

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

TEMA:

**“ANÁLISIS DEL SISTEMA DE BOMBEO CON BAJOS CAUDALES Y SU
INCIDENCIA EN EL TRANSPORTE DE CRUDO DEL OLEODUCTO DE
REPSOL, UBICADO EN EL BLOQUE 16 PROVINCIA DE ORELLANA”**

**Proyecto de Investigación previo a la obtención del Título de Ingeniero
Industrial**

AUTOR:

Ramiro Eduardo Valencia López

TUTOR:

Ing. Wilson Chancusig

QUITO - ECUADOR

2017

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Director del Proyecto “**ANÁLISIS DEL SISTEMA DE BOMBEO CON BAJOS CAUDALES Y SU INCIDENCIA EN EL TRANSPORTE DE CRUDO DEL OLEODUCTO DE REPSOL, UBICADO EN EL BLOQUE 16 PROVINCIA DE ORELLANA**” presentado por el ciudadano Ramiro Eduardo Valencia López para optar por el título de Ingeniero Industrial, CERTIFICO, que dicho proyecto ha sido revisado en todas sus partes y considero que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del tribunal examinador que se designe.

Quito, marzo de 2017

TUTOR

Ing. Wilson Chancusig
C.I. 0501400618

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

El abajo firmante, declara que los contenidos y los resultados obtenidos en el presente proyecto, como requerimiento previo para la obtención del Título de Ingeniero Industrial, son absolutamente originales, auténticos y personales y de exclusiva responsabilidad legal y académica del autor.

Quito, marzo de 2017

AUTOR

Ramiro Valencia López

C.I. 1705270336

**AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL AUTOR PARA LA CONSULTA,
REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN
ELECTRÓNICA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Ramiro Eduardo Valencia López, declaro ser autor del Proyecto de Tesis “ANÁLISIS DEL SISTEMA DE BOMBEO CON BAJOS CAUDALES Y SU INCIDENCIA EN EL TRANSPORTE DE CRUDO DEL OLEODUCTO DE REPSOL, UBICADO EN EL BLOQUE 16 PROVINCIA DE ORELLANA”, como requisito para optar al grado de Ingeniero Industrial, autorizo al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Tecnológica Indoamérica, para que con fines netamente académicos divulgue esta obra a través del Repositorio Digital Institucional (RDI-UTI).

Los usuarios del RDI-UTI podrán consultar el contenido de este trabajo en las redes de información del país y del exterior, con las cuales la Universidad tenga convenios. La Universidad Tecnológica Indoamérica no se hace responsable por el plagio o copia del contenido parcial o total de este trabajo.

Del mismo modo, acepto que los Derechos de Autor, Morales y Patrimoniales, sobre esta obra, serán compartidos entre mi persona y la Universidad Tecnológica Indoamérica, y que no tramitaré la publicación de esta obra en ningún otro medio, sin autorización expresa de la misma. En caso de que exista el potencial de generación de beneficios económicos o patentes, producto de este trabajo, acepto que se deberán firmar convenios específicos adicionales, donde se acuerden los términos de adjudicación de dichos beneficios.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Quito, marzo de 2017, firma conforme:

Ramiro Valencia

C.C. 1705270336

Dirección: Las Anonas E9-145 y Jazmines

E-mail: ramirovalencialopez@gmail.com

Telf. 098324751

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Proyecto de aprobación de acuerdo con el reglamento de títulos y grados de la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Tecnológica Indoamérica.

Quito,.....

Para constancia firman:

F.....

PRESIDENTE

F.....

VOCAL

F.....

VOCAL

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento especial va dirigido a Tatiana por su apoyo incondicional en el transcurso de mis estudios y de mi vida. A mi hijo Luis por brindarme su ayuda en la ejecución de todos los proyectos que se presentan a través del tiempo. Así como también a los profesores de la carrera de Ingeniería Industrial, director de tesis y colaboradores quienes han aportado con su experiencia y conocimientos para el éxito y culminación de este estudio. A la Ing. Ondina Mendoza e Ing. Iver Barroeta representantes de Gasdynca quienes prestaron las facilidades necesarias y la información para la consecución de este trabajo.

Ramiro

DEDICATORIA

A Dios, por iluminar mi camino, otorgarme sabiduría, fortaleza y perseverancia para superar todos los retos y obstáculos de mi vida.

A Tatiana y Luis, por brindarme su cariño y apoyo incondicional en la realización de este proyecto.

A todos los catedráticos de Ingeniería Industrial, por transmitirme sus conocimientos durante mi formación profesional.

A los compañeros y compañeras que han sido un soporte importante para culminar mi carrera.

