

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**



**REDISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO DE CRUDO HAMACA BLEND  
DESDE LA PLANTA PETROPIAR HASTA LA PLATAFORMA SUR DEL  
TERMINAL JOSÉ ANTONIO ANZOÁTEGUI**

**Realizado por:**

**JOSÉ ISIDRO MAGO BELLORÍN**

**Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como requisito  
parcial para optar al título de:**

**INGENIERO MECÁNICO**

**Puerto La Cruz, Junio de 2009**

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**



**REDISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO DE CRUDO HAMACA BLEND  
DESDE LA PLANTA PETROPIAR HASTA LA PLATAFORMA SUR DEL  
TERMINAL JOSÉ ANTONIO ANZOÁTEGUI**

**ASESORES:**

---

**Prof. José Rengel  
Asesor Académico**

---

**Ing. Luís Pereira  
Asesor Industrial**

**Puerto La Cruz, Junio de 2009**

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE**  
**NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**  
**DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**



**REDISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO DE CRUDO HAMACA BLEND  
DESDE LA PLANTA PETROPIAR HASTA LA PLATAFORMA SUR DEL  
TERMINAL JOSÉ ANTONIO ANZOÁTEGUI**

**JURADO**

El Jurado hace constar que asignó a esta Tesis la clasificación de:

**EXCELENTE**

---

**Prof. José Rengel**  
**Asesor Académico**

---

**Prof. Simón Bittar**  
**Jurado Principal**

---

**Prof. Orlando Ayala**  
**Jurado Principal**

**Puerto La Cruz, Junio de 2009**

## RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 44 del Reglamento de Trabajos de Grado de la Universidad de Oriente:

“Los Trabajos de Grado son propiedad exclusiva de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”.

## DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía y mi fortaleza en todo momento. Te dedico todos mis logros y en especial este, porque todo lo que soy lo debo a ti, Mi Señor.

A mi mamá y a mis hermanos, porque son el motivo de mis estudios y la principal razón de mis sueños.

A mis amigos y familiares, quienes han creído en mí, y me han ayudado aun sin esperar nada a cambio.

A mi princesa, por ser mi otra mitad.

A todos ustedes los amo mucho y les dedico este *Mi Gran Sueño*.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres porque me han sabido guiar por el camino correcto y formaron la base del hombre que soy. En especial a mi Madre quien es lo más grande que tengo en el mundo y mi mayor motivo de inspiración.

A mis hermanos que siempre me han apoyado incondicionalmente, brindándome su amistad, cuidado y ayuda, a pesar de las circunstancias.

A mis tíos (Migdalia, Sonia y Ennio), quienes hicieron posible que pudiera estudiar esta carrera en la Universidad de Oriente. Gracias por brindarme casa, sustento, cuidado y amor durante estos todos estos años.

A mis primos por su apoyo, en especial a Josef que es mi ejemplo a seguir, su constancia y determinación me inspiraron a continuar en medio de las dificultades. Gracias por tu amistad y por enseñarme tantas cosas desde que llegué al puerto.

A mis abuelas, dos mujeres maravillosas quienes han estado pendiente en todo momento de mi, para darme de su amor, cuidado y consejos para enfrentar la vida.

A mi viejo (Rufo), porque cuando las cosas no han parecido estar muy bien, tu estuviste allí para ayudarnos a mis hermanos y a mi.

A mi novia, quien me ha ayudado tanto en la realización de este trabajo que si se pudiera sería mi compañera de tesis, gracias Mi Bella.

A mis asesores, por su apoyo y dedicación para la realización de esta gran meta de mi vida. Gracias por ayudarme en todo lo que les fue posible.

A mis amigos, por ser ese regalo tan especial que DIOS me ha dado, a quienes defino con esta canción de Marcos Vidal (Mi Regalo):

“no son muchos pero DIOS los puso allí,  
un poquito más cercanos, me los regalo a mi,  
para hacerme comprender un poco más  
el calibre del amor de mi Padre celestial.  
No son muchos,  
pero no los hay mejores en la tierra,  
sin temor a los leones en la arena,  
solo pendientes de que alguien me proteja,  
aunque el precio sea mayor,  
son amigos,  
y no tengo que dar nombres o apellidos...  
...porque ellos mismos ya se saben aludidos”.

A DIOS, QUIEN ME CONCEDIÓ LA VIDA Y LA ENERGÍA PARA REALIZAR ESTE TRABAJO, PERO SOBRETUDO POR DARME EL PRIVILEGIO DE CONOCER A TODAS ESTAS PERSONAS TAN MARAVILLOSAS QUE ME LO HICIERON POSIBLE Y QUE ME HAN AYUDADO A CRECER. GRACIAS JEHOVA, A TI SEA TODA LA GLORIA Y LA ALABANZA POR LOS SIGLOS DE LOS SIGLOS.

## **RESUMEN**

El presente trabajo expresa el rediseño del sistema de bombeo de crudo Hamaca Blend desde la planta Petropiar hasta la plataforma sur del Terminal de almacenamiento y embarque de crudo José Antonio Anzoátegui (TAECJAA). Para tal fin, se realizó un estudio de la condición actual que presenta dicho sistema y se identificaron las limitaciones e inconvenientes que ocasiona el rebombeo del crudo Hamaca Blend en el TAECJAA, lo que sirvió de base para el planteamiento de tres propuestas que permitieran resolver la problemática que presenta el sistema en estudio. Con el objetivo de predecir el comportamiento que tendría el sistema al aplicarle las modificaciones de cada opción, se simuló el oleoducto con el programa PIPEPHASE 9.1, y los resultados obtenidos fueron analizados para decidir cuál de las proposiciones planteadas representa la solución más idónea. De ese análisis se concluyó que la mejor alternativa de modificación es la que plantea evitar el paso del fluido por las bombas de Petropiar y desincorporar el sistema de medición.



## CONTENIDO

	Pág.
RESOLUCIÓN .....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTOS .....	vi
RESUMEN.....	viii
CONTENIDO .....	ix
LISTA DE TABLAS .....	xiii
LISTA DE FIGURAS .....	xiv
CAPÍTULO I.....	17
EL PROBLEMA .....	17
1.1 Introducción .....	17
1.1.1 El Terminal de Almacenamiento y Embarque de Crudo José Antonio Anzoátegui .....	18
1.2 Planteamiento del problema .....	20
1.3 Enfoque del problema .....	21
1.3.1 Objetivo general .....	21
1.3.2 Objetivos específicos .....	21
1.4 Resumen de resultados .....	22
1.5 Contenido del trabajo .....	23
CAPÍTULO II .....	24
MARCO TEÓRICO .....	24
2.1 Antecedentes del proyecto .....	24
2.2 Transporte de Crudo en Tuberías .....	25
2.2.1 Teorema de Bernoulli.....	25
2.2.2 Pérdida de carga debida al flujo del fluido.....	27
2.2.2.1 Pérdidas de carga en tuberías.....	27

2.2.2.2 Pérdidas de carga en accesorios.....	28
2.2.3 Factor de Fricción .....	30
2.2.3.1 Ecuaciones para determinar el factor de fricción.....	30
2.2.3.2 Número de Reynolds (Re) .....	31
2.2.4 Accesorios de Tuberías .....	32
2.2.4.1 Codos .....	33
2.2.4.2 “T” .....	33
2.2.4.3 Reducción y Expansión .....	34
2.2.4.4 Válvulas .....	34
2.3 Manejo de fluidos.....	35
2.3.1 Fuerza Centrífuga.....	35
2.3.2 Bombas centrífugas .....	36
2.3.2.1 Curvas de Operación.....	37
2.4 Cavitación .....	41
2.4.1 Presión de Vapor .....	42
2.5 Simulación numérica.....	42
2.5.1 PIPEPHASE Versión 9.1 .....	42
2.5.1.1 Factor de eficiencia al flujo .....	43
CAPÍTULO III.....	45
DESARROLLO DEL TRABAJO .....	45
3.1 Revisión bibliográfica .....	45
3.2 Recopilación de información del sistema .....	45
3.3 Descripción del sistema de bombeo actual .....	46
3.3.1 Condiciones Operativas de la Bomba .....	47
3.3.1.1 Cálculo de las curvas características de las bombas .....	49
3.4 Identificación de las limitaciones e inconvenientes que ocasiona el rebombeo del crudo Hamaca Blend en el TAECJAA.....	50
3.4.1 Limitaciones.....	50
3.4.2 Inconvenientes.....	51

3.5 Planteamiento de opciones que permitan eliminar el rebombeo del crudo Hamaca Blend en el TAECJAA.....	52
3.5.1 Primera Propuesta .....	53
3.5.2 Segunda Propuesta .....	54
3.5.3 Tercera Propuesta.....	55
3.6 Evaluación hidráulica del sistema de bombeo de crudo Hamaca Blend, mediante el simulador PIPEPHASE 9.1 .....	56
3.6.1 Montaje de la Simulación del Sistema Actual en PIPEPHASE 9.1 .....	56
3.6.2 Validación de la Simulación .....	57
3.6.3 Evaluación Hidráulica de las Propuestas .....	59
3.6.3.1 Determinación de la variación de la altura de carga del sistema con el caudal.....	60
3.6.3.2 Determinación de la variación del NPSH <sub>D</sub> con el caudal .....	61
3.7 Selección de la mejor propuesta.....	61
CAPÍTULO IV .....	63
RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	63
4.1 Comportamiento hidráulico del sistema actual de bombeo .....	63
4.1.1 Condición Operativa de las Bombas .....	64
4.2 Evaluación hidráulica del sistema de bombeo de crudo Hamaca Blend, mediante el uso del simulador PIPEPHASE 9.1 .....	68
4.2.1 Validación de la simulación .....	68
4.2.2 Primera Propuesta: Evitar el paso del fluido por las bombas del TAECJAA .....	70
4.2.3 Segunda Propuesta: Evitar el paso del fluido por las bombas de Petropiar .....	72
4.2.4 Tercera Propuesta: Evitar el paso del fluido por las bombas del TAECJAA y sustituir las bombas de Petropiar por otras de mayor capacidad .....	73
4.3 Selección de la propuesta más factible.....	76

CAPÍTULO V .....	77
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77
5.1. Conclusiones .....	77
5.2 Recomendaciones.....	78
BIBLIOGRAFÍA .....	79
APÉNDICE.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO .....	82

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 4.1</b> Valores reales y simulados de la variación de presión en cada tramo.....	53
<b>Tabla 4.2</b> Caídas de presión por tramo y factores de ajustes.....	53
<b>Tabla A.1</b> Presiones de succión y descarga de la bomba 61-P-008A para diferentes caudales.....	65
<b>Tabla A.2</b> Presiones de succión y descarga de la bomba TA1-B-01B/E/G/H para diferentes caudales.....	65
<b>Tabla A.3</b> Presiones de succión y descarga de la bomba TA1-B-02B/C/E para diferentes caudales.....	66
<b>Tabla B.1</b> Eventualidades ocurridas durante algunas cargas de crudo Hamaca Blend.....	70
<b>Tabla C.1</b> Presiones alcanzadas en la plataforma sur durante la carga de varios buques con crudo Hamaca Blend.....	72
<b>Tabla D.1</b> Especificación de los productos manejados en Petropiar.....	73

## LISTA DE FIGURAS

	Pag.
<b>Fig. 1.1</b> Ubicación del Terminal de Almacenamiento y Embarque de Crudo José Antonio Anzoátegui.....	3
<b>Fig. 2.1</b> Corriente de flujo entre dos puntos.....	10
<b>Fig. 2.2</b> Tipos de bombas centrífugas.....	20
<b>Fig. 2.3</b> Curvas características de las bombas centrífugas.....	24
<b>Fig. 3.1</b> Diagrama del sistema de bombeo de crudo Hamaca Blend desde Petropiar hasta la plataforma sur del TAECJAA.....	31
<b>Fig. 3.2</b> Salto de línea del Sistema de Medición.....	36
<b>Fig. 3.3</b> Salto de línea de las bombas TAECJAA.....	38
<b>Fig. 3.4</b> Salto de línea de las bombas Petropiar.....	39
<b>Fig. 3.5</b> Tramos del sistema de bombeo de crudo Hamaca Blend desde Petropiar hasta la plataforma sur del TAECJAA.....	43
<b>Fig. 4.1</b> Evidencias de fugas en válvulas de la línea de la plataforma sur (PDVSA).....	48
<b>Fig. 4.2</b> Comportamiento operacional y comportamiento especificado por el fabricante, de las curvas de cabezal y eficiencia de las bombas 61-P-008A/B/C/D.....	49
<b>Fig. 4.3</b> Comportamiento operacional y comportamiento especificado por el fabricante, de la curva de potencia de las bombas 61-P-008A/B/C/D.....	50
<b>Fig. 4.4</b> Comportamiento operacional y comportamiento especificado por el fabricante, de la curva de cabezal y eficiencia de las bombas TA1-B-01B/E/G/H.....	50
<b>Fig. 4.5</b> Comportamiento operacional y comportamiento especificado por el fabricante, de la curva de potencia de las bombas TA1-B-01B/E/G/H.....	51
<b>Fig. 4.6</b> Comportamiento operacional y comportamiento especificado por el	51

fabricante, de la curva de cabezal y eficiencia de las bombas TA1-B-02B/C/E.	
<b>Fig. 4.7</b> Comportamiento operacional y comportamiento especificado por el fabricante, de la curva de potencia de las bombas TA1-B-02B/C/E.....	52
<b>Fig. 4.8</b> Comportamiento de tres de las bombas 61-P-008A/B/C/D, frente al requerimiento de carga del sistema de bombeo para la primera propuesta.....	55
<b>Fig. 4.9</b> Comportamiento de las curvas $NPSH_D$ y $NPSH_R$ en función del caudal para la primera propuesta.....	55
<b>Fig. 4.10</b> Comportamiento de dos de las bombas TA1-B01 y una TA1-B02 en paralelo, frente al requerimiento de carga del sistema de bombeo para la segunda propuesta.....	56
<b>Fig. 4.11</b> Comportamiento de las curvas $NPSH_D$ y $NPSH_R$ en función del caudal para la segunda propuesta.....	57
<b>Fig. 4.12</b> Comportamiento del requerimiento de carga del sistema de bombeo en función del caudal para la tercera propuesta.....	59
<b>Fig. 4.13</b> Comportamiento de las curvas $NPSH_D$ en función del caudal para la tercera propuesta.....	59
<b>Figura A.1</b> Hoja de datos de las bombas 61-P-008A/B/C/D.....	67
<b>Figura A.2</b> Hoja de datos de las bombas TA1-B-01B/E/G/H.....	68
<b>Figura A.3</b> Hoja de datos de las bombas TA1-B-02B/C/E.....	69
<b>Figura E.1</b> Esquema de la simulación para la primera propuesta.....	74
<b>Figura E.2</b> Reporte de las condiciones operacionales en los nodos del sistema de bombeo de crudo Hamaca Blend desde Petropiar Hasta la Plataforma sur para la primera propuesta.....	75
<b>Figura E.3</b> Reporte de las condiciones operacionales de las bombas 61-P-008A/B/C para la primera propuesta.....	76
<b>Figura E.4</b> Esquema de la simulación para la segunda propuesta.....	77
<b>Figura E.5</b> Reporte de las condiciones operacionales en los nodos del sistema	78

de bombeo de crudo Hamaca Blend desde Petropiar Hasta la Plataforma sur para la primera propuesta.....	
<b>Figura E.6</b> Reporte de las condiciones operacionales de las bombas 61-P-008A/B/C para la primera propuesta .....	79
<b>Figura F.1</b> Hoja de datos de la bomba Goulds Modelo 3620 XX 18x24-31A..	80



# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA

### 1.1 Introducción

Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA) es la compañía encargada de la explotación del petróleo y sus derivados en Venezuela. Fundada en 1975, ésta logra ser considerada, gracias a su calidad y responsabilidad, como una empresa confiable en el proceso de suministro de grandes volúmenes de crudo a escala mundial. Independientemente de los problemas que se han presentado dentro de la empresa en los últimos tiempos, PDVSA se consolida como una de las principales compañías petroleras multinacionales y ha sido la principal responsable de la exploración, explotación, refinación, transporte y distribución de hidrocarburos. También promueve los negocios de Química, Petroquímica y Carbón, a fin de obtener una alta rentabilidad en el mercado, que permita generar beneficios al país, a través de la realización de actividades en las áreas de petroquímica, investigación, desarrollo tecnológico, educación y adiestramiento en sectores vinculados con la industria energética, así como en otras áreas.

Por los cambios incesantes del mercado internacional, PDVSA como corporación del nuevo siglo e integrante de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP), debe mantenerse a la vanguardia de los grandes avances, sean estos en el ámbito económico, tecnológico, gerencial, ambiental, en fin todos aquellos que le permitan consolidarse en el mercado mundial como una empresa estable y de excelente nivel de calidad en sus productos y procesos.

