido.

**NÚMERO DE REYNOLDS:** relación de las fuerzas dinámicas de la masa del fluido respecto a los esfuerzos de deformación ocasionados por la viscosidad.

**PRESIÓN DE VAPOR:** es la presión para una temperatura dada, en la que la fase líquida y el vapor se encuentran en equilibrio dinámico.

**SISTEMA DEL DESCARGADERO:** todas las partes de las instalaciones físicas que conforman el descargadero, incluso la tubería, válvulas, unidades de bombeo y conjunto de tanques.

**TIE-IN:** indica el punto en donde se debe desmantelar tubería existente o el punto en donde se debe conectar la tubería nueva a tubería existente.

**VISCOSIDAD:** es la fricción interna o resistencia interna al movimiento relativo de las partículas de un fluido.

## RESUMEN

### TÍTULO

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE DESCARGA DE CRUDO PESADO DESDE CARROTANQUES PARA CAMPO RUBIALES, META EN LA EMPRESA INGENIERÍA STRYCON, LTDA\***

### AUTOR

NELSON RAMIRO BLANCO MÁRQUEZ\*\*

### PALABRAS CLAVES

DESCARGADERO, DISEÑO, HIDRÁULICA, CRUDO PESADO.

### DESCRIPCIÓN

El presente proyecto de grado mejorará las actuales condiciones de descarga de crudo desde carrotanques en el campo petrolero de Campo Rubiales, Meta, haciendo esta operación más rápida y eficiente para aumentar el número de carrotanques descargados y aumentar el volumen de crudo pesado enviado diariamente al área de procesos (CPF).

Este documento muestra los criterios o bases de diseño tenidos en cuenta para el desarrollo y cálculo de las tuberías y las bombas del sistema, cumpliendo con los requerimientos de disminución del actual tiempo de descarga de los carrotanques y dando flexibilidad de operación para el mejor aprovechamiento de las facilidades. Por otro lado muestra los resultados de cálculo, tales como los diámetros de las tuberías de succión y descarga de las bombas, la presión de succión y descarga de las bombas, el NPSH disponible, la potencia hidráulica, la potencia al freno y la potencia requerida en el motor, al igual que las especificaciones técnicas de las bombas y motores de este proyecto. El diseño del descargadero permite recibir cinco carrotanques simultáneamente y evacuar cada uno en 40 minutos aproximadamente, igualmente en el momento en que llegue a la zona de descarga menos de cinco carrotanques, utilizar un número mayor de bombas por carrotanque, disminuyendo el tiempo de descarga a menos de 40 minutos.

---

\*Trabajo de Grado

\*\*Facultado de Físico-Mecánica. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Alfonso García Castro.

## ABSTRACT

### TITLE:

**DESIGN OF A HEAVY CRUDE OIL UNLOADING SYSTEM FROM PETROL TANKERS FOR CAMPO RUBIALES- META, AT THE COMPANY INGENIERÍA STRYCON LTDA \***

### AUTHOR

NELSON RAMIRO MÁRQUEZ \*\*

### KEY WORDS

UNLOADING SITE, DESIGN, HYDRAULICS, HEAVY CRUDE OIL

### DESCRIPTION

The present work will improve the current crude oil unloading conditions from petrol tankers in the petroleum field of Campo Rubiales, Meta, making of this a more rapid and efficient operation and therefore, increasing the number of unloaded tankers and the volume of heavy crude oil sent every day to the process area (CPF).

This document shows the criteria or bases of design taken in account for the development and calculation of the piping and pumps system, fulfilling the requirements related to the decrease of the tankers current unloading times and giving the operation flexibility for a better utilization of the facilities. On the other hand, it shows the results of calculations, such as the diameters of the suction and discharge piping of pumps, the suction and discharge pressure of pumps, the NPSH available, the hydraulic power, the brake power and the power needed in the engine, as well as technical specifications of pumps and engines used in this project. The design of the unloading site allows up to five tankers simultaneously and evacuates each one in 40 minutes approximately. Likewise, in the moment when less than five tankers get to the unloading area, it permits to use a greater number of pumps per tanker, diminishing the unloading time to less than 40 minutes.

---

\* Final Bachelor Work

\*\* Faculty of Physical mechanics. Mechanical Engineering School. Director: Alfonso García Castro.

## INTRODUCCIÓN

El constante crecimiento de la producción a consecuencia de la exploración y explotación de nuevos pozos de crudo pesado en Campo Rubiales, Meta y debido a que las facilidades existentes (líneas troncales) para llevar el crudo hacia el área de proceso y el sistema para descargar el crudo transportado en carrotanques no son suficientes, se pretende por medio de este proyecto de grado, diseñar un sistema que mejore las actuales condiciones de descarga de crudo desde carrotanques y hacer esta operación más rápida y eficiente para aumentar el número de carrotanques descargados y aumentar el volumen de crudo pesado enviado diariamente al área de procesos.

Este libro está diseñado y estructurado de tal forma que en el primer capítulo se encuentran los objetivos del proyecto.

En el segundo capítulo se presentan las bases de diseño con las cuales se rige el proyecto para el dimensionamiento de las tuberías y la selección de las bombas. Este capítulo contiene la información de entrada en donde se encuentra el volumen promedio a descargar por carrotanque, el caudal actual de descarga y las velocidades de referencia para el transporte de Crudo, las condiciones ambientales del sitio donde funcionará el descargadero, el sistema de unidades usado en el diseño, las especificaciones del Crudo Rubiales y su comportamiento a diferentes temperaturas y porcentajes de agua, las condiciones del fluido para el diseño y las consideraciones para la selección de las bombas.

En el tercer capítulo se presenta la metodología para el cálculo hidráulico, el cual consiste en mostrar las ecuaciones, consideraciones y procedimientos empleados para determinar los diámetros de las tuberías del sistema.

El capítulo cuatro contiene las ecuaciones y consideraciones para el cálculo de la presión de succión, NPSH disponible, presión de descarga y las potencias, utilizadas en la selección de las bombas.

En el capítulo cinco, están los resultados del cálculo hidráulico de las tuberías con un esquema del sistema de descarga diseñado, también se presentan los resultados de las presiones, NPSH disponible y potencias hidráulica y al freno de las bombas teniendo en cuenta los diámetros, longitudes y accesorios del sistema, para la condición considerada crítica y las especificaciones técnicas para las bombas rotatorias según el código API 676.

El capítulo cinco, también contiene la potencia estimada para el motor, la velocidad síncrona y las especificaciones técnicas del motor.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Cumplir la misión institucional de la Universidad Industrial de Santander de generar y adecuar conocimientos y participar activamente en un proceso de cambio por el progreso y desarrollo industrial de nuestro país, desempeñando actividades relacionadas con el diseño, selección y aplicación de tecnología en sistemas mecánicos que soporten la manufactura de bienes o la operación de servicios, enfocados principalmente al proceso y transporte de hidrocarburos.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar el dimensionamiento de tuberías y la selección y especificación de equipos rotativos (bombas) para la descarga de crudo pesado desde carrotanques, basado en parámetros de diseño que involucran las propiedades del fluido, la velocidad del fluido y las pérdidas de energía por accesorios y por fricción en la tubería, teniendo como referencia para el análisis el requerimiento de disminución del actual tiempo de descarga de los carrotanques el cual se encuentra en 45 minutos.
  
- Diseñar el sistema para descargar un máximo de cinco (5) carrotanques simultáneamente.
  
- Dar flexibilidad de operación al sistema, para poder realizar las siguientes condiciones en el proceso:

- En el momento de la llegada al descargadero de un número de carrotanques inferior al número de bombas, encender varias bombas para disminuir el tiempo de descarga del crudo.
- Enviar el crudo a los 6 tanques de almacenamiento de crudo que existen en el sitio de ubicación del descargadero y cuya capacidad es de 1000 Barriles cada uno.
- En caso de no enviar el crudo a los tanques de almacenamiento, tener la facilidad para enviarlo a la troncal que lo lleva al CPF "*Central Process Facility*" para su procesamiento.
- Utilizar las bombas del descargadero para enviar crudo desde los tanques de almacenamiento hasta la troncal que lo lleva al CPF, en el momento en que no lleguen carrotanques a ser descargados.

## 2. BASES DE DISEÑO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LAS TUBERÍAS Y LA SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS ROTATIVOS (BOMBAS)

### 2.1 INFORMACIÓN DE ENTRADA

Como datos de entrada se encuentra el volumen promedio de los carrotanques a ser descargados, el tiempo actual de descarga de dichos volúmenes, el caudal actual de descarga y las velocidades de referencia recomendadas para el transporte de Crudo.

Tabla 1. Datos generales.

NOMBRE	UNIDAD	VALOR
Volumen a descargar por carrotanque	gal	9500
Tiempo actual de descarga por carrotanque	min	45
Caudal actual de descarga por bomba	gpm	211,11

Fuente: Datos tomados en Campo Rubiales, Meta por el autor del proyecto.

Tabla 2. Típicas velocidades para fluidos con viscosidad > 10 cP, para diferentes diámetros “d”.

DESCRIPCIÓN	CRITERIO	UNIDAD
Succión de bomba	$(0,2 + d/20)$	ft/s
Descarga de bomba	$(0,5 + d/10)$	ft/s
Líneas	$(1 + d/2)$	ft/s

Fuente: “DIS/030-OS65-PEB-001.0”. Documento de Ingeniería Strycon.

## 2.2 CONDICIONES AMBIENTALES

Las condiciones ambientales del campo Rubiales son aproximadamente las siguientes:

Tabla 3. Condiciones ambientales Campo Rubiales.

<b>Temperaturas</b>	26,3°C
<b>Precipitación</b>	1.900 a 2.200 mm/año
<b>Características el viento</b>	Velocidad promedio: Se ha adoptado el valor de 100 km/h como criterio de diseño según recomendación de la NSR-98 Colombiana.
<b>Humedad Relativa</b>	25% a 40%
<b>Atmósfera</b>	Presión barométrica promedio: 14,1 psia
<b>Nivel de ruido en el sector</b>	45 dB en ruido ambiental.
<b>Elevación</b>	Elevación de las facilidades con respecto al nivel del mar: 200 msnm aproximadamente

Fuente: "DIS/030-OS65-PEB-001.0". Documento de Ingeniería Strycon.