Ramiro

ÍNDICE GENERAL

PRELIMINARES	Pág.
PORTADA	i
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD.....	iii
AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL AUTOR.....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	v
AGRADECIMIENTO	vi
DEDICATORIA.....	vii
ÍNDICE GENERAL	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
GLOSARIO DE TÉRMINOS	xvi
RESUMEN EJECUTIVO	xvii
SUMMARY	xviii
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I EL PROBLEMA

Tema.....	2
Planteamiento del Problema.....	2
Contextualización	3
Macro	3
Meso.....	4
Micro.....	6
Árbol de Problemas	9
Análisis Crítico	10
Prognosis	10
Formulación del Problema	11

Interrogantes de la Investigación	11
Delimitación del objeto de la investigación	11
Justificación de la Investigación.....	12
Objetivos	13
Objetivo General.....	13
Objetivos Específicos.....	13

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Antecedentes Investigativos	14
Fundamentaciones	15
Fundamentación Legal.....	16
Fundamentación Técnica	19
Categorías Fundamentales.....	20
Constelación de Ideas conceptuales de la Variable Independiente	21
Constelación de Ideas conceptuales de la Variable Dependiente.....	22
Desarrollo de marco teórico	23
Sistemas de bombeo.....	23
Máquina hidráulica	23
Bombas de transferencia	28
Curvas características de una bomba centrífuga.....	43
Punto de operación de una bomba	48
Leyes de afinidad para bombas centrífugas, teoría de la semejanza	48
Métodos para el ajuste de caudal.....	50
Hipótesis.....	56
Señalamiento de variables	57

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

Enfoque de la Modalidad	64
-------------------------------	----

Modalidad y Tipos de Investigación.....	64
Población.....	65
Operacionalización de Variables	68
Operacionalización de la Variable Independiente	68
Operacionalización de la Variable Dependiente	69
Plan de Recolección de Información	70
Aplicación de instrumentos de recolección de datos	71

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y SITUACIÓN

ACTUAL

Procesamiento y Análisis de la Información.....	72
Análisis.....	72
Análisis de la situación actual	79
Condiciones Actuales.....	79
Simulación con condiciones actuales.....	80
Aplicación de la teoría de la semejanza	85
Análisis del comportamiento de las bombas con la teoría de semejanza.....	87
Simulación con diámetros modificados 25000 BOPD	89
Verificación de la Hipótesis	92
Conclusiones y Recomendaciones de la Investigación.....	94
Conclusiones.....	94
Recomendaciones	94

CAPÍTULO V

PROPUESTA

Título.....	96
Datos Informativos de la Empresa.....	96
Ubicación	96
Antecedentes de la propuesta	97

Objetivos	98
Objetivo General.....	98
Objetivos Específicos.....	98
Justificación de la Propuesta	98
Desarrollo de la Propuesta.....	99
Factibilidad	99
Análisis de Factibilidad Legal	99
Análisis de Factibilidad Técnica.....	100
Análisis de Factibilidad Económica	100
Análisis de Factibilidad Ambiental.....	100
Metodología.....	101
Cronograma de Actividades del Proyecto de Titulación	101
Diagrama de Gantt	103
Cálculo de Ruta Crítica	104
Ruta Crítica.....	106
Estudio de la Ingeniería.....	107
Simulación Proceso Actual	107
Cálculo de variables condiciones actuales	110
Alternativas	113
Cálculo de variables caudal de 25.000 BOPD	118
Evaluación de la matriz de alternativas #1 y #2	125
Resultados de la Evaluación.....	127
Beneficios de la Propuesta	128
Evaluación Económica.....	129
Análisis de Factibilidad.....	132
Resultados	138
Conclusiones.....	138
Recomendaciones	139
 BIBLIOGRAFÍA	 140
ANEXOS.....	143

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura N° 1: Localización del SOTE y OCP en Ecuador.....	6
Figura N° 2: Esquema de procesos.	8
Figura N° 3: Relación causa efecto.....	9
Figura N° 4: Efectos perjudiciales por desviaciones del Punto Óptimo de rendimiento (POR).....	10
Figura N° 5: Organizador Lógico de Variables.	20
Figura N° 6: Constelación de Ideas Variable Independiente.....	21
Figura N° 7: Constelación de Ideas Variable Dependiente.	22
Figura N° 8: Clasificación de las máquinas hidráulicas.	24
Figura N° 9: Corte transversal del rodete de una bomba centrífuga con dibujos de los triángulos de velocidad a la entrada y salida.	25
Figura N° 10: Triángulos de velocidad de entrada y salida de los álabes del rodete de una bomba o ventilador con la notación internacional para ángulos, velocidades y componentes de velocidades.	26
Figura N° 11: Clasificación de las bombas rotodinámicas.....	29
Figura N° 12: Clasificación de las bombas rotodinámicas.....	30
Figura N° 13: Componentes de una bomba centrífuga.	31
Figura N° 14: Funcionamiento de la bomba centrífuga.	32
Figura N° 15: Componentes de la altura manométrica.	40
Figura N° 16: Pérdidas de carga en tubería de hierro fundido.	41
Figura N° 17: Curva característica de bomba centrífuga Q -H.....	44
Figura N° 18: Familia de curvas de bomba centrífuga Q - H.....	44
Figura N° 19: Curva Q - P.....	45
Figura N° 20: Curva Q - η	45
Figura N° 21: Curva Q - NPSH.	46
Figura N° 22: Curva de un sistema Hidráulico.....	47
Figura N° 23: Punto de operación de una bomba en un sistema hidráulico.	48
Figura N° 24: Esquema para control por estrangulamiento.	51
Figura N° 25: Curvas características, método control por estrangulamiento.	51