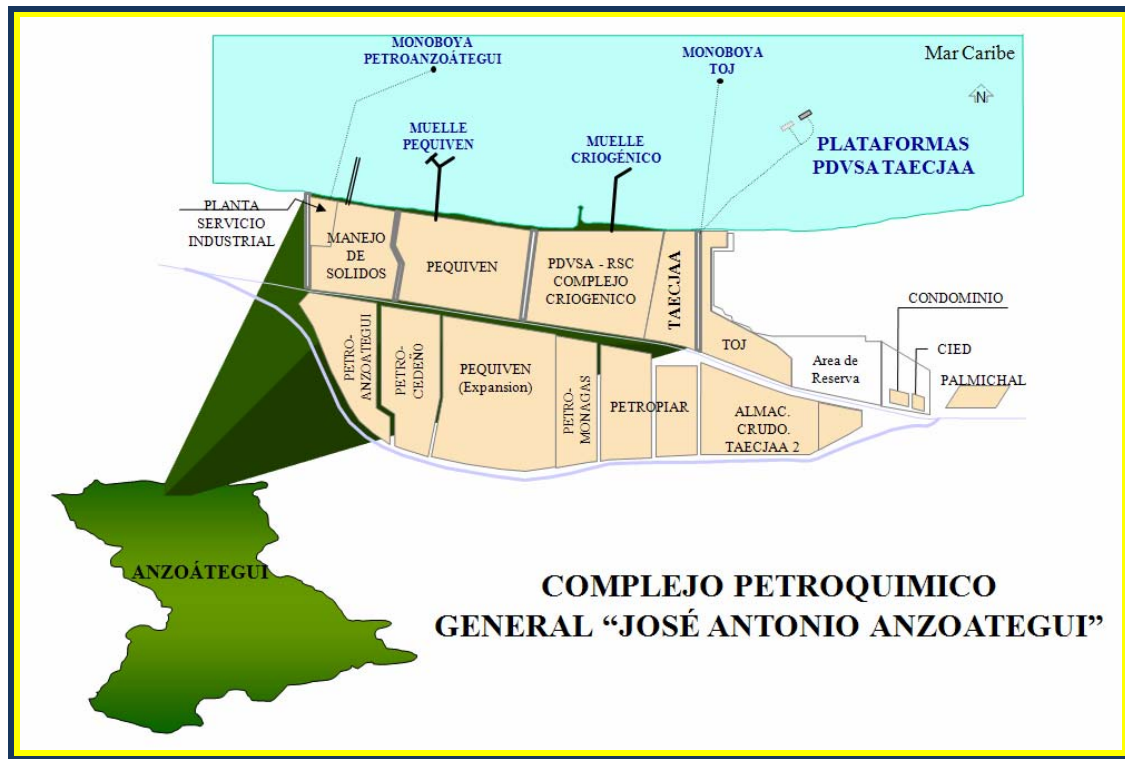
PDVSA está dividida en cuatro grandes zonas: Occidente, Centro, Sur y Oriente. Para el almacenamiento y distribución tanto de los crudos como de los

productos producidos en el Oriente del país, PDVSA cuenta con el Terminal de Guaraguao y con el Terminal de Almacenamiento y Embarque de Crudo José Antonio Anzoátegui (TAECJAA).

### **1.1.1 El Terminal de Almacenamiento y Embarque de Crudo José Antonio Anzoátegui**

PDVSA construyó el TAECJAA con la finalidad de cubrir la necesidad de una infraestructura capaz de manejar todos los volúmenes de crudo del Oriente del país, asociados a sus planes de expansión, ya que la capacidad del terminal de Guaraguao se hacía insuficiente para manejar todos los crudos y productos mejorados de PDVSA Exploración y Producción proveniente del Oriente del país. Este terminal inició sus operaciones en Noviembre de 1994 con embarque de crudos Mesa y Merey, provenientes de la Faja Petrolífera del Orinoco. Actualmente se embarcan los crudos: Mesa de 30° API, Merey 16° API, Leona 22° API, Leona 24° API, Leona 26° API, Monagas 18° API, Zuata Sweet y Hamaca Blend. Estos tres últimos, son crudos sintéticos provenientes de las asociaciones (Petromonagas, Petrocedeno y Petropiar respectivamente), mientras que el Crudo Mesa proviene del Centro de Almacenamiento y Transporte de Crudo Travieso (Troncal 54), el Crudo Merey proviene del Centro de Almacenamiento y Transporte de Crudo San Tome (Troncal 51) y los crudos leona son una mezcla entre Mesa 30° API y Merey 16° API. Estos crudos a embarcar tienen como destino los Estados Unidos, Canadá, Portugal, Trinidad y Tobago, España, Curazao, India, Islas Vírgenes, Suiza, entre otros países, así como también suplir algunas necesidades especiales en el interior del país (cabotaje).

El Terminal de Almacenamiento y Embarque José Antonio Anzoátegui (TAECJAA) forma parte del Complejo Petroquímico “General José Antonio Anzoátegui”, ubicado en Jose, Estado Anzoátegui, Venezuela (ver fig. 1.1).



**Fig. 1.1** Ubicación del Terminal de Almacenamiento y Embarque de Crudo José Antonio Anzoátegui [PDVSA].

El TAECJAA representa el último eslabón del proceso operacional de producción y exportación, el cual se inicia en los yacimientos petrolíferos y termina en el embarque del crudo en el Tanquero. Así como también es un puente intermedio en dicho proceso, cuando a través de él se realizan importaciones de productos empleados por las asociaciones durante el mejoramiento de crudo. Para lo cual cuenta en la actualidad con:

- Patio de Tanques.
- Sistema de Bombeo.
- Plataformas de Embarque (norte y sur).
- Muelle de Servicio.

- Tratamiento de Efluentes Líquidos.
- Sistema de Mezclados en líneas y los diferentes servicios requeridos para el almacenamiento y despacho de crudos.

## **1.2 Planteamiento del problema**

De las tres asociaciones a quienes el TAECJAA presta sus servicios, sólo Petromonagas bombea su crudo desde su mejorador hasta la plataforma sur, mientras que Petrocedeño y Petropiar bombean sus crudos hasta el TAECJAA, donde es rebombeado hasta la plataforma sur. Con el paso del tiempo se han presentado diversos problemas con el embarque del crudo de Petropiar (Hamaca Blend), ya que cuando es bombeado desde este mejorador hasta el terminal, el mismo llega con presiones muy elevadas a la succión de las bombas, sobrepasando el límite de presión máximo establecido por la filosofía operacional del terminal, provocando daños en accesorios y equipos en algunos sectores de la línea, lo cual representa un factor potencial a la ocurrencia de severos daños en el oleoducto. Por otra parte, se presenta la falta de sincronización entre las operaciones de Petropiar y del TAECJAA durante la carga, lo cual ocasiona, en algunos casos, que las bombas se apaguen por alta o baja presión en la succión, ocasionando así un paro brusco de la carga, que repercute tanto en el deterioro de los equipos como en horas de demora para el cargamento del buque, ya que al apagarse las bombas se debe esperar una hora como mínimo para poder encenderlas nuevamente. También hay que tomar en cuenta que a pesar de que el TAECJAA tiene la posibilidad de embarcar cuatro buques simultáneamente esto se ve limitado por la capacidad del sistema de bombeo. Frente a lo antes expuesto, se plantea realizar un rediseño del sistema de bombeo de crudo Hamaca Blend, desde la planta mejoradora Petropiar hasta la plataforma sur del terminal de almacenamiento y embarque de crudo José Antonio Anzoátegui (TAECJAA), con la finalidad de solventar los problemas e inconvenientes que tiene dicho sistema, así como proporcionar una mayor flexibilidad operacional al terminal.

### **1.3 Enfoque del problema**

De acuerdo a lo descrito anteriormente, se considera de interés el estudio de modificaciones en el sistema de bombeo, que permitan evitar el rebombeo de crudo en el TAECJAA y con ello impedir el congestionamiento de este importante Terminal.

Ante tal situación se plantea realizar una descripción de la situación actual del sistema de bombeo en estudio, donde se describirán los equipos que lo conforman, el recorrido que sigue el fluido desde Petropiar hasta la plataforma sur del TAECJAA y las condiciones operativas de las bombas.

Luego de esto se identificarán las limitaciones e inconvenientes que ocasiona el rebombeo del crudo y después se plantearán propuestas para la modificación del sistema en estudio que permitan solventar la problemática existente.

A fin de evaluar hidráulicamente el sistema para cada una de las modificaciones propuestas, se efectuarán simulaciones con el programa PIPEPHASE 9.1 y finalmente se seleccionará, por medio de un análisis técnico, la opción más viable entre las planteadas.

#### **1.3.1 Objetivo general**

Rediseñar el sistema de bombeo de crudo Hamaca Blend desde la planta Petropiar hasta la plataforma sur del Terminal José Antonio Anzoátegui.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Describir la situación actual del sistema de bombeo de crudo Hamaca Blend desde Petropiar hasta la plataforma sur del TAECJAA.

2. Identificar las limitaciones e inconvenientes que ocasiona el rebombeo del crudo Hamaca Blend en el TAECJAA.
3. Plantear propuestas para la modificación del sistema de bombeo de crudo Hamaca Blend que eviten el rebombeo del mismo en el TAECJAA.
4. Evaluar hidráulicamente el sistema de bombeo de crudo Hamaca Blend desde la planta mejoradora Petropiar hasta la plataforma sur del TAECJAA, mediante el simulador PIPEPHASE 9.1, para cada una de las modificaciones propuestas.
5. Seleccionar a través de un análisis técnico la opción más factible entre las propuestas.

#### **1.4 Resumen de resultados**

Durante las visitas al campo se pudieron observar presiones superiores a 689 kPa (100 psig) en la succión de las bombas del TAECJAA, lo que ocasionó daños en los equipos de medición ubicados en este punto, así como fugas en algunos accesorios.

Por otra parte, se pudo constatar que las bombas del TAECJAA (TA1-B-01B/E/G/H y TA1-B-02B/C/E), presentaron una disminución del 5% y 10% en sus eficiencias, respectivamente.

Tomando en cuenta lo antes mencionado y que además el sistema de medición (90-ME-001) no está cumpliendo la labor para la cual fue instalado, se propone evitar el paso del crudo Hamaca Blend por las bombas de Petropiar (61-P-008A/B/C/D) y

desincorporar el sistema de medición. Lo que permitiría el funcionamiento adecuado del sistema de bombeo estudiado.

### **1.5 Contenido del trabajo**

El presente trabajo se dividió en capítulos, distribuidos de la siguiente forma: El Capítulo I constituye la introducción del proyecto, donde se expone el problema en estudio, el enfoque del problema, el objetivo general que se persigue con el trabajo y los objetivos específicos que se plantearon para alcanzarlo y un resumen de los resultados obtenidos. El Capítulo II representa el marco teórico, en el se dan a conocer los basamentos relacionados con el tema en estudio. El capítulo III conforma el desarrollo del proyecto, en él se presenta la metodología empleada para desarrollar y alcanzar los objetivos planteados. El capítulo IV contiene los resultados obtenidos y su respectivo análisis. Por último, en el capítulo V se establecen las conclusiones alcanzadas y las recomendaciones sobre la problemática estudiada.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes del proyecto

Los siguientes trabajos contienen estudios previos realizados a procesos similares al evaluado en el presente trabajo.

**Velásquez, C., en 1999<sup>[1]</sup>**, efectuó el análisis de mejoras del sistema de manejo de crudo de Oriente, simulando, mediante la utilización del sistema computarizado FloMatic<sup>MT</sup>, las redes y sistemas de manejo de crudo de los distritos Anaco, Morichal, Punta de Mata y San Tomé con el fin de mejorar los mismos, y manejar los pronósticos de producción de PDVSA para ese entonces.

**Palomo, J., en el 2005<sup>[2]</sup>**, realizó la evaluación del sistema de bombeo y tuberías para el transporte de lodos petrolizados (slop) desde el Terminal Marino de Guaraguao hasta la Refinería de Puerto la Cruz, para lo cual llevó a cabo el levantamiento de planos e isométricos y verificó condiciones de funcionamiento de bombas, entre otras cosas.

**Bustamante, A., en 2006<sup>[3]</sup>**, realizó la evaluación hidráulica de las redes de recolección de crudo multifásico asociadas a las estaciones de descarga Bared-5 y Bared-10 del campo Bared, PDVSA - Distrito San Tomé; donde se determinó que la producción contemplada para Bared-10 superaría la capacidad de la estructura existente, ya que en los resultados de la simulación hidráulica de la situación futura de producción en esta estación, se observaron presiones de descarga mayores a 300 psig, que producirían la falla del sistema de recolección.



## 2.2 Transporte de Crudo en Tuberías

Los sistemas de transporte de fluidos de las plantas químicas y refinerías parecen un laberinto de tuberías, conformado por una gran cantidad de componentes los cuales transportan fluido, cambian su dirección, lo dividen, lo aceleran o desaceleran. El análisis de sistemas de tuberías y conductos consiste en relacionar las variables del flujo, como pérdidas de energía y flujo, con los parámetros del sistema de tuberías, tales como tamaño, forma, longitud y número de accesorios<sup>[4]</sup>.

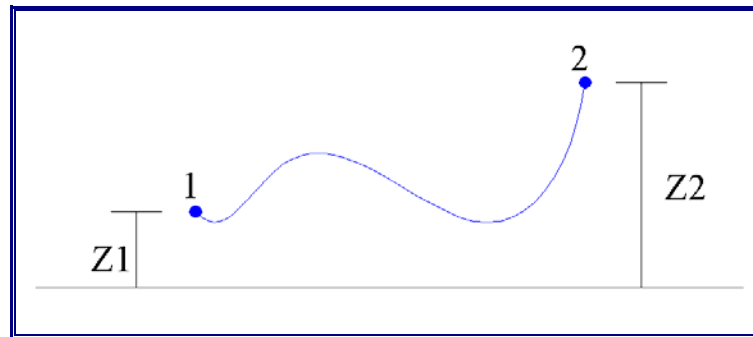
### 2.2.1 Teorema de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli es una expresión, proveniente de la ecuación diferencial planteada por Euler, de la ecuación de la conservación de la energía al flujo de fluidos newtonianos en tuberías<sup>[5]</sup>. El teorema de Bernoulli establece que la energía total (en unidades de longitud) de un fluido ideal (incompresible y no viscoso) es constante a lo largo de una línea de corriente y es igual a la suma de la altura geométrica (energía Potencial), la altura debida a la presión (Energía de Presión) y la altura debida a la velocidad (energía cinética), es decir:

$$\frac{P}{\gamma} + Z + \frac{V^2}{2g} = H \quad (2.1)$$

Para una línea de corriente de fluido que se desplaza del punto 1 al 2 (ver fig. 2.1), la ecuación de Bernoulli quedaría expresada de la siguiente manera:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (2.2)$$



**Fig. 2.1** Corriente de flujo entre dos puntos<sup>[2]</sup>.

Sin embargo, en la realidad existen pérdidas de energía debidas al flujo del fluido y en algunos casos incremento de energía por la influencia de una o varias bombas, por lo que la ecuación de Bernoulli generalizada queda expresada de la siguiente manera:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + H_b = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + H_{r1-2} \quad (2.3)$$

donde:

Unidades

S.I.

$\gamma$ = Peso específico del fluido

N/m<sup>3</sup>

$P_1$  y  $p_2$ = Presión en cada punto

Pa

$v_1$  y  $v_2$ = Velocidad del fluido en cada punto

m/s

$Z_1$  y  $Z_2$ = Altura geodésica

m

$g$ = Aceleración de gravedad

m/s<sup>2</sup>

$H_b$ = Altura proporcionada por la bomba instalada

m

$H_{r1-2}$ = Pérdidas de carga debida al flujo del fluido entre los puntos 1 y 2

m

### 2.2.2 Pérdida de carga debida al flujo del fluido

Es una magnitud que refleja la cantidad de energía que pierde el fluido al ser transportado a través de tuberías y se divide en: pérdidas de carga por fricción en tramos rectos de tuberías y pérdidas de carga en accesorios.

$$H_{r1-2} = \sum hf + \sum hm \quad (2.4)$$

donde:	Unidades
	S.I.
$H_{r1-2}$ = Pérdidas de carga debida al flujo del fluido	m
$h_f$ = Pérdidas de carga por fricción	m
$h_m$ = Pérdidas de carga en accesorios	m

#### 2.2.2.1 Pérdidas de carga en tuberías

También conocidas como pérdidas primarias, son las producidas como consecuencia del contacto del fluido con la tubería (capa límite), rozamiento de unas capas de fluido con otras (régimen laminar) o de partículas de fluido entre si (régimen turbulento).

Las pérdidas primarias están definidas por la ecuación de Darcy-Weysbach presentada a continuación:

$$hf = f \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (2.5)$$

donde:	Unidades
	S.I.
$h_f$ = Pérdidas por fricción	m

f=	Factor de fricción	Adim.
L=	Longitud de la tubería	m
D=	Diámetro de la tubería	m.
g=	Aceleración de gravedad	m/s <sup>2</sup>
v=	Velocidad media del fluido	m/s

### 2.2.2.2 Pérdidas de carga en accesorios

También conocidas como pérdidas secundarias, son aquellas originadas por los efectos de los accesorios que necesariamente se deben colocar en las tuberías, para que produzcan algunas de las siguientes acciones sobre el fluido: desviarlo en 90°, dividir el flujo, purificarlo, medir su caudal, regular su presión o caudal, entre otras cosas.

Las pérdidas secundarias en válvulas y accesorios que conforman un sistema de tuberías se pueden calcular por dos métodos que se explican a continuación<sup>[4]</sup>:

**A) Primer método:** por medio de la ecuación 2.6, en la que el coeficiente de pérdida secundarias  $K$ , depende del tipo de accesorio, del número de Reynolds, de la rugosidad de la tubería y de la configuración antes del accesorio<sup>[4]</sup>.

$$h_m = K \frac{v^2}{2g} \quad (2.6)$$

donde:

	Unidades
	S.I.
$h_m$ =	Pérdidas de carga secundarias
	m

K= Coeficiente de pérdida si se trata de codos, válvulas, etc.,	Adim.
v= Velocidad media del fluido	m/s

Si se trata de un cambio de sección como contracción o ensanchamiento, suele tomarse la velocidad en la sección menor.