## 2.3 SISTEMA DE UNIDADES

En el diseño se debe utilizar el sistema de medidas usual en Ingeniería Strycon. Se muestran algunos ejemplos:

**DIÁMETRO** Pulgadas (in), metros (m).

**ESPESOR** Pulgadas (in), Schedule.

**ESPESOR AISLAMIENTO** Pulgadas (in).

<b>TEMPERATURA</b>	Fahrenheit °F, centígrados °C.
<b>VOLUMEN</b>	Metros Cúbicos (m <sup>3</sup> ), pies cúbicos (ft <sup>3</sup> ), Barriles (bbl).
<b>DIMENSIONES LINEALES</b>	Metros (m), pies (ft).
<b>PRESION</b>	Libras por pulgada cuadrada (psi), Kg/cm <sup>2</sup> .
<b>FLUJO (LIQUIDOS)</b>	Galones por minuto (gpm), Barriles por día (BPD), libras por hora (lb/h), litros por segundo (L/s).
<b>DENSIDAD</b>	Libra por pie cúbico (lb/ft <sup>3</sup> ), API.
<b>POTENCIA</b>	Caballos de potencia (HP).
<b>MASA</b>	Kilogramos (kg), Libras (lb), Toneladas (ton).
<b>SUPERFICIE</b>	Metros cuadrados (m <sup>2</sup> ), pies cuadrados (ft <sup>2</sup> ).
<b>VELOCIDAD</b>	Metros por segundo (m/s), Pies por segundo (f/s).
<b>VISCOSIDAD</b>	centiPoise (cP) – dinámica. centiStokes (cSt) – cinemática.

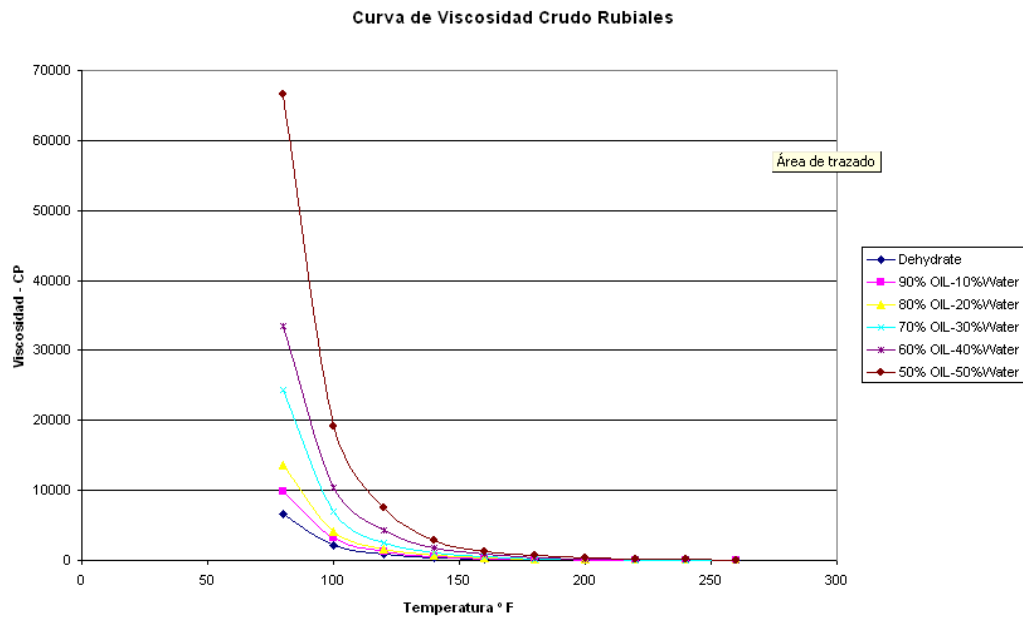
## **2.4 ESPECIFICACIONES DEL CRUDO**

El Crudo a ser descargado en el descargadero, proviene de diferentes pozos de Campo Rubiales, e igualmente llega Crudo que no cumple con las condiciones para venta por lo que se regresa por intermedio del descargadero al área de

proceso (CPF). Por lo tanto son Crudos con diferentes porcentajes BSW y temperaturas.

La siguiente gráfica muestra el comportamiento de la viscosidad del Crudo Rubiales a diferentes temperaturas y porcentajes de agua.

Figura 1. Curva de Viscosidades del Crudo Rubiales.



Fuente: Información suministrada por Pacific Rubiales Energy (PRE) para orden de servicio Ingeniería Strycon: OS04.

Tabla 4. Viscosidad (cP) del Crudo Rubiales a diferentes temperaturas y % crudo-agua.

TEMPERATURA (°F)	Deshidratado	90%Crudo-10% Agua (10% BSW)	80%Crudo-20% Agua (20% BSW)	70%Crudo-30% Agua (30% BSW)	60%Crudo-40% Agua (40% BSW)	50%Crudo-50% Agua (50% BSW)
<b>80</b>	6591	9828	13580	24313	33415	66559
<b>100</b>	2118	3155	4095	7030	10440	19160
<b>120</b>	858	1201	1561	2485	4320	7540
<b>140</b>	374	526,0	666,4	1004	1761	2881
<b>160</b>	186	260,0	317,0	462,0	830,0	1290
<b>180</b>	103	140,0	170,0	236,4	440,8	658,2
<b>200</b>	61,40	81,89	95,96	132,2	249,2	358,4
<b>220</b>	39,04	51,27	60,44	79,33	150,2	209,3

TEMPERATURA (°F)	Deshidratado	90%Crudo-10% Agua (10% BSW)	80%Crudo-20% Agua (20% BSW)	70%Crudo-30% Agua (30% BSW)	60%Crudo-40% Agua (40% BSW)	50%Crudo-50% Agua (50% BSW)
<b>240</b>	26,22	33,95	39,50	50,64	95,8	129,7
<b>260</b>	18,44	23,57	27,12	34,04	64,15	84,7

Fuente: Información suministrada por PRE para orden de servicio Ingeniería Strycon: OS04.

## 2.5 CRITERIOS DE DISEÑO

### 2.5.1 Propiedades del Crudo

Los cálculos hidráulicos de las líneas se realizan con las condiciones más críticas con las que generalmente llega el fluido al descargadero, las cuales se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Propiedades del Crudo Rubiales a condiciones críticas de descarga.

NOMBRE	UNIDAD	VALOR
Viscosidad del Crudo a 120 °F y 40% BSW	cP	4320
Densidad del Crudo a 120 °F y 40% BSW	Lb/ft <sup>3</sup>	60,65
Viscosidad del Crudo a 140 °F y 40% BSW	cP	1761
Densidad del Crudo a 140 °F y 40% BSW	Lb/ft <sup>3</sup>	60,17

## 2.6 SELECCIÓN DE BOMBAS

Las bombas se seleccionan con la capacidad que cumpla el objetivo de disminución del actual tiempo de descarga de los carotanes y cubriendo las presiones de proceso, las pérdidas por fricción en tuberías y equipos.

**2.6.1 Propiedades del Fluido.** La selección de las bombas se realiza con las propiedades del Crudo de 40% BSW y 120 °F, por considerarse una condición crítica debido a su alta viscosidad.

**2.6.2 Caudal.** El Caudal para la selección de las Bombas es el obtenido en el cálculo hidráulico de las líneas, teniendo en cuenta el requerimiento de disminución del tiempo actual de descarga.

**2.6.3 Cabeza Neta de Presión de Succión Disponible (NPSHA).** Para el cálculo del NPSH disponible se tendrán en cuenta los siguientes criterios:

a) El NPSH disponible se determinará para un nivel mínimo de fluido en los carrotanques de 0,5 ft.

b) El NPSHA disponible será al menos 3 ft mayor que el NPSH requerido definido por el fabricante de la bomba seleccionada.

c) La cabeza estática de succión se medirá desde el eje del puerto de succión de la bomba hasta la boquilla de descarga de los carrotanques (2 ft).

d) Para el cálculo de la Potencia se tomará el requerimiento hidráulico más crítico en el descargadero.

## **2.7 LÍNEAS**

Las rutas de las tuberías de líneas de succión deben tener la distancia más corta, así como la mínima cantidad de bridas, accesorios y válvulas, desde un punto de vista práctico en cuanto a diseño de planta.

Las líneas de succión deben ser como mínimo un tamaño más grandes que las boquillas de entrada de las bombas y como mínimo uno o dos tamaños más grandes que las líneas de descarga de las bombas.

En instalaciones con bombas múltiples, el tramo de succión común debe ser diseñado de manera que la velocidad sea lo más cercano posible a la velocidad del fluido en los ramales de succión de cada bomba.

Las tuberías de descarga de bombas deberán ser uno o dos veces de mayor tamaño que la boquilla de descarga.

La velocidad en la tubería de descarga no debe ser mayor a tres veces de la velocidad de la línea de succión.

Para el dimensionamiento de las líneas y bombas se debe tener en cuenta el requerimiento de disminución del actual tiempo de descarga, las velocidades de flujo y las pérdidas hidráulicas.

Para la selección del diámetro de las líneas se analizarán las pérdidas en un tramo de 100 ft.

## **2.8 ACCESORIOS Y VÁLVULAS**

Se deberán usar reducciones excéntricas, ubicadas lo más cerca posible a la boquilla de succión, con el lado plano hacia arriba para mantener nivelado el tope de la línea y evitar puntos altos.

Si es requerido para operación y/o mantenimiento, las válvulas de drenaje deben ser instaladas en puntos bajos y los venteos en puntos altos.

Deben ser instalados filtros permanentes en todas las succiones de bombas. Los filtros tipo canasta deben ser usados únicamente en secciones de tuberías horizontales, mientras que los tipos “Y” pueden ser usados en secciones horizontales y verticales.

Una válvula cheque debe ser instalada para cada bomba, a la descarga de la bomba.

Para proteger las líneas de descarga, por sobrepresión ocasionada por la bomba, se debe instalar una válvula de alivio (PSV) para cada bomba.

### 3. CÁLCULO HIDRÁULICO

El cálculo hidráulico consiste en determinar los diámetros de todas las líneas que hacen parte del descargadero, para diferentes condiciones de temperatura, caudal y %BSW del Crudo Rubiales.

Teniendo en cuenta el requerimiento de disminución del tiempo actual de descarga de los carrotanques (45 minutos), se determinan varios caudales para analizar las velocidades del fluido y las pérdidas en diferentes diámetros de tuberías e igualmente seleccionar los tamaños de las tuberías.

A continuación en la tabla 6, se muestran los tiempos de descarga asumidos y caudales obtenidos con dichos tiempos para un volumen de 9500 galones.

Tabla 6. Caudales obtenidos para descargar un carrotanque de 9500 galones con Crudo a diferentes tiempos, asumidos teniendo como referencia el actual tiempo de descarga de 45 minutos.

TIEMPO DE DESCARGA ASUMIDO	CAUDAL OBTENIDO
50 minutos	190 gpm
45 minutos	211,1 gpm
40 minutos	237,5 gpm
35 minutos	271,4 gpm
30 minutos	316,7 gpm

#### 3.1 METODOLOGÍA

El cálculo hidráulico se realiza con el objeto de determinar el diámetro de las líneas para la succión y la descarga, utilizando los caudales mostrados en la tabla 6 y las propiedades del Crudo Rubiales de la tabla 5.