Figura N° 26: Esquema para control por derivación o By- Pass.	52
Figura N° 27: Curvas características, método control por derivación.	52
Figura N° 28: Esquema del método de control por cambio de diámetro.	53
Figura N° 29: Curvas características, método control por cambio de diámetro del impulsor.	53
Figura N° 30: Curvas características, métodos: cambio de diámetro del impulsor y control por variación de velocidad.	54
Figura N° 31: Sistemas de transporte de crudo en Ecuador.	59
Figura N° 32: Proceso de operación Repsol.	60
Figura N° 33: Resultado de correlación software Minitab 17.	79
Figura N° 34: Resultados de simulación con condiciones actuales.	82
Figura N° 35: Diagrama del proceso actual y condiciones operacionales del sistema de transporte de Repsol.	83
Figura N° 36: Curva Q vs H del sistema.	85
Figura N° 37: Curvas Q vs H estación NPF.	86
Figura N° 38: Curva Q vs H estación Pompeya.	86
Figura N° 39: Curva Q vs H estación Shushufindi.	87
Figura N° 40: Simulación con caudales de 25000 BOPD.	90
Figura N° 41: Esquema resumen de parámetros simulación de 25000 BOPD.	91
Figura N° 42: Bloque 16 Provincia de Orellana.	97
Figura N° 43: Diagrama de Gantt.	103
Figura N° 44: Método Pert.	106
Figura N° 45: Simulación del proceso actual.	107
Figura N° 46: Esquema de simulación del proceso actual.	108
Figura N° 47: Esquema de Simulación alternativa #1.	115
Figura N° 48: Diagrama del Proceso alternativa #1.	117
Figura N° 49: Esquema de Simulación alternativa #2.	122
Figura N° 50: Diagrama del Proceso alternativa #2.	124
Figura N° 51: VAN del proyecto.	138

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla N° 1: Factores de corrección para pérdidas de carga	42
Tabla N° 2: Factores de corrección de pérdidas de carga para accesorios	42
Tabla N° 3: Propiedades del crudo estación SPF.....	62
Tabla N° 4: Propiedades del crudo estación NPF	63
Tabla N° 5: Valores de k	66
Tabla N° 6: Proceso de transportación de crudo desde la estación NPF hasta la estación OCP.	68
Tabla N° 7: Operacionalización de la variable dependiente.....	69
Tabla N° 8: Variables	70
Tabla N° 9: Muestra tomada de la población	73
Tabla N° 10: Variables para determinar la correlación.....	76
Tabla N° 11: Condiciones actuales de operación	81
Tabla N° 12: Resultados de simulación (variables calculadas) para un caudal de 30.902 BOPD	84
Tabla N° 13: Resumen de parámetros.....	89
Tabla N° 14: Cronograma de actividades.....	101
Tabla N° 15: Parámetros para cálculo de la ruta crítica mediante el método PERT.....	104
Tabla N° 16: Datos de partida caudal de 30902 BOPD:	110
Tabla N° 17: Velocidades recomendadas para fluidos en tuberías	111
Tabla N° 18: Resultados de la Simulación para un caudal de 25.000 BFPD.	116
Tabla N° 19: Datos de partida caudal de 25000 BOPD:	118
Tabla N° 20: Resultados de la Simulación para un caudal de 25.000 BFPD.	123
Tabla N° 21: Matriz de evaluación	126
Tabla N° 22: Costo de los trabajos en bombas principales de transferencia	129
Tabla N° 23: Costos de procura e instalación de calentadores y válvulas	130
Tabla N° 24: Costo total de inversión Alternativa #1	131
Tabla N° 25: Ganancia mensual por concepto de ventas de petróleo	133
Tabla N° 26: Flujo de caja de Repsol en el período 2016.....	134