**B) Segundo Método:** por las mismas fórmulas de las pérdidas primarias a la cual sólo se le cambia el término de longitud por el de término de longitud equivalente y se sustituye la velocidad por el caudal <sup>[4]</sup>.

$$h_m = 8f \frac{L_e Q^2}{\pi^2 g D^5} \quad (2.7)$$

donde:	Unidades
	S.I.
$h_m$ = Pérdidas de carga secundarias	m
$f$ = Factor de fricción	Adim.
$L_e$ = Longitud equivalente del accesorio	m
$Q$ = Caudal volumétrico del fluido	m <sup>3</sup> /s

La longitud equivalente ( $L_e$ ) también suele expresarse en función al diámetro de la tubería ( $K_{mult.}$ ) y se puede determinar ya sea por diagramas establecidos o por las siguientes ecuaciones:

$$L_e = \frac{D \cdot \sum K}{f} \quad (2.8)$$

$$K_{mult.} = \frac{\sum K}{f} \quad (2.9)$$

donde:

Unidades

S.I.

Representa la sumatoria de todos los coeficientes de  $\sum K =$  pérdidas de todos los accesorios del mismo diámetro (D) y a través de los cuales fluya el mismo caudal (Q). Adim.

### 2.2.3 Factor de Fricción

El factor de fricción, refleja la resistencia ofrecida por las paredes de la tubería al movimiento del fluido. Su magnitud está muy relacionada con el grado de turbulencia presente en la tubería.

#### 2.2.3.1 Ecuaciones para determinar el factor de fricción

##### a) Flujo Laminar

Ecuación de Poiseuille  $Re < 2000$  (En tuberías)

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.10)$$

##### b) Tubería Lisa

Ecuación de Blasius  $\varepsilon / D < 0.000001$

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (2.11)$$

##### c) Flujo hidráulicamente turbulento

Ecuaciones de Karman – Pantl

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \cdot \log \left( \frac{D}{2 \cdot \varepsilon} \right) + 1.74 \quad (2.12)$$

#### d) Flujo transitorio y tubería rugosa

Ecuación de Colebrook – White

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (2.13)$$

donde:

Unidades

S.I.

$f$ = Factor de fricción

Adim.

$Re$ = Número de Reynolds

Adim.

$\varepsilon$ = Rugosidad de la tubería.

m

$D$ = Diámetro de la tubería

m

$\varepsilon/D$ = Coeficiente de rugosidad

m

#### 2.2.3.2 Número de Reynolds (Re)

Es un valor numérico adimensional que puede considerarse como la relación de las fuerzas dinámicas de la masa del fluido con respecto a los esfuerzos de deformación ocasionados por la viscosidad, planteado por Newton<sup>[5]</sup>.

$$Re = (D, V, \rho, \mu) \quad (2.14)$$

El número de Reynolds se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$R_e = \frac{\rho \cdot D \cdot V}{\mu} \quad (2.15)$$

ó

$$R_e = \frac{D \cdot V}{\nu} \quad (2.16)$$

donde:	Unidades
	S.I.
$Re$ = Número de Reynolds	Adim
$D$ = Diámetro de la tubería	m
$v$ = Velocidad del fluido	m/s
$\rho$ = Densidad del fluido	kg/m <sup>3</sup>
$\mu$ = Viscosidad dinámica del fluido	Pa·s
$\nu$ = Viscosidad cinemática del fluido	m <sup>2</sup> /s

Este número define si el fluido es laminar, turbulento o si está en transición, de acuerdo con los siguientes rangos:

- $Re \leq 2000$  Flujo laminar.
- $2000 < Re < 4000$  Flujo de transición (puede ser laminar o turbulento).
- $Re \geq 4000$  Flujo turbulento.

#### 2.2.4 Accesorios de Tuberías

Los accesorios de tuberías son el conjunto de piezas moldeadas o mecanizadas que unidas a los tubos mediante un procedimiento determinado, forman las líneas estructurales de tuberías de una planta de proceso.

Entre los tipos de accesorios más comunes se puede mencionar <sup>[6]</sup>:

- Codos.
- T.
- Válvulas.
- Reducciones y Expansiones.



#### 2.2.4.1 Codos

Son accesorios de forma curva que se utilizan para cambiar la dirección del flujo de las líneas tantos grados como lo especifiquen los planos o dibujos de tuberías [6].

Los codos estándar son aquellos que vienen listos para la pre-fabricación de piezas de tuberías y que son fundidos en una sola pieza con características específicas y son [6].

- Codos estándar de 45°
- Codos estándar de 90°
- Codos de radio largo, cuyo radio de curvatura varía en función del diámetro (R/D).

#### 2.2.4.2 “T”

Son accesorios que se fabrican de diferentes tipos de materiales, aleaciones, diámetros y espesores [6].

Existen dos tipos de T que son:

- Diámetros iguales o T recta
- Reductora con dos orificios de igual diámetro y uno desigual.

#### 2.2.4.3 Reducción y Expansión

Son accesorios de forma cónica, fabricadas de diversos materiales y aleaciones. Se utilizan para unir una línea con otra de menor diámetro o viceversa según sea el caso [6].

Entre los tipos de reducciones se tiene [6].

- Estándar concéntrica: es un accesorio reductor que se utiliza para disminuir la presión del fluido aumentando su velocidad, manteniendo su eje.
- Estándar excéntrica: es un accesorio reductor que se utiliza para disminuir la presión del fluido en la línea aumentando su velocidad, perdiendo su eje.

#### 2.2.4.4 Válvulas

Es un accesorio que se utiliza para regular y controlar el fluido de una tubería. Este proceso puede ser desde cero flujo (válvula totalmente cerrada) hasta el flujo total (válvula totalmente abierta), pasando por todas las posiciones entre estos dos extremos<sup>[6]</sup>.

Las válvulas son diseñadas en diferentes materiales y de diversas formas, entre los tipos de válvulas están: válvula de compuesta, válvula de globo, válvula de mariposa, válvula de bola, válvula de retención, entre otras. Mientras que según el servicio que prestan se clasifican en:

- a) Válvulas de bloqueo: tienen como objetivo permitir o interrumpir el sentido de flujo, se emplean para la reparación de una línea de conducción de flujo (válvulas de compuerta)<sup>[6]</sup>.
- b) Válvulas reguladora o de control: tienen como finalidad, regular la presión, el caudal o ambos<sup>[6]</sup>.
- c) Válvulas para el control de dirección de flujo: el diseño mecánico de estas válvulas permite el sentido de flujo en una sola dirección, las más comunes son las de retención basculante y las válvulas de pie. Se emplean para impedir el vacío

de tanques y de tuberías y no permiten que las bombas giren en forma inversa cuando se suspende el servicio eléctrico <sup>[6]</sup>.

## **2.3 Manejo de fluidos**

El manejo de fluidos en las industrias petroquímicas es una de las tareas más comunes, por lo que su estudio resulta de gran importancia. Los medios empleados habitualmente para movilizar los fluidos son: la gravedad, el desplazamiento, la fuerza centrífuga, la fuerza electromagnética, la transferencia de cantidad de movimiento, el impulso mecánico o combinaciones de estos seis medios básicos. En la actualidad el medio más comúnmente empleado es la fuerza centrífuga.

### **2.3.1 Fuerza Centrífuga**

Es el producto de la masa por la aceleración centrífuga, en un sistema de referencia no inercial. Esta tiende a alejar los objetos del centro de rotación mediante la velocidad tangencial, perpendicular al radio, en un movimiento circular.

Cuando se utiliza fuerza centrífuga para mover líquidos, ésta es proporcionada por medio de una bomba centrífuga. Aunque varía mucho el aspecto físico de los diversos tipos de bombas centrífugas, la función básica de cada una de ellas es siempre la misma, es decir, producir energía cinética mediante la acción de una fuerza centrífuga y, a continuación, convertir parcialmente esta energía en presión, mediante la reducción eficiente de la velocidad del fluido en movimiento<sup>[7]</sup>.

En general, los dispositivos centrífugos de transporte de fluidos tienen las características que siguen:

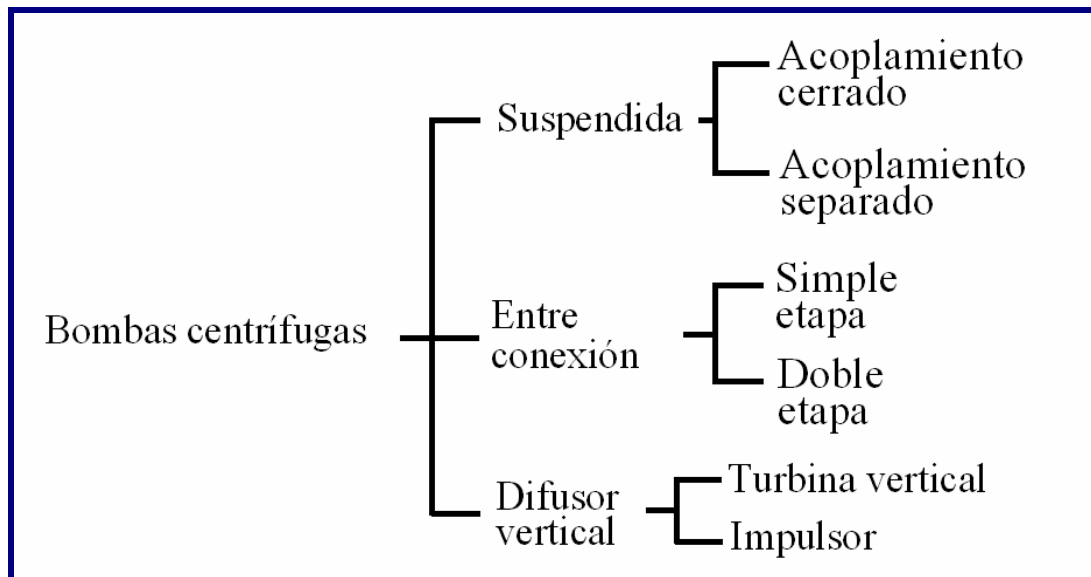
- La descarga está relativamente libre de pulsaciones.

- El diseño mecánico se presta para manejar grandes caudales, lo que significa que las limitaciones de capacidad constituyen raramente un problema.
- Pueden asegurar un desempeño eficiente a lo largo de un intervalo amplio de presiones y capacidades, incluso cuando funcionan a velocidad constante.
- La presión de descarga es una función de la densidad de fluido.

### 2.3.2 Bombas centrífugas

Es una máquina que le proporciona energía a un líquido al transformar la energía mecánica de un impulsor rotatorio, llamado rodete, en energía cinética y en energía de presión.

A fin de ordenar de forma razonable los muchos tipos, el Instituto de Hidráulica ha publicado una carta de clasificación de los tipos de bombas centrífugas (ver fig. 2.2).



**Fig. 2.2** Tipos de bombas centrífugas [The Hydraulic Institute].

### 2.3.2.1 Curvas de Operación

Una de los puntos de mayor importancia en el estudio de las bombas centrífugas, es el uso de las curvas de operación o curvas características. El comportamiento normal de estas curvas se muestra en la figura 2.3, en ella se puede observar la curva altura de carga (columna total), la curva potencia suministrada a la bomba (BHP), la curva eficiencia de la bomba ( $\eta$ ) y la curva energía neta requerida a la entrada (NPSH<sub>R</sub> o CSPN<sub>R</sub>) son graficadas en función del flujo.

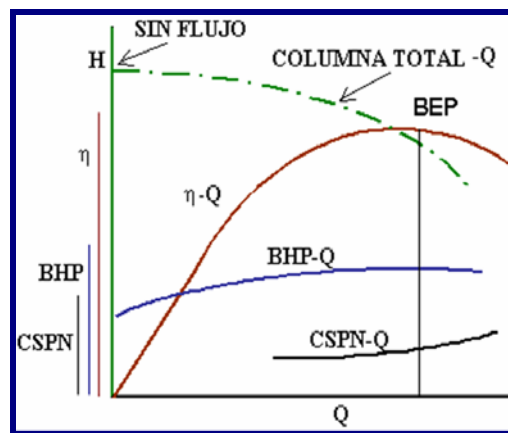


Fig. 2.3 Curvas características de las bombas centrífugas<sup>[7]</sup>.

#### a) Curva altura de carga – Capacidad

Toda bomba centrífuga tiene, para una velocidad particular y un diámetro particular de impulsor cuando manipula un líquido de variación de viscosidad despreciable, una curva de operación, la cual indica la relación entre la columna desarrollada por la bomba, y el flujo a través de la bomba (ver Fig. 2.3).

#### b) Curva Potencia suministrada a la bomba (BHP) – Capacidad

Para operar a la capacidad deseada, se debe suministrar cierta energía a la bomba (potencia suministrada o BHP). Entonces, se puede graficar una curva

representando la relación entre la capacidad y la potencia suministrada, siempre y cuando se mantengan constantes los mismos parámetros del caso anterior. Para bombas centrífugas generalmente la potencia suministrada incrementa al aumentar el caudal manejado por ellas (ver Fig. 2.3). En ocasiones la cuantificación de la potencia suministrada no se puede medir directamente, entonces se calcula a partir de la potencia consumida por el motor que la mueve por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{BHP} = \frac{\text{HP}_{\text{MOTOR}}}{\eta_{\text{MOTOR}}} \quad (2.17)$$

donde:	Unidades
	S.I.
BHP= Potencia suministrada a la bomba	kW
$P_{\text{MOTOR}}$ = Potencia consumida por el motor eléctrico	kW
$\eta_{\text{MOTOR}}$ = Eficiencia del motor eléctrico	Adim.

### c) Curva Eficiencia - Capacidad

Es la relación de la energía proporcionada por la bomba entre la suministrada a ella, razón por la cual no se puede medir directamente, sino que se debe calcular de la información obtenida a través de la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\text{BHP}} \quad (2.18)$$

donde:	Unidades
	S.I.
$\eta$ = Eficiencia de la bomba	Adim.
$\gamma$ = Peso específico del fluido	$\text{N/m}^3$

Q= Caudal manejado por la bomba	m <sup>3</sup> /s
H= Altura de carga proporcionada por la bomba	m
BHP= Potencia suministrada a la bomba	kW

d) Curva Columna de Succión Positiva Neta (CSPN ó NPSH) – Capacidad

Por definición la CSPN es la altura total de carga a la entrada de la bomba, la cual en el caso del funcionamiento de la bomba se le denomina NPSH<sub>R</sub>, mientras que al ser referido al sistema se le llama NPSH<sub>D</sub> (ver Fig. 2.3).

➤ *Columna de Succión Positiva Neta Requerida (CSPN<sub>R</sub> ó NPSH<sub>R</sub>)*

La CSPN<sub>R</sub> es la columna positiva en unidades absolutas requeridas en la succión de la bomba para superar la caída de presión en la bomba y mantener al líquido por encima su presión de vapor.

La CSPN<sub>R</sub> es siempre positiva ya que se expresa en términos de una altura de columna de fluido. El término neto se refiere a la columna de presión real a la entrada de la succión de bomba y no a la columna estática de succión.

➤ *Columna de Succión Positiva Neta Disponible (CSPN<sub>D</sub> ó NPSH<sub>D</sub>)*

La CSPN<sub>D</sub> siempre debe ser mayor que la CSPN<sub>R</sub> para que la bomba opere satisfactoriamente.

$$CSPN_D = \frac{(P_1 - P_V)}{\rho_c g} \quad (2.19)$$

donde:

Unidades

	S.I.
CSPN <sub>D</sub> = Columna de Succión Positiva Neta Disponible	m
P <sub>1</sub> = Presión de succión de la bomba	Pa
P <sub>v</sub> = Presión de vapor del líquido a las condiciones de proceso	Pa
ρ <sub>c</sub> = Densidad del fluido	kg/m <sup>3</sup>
g= Aceleración de la gravedad	9.81 m/s <sup>2</sup>

En un diseño conservador se agrega un margen de seguridad entre el cálculo y la especificación del NPSH<sub>D</sub>. A este margen se le denomina factor de seguridad y se define por la siguiente ecuación:

$$S.F._{NPSH} = \frac{NPSH_D \text{ cálculo}}{NPSH_D \text{ especificado}} \quad (2.20)$$

donde:	Unidades
	S.I.
S.F. <sub>NPSH</sub> = Factor de seguridad del NPSH	Adim.
NPSH <sub>D</sub> cálculado= Columna de Succión Positiva Neta Disponible calculada a través de la ecuación 2.17	m
NPSH <sub>D</sub> especificado = Columna de Succión Positiva Neta Disponible especificado para la selección de las bombas	m

Sin embargo este margen tiende a incrementar el costo de la bomba y por lo tanto se requiere una cuidadosa consideración.



## 2.4 Cavitación

La cavitación es un fenómeno que se produce cuando la presión en algún punto o zona de la corriente de un líquido desciende por debajo de cierto valor mínimo admisible. El fenómeno puede producirse tanto en estructuras hidráulicas estáticas (tuberías, venturas, etc.) como en máquinas hidráulicas (bombas, turbinas, hélices, etc.).

Este valor mínimo admisible se define como la presión de saturación de vapor, el líquido se evapora y se originan, en el interior del mismo, burbujas de vapor las cuales son arrastradas por la corriente y llegan a zonas en que reina una presión muy elevada, produciéndose una condensación violenta del vapor. Esta condensación violenta del vapor a su vez produce una elevación local de la presión que puede sobrepasar los 100.000 kPa. En el interior del fluido existen, pues, zonas en que reina un gradiente fuerte de presiones que aceleran las burbujas y producen un impacto en el contorno (vénturi, bombas, turbinas, etc.)<sup>[8]</sup>

La cavitación de una bomba se nota cuando hay una o más de las siguientes señales: ruido, vibración, caída en las curvas de capacidad y eficiencia<sup>[8]</sup>.

### 2.4.1 Presión de Vapor

Cuando una cantidad pequeña de líquido se coloca en un recipiente cerrado, cierta fracción del líquido se vaporiza. La vaporización cesa cuando se alcanza un equilibrio entre los estados líquido y gaseoso de la sustancia contenida en el recipiente o, en otras palabras, cuando el número de moléculas que escapan de la superficie del agua es igual al número de moléculas que regresan. La presión causada por las moléculas que están en el estado gaseoso es la presión de vapor<sup>[9]</sup>.