Los cálculos realizados para las líneas se desarrollan mediante la siguiente metodología:

- Con los caudales calculados en la tabla 6 y asumiendo diferentes diámetros de tuberías se determinan las velocidades del Crudo.
- Con las velocidades obtenidas y las propiedades del Crudo de la tabla 5 se determina el número de Reynolds con el fin de saber el tipo de régimen.
- Conocido el número de Reynolds se calculan las pérdidas en la tubería para una longitud de 100 ft y se grafican los resultados.

### 3.2 DATOS DE INICIO

Como datos de inicio se encuentran todos los valores utilizados para desarrollar la base de cálculo del sistema a analizar. En la tabla 7 se enuncian los diámetros de tuberías posibles y con las propiedades del Crudo de la tabla 5 se procede a la selección de los tamaños de las líneas.

Tabla 7. Diámetros de tubería.

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Diámetro tubería Schedule 40	4	in
Diámetro tubería Schedule 40	6	in
Diámetro tubería Schedule 40	8	in

Se calcula el área transversal de la tubería y con el caudal al que se está trabajando se procede a calcular la velocidad.

Velocidad:

$$v = Q/A \quad ; \quad A = \frac{\pi * D_i^2}{4}$$

Siendo,

$v$  : Velocidad del fluido, ft/s.

$Q$  : Caudal de operación, gpm.

$A$  : Área de flujo, ft<sup>2</sup>.

$D_i$  : Diámetro interno de la tubería, in.

Obtenida la velocidad, con la densidad del fluido, el diámetro interno y la viscosidad dinámica, se calcula el número de Reynolds con el fin de determinar el tipo de régimen del fluido.

Número de Reynolds:

$$R_e = \frac{\rho * v * D_i}{\mu}$$

Donde,

$R_e$  : Número de Reynolds

$\rho$  : Densidad del crudo a la temperatura de operación, lb/ft<sup>3</sup>.

$v$  : Velocidad de flujo, ft/s.

$D_i$  : Diámetro interno de la tubería, in.

$\mu$  : Viscosidad dinámica del crudo a la temperatura de operación, cP.

Calculado el número de Reynolds se procede a determinar el tipo de régimen del fluido.

$R_e < 2300,$	Laminar.
$2300 < R_e < 4000,$	Transitorio.
$R_e > 4000,$	Turbulento.

Conocido el régimen del fluido se determina el factor de fricción con las siguientes ecuaciones:

**Laminar-Liso**

$$f = \frac{64}{Re}$$

**Transición-Rugoso**

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

**Transición-Liso**

$$f = \frac{0.316}{Re^{0.25}}$$

**Turbulento-Rugoso**

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 * \log\left(\frac{D_i}{2 * \epsilon}\right) + 1.74$$

Siendo,

$f$ : Factor de fricción.

$Re$ : Número de Reynolds.

$\epsilon$ : Rugosidad absoluta, ft. Depende del material y estado físico de la tubería.

$D_i$ : Diámetro interno de la tubería, in.

Las pérdidas por fricción o pérdidas primarias en la tubería se calculan con la ecuación de Darcy - Weisbach:

$$H_{Lp} = f * \frac{L}{D_i} * \frac{v^2}{2 * g}$$

Siendo,

$H_{Lp}$ : Pérdidas por fricción o primarias, ft, psi.

$f$ : Factor de fricción.

$D_i$ : Diámetro interno de la tubería, in.

$v$ : Velocidad del fluido, ft/s.

$L$ : Longitud de la tubería, ft.

$g$ : Aceleración de la gravedad, m/s<sup>2</sup>, ft/s<sup>2</sup>.

Para determinar las pérdidas por accesorios y válvulas o pérdidas secundarias, se utiliza la siguiente ecuación:

$$H_{Ls} = \sum K_{acces} * \frac{v^2}{2 * g}$$

Donde,

$H_{Ls}$ : Pérdidas por accesorios y válvulas o secundarias, ft, psi.

$K_{acces}$ : Coeficiente de pérdidas por accesorios.

$v$ : Velocidad del fluido, ft/s.

$g$ : Aceleración de la gravedad,  $m/s^2$ ,  $ft/s^2$ .

Los coeficientes de pérdidas por accesorios  $K_{acces}$ , se obtienen de las figuras 7, 8 y 9 del Anexo A.

Obtenidas las pérdidas por fricción en la tubería y las pérdidas por accesorios, se calcula las pérdidas de energía total:

$$H_L = H_{Lp} + H_{Ls}$$

Siendo,

$H_L$ : Pérdidas de energía total, ft, psi.

$H_{Lp}$ : Pérdidas por fricción o primarias, ft, psi.

$H_{Ls}$ : Pérdidas por accesorios o secundarias, ft, psi.

Con los valores de pérdidas de energía total para diferentes tamaños de tubería, se realiza una gráfica de pérdidas totales versus caudales y se determinan los tamaños de tubería para el sistema, teniendo como criterio las bases de diseño del proyecto, presentadas en el capítulo 2.

## 4. EQUIPOS ROTATIVOS (BOMBAS)

Para seleccionar adecuadamente las bombas del descargadero, se debe calcular la presión de succión, la presión de descarga, el NPSH disponible y las potencias.

### 4.1 PRESIÓN DE SUCCIÓN

La presión de succión se calcula teniendo en cuenta la presión en la superficie del fluido, la elevación de líquido entre el recipiente y la bomba y las pérdidas por fricción en la línea de succión, como se muestra a continuación:

$$P_s = P_1 + \left( \frac{\Delta Z_1 \times S.G}{2,30666} \right) - H_L$$

Donde,

$P_s$  = presión de succión, psia.

$P_1$  = presión en la superficie del líquido, psia.

$\Delta Z_1$  = cabeza estática y/o de líquido en la succión de la bomba (valores positivos para niveles encima del eje de la bomba y valores negativos para niveles por debajo, ft).

$H_L$  = pérdidas de energía total en la línea de succión de la bomba, psi.

S.G = gravedad específica del líquido

### 4.2 NPSHA –CARGA NETA POSITIVA DISPONIBLE A LA SUCCIÓN

La carga neta positiva disponible a la succión se calcula con la fórmula a continuación:

$$NPSHa = \frac{(P_s - P_{VAP}) \times 2,30666}{S.G}$$

Donde,

NPSHa = carga Neta de succión disponible, ft.

$P_{VAP}$  = presión de vapor del líquido a temperatura de operación, psia.

$P_S$  = presión de succión, psia.

El NPSHa es el valor de NPSH disponible del sistema; el  $NPSH_R$  es el valor de NPSH requerido por la bomba, este dato es suministrado por el proveedor. Para evitar problemas de cavitación el NPSHa debe estar como mínimo 3 pies por encima del  $NPSH_R$ .

### 4.3 PRESIÓN DE DESCARGA

La presión de descarga de las bombas se determina con base a la presión requerida por el sistema y a las pérdidas de presión a lo largo de la línea de descarga de la bomba, incluyendo tanto los equipos, como las válvulas y accesorios instalados en la descarga.

$$P_D = P_2 + \left( \frac{\Delta Z_2 \times S.G}{2,30666} \right) + H_L$$

Donde,

$P_D$  = presión de descarga, psia.

$P_2$  = presión de entrega requerida, psia.

$\Delta Z_2$  = cabeza estática y/o de líquido en la descarga de la bomba (valores positivos para niveles encima del eje de la bomba y valores negativos para niveles por debajo), ft.

$H_L$  = pérdidas de energía total en la línea de descarga de la bomba, psi.

S.G = gravedad específica del líquido.

#### 4.4 CÁLCULO DE LA POTENCIA DE LA BOMBA

La potencia de la bomba está relacionada con el trabajo requerido para entregar el líquido a las condiciones deseadas. Para determinar la potencia hidráulica, es necesario determinar primero el diferencial de presión, las ecuaciones son:

$$\Delta P_D = P_D - P_S$$
$$HHP = \frac{Q \times \Delta P_D}{1714}$$

Donde,

HHP = potencia hidráulica de la bomba, HP.

Q = flujo volumétrico, gpm.

$\Delta P_D$  = Diferencia de presión, psi.

La potencia al freno es la potencia real de la bomba y tiene en cuenta la eficiencia debida a pérdidas incurridas por fricción de sus elementos, posible acumulación, fugas, etc. Se determina de la siguiente manera:

$$BHP = \frac{HHP}{\eta_B}$$

Donde,

BHP = potencia al freno, HP.

$\eta_B$  = eficiencia de la bomba.

Finalmente, teniendo en cuenta que el motor también tiene una eficiencia en la transmisión de potencia, se calcula la potencia requerida por estos, utilizando la siguiente ecuación:

$$HP = \frac{BHP}{\eta_M}$$

Donde,

$\eta_M$  = eficiencia del motor.

## 5. RESULTADOS

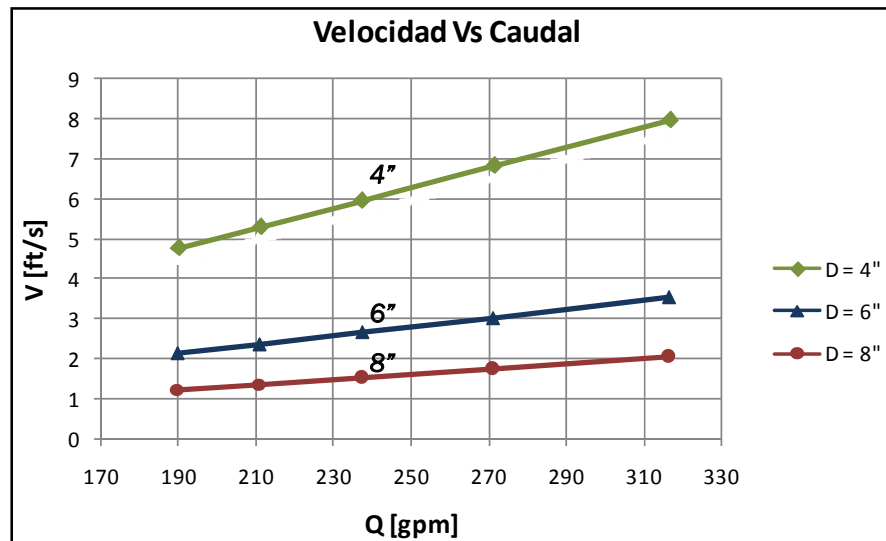
### 5.1 CÁLCULO HIDRÁULICO DE LÍNEAS

Teniendo en cuenta las bases de diseño se calculan las velocidades y las pérdidas por fricción para los tamaños de tubería STD de la tabla 7, para las condiciones del Crudo presentadas en la tabla 5 y para los caudales de la tabla 6. A continuación se presentan los resultados de los cálculos realizados.

Tabla 8. Resultados de velocidades para diferentes diámetros y caudales, para transporte de Crudo Rubiales.