Tabla N° 27: Parámetros para la inversión del proyecto.....	135
Tabla N° 28: TIR y VAN del proyecto	137
Tabla N° 29: Resultados de Van y TIR.....	138
Tabla N° 30: Asignación de puntaje a los criterios.....	166
Tabla N° 31: Pesos porcentuales del Criterio “Requerimiento de Estudios Especiales”.	167
Tabla N° 32: Criterios de evaluación.	167

GLOSARIO DE TÉRMINOS

NPF: North Production Facilities

POR: Punto Óptimo de Rendimiento

BOPD: Barrels Oil Per Day (barriles crudo por día)

OCP: Oleoducto de Crudos Pesados

OPEP: Organización de Países Exportadores de Petróleo

CEPE: Corporación Estatal Petrolera Ecuatoriana

SPF: South Production Facilities

API: American Petroleum Institute

SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition (Supervisión, Control y Adquisición de Datos)

NPSH: Net Positive Suction Head (cabezal positivo de succión)

SOTE: Sistema de Oleoducto Trans Ecuatoriano

OTA: Oleoducto Trans Andino

PPY: Pompeya

SSFD: Shushufindi

BHP: Breake Horse Power (caballos de potencia al freno)

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Tema: “Análisis del sistema de bombeo con bajos caudales y su incidencia en el transporte de crudo del oleoducto de Repsol, ubicado en el Bloque 16 provincia de Orellana”.

Autor: Ramiro Eduardo Valencia López

Tutor: Ing. Wilson Chancusig

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación se basó en el análisis del funcionamiento de las bombas principales de transferencia y los procesos en las estaciones NPF, Shushufindi y Pompeya del oleoducto de Repsol, ubicado en el Bloque 16 provincia de Orellana. La constante disminución de producción de crudo incide en la transportación y procesos ya que la infraestructura instalada en el oleoducto tiene una capacidad de bombeo de 70.000 BOPD, en la actualidad se produce un promedio de 30.000 BOPD, esto afecta negativamente a los equipos de bombeo ya que trabajan fuera del punto óptimo de rendimiento (POR) además se realizan operaciones de recirculación para solventar la falta de producto. Mediante la modificación de los internos de las bombas principales de transferencia se transportará los bajos caudales de producción con procesos eficientes. Esta investigación tiene un enfoque cuantitativo, los datos recopilados de campo en tiempo real de las operaciones del oleoducto son tratados con las ayudas tecnológicas de simulación PIPEPHASE 9.5 y mediante el conocimiento adquirido en la universidad, libros, manuales y proyectos de investigación. Se concluye que con la disminución de los diámetros de los impulsores las bombas principales de transferencia trabajarán dentro del punto óptimo de rendimiento y las operaciones serán eficientes. Esta solución es la más adecuada en los aspectos técnicos y económicos como se demuestra en los estudios realizados en el presente proyecto.

Descriptor: procesos, estaciones de bombeo, bombas principales de transferencia, petróleo, simulación, punto óptimo de rendimiento, operaciones, impulsores.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Theme: “Analysis of the system of low-flow pumping and its impact on the transport of crude oil in the Repsol pipeline, located in Bloque 16 province of Orellana”.

Author: Ramiro Eduardo Valencia López

Tutor: Ing. Wilson Chancusig

SUMMARY

The present investigation was based on the analysis of the operation of the main transfer pumps and the processes in the stations NPF, Shushufindi and Pompeya of Repsol oil pipeline, located in Bloque 16 province of Orellana. The constant decrease of crude oil production affects the transportation and processes since the infrastructure installed in the pipeline has a pumping capacity of 70,000 BOPD, currently produces an average of 30,000 BOPD, this adversely affects the pumping equipment because of they work outside the optimum performance point (OPP) in addition, there are recirculation operations to solve the lack of product. By modifying the internal of the main transfer pumps, the low production flow rates will be transported with efficient processes. This research has a quantitative approach, real-time field data collected from pipeline operations are treated with PIPEPHASE 9.5 simulation aids and through the knowledge acquired in university, books, manuals and research projects it is concluded that with the decrease of the diameters of the impellers the main transfer pumps will work within the optimal point of performance and the operations will be efficient. This solution is the most appropriate in the technical and economic aspects as demonstrated in the studies carried out in the present project.

Descriptors: processes, pumping stations, main transfer pumps, oil, simulation, optimum performance point, operations, impellers.

INTRODUCCIÓN

Este proyecto de titulación tiene como objetivo encontrar la solución más idónea en términos técnicos y económicos para el transporte eficiente de crudo.

El Primer Capítulo contempla el tema del proyecto, el planteamiento del problema con su contextualización, árbol de problemas, análisis crítico, pronosis y los objetivos general y específicos.