La presión de vapor varía de un líquido a otro y depende mucho de la temperatura.

## **2.5 Simulación numérica**

Esta técnica consiste en la solución de un modelo matemático, que recrea un proceso natural. El uso de simulaciones numéricas para estudiar un problema requiere normalmente un cuidadoso estudio de los métodos numéricos, algoritmos a utilizar y de los procesos fundamentales a incluir en la simulación. En el caso del presente trabajo, se empleará el simulador PIPEPHASE versión 9.1.

### **2.5.1 PIPEPHASE Versión 9.1**

Es un programa desarrollado por Simsci-Esscor, en el cual se efectúan simulaciones hidráulicas que permiten predecir la presión, temperatura, distribución de caudal en estado estacionario, a fin de diseñar, analizar y optimizar diversos sistemas de flujo, tanto para fluidos compresibles como para fluidos incompresibles.

Para realizar simulaciones con este programa, se hace necesario tomar ciertas consideraciones, entre las que están: definir el tipo de fluido, el tipo de simulación y el sistema de unidades a emplear, así como también establecer una configuración para el montaje en estudio, cabe destacar que allí se deben ingresar los datos concernientes al fluido (propiedades del fluido) y los referentes a la instalación a estudiar (longitudes, elevaciones diámetros de las tuberías, tipos de accesorios, entre otras cosas). Una vez montada y ejecutada la simulación, se obtiene la distribución de presión, caudal y temperatura a lo largo del sistema, en algunos casos, estos resultados se pueden comparar con los valores reales medidos en campo, a fin de validar la simulación. Dado que, en muchas ocasiones, la divergencia entre estos valores es relevante, el programa cuenta con un factor de corrección denominado eficiencia al flujo, el cual ajusta la caída de presión calculada, minimizando así el

grado de incertidumbre, producto de los efectos de: el cambio de las características de las tuberías y los accesorios producto del tiempo en servicio, el uso de coeficientes de pérdidas ( $K_{mul}$  ó  $K$ ) desacertados y los errores propios de las ecuaciones empleadas.

### 2.5.1.1 Factor de eficiencia al flujo

Este parámetro puede ser utilizado en un ejercicio de calificación para ajustar caudales para cumplir con una medida de caída de presión, a fin de coincidir con los datos de campo<sup>[10]</sup> y este ajuste viene dado por la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{dp}{dl}\right)_{AJUSTADO} = \frac{\left(\frac{dp}{dl}\right)_{NORMAL}}{\left(\frac{FLOWEFF}{100}\right)^2} \quad (2.21)$$

donde:

Unidades

S.I.

$(dp/dl)_{AJUSTADO}$ = Caída de presión por longitud de la tubería, ajustada por el factor de eficiencia al flujo.

Pa

$(dp/dl)_{NORMAL}$ = Caída de presión por longitud de la tubería, reportada por la simulación original

Pa

FLOWEFF= Eficiencia al flujo

Adim.

Cabe destacar que el uso de este factor cuenta con la limitante que el simulador sólo tiene la opción de ingresárselo a las tuberías y no a los accesorios, pero si se conoce el valor de eficiencia al flujo correspondiente a una línea, el mismo se puede ingresar de forma indirecta a los accesorios al modificarles el coeficiente de pérdida ( $K_{mul}$  ó  $K$ ) a través de la siguiente ecuación:

$$(K_{\text{mult.}})_{\text{AJUSTADO}} = \frac{(K_{\text{mult.}})_{\text{NORMAL}}}{\left(\frac{\text{FLOWEFF}}{100}\right)^2} \quad (2.22)$$

donde:

Unidades

S.I.

$(K_{\text{mult.}} \text{ ó } K)_{\text{AJUSTADO}} =$  Coeficiente de pérdida de carga, ajustado por el factor de eficiencia al flujo. Pa

$(K_{\text{mult.}} \text{ ó } K)_{\text{NORMAL}} =$  Coeficiente de pérdida de carga, ingresado inicialmente en la simulación original. Pa

FLOWEFF= Eficiencia al flujo Adim.

## **CAPÍTULO III**

### **DESARROLLO DEL TRABAJO**

A continuación se presenta la metodología a emplear para el desarrollo y alcance de los objetivos trazados en el presente trabajo.

#### **3.1 Revisión bibliográfica**

Esta es la etapa inicial del proyecto, la cual se basó en la búsqueda y recopilación de información relacionada con el sistema de bombeo de crudo Hamaca Blend desde Petropiar hasta la plataforma sur del Terminal de Almacenamiento y Embarque de Crudo José Antonio Anzoátegui. Los basamentos teóricos, se obtuvieron mediante la consulta bibliográfica en diversos medios como: libros, manuales de operación, tesis de grado, documentos de internet, normas nacionales e internacionales.

#### **3.2 Recopilación de información del sistema**

Esta etapa se basó en la recopilación de información de las diferentes áreas que conforman el sistema de bombeo, así como, del proceso actual de despacho de crudo Hamaca Blend; para lo cual se revisaron las rutas de las tuberías que parten desde el patio de tanques en el área 90 en la unidad 61 del mejorador Petropiar hasta la plataforma sur del Terminal de almacenamiento y embarque de crudo José Antonio Anzoátegui, lugar donde el crudo es entregado al buque tanque.

Para ello se necesitó del apoyo técnico de los supervisores y custodios de las diferentes áreas que conforman el sistema de bombeo, el grupo de trabajo de la sala

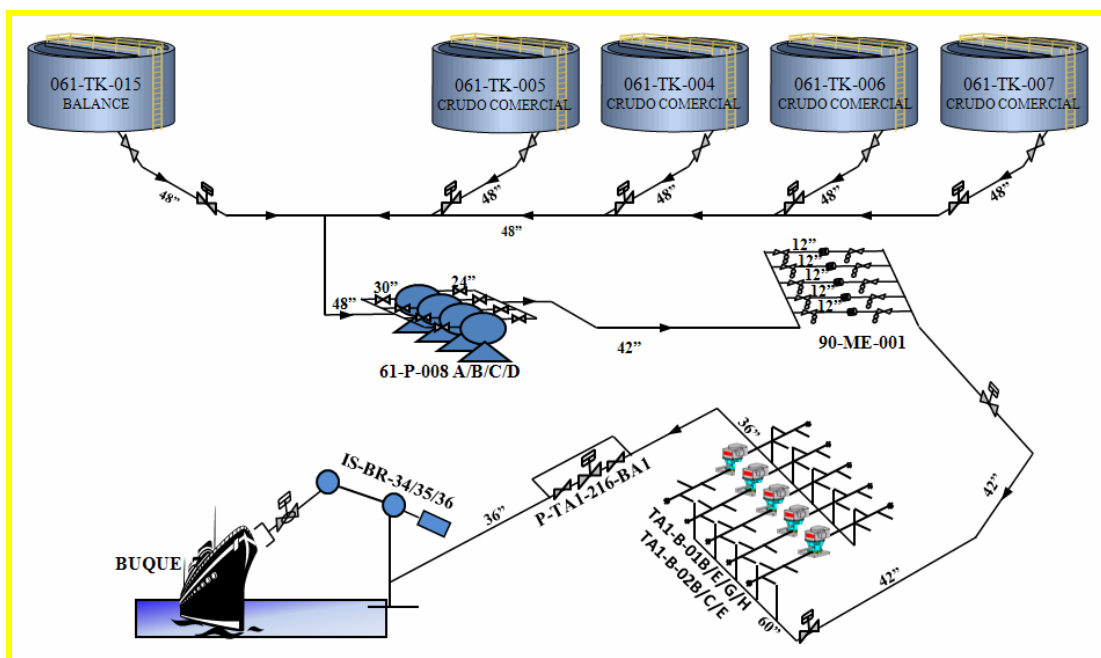
de dibujo técnico de la superintendencia de Proyectos Operacionales y el equipo de trabajo de movimiento de crudo y productos de la superintendencia de Ingeniería de Procesos de la Refinería Puerto la Cruz.

### **3.3 Descripción del sistema de bombeo actual**

A fin de realizar un análisis certero del problema planteado, es imprescindible partir de una comprensión del sistema en estudio, por tal motivo a continuación se presenta la descripción del mismo. Para una mejor visualización de lo expresado en el texto se puede observar el diagrama presentado en la figura 3.1.

El sistema de bombeo de crudo Hamaca Blend parte de uno de los cinco tanques (61-TK-004/005/006/007/015). El 61-TK-015, denominado tanque de balance, no siempre es utilizado para el almacenamiento de crudo comercial, pero existen casos en los que su uso resulta necesario y por esto también se considera como parte del sistema hidráulico. Cada uno de estos tanques está conectado por medio de una línea de 1219,2 mm (48") con el múltiple de succión de las bombas de crudo comercial (61-P-008A/B/C/D). De este múltiple se derivan cuatro líneas de 762 mm (30") cada una a la succión de una de las bombas. Cada bomba tiene una línea de descarga de 609,6 mm (24") que se conecta con el múltiple de salida de 1066,8 mm (42"), quien a su vez está unido a una línea del mismo diámetro que conduce el crudo hasta el sistema de medición (unidad LACT 90-ME-001), donde debería ser medido su volumen, propiedades, temperatura, entre otras cosas. Al salir del sistema de medición por una tubería de 1066,8 (42") el crudo es transportado hasta el múltiple 1 del TAECJAA, lugar en el que se conecta con el cabezal de succión 60"-P-TA1-124 de las bombas TA1-B-01B/E/G/H y TA1-B-02B/C/E; por lo que una vez establecido el despacho de crudo Hamaca Blend, el TAECJAA deberá alinear varias de estas bombas con dicho cabezal. La descarga de las bombas que sean seleccionadas tendrán que conectarse con la línea 36"-P-TA1-216-BA1, que enlaza la descarga de las

bombas con la válvula de control (P-TA1-216), a través de la cual se regula la presión y el caudal manejado por las bombas alineadas. Luego de pasar por la válvula de control el crudo es transportado a través de una línea de 914.4 (36"-CR-IS-1004-DA1) hacia la plataforma sur; allí por medio de una válvula de bloqueo se une al múltiple que distribuye el caudal en los brazos de carga (IS-BR-34/35/36), quienes constituyen la conexión final entre oleoducto y el buque tanque.



**Fig. 3.1** Diagrama del sistema de bombeo de crudo Hamaca Blend desde Petropiar hasta la plataforma sur del TAECJAA.

### 3.3.1 Condiciones Operativas de la Bomba

En el estudio de la condición actual del sistema de bombeo, es de gran importancia conocer el estado de funcionamiento en el que se encuentran las bombas, ya que ellas son las encargadas de proporcionarle la energía al fluido para que este pueda completar su recorrido. Para ello se debe construir las curvas características de

las mismas y compararlas con las proporcionadas por el fabricante. Esto se realiza por medio de la obtención simultánea de una serie de parámetros, a medida que se varía el caudal manejado por las bombas.

Las mediciones de los parámetros fueron tomadas con las bombas instaladas en el sistema de bombeo, debido a que no fue posible sacarlas de funcionamiento para llevarlas a un laboratorio donde se les pudiera realizar las pruebas pertinentes al estudio.

Los parámetros que se deben medir para la realización de las curvas son los siguientes:

➤ Caudal manejado por cada bomba

El caudal manejado por cada bomba es igual al caudal total que circula por el sistema dividido por el número de bombas en funcionamiento. Este criterio fue tomado basado en las siguientes premisas:

- a) No se contó con un equipo capaz de medir el caudal real que pasa por cada una de las bombas, si no que la instrumentación existente en el sistema sólo cuantifica el caudal total.
- b) Las bombas son iguales y están dispuestas en paralelo.
- c) Las conexiones entre el cabezal de succión y la entrada de la bomba, y la salida de la bomba y el cabezal de descarga, es igual en todas las bombas.

➤ Presión de succión y descarga de la bomba

Para obtener estos parámetros se tomaron mediciones directas en dichos puntos, mientras las bombas se encontraban en funcionamiento.



➤ **Potencia consumida por la bomba**

Este parámetro no pudo ser tomado de forma directa, ya que no se contó con las herramientas necesarias para hacerlo. Por esta razón, dicho valor se obtuvo como resultado de multiplicar la eficiencia del motor eléctrico por la potencia consumida por él, la cual fue medida en campo a través la instrumentación existente en el sistema.

### **3.3.1.1 Cálculo de las curvas características de las bombas**

A continuación se describen los procedimientos empleados para el cálculo de cada una de las curvas, cabe destacar que estos cálculos se repitieron con diferentes caudales y fueron empleados tanto para las bombas de Petropiar (61-P-008A/B/C/D) como para las bombas del TAECJAA (TA1-B-01B/E/G/H y TA1-B-02B/C/E).

➤ **Variación de la altura de carga con el caudal de operación.**

En el cálculo del cabezal de carga proporcionado por la bomba para cada caudal, se aplicó la ecuación 2.3 entre la succión y descarga de la bomba, donde: las elevaciones de estos puntos fueron tomadas de los isométricos correspondientes a ellos, la diferencia entre las energías cinéticas se consideró despreciable y las presiones en la succión y la descarga de las bombas se tomaron de las tablas A.1, A.2 y A.3 incluidas en los apéndices. Por otra parte, el caudal manejado por cada bomba fue el caudal total que circula por el sistema dividido por el número de bombas encendidas. Los resultados se presentaron en forma gráfica y se compararon con la curva característica proporcionada por el fabricante.

➤ **Variación de la potencia con el caudal de operación**

En el cálculo de la potencia se empleó la ecuación 2.17, donde: la potencia consumida por el motor eléctrico de la bomba se tomó de las tablas A.1, A.2 y A.3 incluidas en los apéndices. Además la eficiencia de los motores de las bombas de Petropiar y el TAECJAA fue de 95% y 96% respectivamente, acorde con lo

establecido en sus hojas de datos. Los resultados se presentaron en forma gráfica y se compararon con la curva característica proporcionada por el fabricante.

➤ **Variación de la eficiencia con el caudal de operación**

Para el cálculo de la eficiencia se aplicó la ecuación 2.18, donde el caudal, la altura de carga y la potencia de la bomba se tomaron de los cálculos antes realizados. Los resultados se presentaron en forma gráfica y se compararon con la curva característica proporcionada por el fabricante.

Las hojas de datos de las bombas 061-P008A/B/C/D, TA1-B01B/E/C/D y TA1-B-02B/C/E proporcionadas por los fabricantes, se muestran en las figuras A.4, A.5 y A.6, respectivamente, del apéndice.

### **3.4 Identificación de las limitaciones e inconvenientes que ocasiona el rebombeo del crudo Hamaca Blend en el TAECJAA**

Para la identificación de las limitaciones e inconvenientes, se revisaron las bitácoras operacionales del TAECJAA, se realizaron visitas a campo y entrevistas no estructuradas tanto a los operadores como al personal de mantenimiento del TAECJAA.

#### **3.4.1 Limitaciones**

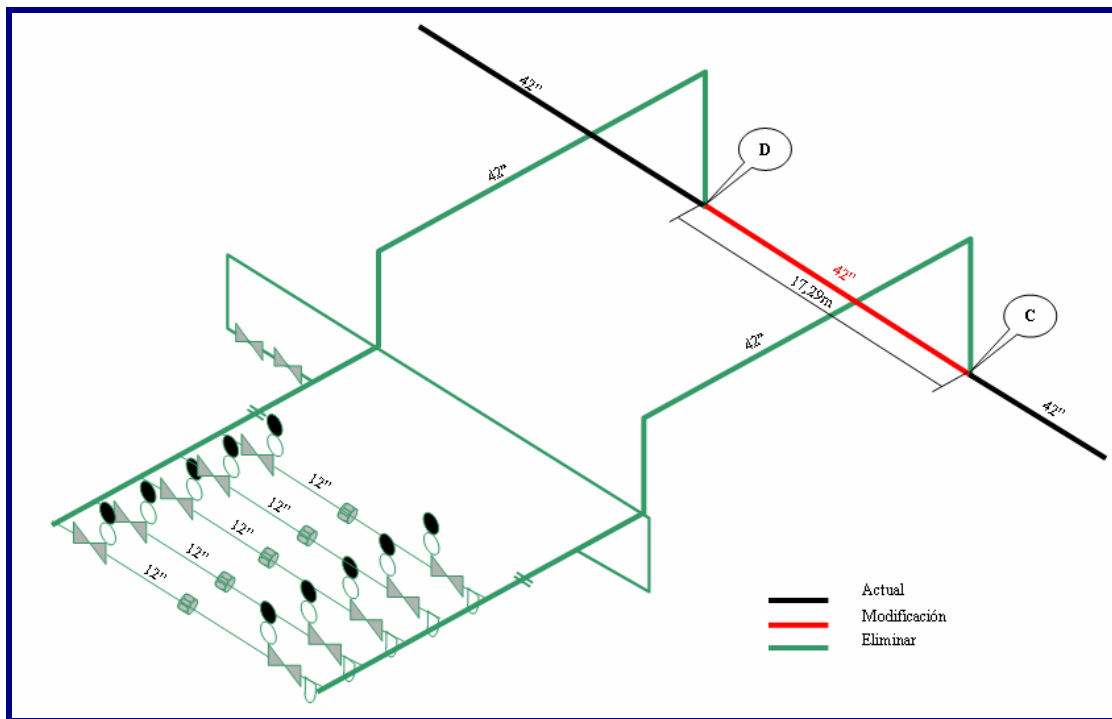
- Restricción en la disponibilidad del muelle sur para cargar otros crudos, ya que por problemas operacionales durante la carga de crudo Hamaca Blend se excede el tiempo de utilización establecido para dicho proceso.
  
- Reducción del número de bombas disponibles en el TAECJAA, debido que algunas de ellas deben colocarse fuera de servicio para realizarle labores de mantenimiento.