Caudal (gpm)	D = 4"	D = 6"	D = 8"
	V (ft/s)	V (ft/s)	V (ft/s)
190	4,79	2,11	1,22
211,1	5,32	2,34	1,35
237,5	5,98	2,64	1,52
271,4	6,84	3,01	1,74
316,7	7,98	3,52	2,03

Figura 2. Gráfica Velocidad Vs Caudal.

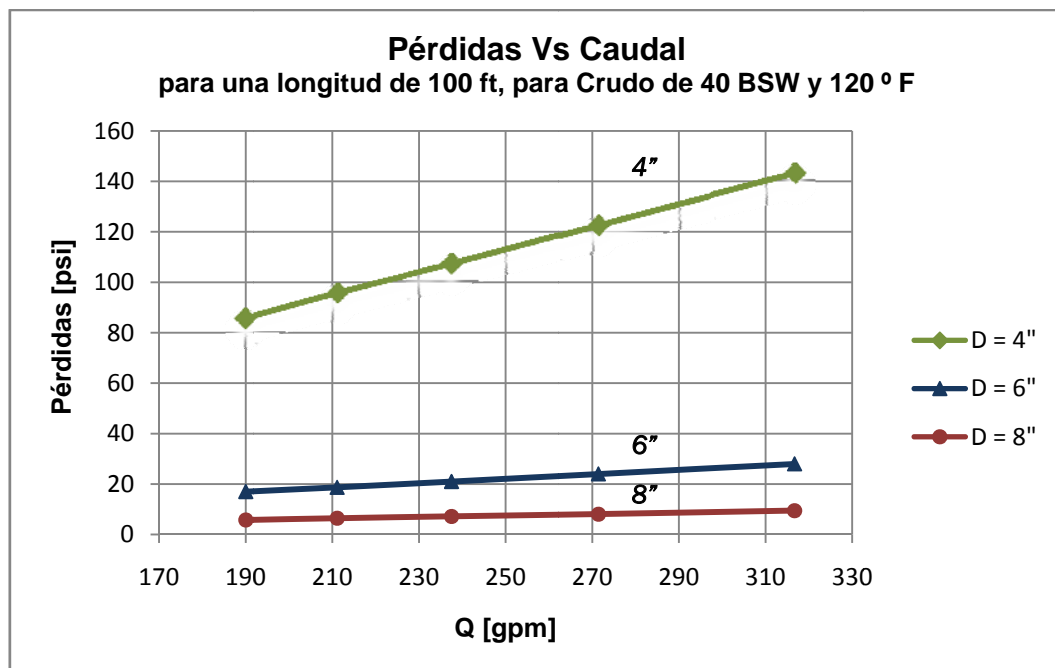


Teniendo en consideración las velocidades de referencia presentadas en la tabla 2 de este documento y analizando los resultados de velocidad obtenidos, se usa una tubería de 8" para la succión y de 6" para la descarga con un caudal de aproximadamente 237,5 gpm, pero para facilidad en la configuración y especificación de la bomba el caudal seleccionado es de 240 gpm.

Tabla 9. Resumen de cálculos de pérdidas para Crudo Rubiales de 40% BSW y 120 °F.

Caudal (gpm)	D = 4"	D = 6"	D = 8"
	<i>Pérdidas (psi)</i>	<i>Pérdidas (psi)</i>	<i>Pérdidas (psi)</i>
190	85,5	17	5,8
211,1	95,5	18,7	6,5
237,5	107	21	7,2
271,4	122,5	24	8,1
316,7	143	28	9,5

Figura 3. Gráfica Pérdidas Vs Caudal para crudo 40% BSW y 120 °F.

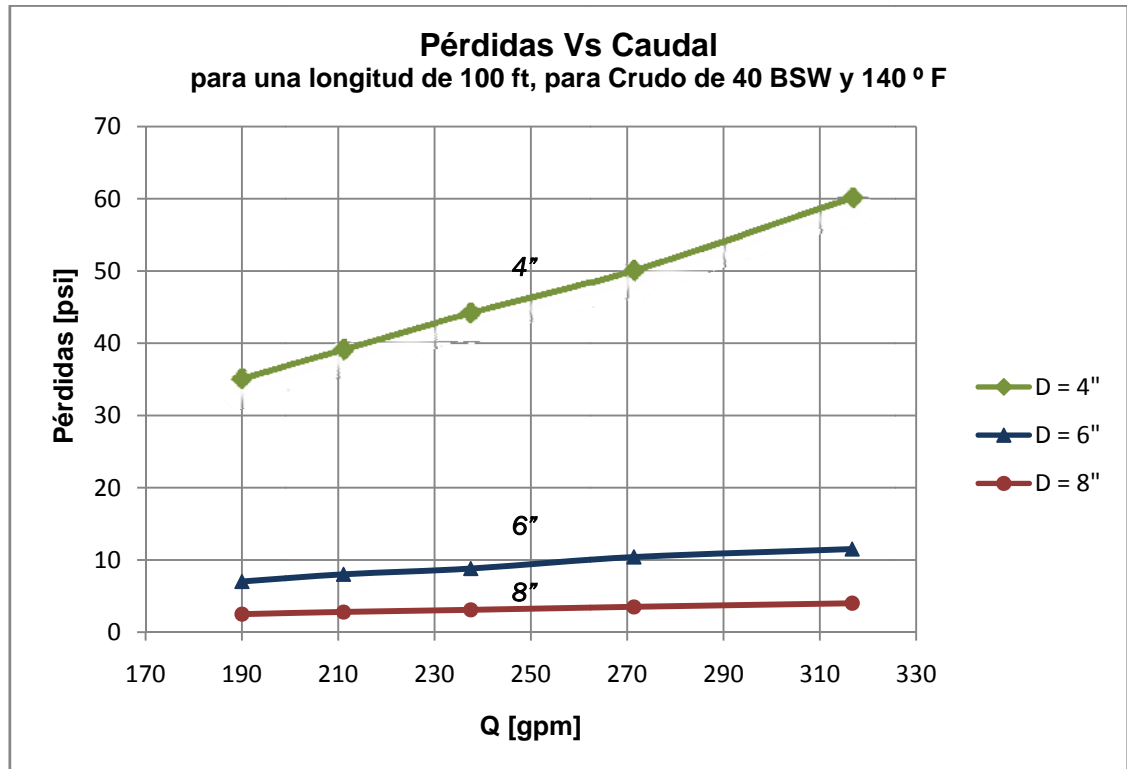


Analizando los resultados obtenidos en cuanto a pérdidas para la condición del Crudo Rubiales de 40% BSW y 120 °F, el diámetro seleccionado es el de 8" para la succión y de 6" para la descarga.

Tabla 10. Resumen de cálculos de pérdidas para Crudo Rubiales de 40% BSW y 140 °F.

Caudal (gpm)	D = 4"	D = 6"	D = 8"
	Pérdidas (psi)	Pérdidas (psi)	Pérdidas (psi)
190	35	7	2,5
211,1	39	8	2,8
237,5	44	8,8	3,1
271,4	50	10,4	3,5
316,7	60	11,5	4

Figura 4. Gráfica Pérdidas Vs Caudal para crudo 40% BSW y 140 °F.



Analizando los resultados obtenidos en cuanto a pérdidas para la condición del Crudo Rubiales de 40% BSW y 140 °F, se selecciona para el diseño del descargadero una tubería de 8" en la succión y de 6" en la descarga.

El caudal a trabajar para mejorar los tiempos de descarga es de 240 gpm, con el cual se reduce a aproximadamente 40 min la descarga de los 9500 galones de crudo de un carrotanque.

La tubería a utilizar en la succión de la bomba es de 8" y la tubería de descarga de las bombas es de 6" (Ver figura 9 en Anexo B y planos en Anexo F).

El diseño contempla un cabezal común de succión de las bombas con fluido de carrotanques para dar flexibilidad de operación al sistema y un cabezal común de succión de las bombas con fluido de los tanques, estos cabezales son de 12" (Ver figura 9 en Anexo B y planos en Anexo F).

Igualmente habrá un cabezal común de descarga de las bombas el cual es de 12" (Ver figura 9 en Anexo B y planos en Anexo F).

La tubería que va a conectar el descargadero con la troncal de envío al CPF es de 8" (Ver figura 9 en Anexo B y planos en Anexo F).

## **5.2 SELECCIÓN DE LAS BOMBAS**

**5.2.1 Datos de Entrada.** Debido a la variedad de características y propiedades con las cuales llega el fluido a ser descargado, para la selección de las bombas se presenta en la tabla 11 las propiedades para el crudo Rubiales de 40% BSW y 120 °F, el caudal, el diámetro de la tubería, las longitudes de los tramos de tubería, etc.

Tabla 11. Datos generales

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
Caudal de descarga calculado	Gpm	240
Viscosidad dinámica del Crudo Rubiales a 120 °F y 40% BSW	cP	4320
Viscosidad cinemática del Crudo Rubiales 40% BSW a 120 °F	cSt	4446,64
Densidad del Crudo Rubiales a 120 °F y 40% BSW	Lb/ft <sup>3</sup>	60,65
SG del Crudo Rubiales a 120 °F y 40% BSW		0,972
Diámetro de las líneas entre el cabezal común de succión y las bombas.	In	8
Longitud de las líneas de succión de 8 pulgadas.	Ft	15
Diámetro de las líneas entre las bombas y el cabezal común de descarga.	In	6
Longitud de las líneas de descarga de 6 pulgadas.	Ft	15
Diámetro de la línea de descarga a la línea troncal.	In	8
Longitud de la línea de descarga a la línea troncal.	Ft	170
Presión requerida en la línea troncal	psig	60
Presión atmosférica	Psi	14,1
Presión de vapor	psia	1,693
Elevación de la boquilla del carrotanque	Ft	2
Mínimo nivel de líquido en carrotanques	Ft	0,5

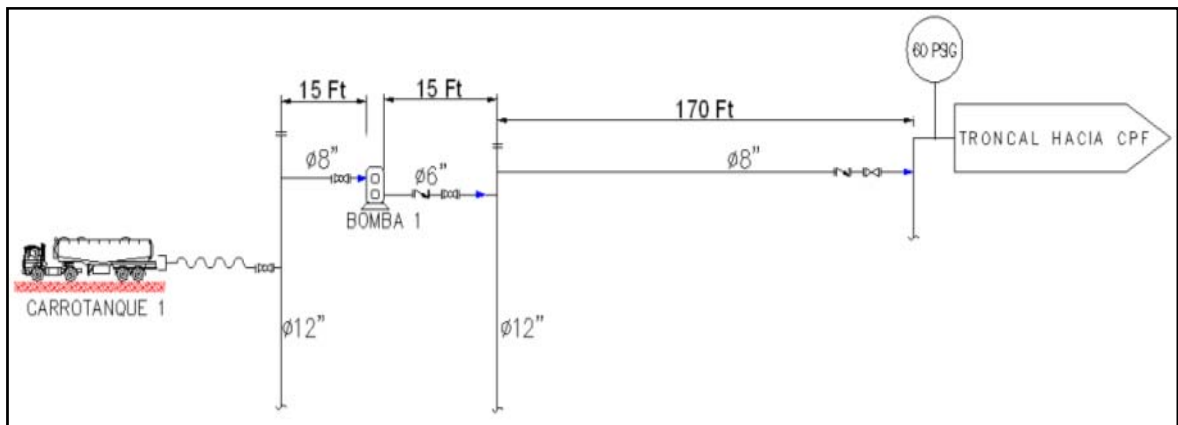
El cálculo de la potencia de la bomba, al igual que la presión de succión, la presión de descarga y el NPSH disponible se realiza con la condición más crítica presente en el descargadero, cuyo esquema se muestra en la figura 5.