El Capítulo dos trata los antecedentes investigativos, fundamentaciones, y desarrolla el marco teórico con las investigaciones recopiladas de fuentes bibliográficas concernientes al proyecto de titulación. Se realiza la hipótesis, el señalamiento de las variables y definición de términos técnicos.

En el Capítulo tres se cita el enfoque de la modalidad, tipos de investigación, operacionalización de las variables.

En el Capítulo cuatro se realiza el análisis de la información de la situación actual del transporte de crudo y se procede a validar el esquema. Se aplica la ley de la semejanza, se realiza la simulación de las condiciones futuras con 25000 BOPD. Se verifica la hipótesis y se emite las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

En el Capítulo cinco enfoca la solución al problema que presenta el oleoducto de Repsol en la transportación de crudo, buscando la alternativa que sea más eficiente y económica, realizando estudios especiales con criterios ambientales, técnicos, beneficiosos para la empresa Repsol.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

Tema

“ANÁLISIS DEL SISTEMA DE BOMBEO CON BAJOS CAUDALES Y SU INCIDENCIA EN EL TRANSPORTE DE CRUDO DEL OLEODUCTO DE REPSOL, UBICADO EN EL BLOQUE 16 PROVINCIA DE ORELLANA”

Planteamiento del Problema

La producción en los campos del Bloque 16 en los cuales opera Repsol era de 70000 BOPD, en la actualidad se está transportando 30000 BOPD tendiendo a la baja, esta disminución presenta varios problemas como: transporte de crudo, bombas principales de transferencia, y operaciones ineficientes de las estaciones de bombeo.

En la tubería de transportación de crudo se presenta sedimentaciones debido a que a menos caudal se tiene menos velocidad de conducción provocando dificultad en el transporte de petróleo.

Las bombas principales de transferencia trabajan fuera del punto óptimo de rendimiento, provocando calentamiento excesivo, cavitación por bajo caudal, vida reducida de los sellos mecánicos y rodamientos, recirculación en la aspiración e impulsión.

En las estaciones de bombeo se adoptan operaciones de recirculación de producto, en la succión se tiene 49000 BOPD y en la descarga se bifurcan 30000 BOPD para la línea de transporte y 19000 BOPD por medio de un by-pass a la succión de la bomba, esto provoca que la presión de descarga disminuya por ende la velocidad.

Por las razones anteriormente citadas, se requiere realizar un estudio de ingeniería a fin de optimizar la operación del oleoducto que permita transportar el crudo en volúmenes menores a 30.000 BOPD hasta el punto de entrega en OCP.

Contextualización

Macro

De acuerdo al boletín de Oil Watch (2004), América Latina inicio sus actividades en el ámbito petrolero a inicios del siglo XX, la empresa Estándar Oil comenzó a explotar los campos de Maracaibo, zona norte de Venezuela, los cuales se encuentran productivos hasta la presente fecha. A través del tiempo otros países fueron ingresando al grupo de productores de petróleo.

Las empresas petroleras han influido en la política, legislaciones y regulaciones ambientales de los países productores. Por los beneficios que se ha generado por esta actividad, Argentina fue el primer país que nacionalizó el petróleo seguido por México y Brasil, posteriormente se creó la Organización de Países Exportadores de Petróleo OPEP en la que Venezuela jugó un papel importante.

Los países de América Latina que cuentan con yacimientos petroleros han realizado diferentes tipos de contratos con empresas transnacionales, las cuales han dejado mínimas ganancias para los estados.

(MONALDI, 2010) menciona que: “en los años 90 América tuvo un incremento en la inversión en el sector petrolero, la inversión pública y privada en

Argentina, Bolivia, Brasil, Ecuador y Venezuela generaron grandes incrementos en las reservas y producción petrolera”.

El alza de los precios internacionales del petróleo y la falta de ingresos por explotación petrolera a las arcas fiscales han originado en estos últimos años que la región experimente una ola de nacionalizaciones y expropiaciones en el sector hidrocarburífero.

García y Garcés en su publicación. La industrialización del Petróleo en América Latina y el Caribe manifiestan que a pesar de que América Latina posee grandes reservas probadas de Petróleo mismas que son alrededor del 20% del total mundial, con 10,4 millones de Barriles equivalentes de petróleo por día (Mbep/día), tiene una producción de derivados de 6,8 (Mbep/día) y una demanda de derivados de 7,3 (Mbep/día), lo que indica que el bloque se mantiene como importador de derivados, con excepción de Venezuela, Colombia y Argentina.

Finalmente se menciona que las reservas probadas a nivel mundial son de 53 años y para América y el Caribe, el alcance es de 91 años, por lo que se tiene un margen amplio de tiempo para realizar los proyectos en el sector petrolero.