### 3.4.2 Inconvenientes

- Al realizar el cambio de tanque en Petropiar las bombas del TAECJAA tienden, en algunas ocasiones, a cavitarse o a apagarse por baja presión en la succión.
- Fatiga en las tuberías y accesorios por sobrepresión entre las bombas de Petropiar y las del TAECJAA, ya que al activarse el sistema de parada de emergencia se cierran las válvulas de bloqueo de plataforma (Bettys) y se apagan las bombas del TAECJAA, mientras que las de Petropiar continúan funcionando hasta dispararse por alta presión.
- Daños en los manómetros y problemas en las bombas del TAECJAA, debido a las altas presiones en la succión en las mismas.
- Pérdida de energía hidráulica, debido al empleo innecesario de un sistema de medición (unidad LACT) en la línea de crudo comercial. La misma fue colocada con la finalidad de cuantificar la cantidad de crudo despachado por Petropiar, sin embargo en la actualidad la cuantificación se realiza por aforamiento de tanque de acuerdo con lo ordenado por el Ejecutivo Nacional mediante el oficio N° 1012 de fecha 7 de septiembre de 1999, emanado por el Ministerio de Energía y Minas, ahora Ministerio del Poder Popular para la Energía y el Petróleo (MENPET).
- Interrupción del proceso de carga del buque, debido a la ausencia de sincronización entre el personal responsable de las operaciones de Petropiar y las del TAECJAA.

### 3.5 Planteamiento de opciones que permitan eliminar el rebombeo del crudo Hamaca Blend en el TAECJAA

A continuación se plantearán tres opciones que permitan evitar el rebombeo de crudo desde el TAECJAA, a fin de solventar los inconvenientes y limitaciones antes expuestos.



**Fig. 3.2** Salto de línea del Sistema de Medición.

Como modificación común entre las tres opciones a plantear está la desincorporación del sistema de medición. Para llevar a cabo esta modificación, se deben unir las líneas que se encuentran a los extremos de la unidad LACT, colocando un tramo de tubería de 17,29m de longitud que conecte los puntos C y D mostrados en la fig. 3.2. Este tramo deberá ser de 1066.8 mm (42") de diámetro, ya que con esto se mantiene la uniformidad en el diseño de la línea de proceso.

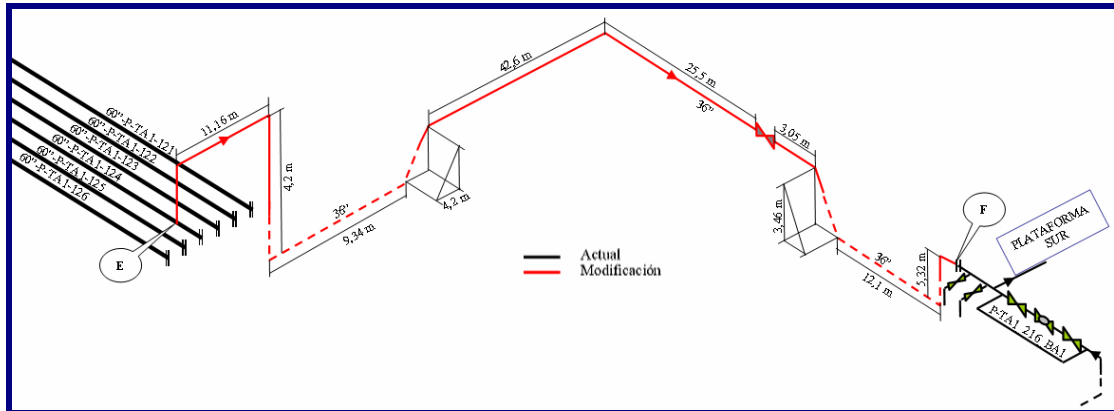
### 3.5.1 Primera Propuesta

Evitar el paso del fluido por las bombas del TAECJAA. Tomando en consideración que actualmente existe sobrepresión en la succión de las bombas del TAECJAA y que al desincorporar el sistema de medición este fenómeno se incrementará, se plantea la posibilidad de manejar el crudo utilizando sólo las bombas de Petropiar (61-P-008A/B/C/D).

Para realizar esta modificación se deberán conectar el cabezal 60"-P-TA1-124 (punto E) con el extremo de la válvula de control P-TA1-216-BA1 (punto F), como se muestra en la fig. 3.3. El dimensionamiento del salto de línea, tanto del recorrido como del diámetro del mismo, se realizó a partir de tres premisas prioritarias: disposición de espacio, velocidad de erosión y caída de presión por longitud. Para determinar la geometría de este salto se estudió la disponibilidad de espacio, ya que al ser una planta de manejo de crudo en ella están dispuestas una serie de tuberías que limitan los espacios libres para la ubicación de nuevas líneas. Para ello se empleó la norma ASME/ANSI B31.4, en la cual se establecen los límites de cercanía entre la ubicación de una línea nueva con respecto a otra ya existente.

Por otra parte, el dimensionamiento de la tubería se realizó a partir de los siguientes dos criterios: primero, que la caída de presión por longitud no exceda al máximo de caída de presión de 0,45 kPa/m (0,02 psi/pie) según la norma PDVSA MDP-02-FF-03 y en segundo lugar que la velocidad máxima del fluido no supere la velocidad de erosión para servicios continuos, 4,1 m/s (13,47 pie/s) para el fluido en estudio de acuerdo con la PDVSA 90616.1.024.

Para el dimensionamiento del salto de línea se evaluaron tres diámetros: 762 mm (30"), 914,4 mm (36") y 1066,8 mm (42"), para seleccionar el menor de ellos que cumpla con lo establecido por las normas antes mencionadas.

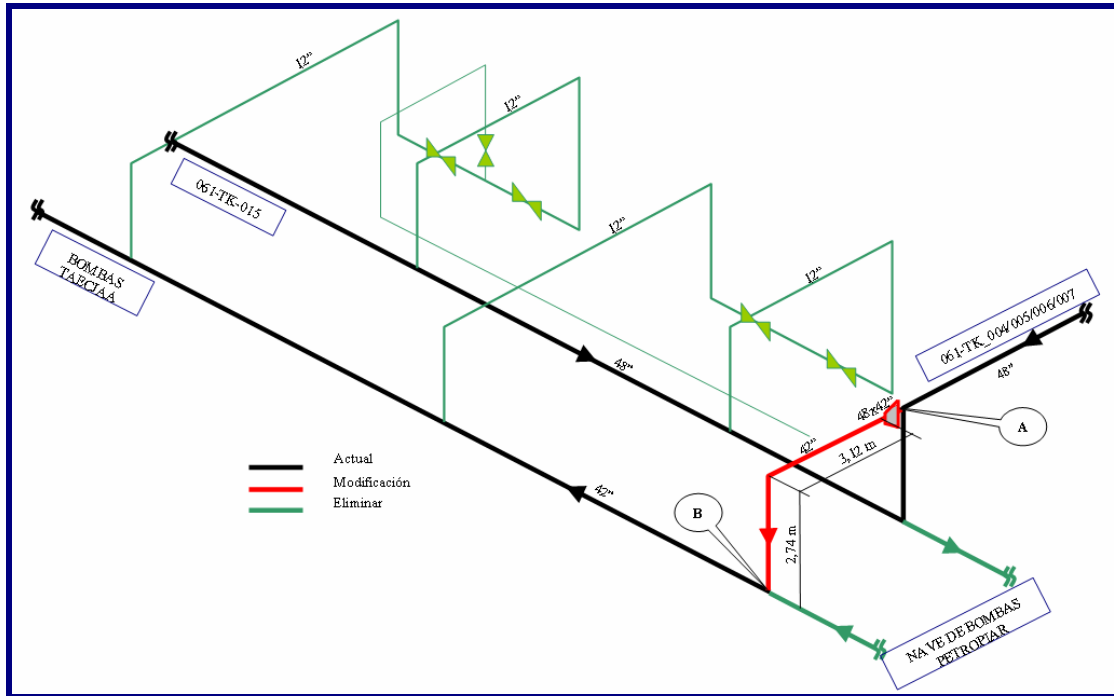


**Fig. 3.3** Salto de línea de las bombas TAECJAA.

### 3.5.2 Segunda Propuesta

Evitar el paso del fluido por las bombas de Petropiar. Considerando que al no existir la restricción antes ocasionada por el sistema de medición y tomando en cuenta la disposición geodésica entre las estaciones de bombeo, se plantea la posibilidad de manejar el crudo directamente desde las bombas del TAECJAA, disminuyendo así la probabilidad de que ocurran inconvenientes asociados a la alta exigencia de sincronización entre las operaciones del TAECJAA y Petropiar.

Para evitar el paso del crudo por las bombas 61-P-008A/B/C/D, se debe unir la línea que va hacia el múltiple de entrada de las bombas con la línea que viene del múltiple de salida de ellas, esto a través de un tramo que inicie en el punto A con una reducción de 1219,2x1066,8mm (48x42") seguido de una línea de 1066,8 mm (42") que se conecte con la salida del múltiple de descarga de las bombas 61-P-008A/B/C/D en el punto B, como se muestra en la fig. 3.4.



**Fig. 3.4** Salto de línea de las bombas Petropiar.

### 3.5.3 Tercera Propuesta

Evitar el paso del fluido por las bombas del TAECJAA y sustituir las bombas de Petropiar por otras de mayor capacidad. Para llevar a cabo esta opción primero se debe evitar el paso del crudo a través de las bombas del TAECJAA, lo cual se basa en las mismas razones expuestas en el desarrollo de la primera propuesta, y en segundo lugar se deben sustituir las bombas de Petropiar por un arreglo de bombas que sea capaz de manejar el crudo a una tasa de carga de  $7949,4 \text{ m}^3/\text{h}$  (50000 BPH) hasta buque, a fin de cumplir con los requerimientos de carga establecidos por el mejorador. Cabe destacar que esta propuesta se estudiará solamente en el caso de que al analizar la primera propuesta se determine que las bombas 061-P-008A/B/C/D no son capaces de cumplir con los requerimientos de carga.

### **3.6 Evaluación hidráulica del sistema de bombeo de crudo Hamaca Blend, mediante el simulador PIPEPHASE 9.1**

Para realizar la evaluación del sistema de bombeo es necesario establecer los datos a emplear y las consideraciones a tomar en el montaje de la simulación.

- El producto en estudio es crudo Hamaca Blend, las características del mismo (°API, viscosidad cinemática, presión de vapor, entre otras cosas) se encuentran especificadas en la tabla D.1 del apéndice.
- Los datos de las longitudes, elevaciones y diámetros de las líneas, así como los tipos de accesorios y sus diámetros fueron tomados de los isométricos del sistema, presentados en el Apéndice G.
- Las curvas características de las bombas empleadas fueron las proporcionadas por el fabricante y se tomaron de las figuras A.4, A.5 y A.6 del apéndice.
- La válvula de control P-TA1-216-BA1 se consideró que estaba 100% abierta (representada en la simulación por una válvula de bola), ya que la misma puede provocar que la curva del sistema varíe en infinidad de posiciones dependiendo de la apertura que tenga, porque en caso de que se desee regular el caudal manejado por el sistema, simplemente se deberá cerrar la misma en la proporción adecuada.

#### **3.6.1 Montaje de la Simulación del Sistema Actual en PIPEPHASE 9.1**

Para realizar el montaje de la simulación, se inició el programa y se ingresaron los datos que el mismo requiere para su configuración, tomando en consideración, para este caso en específico, que:



- El tipo de simulación es modelo de red, ya que es la que concuerda con el tipo de fluido y con la configuración de la red de tuberías.
- El tipo de fluido es líquido, debido a que el fluido es transportado en fase líquida y está movido por bombas centrífugas las cuales manejan sólo líquido.
- El sistema de unidades seleccionado fue el internacional.

Una vez establecidas las consideraciones del análisis, se le ingresan las propiedades del fluido en estudio (°API y viscosidad cinemática mostrados en la tabla D.1 del apéndice) y luego se realiza un esquema del sistema de bombeo seleccionando en la barra de herramientas los iconos correspondientes a cada elemento que constituye dicho sistema (fuentes, sumideros, tramos de tuberías y nodos), para después ingresarle los datos requeridos por cada uno de ellos.

Después de ingresados todos los datos de la simulación, entonces se procede a chequear que las condiciones de borde no ocasionen un error que evite la convergencia de los cálculos que realizará el simulador, para ello se presiona el botón check. Una vez chequeada la simulación se procederá a correr la misma y a visualizar los resultados.

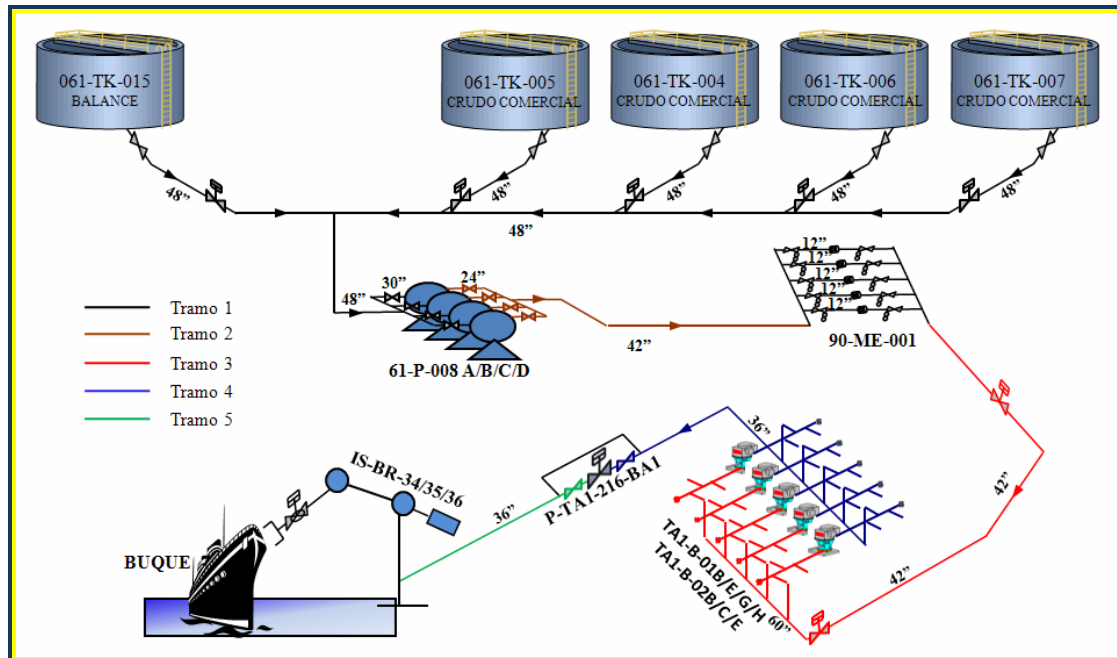
### **3.6.2 Validación de la Simulación**

Dado que el sistema hidráulico posee una estación de bombeo, un sistema de medición, una estación de rebombeo y una válvula de control, se hace necesario separarlo en cinco tramos, para tomar las caídas de presiones a lo largo de cada tramo y compararlas con los valores reales del sistema en operación, lo que permitirá validar la simulación.

Esta división se realizará partiendo de la premisa de que la presión en la fuente y el caudal manejado por el sistema, serán variables de entorno, las cuales estarán regidas por el nivel del tanque y el caudal manejado por el sistema para el momento de la toma de los datos operacionales.

La división realizada es presentada en los siguientes tramos:

- El primero contempla desde la salida de uno de los tanques 61-TK-004/005/006/007/015 hasta la entrada de las bombas 61-P-008A/B/C/D, y está representado por el tramo de color negro en la figura 3.5.
- El segundo tramo va desde la salida de las bombas 61-P-008A/B/C/D hasta la entrada del sistema de medición, descrito en la figura 3.5 por el tramo de color marrón.
- El tercer tramo inicia en la salida del sistema de medición y culmina en la succión de las bombas TA1-B-01B/E/G/H y TA1-B-02B/C/E, esto se puede visualizar en la figura 3.5 como el tramo de color rojo.
- El cuarto tramo va desde la descarga de las bombas TA1-B-01B/E/G/H y TA1-B-02B/C/E hasta la entrada de la válvula de control P-TA1-216-BA1, el cual está ejemplificado en la figura 3.5 por el tramo de color azul.
- Finalmente el quinto y último tramo abarca desde la salida de la válvula de control P-TA1-216-BA1 hasta la plataforma sur, específicamente en la entrada a los brazos de carga, representado por el tramo de color verde en la figura 3.5.



**Fig. 3.5** Tramos del sistema de bombeo de crudo Hamaca Blend desde Petropiar hasta la plataforma sur del TAECJAA.

Luego, a fin de validar la simulación, se compararon las caídas de presión arrojadas por ella con las operacionales para cada tramo. Debido a la discrepancia entre estos valores, se procedió a ajustar la simulación, con la finalidad de que su comportamiento sea similar al real. Para lograr dicho ajuste se determinó el factor de eficiencia al flujo para cada tramo a través de la ecuación 2.21. Este factor de ajuste se le aplicó tanto a las tuberías como a los accesorios. Puesto que el simulador no posee la opción de introducirle este factor a los accesorios, entonces a los coeficientes de pérdidas ( $K$  ó  $K_{mult.}$ ) se les aplicó la ecuación 2.22, con la finalidad de ajustar tanto a las pérdidas de carga en la tubería como las pérdidas de carga en los accesorios.

### 3.6.3 Evaluación Hidráulica de las Propuestas

Una vez ajustada la simulación, se procederá a ingresarle las modificaciones de las propuestas planteadas, para luego calcular la caída de presión en cada tramo, a fin

de construir las curvas de variación de la altura de carga del sistema con el caudal y la variación del  $NPSH_D$  con el caudal. Esto se realizará para la situación de operación más crítica, es decir, mínimo nivel en el tanque de crudo comercial.