De acuerdo con el esquema de la figura 5, los accesorios contemplados en las diferentes secciones de la tubería del descargadero son los presentados en la tabla 12.

Tabla 12. Accesorios en el tramo de succión y descarga.

Accesorios	Cantidad Succión	Cantidad Descarga
Codos de 90°	2	4
Válvulas de bola	2	1
Válvulas de globo	0	1
Válvulas Check	0	2
Tee	1	1
Filtros	1	0

Figura 5. Esquema de descarga de carrotanque y envío hacia la troncal.



### 5.2.2 Cálculo de la Presión de succión de las bombas

Área:

$$A = \frac{\pi * 7,981^2}{4} ; in^2$$

Se calcula el área transversal de la tubería y con el caudal al que se está trabajando se procede a calcular la velocidad.

Velocidad:

$$V = \frac{0,535}{0,347} ; ft/s$$

Tabla 13. Datos para el cálculo de velocidad

Variable	Nombre	Valor	Unidades
D	Diámetro interno	7,981	in
A	Área transversal	0,347	ft <sup>2</sup>
v	Velocidad del fluido	1,54	ft/s

Obtenida la velocidad y con la viscosidad del fluido y el diámetro se calcula el número de Reynolds con el fin de determinar el tipo de régimen del fluido, luego se determinan las pérdidas de energía por fricción, accesorios y válvulas para la línea de succión, utilizando un factor de seguridad de 1,5 debido a que adicional irá un tramo de manguera con acople rápido de aproximadamente 5 metros e igualmente considerando la caída de presión en el filtro de 2 psi.

Tabla 14. Cálculo de pérdidas en la succión.

Variable	Nombre	Valor	Unidades
L	Longitud de succión	15	ft
Re	Número de Reynolds	21	
f	Factor de fricción	2,992	
$\Sigma k_{acces}$	Coefficiente de pérdidas por accesorios y válvulas	13,8	
H <sub>Lp</sub>	Pérdida de Energía por fricción	2,4	psi
H <sub>Ls</sub>	Pérdida de Energía por accesorios, válvulas y equipos	2,3	psi
H <sub>Lk</sub>	Pérdidas de Energía totales en la succión.	4,7	psi

$$P_s = 14,1 + \left( \frac{2,5 \times 0,972}{2,30666} \right) - 4,7 = 10,45 \text{ psia}$$

**5.2.3 Cálculo del NPSH disponible.** El cálculo del NPSH se realiza con las pérdidas hidráulicas totales para el tramo de succión.

$$NPSHa = \frac{(10,45 - 1,695) \times 2,30666}{0,972} = 20,78 \text{ ft}$$

**5.2.4 Cálculo de la Presión de descarga de las bombas.** Las pérdidas en la descarga de la tubería se realiza siguiendo el procedimiento utilizado en este proyecto para el cálculo de pérdidas de energía primarias y secundarias y teniendo en cuenta el flujo en el tramo de tubería de 8" que lleva el fluido hasta la troncal, por lo tanto tenemos:

Tabla 15. Cálculo de pérdidas en la descarga.

Variable	Nombre	Valor	Unidades
L <sub>1</sub>	Longitud de descarga de 6"	15	ft
L <sub>2</sub>	Longitud de descarga de 8"	170	ft
Σk <sub>acces</sub>	Coefficiente de pérdidas por accesorios y válvulas	15,6	
H <sub>Lp</sub>	Pérdida de Energía por fricción	18,3	psi
H <sub>Ls</sub>	Pérdida de Energía por accesorios, válvulas y equipos	0,8	psi
H <sub>Lk</sub>	Pérdidas de Energía totales en la descarga.	19,1	psi

Conociendo las pérdidas y la presión requerida en la troncal, se procede a calcular la presión en la descarga.

$$P_D = 60 + 19,1 = 79,1 \text{ psig}$$

$$P_D = 79,1 \text{ psig} + 14,1 \text{ psi} = 93,2 \text{ psia}$$

**5.2.5 Cálculo de las Potencias de las bombas.** Para calcular las potencias se requiere inicialmente calcular el diferencial de presión y con la eficiencia de la bomba del 60% por ser un fluido viscoso, se obtiene la potencia al freno BHP.

$$\Delta P_D = 93,2 - 10,45 = 82,8 \text{ psi}$$

$$\text{HHP} = \frac{240 \times 82,5}{1714} = 11,6 \text{ HP}$$

$$\text{BHP} = \frac{11,6}{0,60} = 19,33 \text{ HP}$$

Las 5 bombas deben tener las siguientes condiciones: 240 gpm, NPSHa de 20,7 ft, Presión de descarga de 79,1 psig y potencia al freno de 19,33 BHP (Ver figura 10 en Anexo C).

Por la alta viscosidad del fluido que llega al descargadero, la bomba debe ser de desplazamiento positivo tipo rotativa y debe consistir de carcasa, elementos rotativos, motor eléctrico, reductor, base, acople, rodamientos y empaquetaduras y deben cumplir con el Código API 676 u otro equivalente que ofrezca mejoras en el diseño y fabricación y estar en capacidad de operar continuamente bajo las condiciones de operación.

Debe operar a las velocidades recomendadas por el fabricante, determinadas por el tipo de bomba, la viscosidad y demás características del líquido bombeado, la presión de descarga dada por las condiciones hidráulicas de la línea y la presión de succión de la bomba.

El conjunto motor-bomba debe ser montado en una base común fabricada de acero. El conjunto debe ser pre-alineado en fábrica o en el sitio de ensamble para asegurar una apropiada alineación en la instalación final.

La bomba debe ser probada a una presión que resulte de tomar el mayor valor entre: 1.5 veces la presión de operación ó 100 psig.

La prueba es satisfactoria si la presión se mantiene estable durante mínimo 30 minutos.

El acople entre el eje del motor eléctrico, el reductor y el eje de la bomba debe ser flexible o de acuerdo a las normas del fabricante.

Todos los rodamientos de la bomba deben ser seleccionados por el Proveedor para satisfacer los requisitos por inmersión y las temperaturas máximas que se pueden presentar durante el proceso y operación del equipo.

La bomba debe estar equipada con sellos mecánicos de fácil mantenibilidad y debe tener una placa de identificación en acero inoxidable en la cual se registran los siguientes datos:

- Número de Identificación de la Orden de compra.
- Número de serie de la bomba.
- Tamaño, modelo y tipo de bomba.
- Capacidad-gpm.
- Potencia.
- Nombre del Fabricante.
- Velocidades mínima y máxima de operación-rpm.
- Presión máxima admisible de operación-psig.
- Presión de prueba-psig.
- Peso de la unidad completa (incluyendo acople, patín y motor).

Los procedimientos de preparación y pintura de superficies deben estar de acuerdo con los procedimientos estándar registrados por el fabricante. El equipo debe estar adecuadamente drenado, seco y se debe cubrir internamente con un componente adecuado para prevenir la corrosión.

Las pinturas que se apliquen deben ser resistentes a los hidrocarburos y a las temperaturas máximas de operación de los equipos y las inducidas por el producto bombeado.

Todas las superficies maquinadas o sin pintura expuestas a la intemperie durante el envío o almacenamiento deben ser recubiertas con un compuesto adecuado para prevenir la corrosión que sea de fácil remoción.

### **5.3 SELECCIÓN DEL MOTOR**

**5.3.1 Potencia del Motor.** Para la selección del motor debemos inicialmente calcular la potencia, utilizando una eficiencia mecánica del 85%, esto es:

$$\text{HP} = \frac{19,33}{0,85} = 22,74 \text{ HP}$$

**5.3.2 Velocidad del Motor.** La velocidad de los motores AC está determinada por el número de polos y la frecuencia.

Para una frecuencia de 60 Hz y 4 polos, la velocidad es:

$$\text{velocidad síncrona} = \frac{120 * 60}{4} = 1800 \text{ r.p.m}$$

Para un motor de 25 Hp, 60 Hz y velocidad de 1800 rpm, la asignación NEMA de la carcasa (Frame) es 284T (Ver figura 11 Anexo D).

El motor debe ser TEFC, de tipo trifásico 480 V, 60 Hz, para ser instalado en área clasificada clase 1, división 2. Debe tener aislamiento clase F, Factor de servicio de 1,15 y el nivel de ruido a 1 m no debe exceder 85 dB.

El motor de la bomba empleará para el arranque un arrancador suave.

Los motores deben tener terminales para la conexión del sistema de puesta a tierra.

El reductor debe ser suministrado y calculado por el proveedor de las bombas, y su relación de reducción debe ser tal que proporcione la velocidad de la bomba requerida para cumplir con las condiciones del proceso.

## CONCLUSIONES

Se cumplió a cabalidad el objetivo del proyecto de dimensionar la tubería y seleccionar las bombas del descargadero bajo parámetros de diseño, involucrando las propiedades del fluido, la velocidad del fluido y las pérdidas de energía.

Con el sistema diseñado se logra el objetivo de recibo de cinco carrotanques simultáneamente en cinco bahías, permitiendo evacuar cada carrotanque, en 40 minutos aproximadamente utilizando las cinco bombas, reduciendo de 45 minutos a 40 minutos el tiempo de descarga y aumentando la capacidad de recibo de crudo.

Se cumplió con el objetivo de brindar flexibilidad de operación al sistema, permitiendo realizar las condiciones requeridas.

- La condición de encender mayor cantidad de bombas por carrotanque en el momento que se reciban menos de cinco carrotanques para disminuir aún más el tiempo de descarga se logra, con el cabezal de succión de carrotanques de 12", que tiene instaladas las mangueras de acople rápido y conectadas las líneas de succión de todas las bombas.
- La condición de envío del fluido a los tanques de almacenamiento, se cumple al utilizar el cabezal común de descarga de las bombas de 12" el cual, por medio de dos líneas de 8" se conecta a la tubería existente para el llenado de los tanques. El operador selecciona a cual o cuales de los seis tanques va a enviar el fluido, realizando la respectiva apertura de válvulas antes de dicha operación.
- Para la condición de descargar el fluido directo a la troncal de transferencia a la central de facilidades de producción (CPF), sin pasar por los tanques de

almacenamiento se logra, utilizando el cabezal común de descarga de las bombas de 12" y manteniendo cerradas las válvulas de las líneas de 8", que permiten el paso del fluido hacia los tanques. El fluido es enviado hacia la troncal a través de la línea de 8", instalada para tal fin.