Meso

En el Ecuador el petróleo es la fuente de riqueza más importante ya que del total de las exportaciones del país, el sector petrolero ha abarcado hasta un 66% en los últimos 10 años, aportando hasta un 59% del presupuesto general del estado, de acuerdo a Guaranda Mendoza.

(NURINKIAS SALAZAR, 2014):

La empresa Inglesa Anglo Ecuadorian Oilfields Ltda. comienza con la explotación petrolera del país en el año de 1925, ubicando pozos productores en la provincia de Santa Elena, con una producción inicial de 1.226 barriles diarios. Pero la primera exportación de petróleo del país se realizó en el año de 1928.

(GUARANDA MENDOZA, s.f):

En el año de 1971 se habían concesionado miles de hectáreas a empresas petroleras sin ninguna regulación y sin firmar ningún contrato. En este año gracias a la dictadura militar que comandaba el país y a la posición que ocupaba como segundo productor de América del Sur, se decidió entrar en la OPEP dándose paso a la creación de la Corporación Estatal Petrolera Ecuatoriana (CEPE). Gracias a esta gestión se realizó la primera exportación desde el Puerto de Balao en Esmeraldas, se puso en vigencia la ley de hidrocarburos y se incrementó las regalías para el estado, además se replantearon las condiciones de las concesiones para las empresas fijando los contratos hasta en 20 años y con una extensión de 200.000 hectáreas.

Desde 1989 CEPE se convierte en lo que hoy se conoce como PETROECUADOR con las diferentes filiales. Luego de una permanencia de 19 años en la OPEP, Sixto Durán Ballén en 1993 retira al país de ese importante organismo. Desde entonces Ecuador ha estado sometido a las políticas de las empresas y mercados internacionales. En el año 2002 se finaliza con la construcción del OCP (figura 1) que fue una de las estrategias para seguir con la expansión petrolera en el país. Desde el 2003 el estado comienza con la concesión de varios campos en la zona oriental del país, poniendo énfasis en la preservación del medio ambiente ya que los campos son parte de reservas ecológicas como Yasuní y Cuyabeno.



Figura N° 1: Localización del SOTE y OCP en Ecuador.
Fuente: GASDYNCA-REPSOL, 2016.

Micro

La empresa REPSOL dispone en el Bloque 16 de dos facilidades para la producción de crudo, la Estación SPF ubicada en la zona sur, en dicha estación ingresa la producción de los campos Ginta, Iro, Daimi y Amo; y la Estación NPF ubicada en la zona norte, cuya producción proviene de los campos Capirón, Bogi y Tivacuno.

También dispone para sus operaciones de transporte de crudo por un oleoducto de 16 pulgadas de diámetro, inicia en la Estación SPF pasando por la Estación NPF, de donde sale hacia una estación de bombeo ubicada en Pompeya, luego se

dirige a la Estación Shushufindi donde el crudo es calentado y bombeado hacia una pequeña estación de derivación en Lago Agrio en el sitio denominado Pozo 27, para luego de 10 kilómetros con un diámetro de 20 pulgadas entregar en OCP.

(GASDYNCA-REPSOL, 2016):

Los sistemas de las estaciones y líneas para la transportación de crudo fueron diseñados para transportar 70.000 BOPD. Conforme ha ido transcurriendo el tiempo y ha avanzado la extracción de petróleo, las reservas han disminuido, por lo que en la actualidad el transporte de crudo del Bloque 16 se encuentra en el orden de 30.000 BOPD, los cuales fluyen a través del oleoducto de 16 pulgadas de diámetro, con un recorrido de 145 Km de longitud aproximada desde la Estación NPF hasta el punto de entrega en OCP. El crudo es enviado de la Estación NPF con las bombas P-1110 A/C, P-1110 D/E, llegando a la Estación Pompeya de donde con los equipos P-4610 A/B/C/D es impulsado a la Estación Shushufindi, en esta estación el crudo es calentado y bombeado con los conjuntos P- 1611 A/B/C para llegar a OCP con una presión aproximada a 30 psi.

(INEXA, Ingeniería y Exportación de Tecnología S.L., 2016):

La baja producción de crudo en SPF y NPF provoca un sobredimensionamiento de los equipos, con la producción actual estas instalaciones dejan de ser óptimas, teniendo problemas en los procesos y transportación de producto ya que las bombas de transferencia principales trabajan alejadas del punto óptimo de rendimiento. “Cuando el punto de trabajo se aleja del POR (punto óptimo de rendimiento), se producen fenómenos de recirculación interna en la bomba que causan desequilibrios en los empujes que soporta. Este fenómeno incrementa el deterioro en los sellos mecánicos, aros de desgaste y rodamientos provocados a su vez por desalineamientos del eje”

Actualmente en las estaciones se han optado métodos para trabajar con los equipos en condiciones de sobredimensionamiento, esta medida es por medio de un by-pass desde la descarga de las bombas hacia la succión mediante la apertura de una válvula, este proceso hace que recircule cierta cantidad de producto estimado, necesario para cumplir con el proceso y descargar únicamente los 30.000 barriles de producción.