En el caso de las dos primeras propuestas se graficará la curva de requerimiento de cabezal del sistema en conjunto con la del respectivo arreglo de bombas para evaluar si ellas son capaces de cumplir con las condiciones de carga del sistema. Mientras que para la última propuesta se tomarán las exigencias de cabezal y caudal requeridas para el cumplimiento de las condiciones de carga del buque. Con estos valores se planteará una configuración de un nuevo sistema de bombeo que permita variar el flujo total.

### **3.6.3.1 Determinación de la variación de la altura de carga del sistema con el caudal**

Para la determinación del cabezal  $H_s$  se empleará la ecuación 2.3. Para la aplicación de esta ecuación se tomaron las siguientes consideraciones:

- El punto 1 representará el tanque, ya que allí comienza el oleoducto.
- El punto 2 está ubicado justo antes de entrar a los brazos de carga, dado que este lugar representa mejor el final del oleoducto, debido a que en ocasiones uno de los brazos no se emplea durante la carga, bien sea porque se le está haciendo mantenimiento o, en algunos casos, por exigencia del buque.
- La velocidad en el punto 1 se tomará igual a cero ( $V_1 = 0$  m/s).
- La presión en el punto 1 será igual a la presión en el pie del tanque cuando está a mínimo nivel ( $P_1 = 76,10$  kPa (11,04 psig)).

- La presión en el punto 2 será igual a 310,2 kPa (45 psig), la cual corresponde a la máxima presión medida en este punto durante la carga de diversos buques con crudo Hamaca Blend, (ver tabla C.1 del apéndice).
- La velocidad 2 al igual que los términos de pérdida de carga debido al flujo y a la diferencia de altura entre ambos puntos, fueron tomados del reporte del simulador.

### **3.6.3.2 Determinación de la variación del $NPSH_D$ con el caudal**

Para la determinación del cabezal  $NPSH_D$  se empleará la ecuación 2.19, partiendo de la presión de vapor expresada en la tabla D.1 del apéndice, mientras que la presión en el punto 1 corresponderá a la de la succión de la bomba, la cual será igual a la reportada por PIPHEPSASE. Esto se realizará para cada propuesta a medida que se varía el caudal manejado por el sistema de bombeo. Luego, a fin de establecer un diseño conservador, el  $NPSH_D$  será dividido por un factor de seguridad de 1,1 de acuerdo con lo establecido en el manual de diseño de procesos PDVSA MDP-02-P-06, así como verificar que el  $NPSH_D$  se encuentre 0.91m (3pie) por encima del  $HPSH_R$  de acuerdo con lo establecido en la norma PDVSA.

Una vez obtenida la curva  $NPSH_D$  se comparará con la curva  $NPSH_R$  para las dos primeras propuestas, a fin de verificar si las bombas podrían manejar el máximo caudal requerido sin llegar a cavitación. Mientras que para la tercera propuesta el punto de cruce entre la curva  $NPSH_D$  y el caudal máximo requerido, indicará el máximo valor de  $NPSH_R$  que podría tener el nuevo arreglo de bombas.

### **3.7 Selección de la mejor propuesta**

La elección de la mejor propuesta se basará en el estudio de las curvas generadas durante la evaluación hidráulica de cada propuesta, partiendo de la premisa

de que la mejor opción será la que además de solventar la problemática existente, cumpliendo con los requerimientos de carga establecidos, sea la más factible de poner en práctica.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y ANÁLISIS**

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos por medio de la metodología planteada en el capítulo anterior.

#### **4.1 Comportamiento hidráulico del sistema actual de bombeo**

El estudio de la condición actual del sistema de bombeo, ofreció como resultado el conocimiento del recorrido del mismo, las características de los equipos que lo conforman, las condiciones operativas de los equipos críticos que posee (bombas y sistema de medición), entre otras cosas, sirviendo de base para la verificación de las problemáticas que presenta.

Dentro de las problemáticas mencionadas, se corroboró que el proceso requiere un alto grado de precisión entre las operaciones de Petropiar y del TAECJAA, ya que para funcionar de manera adecuada es necesario que ambas instalaciones de bombeo se encuentren trabajando sincronizadamente, porque al no ocurrir de esa manera el sistema se caerá por las altas o bajas presiones a las que se encontrarían sometidas las bombas, como se puede observar en la tabla B.1 del apéndice, donde se presentan los problemas más comunes que ocurren durante la carga de buques con crudo Hamaca Blend.

Durante visitas al campo se pudieron observar presiones superiores a 689 kPa (100 psig) en la succión de las bombas del TAECJAA, lo cual se encuentra muy por encima del límite máximo establecido para el correcto funcionamiento de las mismas (40 psig según filosofía operacional del Terminal) y esto ocasionó el daño de los

equipos de medición ubicados en este punto, ya que su capacidad no alcanza estas presiones. Por otra parte se pudo constatar que en algunos accesorios han ocurrido fugas, como se muestra en la figura 4.1.



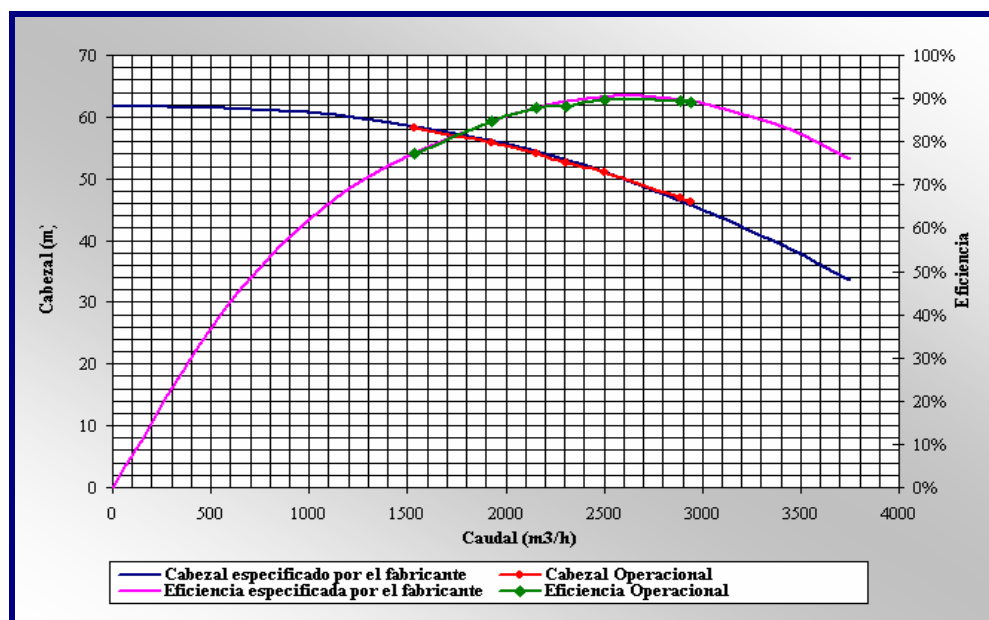
**Fig. 4.1** Evidencias de fugas en válvulas de la línea de la plataforma sur [PDVSA].

#### 4.1.1 Condición Operativa de las Bombas

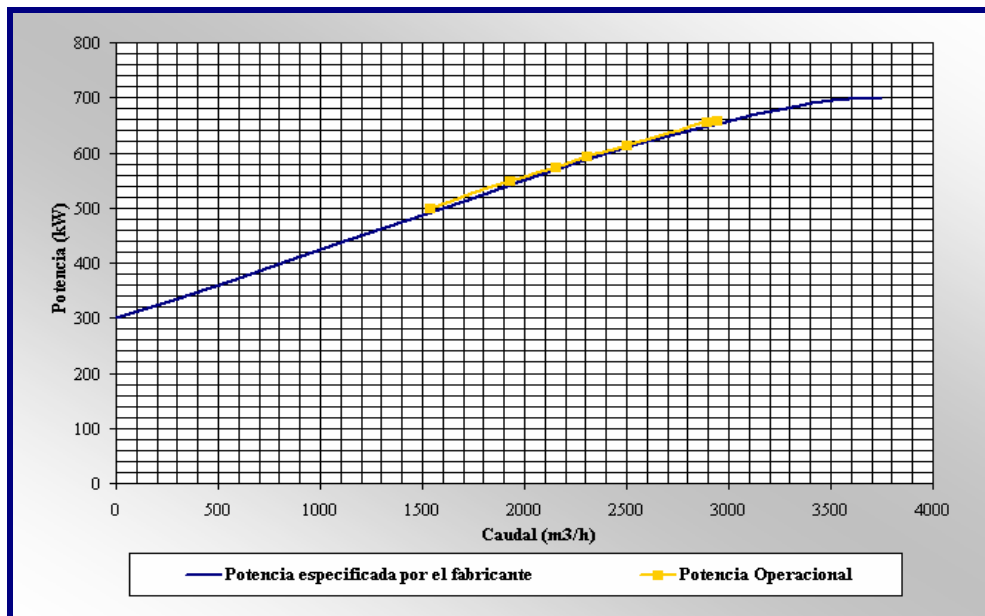
El estudio de las condiciones operacionales de las bombas se basó en la comparación entre las curvas operacionales y las especificadas en sus hojas de datos, observándose que las bombas de Petropiar poseen un comportamiento muy similar al proporcionado por el fabricante en su hoja de datos (ver figura A.4), lo cual se puede constatar en las figuras 4.2 y 4.3. Mientras que las bombas del TAECJAA



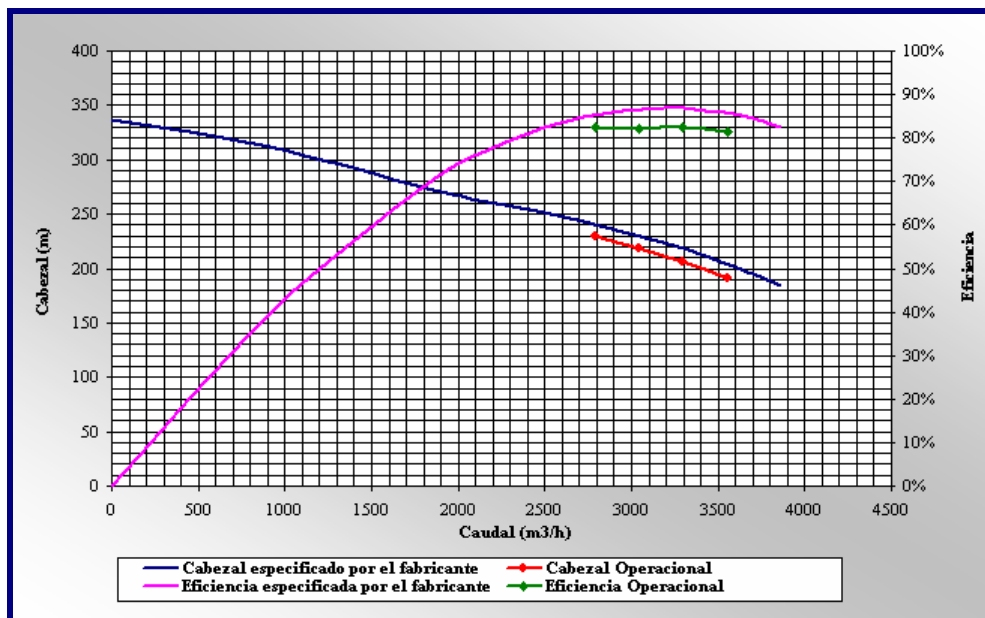
presentaron un cierto grado de discrepancia entre las curvas operacionales y las proporcionadas por el fabricante para las bombas primarias y secundarias (ver figuras A.5 y A.6). Las curvas que presentan mayor discordancia con respecto a lo estipulado por el fabricante son las de eficiencia operacional, presentando disminuciones del 5% y 10% en la eficiencia de las bombas TA1-B-01B/E/G/H y TA1-B-02B/C/E, respectivamente. Lo cual se puede observar en las figuras 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7.



**Fig. 4.2** Comportamiento operacional y comportamiento especificado por el fabricante, de las curvas de cabezal y eficiencia de las bombas 61-P-008A/B/C/D.



**Fig. 4.3** Comportamiento operacional y comportamiento especificado por el fabricante, de la curva de potencia de las bombas 61-P-008A/B/C/D.



**Fig. 4.4** Comportamiento operacional y comportamiento especificado por el fabricante, de la curva de cabezal y eficiencia de las bombas TA1-B-01B/E/G/H.

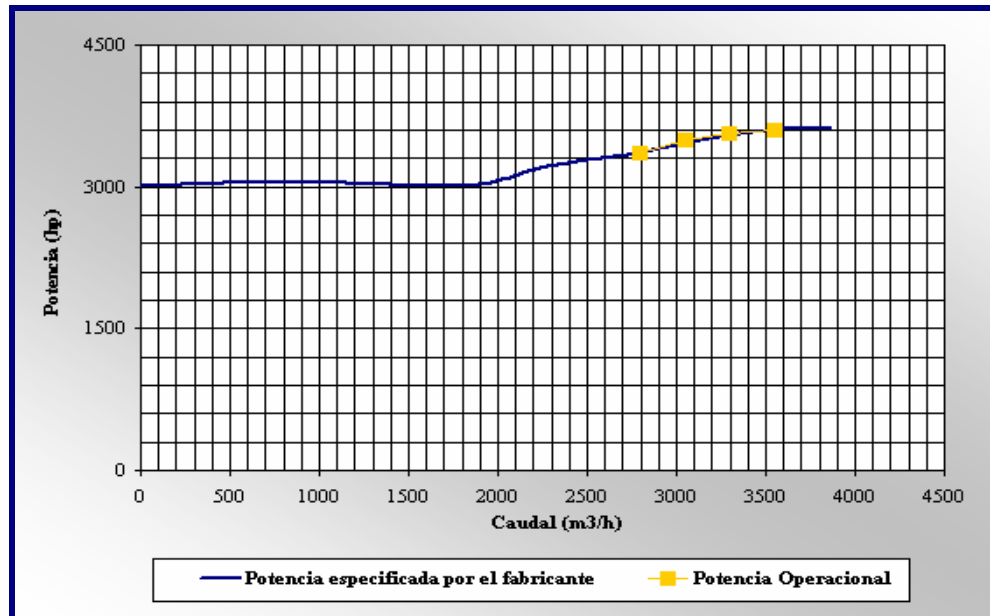
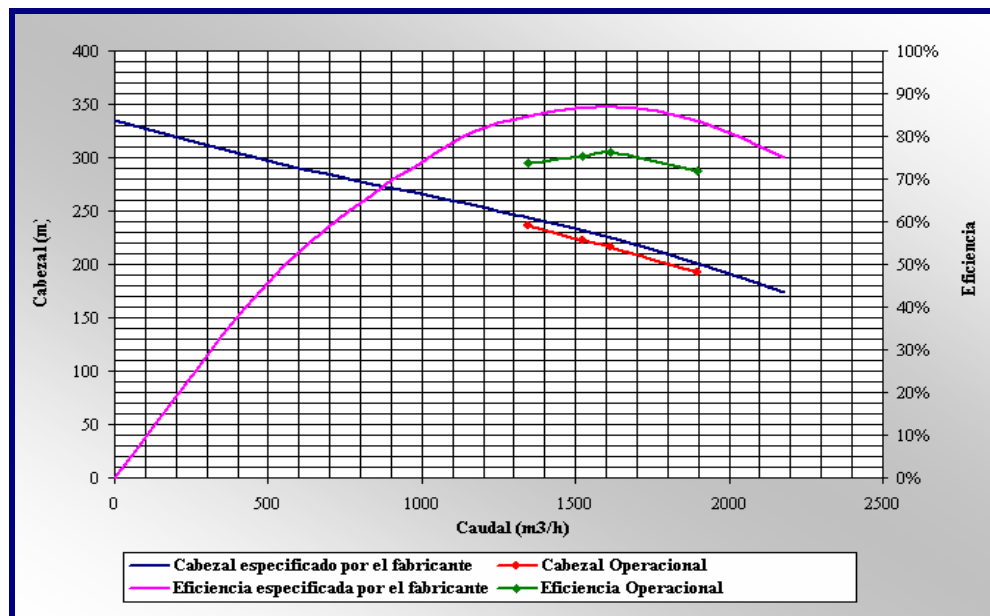
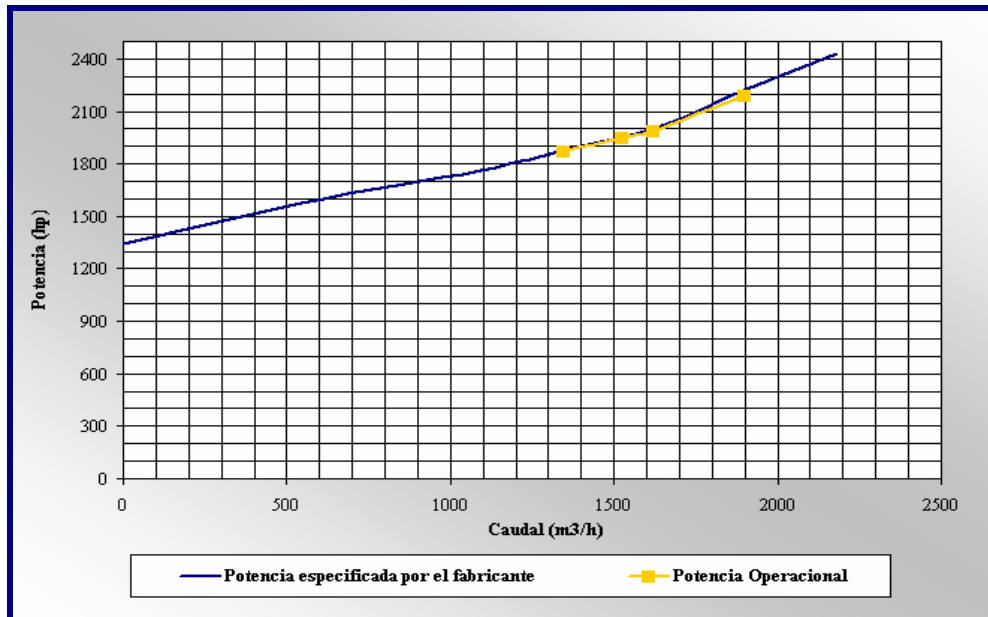


Fig. 4.5 Comportamiento operacional y comportamiento especificado por el fabricante, de la curva de potencia de las bombas TA1-B-01B/E/G/H.