- La condición de envío del fluido desde los tanques de almacenamiento a la troncal cuando no se estén descargando carrotanques se alcanza, utilizando las bombas del descargadero que se requieran y el cabezal de succión de tanques de almacenamiento, el cual se interconecta por medio de tubería de 6" con las salidas de fluido de los tanques.

Con este diseño la capacidad del descargadero aumenta de 10.857 BOPD a 29.610 BOPD, lo que significa que tomando un tiempo promedio de maniobra de 15 minutos para estacionamiento, acople de manguera, abertura de escotillas, manipulación de válvulas, etc., se pasa a descargar de 48 a 131 carrotanques por día.

Este proyecto de grado se realizó durante la práctica empresarial y hace parte del diseño del descargadero para Campo Rubiales, Meta en la Empresa Ingeniería Strycon, en donde además del diseño de las facilidades mecánicas presentadas en este documento, se desarrollaron las facilidades civiles, eléctricas, procesos, instrumentación y tubería, involucrando un trabajo interdisciplinario bajo el liderazgo del autor del proyecto.

## BIBLIOGRAFÍA

API STANDARD 676, Positive Displacement Pump Rotary. Second Edition, December 1994.

ASME B31.3. Process Piping, 1999 Edition.

ASME B31.4. Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and other Liquids, 1998 Edition.

BIRD, Biron., STEWART, Warren E., LIGHTFOOT, Edwin N. Fenómenos de transporte. México: Ediciones REPLA, S.A, 1987.

CRANE. Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías. México: MCGRAW HILL.

DAILY, James W. HARLEMAN, Donald R.F. Dinámica de los Fluidos con aplicaciones de ingenierías. México: Editorial TRILLAS, 1975.

EMPRESA COLOMBIANA DE PETROLEOS, Distrito de Refinería. Equipo y principios de refinación. Colombia: ECOPETROL.

FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. Mecánica de Fluidos. Universidad de Cantabria: Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética.

FLOWSERVE, Corporation. Cameron Hydraulic data. A handy reference on the subject of hydraulics, and steam. Nineteenth Edition, First Printing. Canada: Edited by C.C Healt, 2002.

KARASSIK, Igor J. MESSINA, Joseph P. COOPER, Paul. HEALD, Charles C. Pump Handbook. Estados Unidos: McGRAW HILL, Tercera Edición. 2001.

KENNETH, J. Bombas Selección, uso y mantenimiento. McGRAW-HILL. México. 1998.

# **ANEXOS**

## ANEXO A. TABLAS PARA CÁLCULO DE COEFICIENTES DE FRICCIÓN EN VÁLVULAS Y ACCESORIOS

Figura 6. Tabla de Factores de Fricción  $f_t$

FACTORES DE FRICCIÓN PARA TUBERÍAS COMERCIALES, NUEVAS, DE ACERO, CON FLUJO EN LA ZONA DE TOTAL TURBULENCIA													
Diámetro mm	15	20	25	32	40	50	65, 80	100	125	150	200,250	300400	450-600
Nominal pulg	½	¾	1	1¼	1½	2	2½, 3	4	5	6	8-10	12-16	18-24
Factor de fricción ( $f_t$ )	.027	.025	.023	.022	.021	.019	.018	.017	.016	.015	.014	.013	.012

Fuente: CRANE. Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías. México: McGRAW HILL.

Figura 7. Fórmulas para el Cálculo del Coeficiente  $K_{\text{aces}}$

**Fórmula 1**

$$K_2 = \frac{0.8 \left( \text{sen } \frac{\theta}{2} \right) (1 - \beta^2)}{\beta^4} = \frac{K_1}{\beta^4}$$

**Fórmula 2**

$$K_2 = \frac{0.5 (1 - \beta^2) \sqrt{\text{sen } \frac{\theta}{2}}}{\beta^4} = \frac{K_1}{\beta^4}$$

**Fórmula 3**

$$K_2 = \frac{2.6 \left( \text{sen } \frac{\theta}{2} \right) (1 - \beta^2)^2}{\beta^4} = \frac{K_1}{\beta^4}$$

**Fórmula 4**

$$K_2 = \frac{(1 - \beta^2)^2}{\beta^4} = \frac{K_1}{\beta^4}$$

**Fórmula 5**

$$K_2 = \frac{K_1}{\beta^4} + \text{Fórmula 1} + \text{Fórmula 3}$$

$$K_2 = \frac{K_1 + \text{sen } \frac{\theta}{2} [0.8 (1 - \beta^2) + 2.6 (1 - \beta^2)^2]}{\beta^4}$$

**Fórmula 6**

$$K_2 = \frac{K_1}{\beta^4} + \text{Fórmula 2} + \text{Fórmula 4}$$

$$K_2 = \frac{2.1 + 0.5 \sqrt{\text{sen } \frac{\theta}{2}} (1 - \beta^2) + (1 - \beta^2)^2}{\beta^4}$$

**Fórmula 7**

$$K_2 = \frac{K_1}{\beta^4} + \beta \text{ (Fórmula 2 + Fórmula 4), cuando } \theta = 180^\circ$$

$$K_2 = \frac{K_1 + \beta [0.5 (1 - \beta^2) + (1 - \beta^2)^2]}{\beta^4}$$

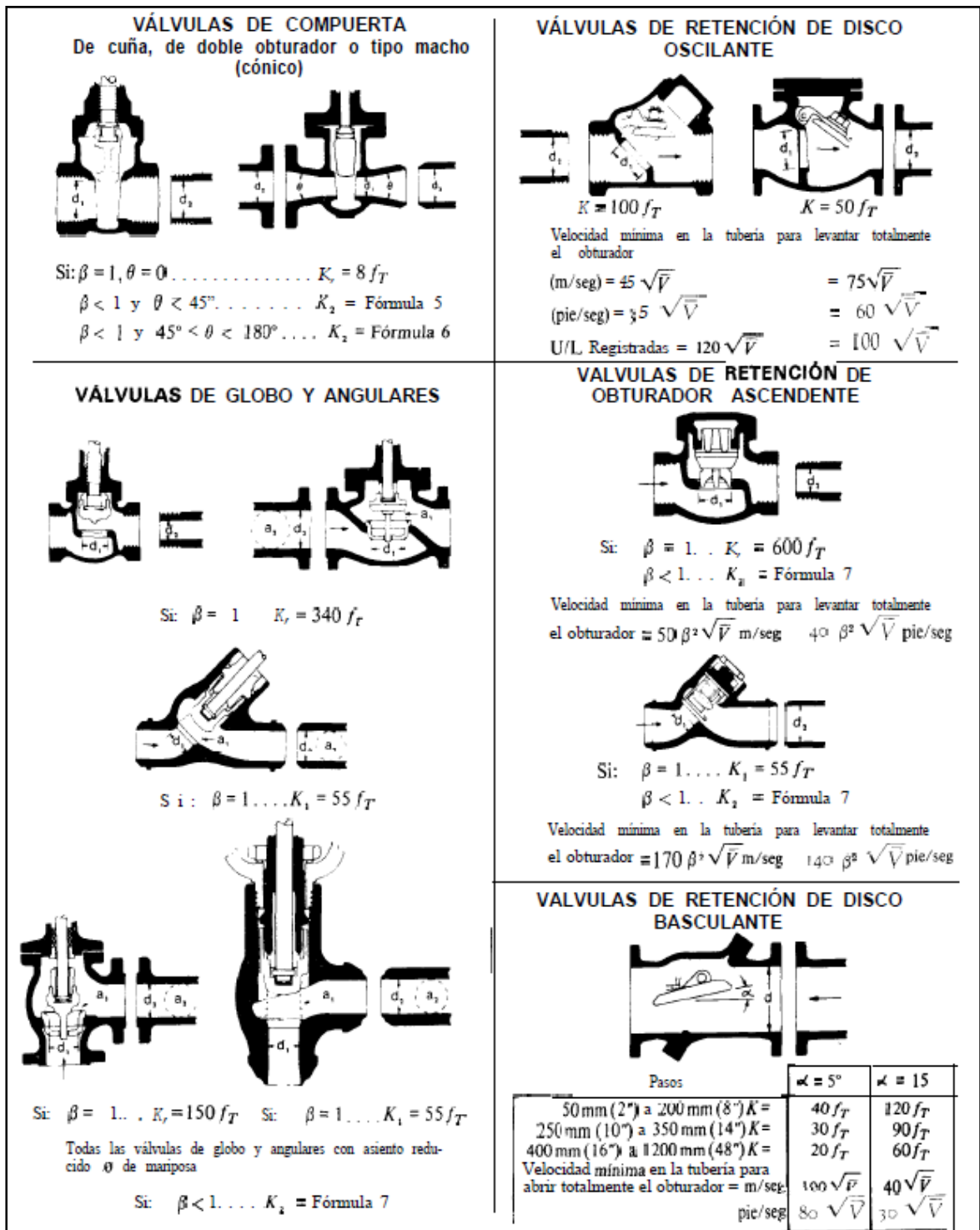
$\beta = \frac{d_1}{d_2}$

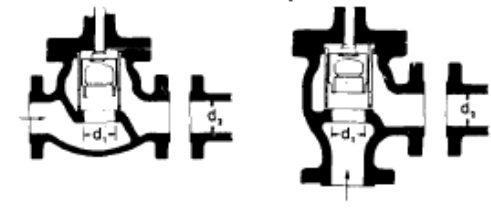
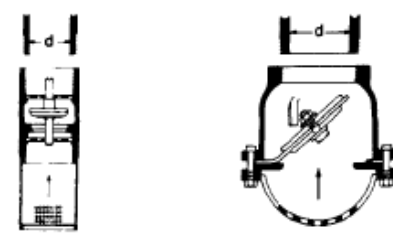
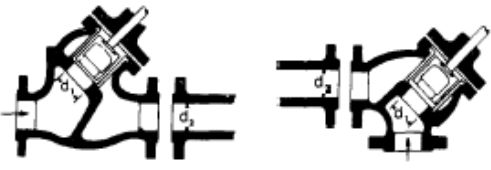
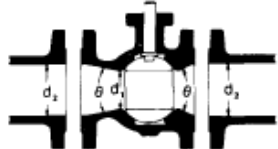

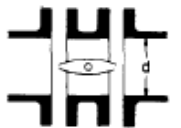
$\beta^2 = \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2 = \frac{a_1}{a_2}$