ESTACIONES DE BOMBEO

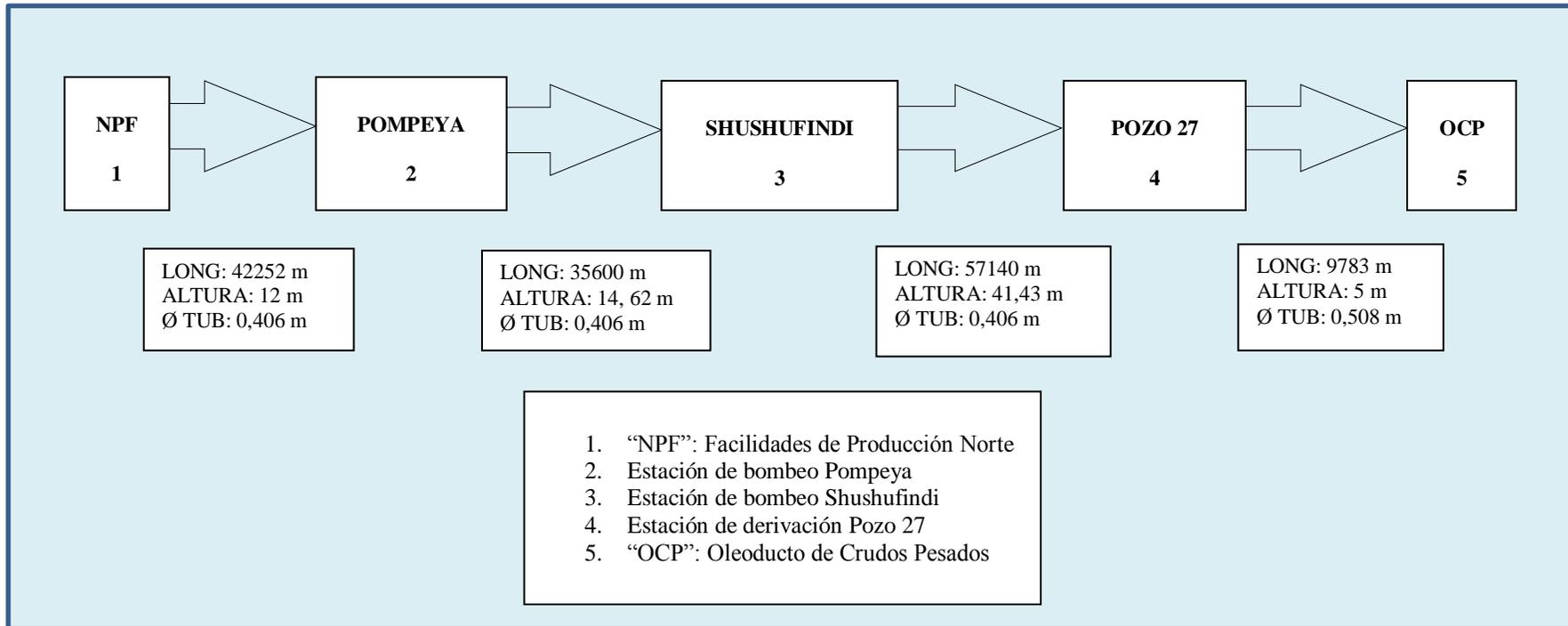


Figura N° 2: Esquema de procesos.
Fuente: Investigación directa.
Elaborado por: El Investigador.