**Fig. 4.6** Comportamiento operacional y comportamiento especificado por el fabricante, de la curva de cabezal y eficiencia de las bombas TA1-B-02B/C/E.



**Fig. 4.7** Comportamiento operacional y comportamiento especificado por el fabricante, de la curva de potencia de las bombas TA1-B-02B/C/E.

## 4.2 Evaluación hidráulica del sistema de bombeo de crudo Hamaca Blend, mediante el uso del simulador PIPEPHASE 9.1

Para evaluar el comportamiento hidráulico que tendrá el sistema de bombeo al aplicarle cada una de las propuestas planteadas, se realizó la simulación del sistema actual, la cual posteriormente se validó con datos operacionales.

### 4.2.1 Validación de la simulación

En este proceso se constató que existía discrepancia entre los datos operacionales y los resultados de la simulación, como se muestra en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1** Valores reales y simulados de la variación de presión en cada tramo.

<b>Tramo</b>	<b><math>\Delta P_{\text{operacional}}</math> (kPa)</b>	<b><math>\Delta P_{\text{simulado}}</math> (kPa)</b>	<b>% Error</b>
<b>1</b>	-36,4632143	6,2725	117,202268
<b>2</b>	-137,857143	-78,5785714	43
<b>3</b>	68,9285714	117,178571	70
<b>4</b>	-64,7928571	-23,4357143	63,8297872
<b>5</b>	-835,414286	-684,460714	18,0693069

Debido a las diferencias presentadas, a la simulación original se le realizaron unos ajustes por medio del factor de eficiencia al flujo, tomando en cuenta que la incongruencia se debió principalmente a que las tuberías y los accesorios que conforman el sistema tienen varios años en servicio, por cuanto sus características no son las mismas a las que poseían originalmente, y además los valores de los coeficientes de pérdidas ( $K$  ó  $K_{\text{mult}}$ ) de los accesorios ingresados en la simulación son los predeterminados por el programa, por no contar con los proporcionados por el fabricante. Este factor de ajuste se le aplicó tanto a las tuberías como a los accesorios, ya que las pérdidas por accesorios son considerablemente influentes en la pérdida de carga debida al flujo del fluido, como se puede observar en la tabla 4.2.

**Tabla 4.2** Variación de presión simulada por tramo y factores de ajustes.

<b>Tramo</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b><math>\Delta P_{\text{sim.}}</math> (KPa)</b>	6,273	-78,579	117,179	-23,436	-684,461
<b><math>\Delta P_{\text{accesorios}}</math> (KPa)</b>	-30,329	-46,871	-48,250	-39,979	-54,454
<b><math>\Delta P_{\text{tuberías}}</math> (KPa)</b>	-19,796	-26,076	-40,054	-25,876	-630,269
<b>% Efic. al flujo</b>	73,47	74,28	80,42	77,89	90,52
<b><math>\Delta P_{\text{sim. Ajustada}}</math> (KPa)</b>	-36,463	-137,857	68,929	-64,793	-834,725

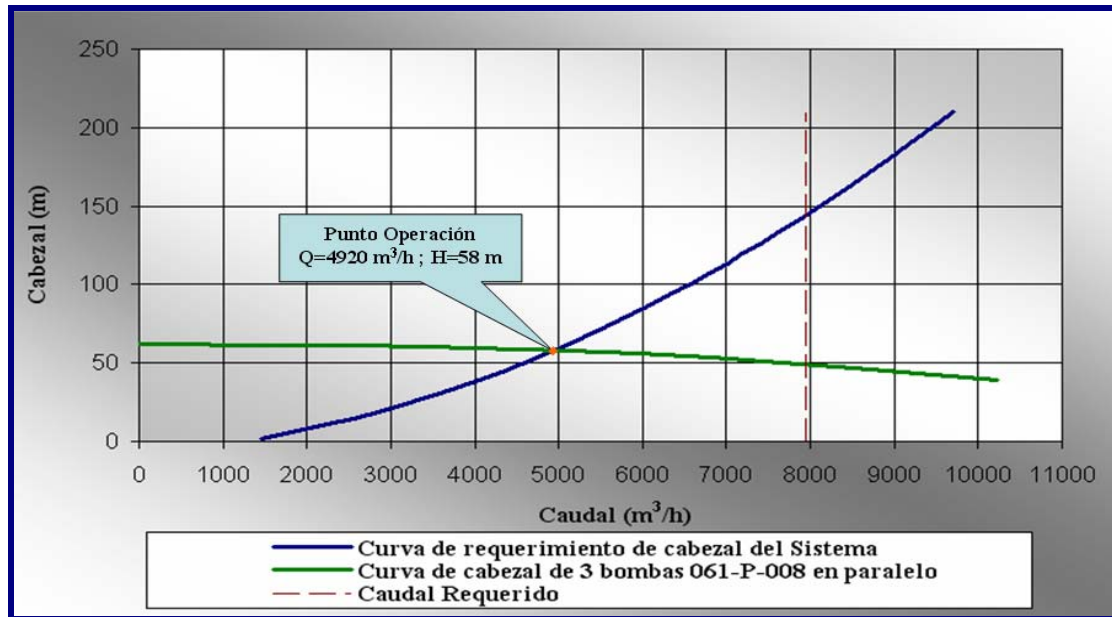
\*Tanto la toma de los datos operacionales como el ajuste de la simulación fue realizado a un caudal de 47910 BPH.

El factor de ajuste resultó diferente para cada tramo (ver tabla 4.2), dado que cada uno de ellos presenta diversidad en número y dimensión tanto de accesorios como de tuberías, así como un grado de utilización distinto, afectando de forma diferente a cada tramo.

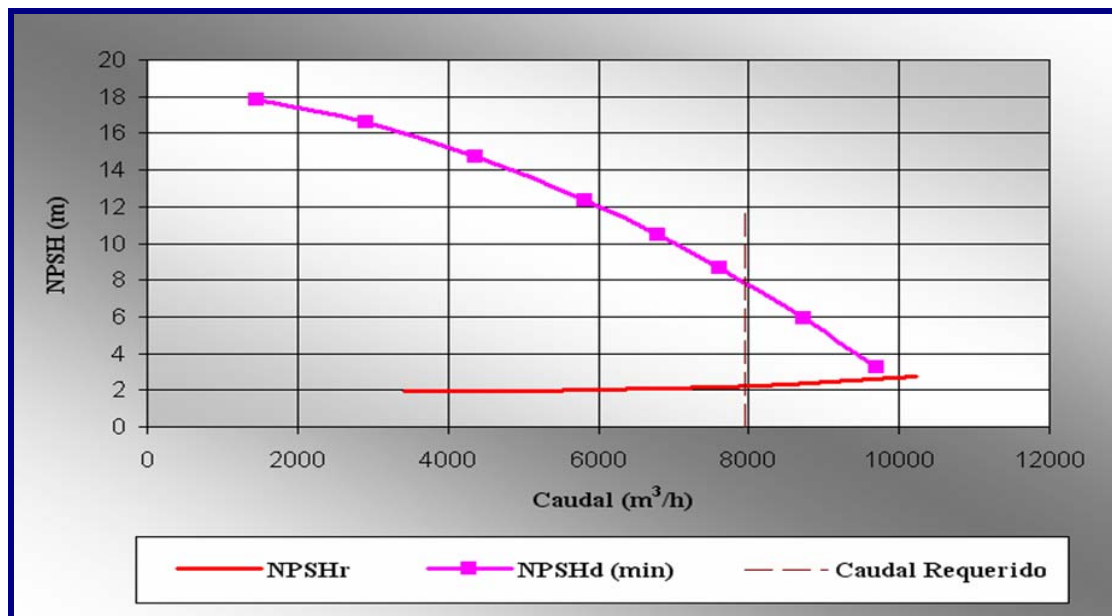
Una vez ajustada la simulación, se procedió a evaluar el comportamiento que tendrá el sistema de bombeo al aplicarle cada una de las propuestas planteadas. Esta evaluación se realizó por medio del análisis de las curvas de operación de las bombas frente a los requerimientos de carga y NPSH del sistema. Estas curvas se construyeron a partir de los resultados arrojados por el simulador. En el apéndice E se muestran los esquemas y una muestra de los reportes de las simulaciones realizadas.

#### **4.2.2 Primera Propuesta: Evitar el paso del fluido por las bombas del TAECJAA**

En la figura 4.8 se puede observar el comportamiento de tres de las bombas 61-P-008A/B/C/D, frente al requerimiento de carga del sistema de bombeo para la primera propuesta. La intercepción de estas curvas denota el punto de operación del sistema de bombeo ( $Q=4920$  m<sup>3</sup>/h y  $H=58$  m), indicando que este arreglo sólo podría manejar flujos iguales o menores al antes mencionado, ya que las bombas no proporcionarán una altura de carga suficiente para satisfacer la exigida por el sistema, a flujos por encima de ese valor. Mientras que en la figura 4.9 se puede notar como el NPSH no representa una limitante para la aplicación de esta propuesta, pues para el caudal de operación el  $NPSH_d$  está 11,9 m por encima del  $NPSH_r$ . Tomando en cuenta todo lo antes mencionado, se establece que esta opción no representa una solución a la problemática existente, dado que, el caudal máximo de operación del sistema estaría muy por debajo del caudal de operación exigido por el mejorador, lo que implicaría un aumento del 150% en el tiempo de carga de los buques con crudo Hamaca Blend y a su vez el congestionamiento del TAECJAA.



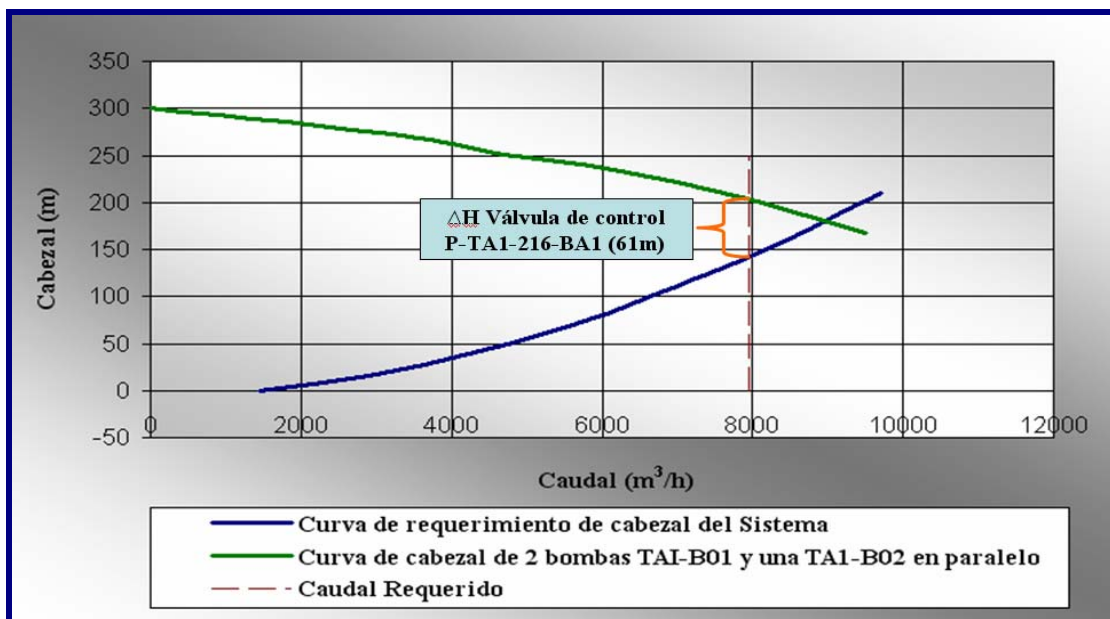
**Fig. 4.8** Comportamiento de tres de las bombas 61-P-008A/B/C/D, frente al requerimiento de carga del sistema de bombeo para la primera propuesta.



**Fig. 4.9** Comportamiento de las curvas NPSH<sub>d</sub> y NPSH<sub>r</sub> en función del caudal para la primera propuesta.

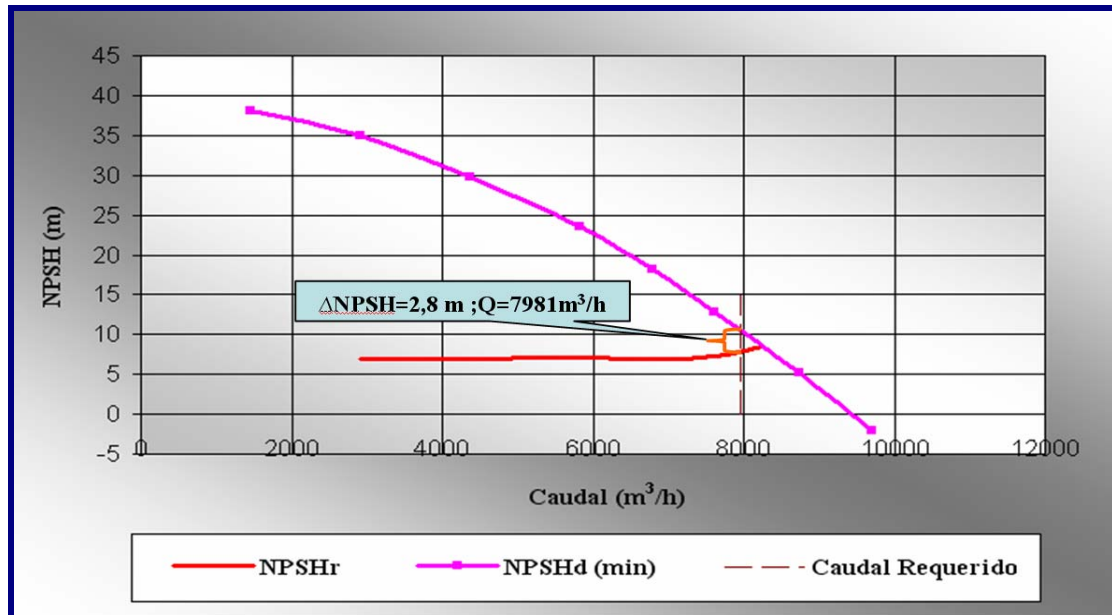
#### 4.2.3 Segunda Propuesta: Evitar el paso del fluido por las bombas de Petropiar

En la figura 4.10 se puede observar el comportamiento de dos de las bombas TA1-B01 y una TA1-B02 en paralelo, frente al requerimiento de carga del sistema de bombeo para la segunda propuesta. Se puede apreciar como el punto de operación está por encima del caudal requerido (7949 m<sup>3</sup>/h), mientras que para dicho caudal el cabezal de carga supera al exigido por el sistema por 61 m. Mientras al comparar las curvas del NPSH<sub>D</sub> y el NPSH<sub>R</sub> (ver figura 4.11), se nota como su intercepción está por encima del caudal requerido, indicando que el sistema podrá manejar caudales menores a 8250 m<sup>3</sup>/h (51890 BPH) a las condiciones de estudio sin que las bombas presenten cavitación, ya que a parte de poseer un factor de seguridad de 1.1 la diferencia entre los NPSH supera los 0.91 m establecidos por la NORMA de PDVSA.



**Fig. 4.10** Comportamiento de dos de las bombas TA1-B01 y una TA1-B02 en paralelo, frente al requerimiento de carga del sistema de bombeo para la segunda propuesta.





**Fig. 4.11** Comportamiento de las curvas NPSHd y NPSHr en función del caudal para la segunda propuesta.

Tomando en cuenta que las condiciones en estudio fueron las más críticas, que el  $NPSH_D$  supera al  $NPSH_R$  en 2,8m a las condiciones de operación establecidas y que la diferencia entre el cabezal proporcionado por las bombas y el requerido por el sistema se podría compensar con el ajuste de la válvula de control P-TA1-216-BA1, se puede deducir, que al aplicar esta propuesta de modificación, el sistema funcionará de forma adecuada bajo las condiciones de operación normal.

#### **4.2.4 Tercera Propuesta: Evitar el paso del fluido por las bombas del TAECJAA y sustituir las bombas de Petropiar por otras de mayor capacidad**

En la figura 4.12 se observa que la línea azul representa la curva de requerimiento de caudal del sistema. Por lo que se puede deducir que el punto de

intersección entre esta curva y el caudal requerido representa el punto de operación de la nueva configuración de bombas, por tal motivo este nuevo arreglo deberá proporcionar un cabezal de carga de 145 m a un flujo de 7949 m<sup>3</sup>/h (50000 BPH).

Las bombas deberán instalarse con una configuración en paralelo, debido a que el proceso demanda una holgura que le permita variar el caudal en un rango que va desde 1590 m<sup>3</sup>/h hasta 7949 m<sup>3</sup>/h y tomando en cuenta que el espacio disponible para instalar las nuevas bombas es el de las actuales, se propone cambiar las existentes (61-P-A/B/C/D) por cuatro de una etapa que proporcionen un cabezal de carga de 145 m a un flujo nominal de 2650 m<sup>3</sup>/h (16667 BPH), para cumplir con el grado de redundancia especificado por el mejorador (tres operan y una está de respaldo) y emplear los equipos existentes en la instalación actual.

Cabe destacar que para las condiciones antes mencionadas el NPSH<sub>D</sub> es de 7,8m, como se puede observar en la figura 4.13, razón por la cual dichas bombas no deberán tener un NPSH<sub>r</sub> superior a éste cuando manejen 2650 m<sup>3</sup>/h (16667 BPH).