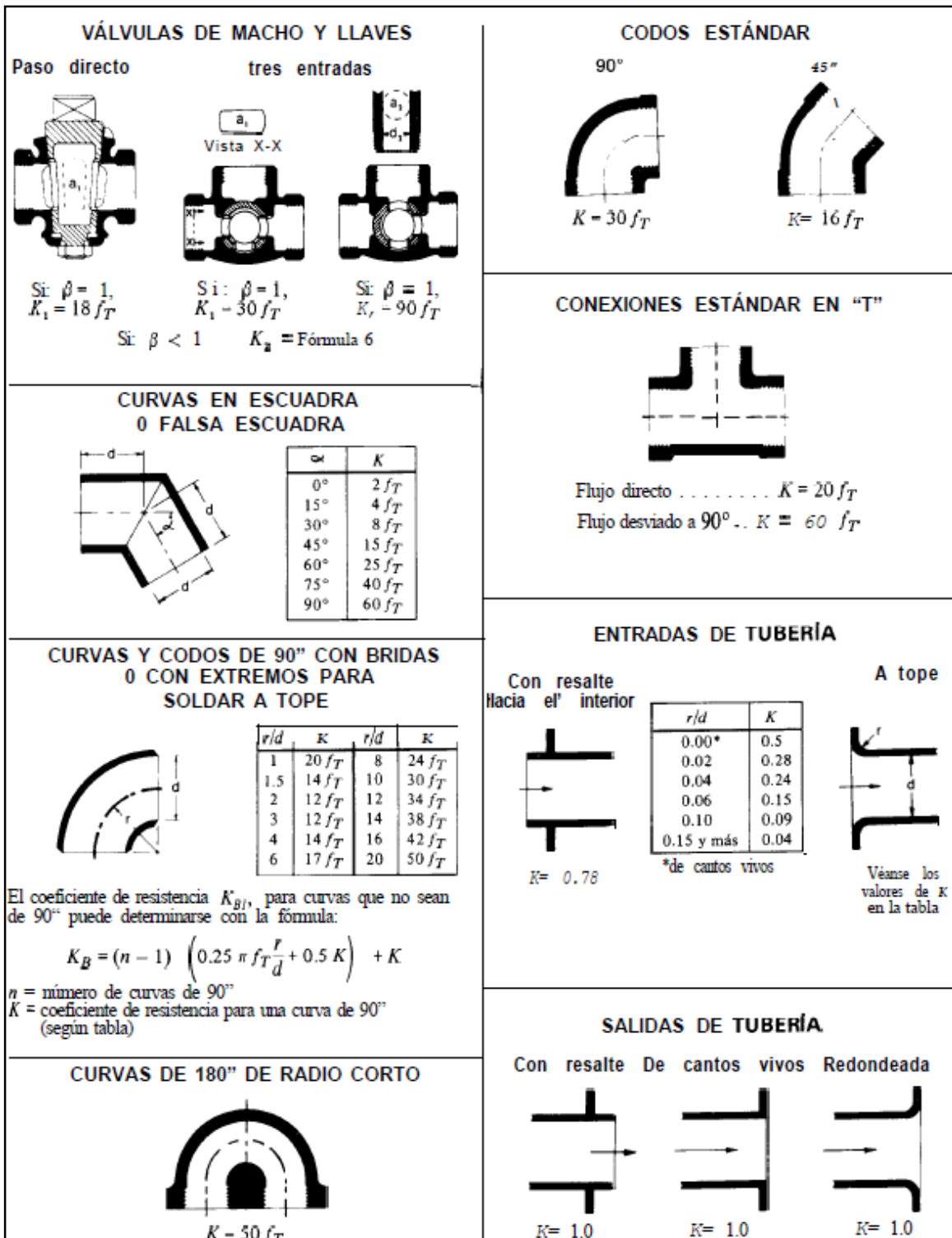
El subíndice 1 define dimensiones y coeficiente para el diámetro menor. El subíndice 2 se refiere al diámetro mayor.

Fuente: CRANE. Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías. México: McGRAW HILL.

Figura 8. Coeficientes de Resistencia válidos para válvulas y accesorios.



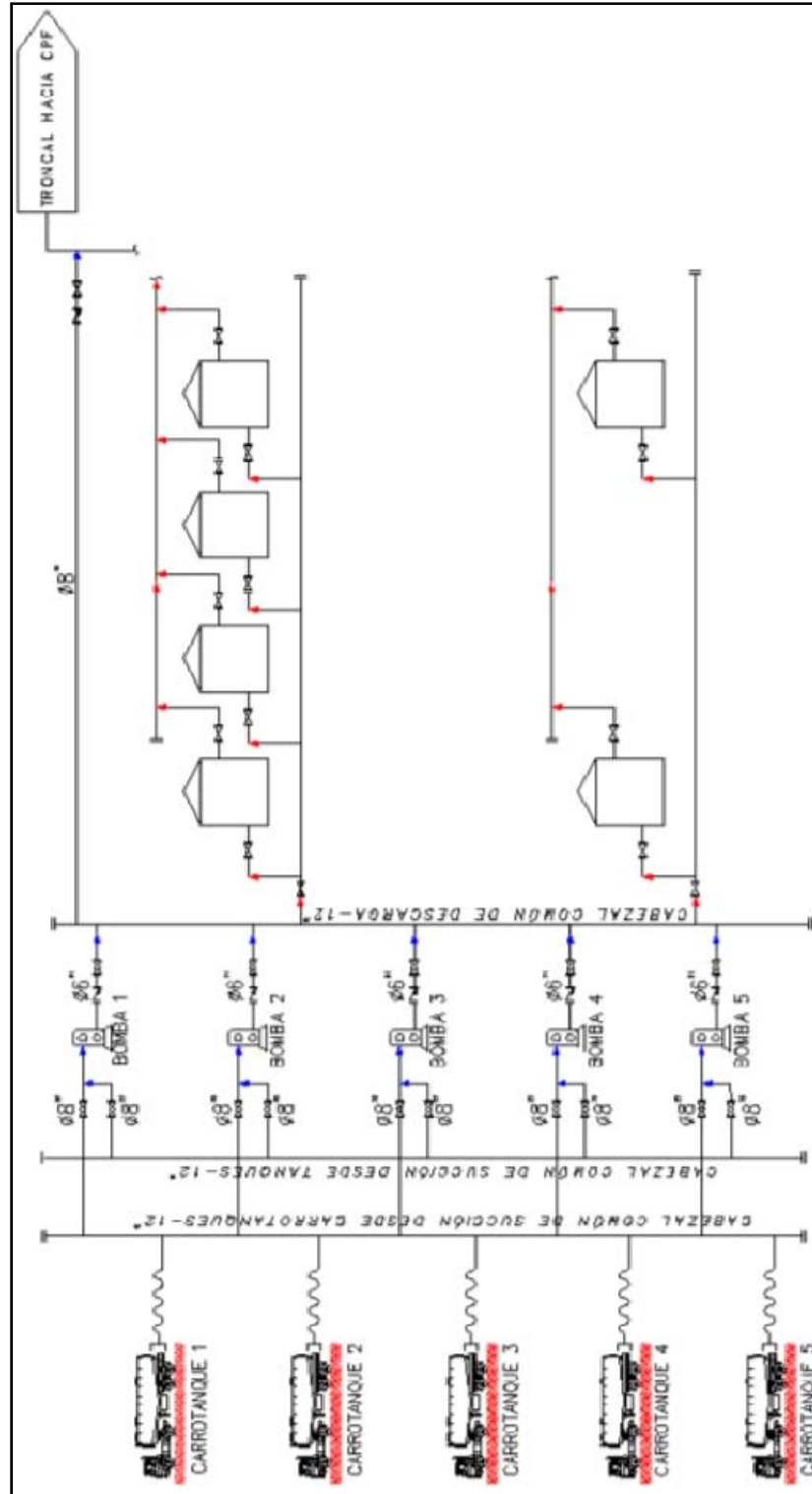
<p style="text-align: center;"><b>VÁLVULAS DE RETENCIÓN Y CIERRE</b> (Tipos recto y angular)</p>  <p style="text-align: center;">Si: <math>\beta = 1 \dots K_1 = 400 f_T</math>      <math>\beta = 1 \dots K_1 = 200 f_T</math>  <math>\beta &lt; 1 \dots K_2 = \text{Fórmula 7}</math>      <math>\beta &lt; 1 \dots K_2 = \text{Fórmula 7}</math></p> <p>Velocidad mínima en la tubería para levantar totalmente el obturador  m/seg <math>\approx 70 \beta^2 \sqrt{V}</math>      Velocidad mínima en la tubería para levantar totalmente el obturador  = <math>95 \beta^2 \sqrt{V}</math>  pie/seg = <math>55 \beta^2 \sqrt{V}</math>      = <math>75 \beta^2 \sqrt{V}</math></p>	<p style="text-align: center;"><b>VÁLVULAS DE PIE CON FILTRO</b></p> <p style="text-align: center;">Obturador ascendente      Obturador oscilante</p>  <p style="text-align: center;"><math>K = 420 f_T</math>      <math>K = 75 f_T</math></p> <p>Velocidad mínima en la tubería para levantar totalmente el obturador  m/seg = <math>20 \sqrt{V}</math>      Velocidad mínima en la tubería para levantar totalmente el obturador  = <math>45 \sqrt{V}</math>  pie/seg = <math>15 \sqrt{V}</math>      = <math>35 \sqrt{V}</math></p>
 <p style="text-align: center;">Si: <math>\beta = 1 \dots K_1 = 300 f_T</math>      <math>\beta = 1 \dots K_1 = 350 f_T</math>  <math>\beta &lt; 1 \dots K_2 = \text{Fórmula 7}</math>      <math>\beta &lt; 1 \dots K_2 = \text{Fórmula 7}</math></p> <p>velocidad mínima en la tubería para abrir totalmente el obturador  m/seg = <math>75 \beta^2 \sqrt{V}</math>      pie/seg = <math>60 \beta^2 \sqrt{V}</math></p>	<p style="text-align: center;"><b>VÁLVULAS DE GLOBO</b></p>  <p style="text-align: center;">Si: <math>\beta = 1, \theta = 0 \dots K_1 = 3 f_T</math>  <math>\beta &lt; 1</math> y <math>\theta &lt; 45^\circ \dots K_2 = \text{Fórmula 5}</math>  <math>\beta &lt; 1</math> y <math>45^\circ &lt; \theta &lt; 180^\circ \dots K_2 = \text{Fórmula 6}</math></p>
 <p style="text-align: center;"><math>\beta = 1 \dots K_1 = 55 f_T</math>      <math>\beta = 1 \dots K_1 = 55 f_T</math>  <math>\beta &lt; 1 \dots K_2 = \text{Fórmula 7}</math>      <math>\beta &lt; 1 \dots K_2 = \text{Fórmula 7}</math></p> <p>Velocidad mínima en la tubería para levantar totalmente el obturador  mg/seg = <math>170 \beta^2 \sqrt{V}</math>      (pie/seg) = <math>140 \beta^2 \sqrt{V}</math></p>	<p style="text-align: center;"><b>VÁLVULAS DE MARIPOSA</b></p>  <p>Diámetro 50 mm (2") a 200 mm (8") . . . . . <math>K = 45 f_T</math>  Diámetro 250 mm (10") a 350 mm (14") . . . <math>K = 35 f_T</math>  Diámetro 400 mm (16") a 600 mm (24") . . . <math>K = 25 f_T</math></p>



Fuente: CRANE. Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías. México: McGRAW HILL.