El proceso de selección de la bomba para esta propuesta, se realizó entre tres de los fabricantes recomendados por la empresa, obteniéndose que sólo la bomba Goulds Modelo 3620 XX 18x24-31A, cumple con los requerimientos antes mencionados. Su hoja de datos se muestra en el apéndice F.

Para la implementación de esta propuesta, sería necesario cambiar las líneas desde la salida de las nuevas bombas hasta la conexión con la válvula de control P-TA1-216-BA1, por unas de mayor presión de diseño, ya que las actuales tienen una presión de diseño de 150 psi, mientras que las que alcanzaría este tramo estarían por sobre los 200 psi. De igual forma se deberá agregar una válvula de control a la salida de las bombas, dado que el sistema no utilizará la válvula de control P-TA1-216-

BA1, ya que el salto de línea a realizarse en el TAECJAA, se conectará a la salida de la válvula de control, como se muestra en la figura 3.3.

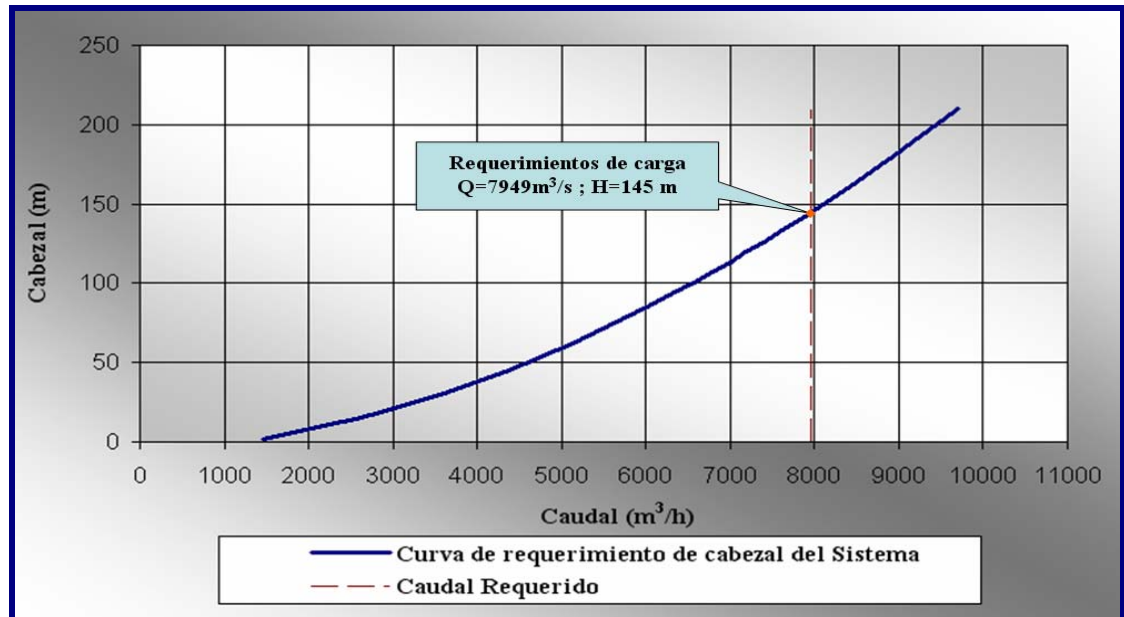
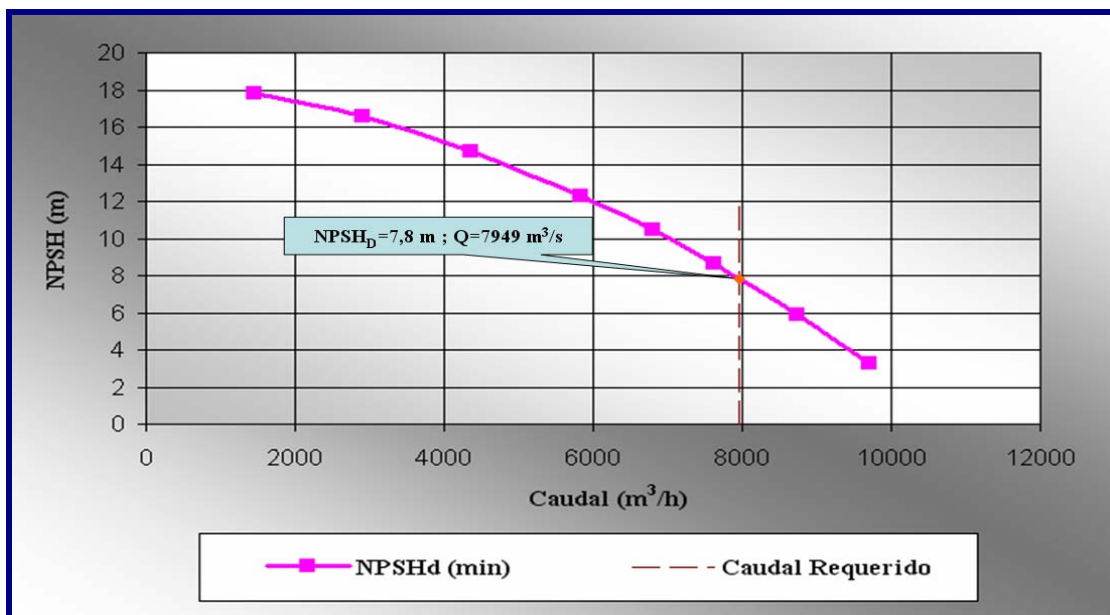


Fig. 4.12 Comportamiento del requerimiento de carga del sistema de bombeo en función del caudal para la tercera propuesta.



**Fig. 4.13** Comportamiento de las curvas NPSHd en función del caudal para la tercera propuesta.

#### **4.3 Selección de la propuesta más factible**

Como resultado del análisis de las propuestas se obtuvo que sólo la segunda y la tercera opción cumplen con los requerimientos de carga del mejorador. Sin embargo la mejor propuesta de modificación es la segunda, LA CUAL consiste en evitar el paso del fluido por las bombas de Petropiar y desincorporar el sistema de medición, ya que el aplicar esta propuesta brinda una serie de beneficios adicionales a los que se obtendrían poniendo en práctica la tercera propuesta. Entre estos beneficios están:

- Conexión del sistema de bombeo con el sistema de parada de emergencia de plataforma.
  
- Saltos de líneas más prácticos para su incorporación en el sistema de bombeo.
  
- No se requiere inversión en equipos de bombeo, ya que se emplearían los actuales.
  
- No será necesario cambiar las tuberías y los accesorios por otros que soporten mayor presión, en el tramo comprendido desde las bombas de Petropiar hasta la salida de la válvula de control P-TA1-216-BA1.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1. Conclusiones**

Después de realizar la evaluación hidráulica del sistema de bombeo de crudo Hamaca Blend desde la planta mejoradora Petropiar hasta la plataforma sur del TAECJAA se concluyó que:

1. Evitar el paso del crudo Hamaca Blend por las bombas 61-P-008A/B/C/D y desincorporar el sistema de medición, representa la mejor opción de rediseño para solucionar la problemática existente en el sistema de bombeo en estudio.
2. Dado que el sistema de medición (unidad LACT) situado en el sistema de bombeo está generando pérdida de energía, sin cumplir con el propósito para la cual fue instalado, se debe desincorporar del sistema.
3. La sobrepresión en la succión de las bombas de manejo de crudo del TAECJAA (TA1-B-01B/E/G/H y TA1-B-02B/C/E) ocasionó el daño de los equipos de medición de presión ubicados en este punto, fugas en algunos de los accesorios y la disminución de aproximadamente 5 y 10% en la eficiencia de dichas bombas.
4. El criterio de mantener la uniformidad en la línea de proceso, predominó en el dimensionamiento de los saltos de líneas de las modificaciones para evitar el paso del crudo tanto por el sistema de medición como por las bombas de Petropiar, mientras que para el dimensionamiento del salto de línea de las bombas del TAECJAA, se calculó el menor diámetro que cumpliera con las condiciones de caída de presión y velocidad del fluido, establecidas por las normas PDVSA

MDP-02-FF-03 y PDVSA 90616.1.024, respectivamente, ya que este tramo es de mayor longitud a los antes mencionados, por cuanto la optimización de su diámetro representa una disminución del costo de esta modificación.

## **5.2 Recomendaciones**

1. Colocar transmisores indicadores de presión en la succiones de las bombas TA1-B-01B/E/G/H y TA1-B-02B/C/E del TAECJAA, para que los operadores del TAECJAA puedan visualizar en sala de control la presión en este punto, a fin de que tomen medidas ante cualquier cambio de presión y eviten que se detenga el proceso de carga.
2. Chequear los equipos del sistema de protección de las bombas del TAECJAA, para corroborar que estén cumpliendo con su función.
3. Visualizar en la sala de control del TAECJAA las presiones en plataforma (múltiple de entrada a los brazos y en el pie de ellos), para que los operadores de sala de tierra, sean más conscientes de las condiciones hidráulicas de la plataforma y así tomar mejores decisiones en función a ello.
4. Mejorar la comunicación entre las operaciones de Petropiar y el Terminal, para evitar los problemas causados por la desincronización entre las operaciones de Petropiar y del TAECJAA.
5. Realizar mantenimiento en lapsos más cortos a las bombas del TAECJAA, para evitar que descienda la eficiencia de las mismas.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Velásquez, C. (1999), **“Análisis y Mejoras del Sistema de Manejo de Crudo de Oriente”** Trabajo de Grado, Universidad de Oriente, Puerto La Cruz, Venezuela.
- [2] Palomo, J. (2005), **“Evaluación del Sistema de Bombeo y Tuberías para el Transporte de Lodos Petrolizados (Slop) desde el Terminal Marino de Guaraguao hasta la Refinería de Puerto La Cruz”** Trabajo de Grado, Universidad de Oriente, Puerto La Cruz, Venezuela.
- [3] Bustamante, A. (2006), **“Evaluación Hidráulica de las Redes de Recolección de Crudo Multifásico Asociadas a las Estaciones de Descarga Bared-5 Y Bared-10 del Campo Bared, PDVSA Distrito San Tomé”**. Trabajo de Grado, Universidad de Oriente, Puerto La Cruz, Venezuela.
- [4] Gerhart P, (1998) **“Fundamentos de la Mecánica de Fluidos”**, Segunda Edición, Editorial Prentice Hall, México.
- [5] Crane, H. (1992), **“Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías”**, Mc Graw-hill, Primera edición, México.
- [6] Zerpa, E., **“Tuberías y Accesorios”**, consultado en: <http://www.arqhys.com/tuberias-accesorios.html>
- [7] Moncada, L. (2006), **“Bombas, Compresores y Ventiladores”**, consultado en: <http://plantasquimicas.iespana.es/Bombas/b8.htm>.

- [8] Mataix C, “**Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas**”, Segunda Edición, Editorial Harla, S.A., España (1982).
- [9] Potter M y otros, “**Mecánica de Fluidos**”, Tercera Edición, Editorial Prentice Hall, México (1998).
- [10] INVENSIS®, SIMSCI – ESSCOR™. (2006), “**PIPEPHASE-Keyword Manual**”, USA.
- [11] Avallone, E. y Baumeister, T. (1995), “**Manual del Ingeniero Mecánico**”, Tomo 1, Mc Graw-hill, Novena edición, USA.
- [12] Mujica, J. (2007), “**Procedimiento de Operaciones de Despacho de Crudo de Petropiar por el Muelle Sur**” primera publicación, Venezuela.
- [13] Alcalá, J. y Vergara M. (1998), “**Filosofía Operacional del Terminal de Almacenamiento y Embarque de Crudo José Antonio Anzoátegui (TAECJAA)**” primera revisión, Venezuela.
- [14] Shames, I. (1995), “**Mecánica de Fluidos**”, 3ra Edición, Editorial McGraw – Hill, Colombia.
- [15] “**La Industria Venezolana de los Hidrocarburos**” (1989), Tomo 1, Centro de Formación y Adiestramiento de Petróleos de Venezuela y sus filiales, Editorial Ex Libris, Caracas, Noviembre.
- [16] Santos, R. (2006), “**Diseño Hidráulico de Sistemas de Distribución de Líquidos Utilizando Bombas Centrífugas**”. Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes, Mérida.



- [17] **“Estación Recolectora de Flujos”** (1982), Centro de formación y Adiestramiento de Petróleos de Venezuela y sus filiales, Caracas.
- [18] Daily, J. (1975), **“Dinámica de los Fluidos”**, Editorial Trillas, México.
- [19] PDVSA (1993), **“Dimensionamiento de Tuberías de Proceso. Manual de Ingeniería de Diseño”**, PDVSA N° 90616.1.024, Venezuela.
- [20] PDVSA (1996), **“Flujo de Fluidos. Flujo en Fase Líquida. Manual de Diseño de Proceso”**, PDVSA MDP-02-FF-03, Venezuela.
- [21] PDVSA (1997), **“Cálculos en Servicios de Bombeo. Manual de Diseño de Proceso”**, PDVSA MDP-02-P-06, Venezuela.
- [22] ASME-ANSI (2002), **“Pipeline transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids”** , ASME/ANSI B31.4, Estados Unidos.

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y**  
**ASCENSO**

<b>TÍTULO</b>	REDISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO DE CRUDO HAMACA BLEND DESDE LA PLANTA PETROPIAR HASTA LA PLATAFORMA SUR DEL TERMINAL JOSÉ ANTONIO ANZOÁTEGUI
<b>SUBTÍTULO</b>	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Mago B., José I..	CVLAC: 18.415.502 E MAIL: jose_mago_45@hotmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

**PALABRAS O FRASES CLAVES:**

Sistema de bombeo de crudo

Curvas características de bombas

Terminal de Almacenamiento y Embarque de Crudo

PIPEPHASE 9.1

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

<b>ÁREA</b>	<b>SUBÁREA</b>
Ingeniería y ciencias aplicadas	Ingeniería Mecánica

**RESUMEN (ABSTRACT):**

El presente trabajo expresa el rediseño del sistema de bombeo de crudo Hamaca Blend desde la planta Petropiar hasta la plataforma sur del Terminal de almacenamiento y embarque de crudo José Antonio Anzoátegui (TAECJAA). Para tal fin, se realizó un estudio de la condición actual que presenta dicho sistema y se identificaron las limitaciones e inconvenientes que ocasiona el rebombeo del crudo Hamaca Blend en el TAECJAA, lo que sirvió de base para el planteamiento de tres propuestas que permitieran resolver la problemática que presenta el sistema en estudio. Con el objetivo de predecir el comportamiento que tendría el sistema al aplicarle las modificaciones de cada opción, se simuló el oleoducto con el programa PIPEPHASE 9.1, y los resultados obtenidos fueron analizados para decidir cuál de las proposiciones planteadas representa la solución más idónea. De ese análisis se concluyó que la mejor alternativa de modificación es la que plantea evitar el paso del fluido por las bombas de Petropiar y desincorporar el sistema de medición.

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**CONTRIBUIDORES:**

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL</b>				
<b>RENGEL, JOSE E.</b>	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS X</b>	<b>TU</b>	<b>JU</b>
	<b>CVLAC:</b>	<b>9.278.475</b>			
	<b>E_MAIL</b>	<b>RENGEL66@GMAIL.COM</b>			
	<b>E_MAIL</b>				
<b>PEREIRA, LUIS</b>	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS</b>	<b>TU X</b>	<b>JU</b>
	<b>CVLAC:</b>	<b>5.395.452</b>			
	<b>E_MAIL</b>	<b>Pereirals@PDVSA.COM</b>			
	<b>E_MAIL</b>				
<b>BITTAR, SIMÓN</b>	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS</b>	<b>TU</b>	<b>JU X</b>
	<b>CVLAC:</b>	<b>3.957.961</b>			
	<b>E_MAIL</b>				
	<b>E_MAIL</b>				
<b>AYALA, ORLANDO</b>	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS</b>	<b>TU</b>	<b>JU X</b>
	<b>CVLAC:</b>	<b>11.420.758</b>			
	<b>E_MAIL</b>	<b>Omayalah@gmail.com</b>			
	<b>E_MAIL</b>				

**FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:**

<b>2009</b>	<b>06</b>	<b>30</b>
<b>AÑO</b>	<b>MES</b>	<b>DÍA</b>

**LENGUAJE. SPA**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**ARCHIVO (S):**

<b>NOMBRE DE ARCHIVO</b>	<b>TIPO MIME</b>
TESIS. REDISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO.DOC	Application/msword

**CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS:** A B C D E F G H I J K L  
M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x  
y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

**ALCANCE**

**ESPACIAL:** \_\_\_\_\_(OPCIONAL)

**TEMPORAL:** \_\_\_\_\_(OPCIONAL)

**TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

INGENIERO MECÁNICO

**NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

PREGRADO

**ÁREA DE ESTUDIO:**

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

**INSTITUCIÓN:**

UNIVERSIDAD DE ORIENTE. NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**DERECHOS**

DE ACUERDO CON EL ARTICULO 44 DEL REGLAMENTO DE TRABAJO DE GRADO DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE: "LOS TRABAJOS DE GRADO SON DE EXCLUSIVA PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE Y SÓLO PODRÁN SER UTILIZADOS POR OTROS FINES CON EL CONSENTIMIENTO DEL CONSEJO DE NÚCLEO RESPECTIVO, QUIEN LO PARTICIPARÁ AL CONSEJO UNIVERSITARIO".

---

**José Mago**

**Autor**

---

**Prof. José Rengel**

**Asesor Académico**

---

**Ing. Luís Pereira**

**Asesor Industrial**

---

**Prof. Simón Bittar**

**Jurado Principal**

---

**Prof. Orlando Ayala**

**Jurado Principal**

---

**Prof. Delia Villaroel**

**POR LA SUBCOMISIÓN DE TESIS**