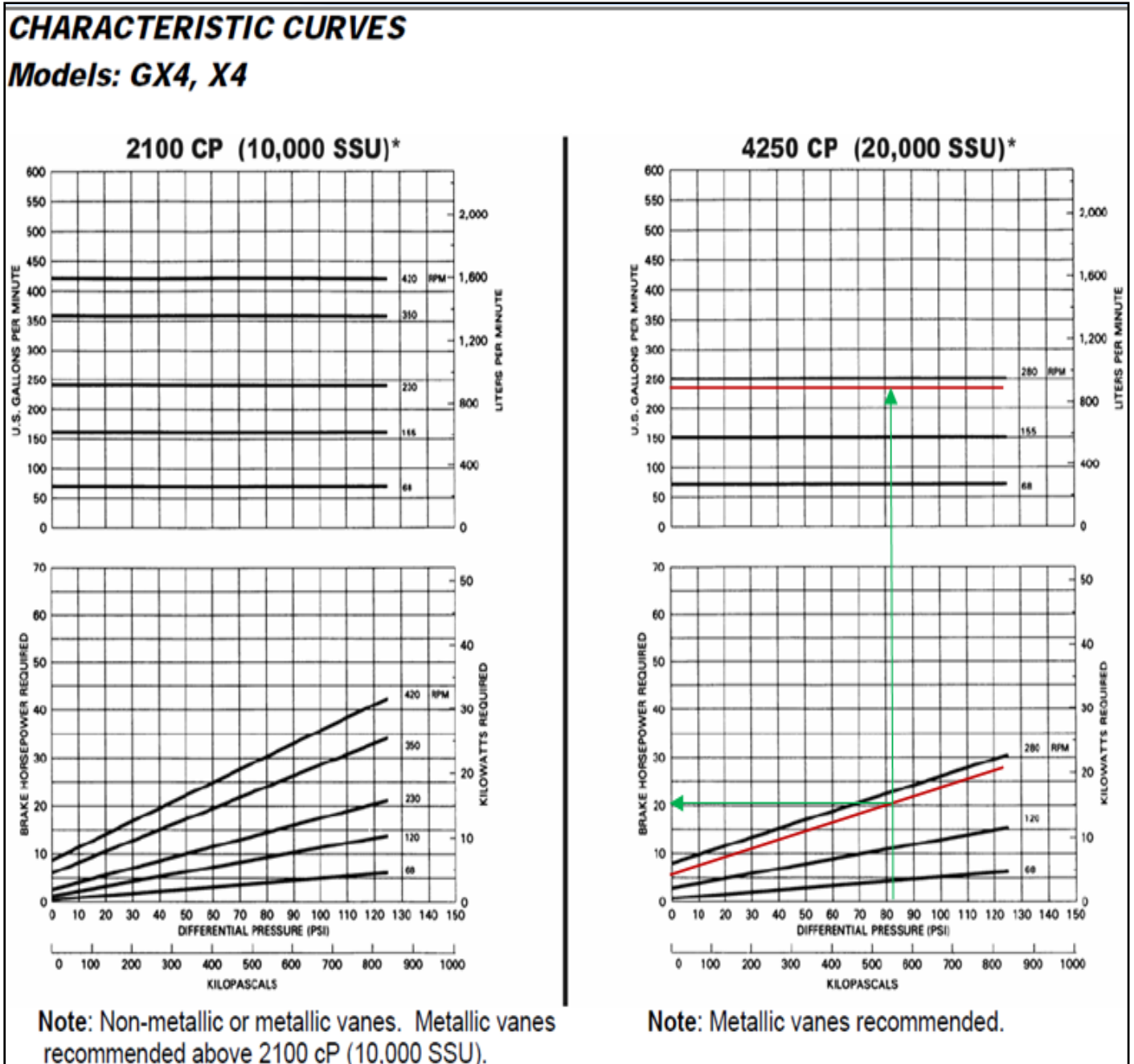
## ANEXO B. SISTEMA DE DESCARGA DISEÑADO

Figura 9. Sistema de Descarga diseñado.



## ANEXO C. CURVA DE FUNCIONAMIENTO DE LAS BOMBAS


Figura 10. Curva de funcionamiento de las bombas del descargadero, para una bomba tipo paletas deslizantes.



Fuente: <http://www.blackmer.com/myapp/pdf/101-031.pdf>

## ANEXO D. CATÁLOGO DE MOTORES

Figura 11. Catálogo de motores.

Motores trifásicos jaula de ardilla, alta eficiencia, totalmente cerrados						
Totalmente cerrados con ventilación exterior Montaje: Horizontal (F1) Aislamiento Clase F Diseño Nema B según Norma MG-1 33°C temp. ambiente a una altitud de 2300msnm 40°C temp. ambiente a una altitud de 1000msnm				Motores a prueba de explosión para atmósferas de División 1, Clase 1, Grupo D - Clase 2, Grupos F&G Para otra clasificación, favor de consultarnos. Factor de Servicio: 1.0 Motores RGZZESD 1.15 Motores RGZE y RGZESD 1.25 Motores RGZE y RGZFSD Armazones 143T a 256T en 2 y 4 Polos		 PRODUCTO CERTIFICADO S1097
Potencia en HP	Descripción			Modelo		
	Velocidad en RPM	Tensión a 60 Hz en Volts	Tamaño Armazón NEMA	RGZE-B/C Con brida C Catálogo Spiridon	RGZE-JM BC + espiga JM No. de parte	RGZZESD con brida C A prueba de explosión Catálogo Spiridon
0.75	1800	220/440	143TC	1LA01434YK31	1LA01434YK39	no disponible
	1200	220/440	143TC	1LA01436YK31	*	no disponible
	900	220/440	145TC	*	*	no disponible
1	3600	220/440	143IC	1LA01432YK31	1LA01432YK39	1MJ91432YP31
	1800	220/440	143TC	1LA01444YK31	1LA01444YK39	1MJ91444YP31
	1200	220/440	145TC	*	*	*
1.5	3600	220/440	182TC	*	*	*
	1800	220/440	143TC	1LA01442YK31	1LA01442YK39	1MJ91442YP31
	1200	220/440	145TC	1LA01454YK31	1LA01454YK39	1MJ91454YP31
2	3600	220/440	182TC	*	*	*
	1800	220/440	184TC	*	*	*
	1200	220/440	184TC	*	*	*
3	3600	220/440	213TC	1LA01452YK31	1LA01452YK39	1MJ91452YP31
	1800	220/440	145TC	1LA01464YK31	1LA01464YK39	1MJ91464YP31
	900	220/440	184TC	*	*	*
5	3600	220/440	213TC	1LA01822YK31	1LA01822YK39	1MJ91822YP31
	1800	220/440	182TC	1LA01822YK38	A7810000001987	*
	900	220/440	182TC	1LA01824YK31	1LA01824YK39	1MJ91824YP31
7.5	3600	220/440	187TCH	1LA01824YK38	A7810000001997	*
	1800	220/440	215TC	*	*	*
	900	220/440	215TC	*	*	*
10	3600	220/440	184TC	1LA01842YK31	1LA01842YK39	1MJ91842YP31
	1800	220/440	184TCH	1LA01842YK38	A7882500008154	*
	900	220/440	184TC	1LA01844YK31	1LA01844YK39	1MJ91844YP31
15	3600	220/440	184TCH	1LA01844YK38	A7810000003930	*
	1800	220/440	215TC	*	*	*
	900	220/440	254TC	*	*	*
20	3600	220/440	213TC	1LA02132YK31	1LA02132YK39	1MJ92132YP31
	1800	220/440	213TC	1LA02134YK31	1LA02134YK39	1MJ92134YP31
	900	220/440	254TC	*	*	*
25	3600	220/440	256TC	*	*	*
	1800	220/440	215TC	1LA02152YK31	1LA02152YK39	1MJ92152YP31
	900	220/440	215TC	1LA02154YK31	1LA02154YK39	1MJ92154YP31
30	3600	220/440	256TC	*	*	*
	1800	220/440	284TC	1LA02542FE77	1LA02542YK39	1MJ92542YP31
	900	220/440	254TC	1LA02544FE77	1LA02544YK39	1MJ92544YP31
40	3600	220/440	284TC	*	*	*
	1800	220/440	284TC	*	*	*
	900	220/440	286TC	*	*	*
50	3600	220/440	324TC	1LA02562FE77	1LA02562YK39	1MJ92562YP31
	1800	220/440	215TC	1LA02564FE77	1LA02564YK39	1MJ92564YP31
	900	220/440	324TC	*	*	*
60	3600	220/440	326TC	*	*	*
	1800	220/440	284TSC	1LA02842FE78	A7810000002058	*
	900	220/440	284TC	1LA02844FE77	*	*
75	3600	220/440	324TC	*	*	*
	1800	220/440	324TC	*	*	*
	900	220/440	326TC	*	*	*
100	3600	220/440	286TSC	1LA02862FE78	A7810000002082	*
	1800	220/440	286TC	1LA02864FE77	*	*
	900	220/440	326TC	*	*	*
150	3600	220/440	364TC	*	*	*
	1800	220/440	326TC	*	*	*
	900	220/440	364TC	*	*	*

Fuente: [http://www.siemens.com.mx/A&D/Data/Cat\\_motores\\_Siemens.pdf](http://www.siemens.com.mx/A&D/Data/Cat_motores_Siemens.pdf)

## ANEXO E. REGISTRO FOTOGRÁFICO

### VISITA A CAMPO RUBIALES, META SEPTIEMBRE DEL 2009

Fotografía 1. Antiguo descargadero de carrotanques.



Fotografía 2. Acceso de Carrotanques al Antiguo Descargadero.



## REGISTRO FOTOGRÁFICO AVANCES DE LAS OBRAS DEL DESCARGADERO MARZO 2010

Fotografía 3. Sistema de succión de las bombas.



Fotografía 4. Sistema de alivio de las bombas.



Fotografía 5. Sistema de descarga de las bombas.



Fotografía 6. Sistema de encendido y apagado de las bombas.



Fotografía 7. Conexiones para mangueras con acople rápido.



## **ANEXO F. PLANOS DE DISEÑO DEL DESCARGADERO**