Árbol de Problemas

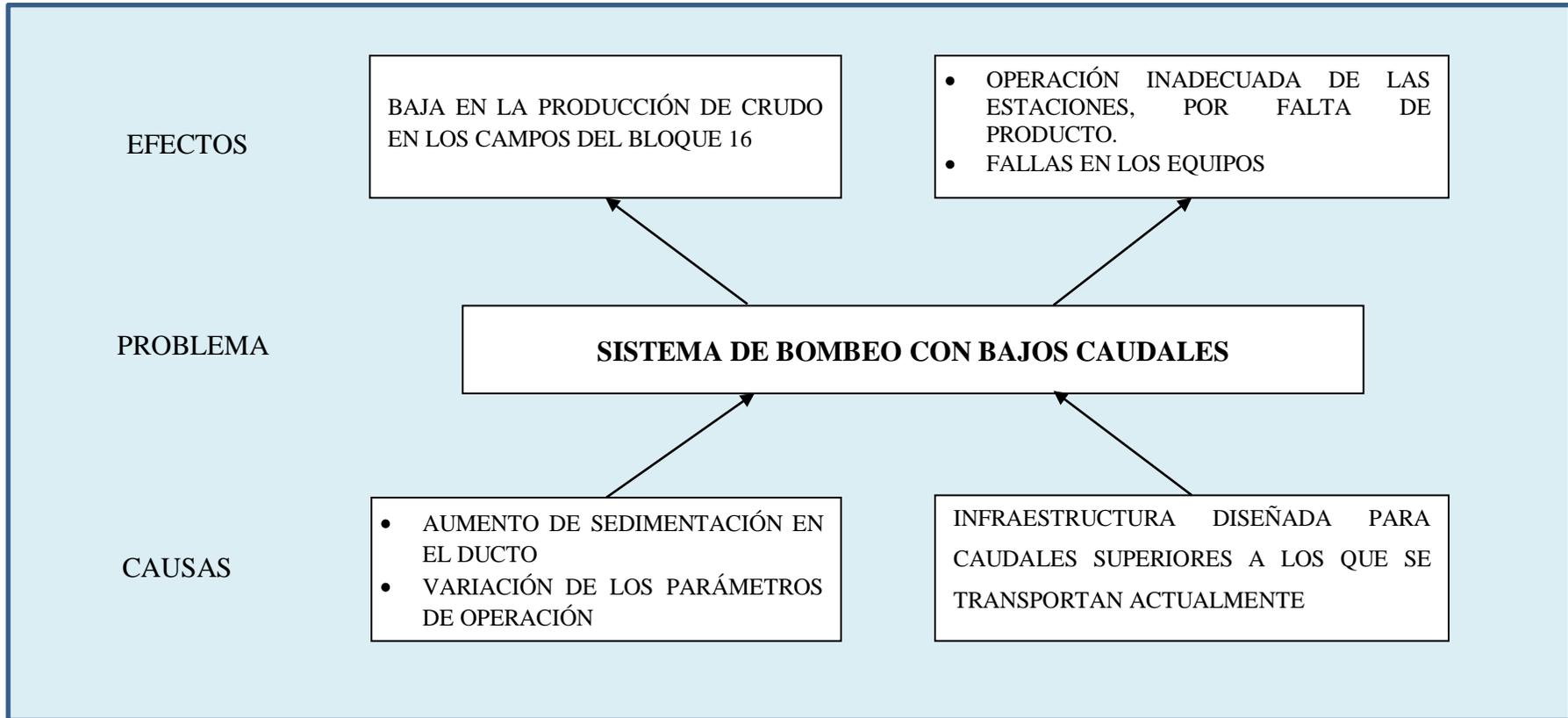


Figura N° 3: Relación causa efecto.
Fuente: Investigación directa.
Elaborado por: El Investigador.

Análisis Crítico

Por la constante disminución en la producción de crudo en los pozos de las Facilidades de Producción Sur y las Facilidades de Producción Norte de Repsol se presentan problemas como el aumento de sedimentación en el ducto y la variación de los parámetros de operación en los procesos y transportación del producto.

La infraestructura instalada en el oleoducto tiene una capacidad de bombeo de 70000 BOPD en la actualidad se produce un promedio de 30.000 BOPD tendiendo a la baja, esto afecta al funcionamiento de los equipos provocando que los sistemas de bombeo trabajen alejados del punto óptimo de rendimiento (POR), esto provoca daños que incurren en mayores mantenimientos debido a los problemas de los internos de las bombas, además se adoptan operaciones inadecuadas no productivas que desperdician recursos. Por estas razones se debe realizar un análisis en los sistemas de bombeo para mejorar la transportación y sus procesos.

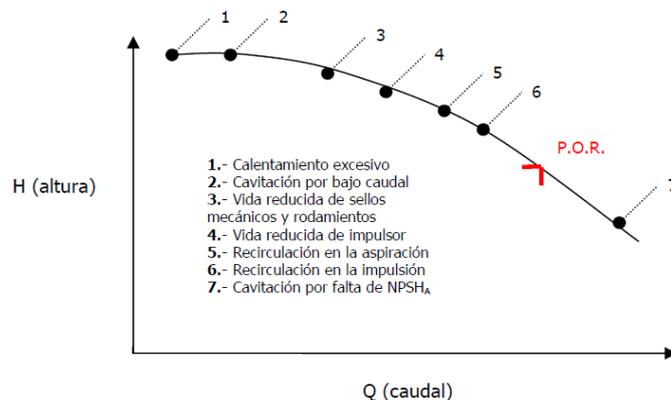


Figura N° 4: Efectos perjudiciales por desviaciones del Punto Óptimo de rendimiento (POR).
Fuente: INEXA, Ingeniería y Exportación de Tecnología S.L.

Prognosis

Las bombas principales de transferencia trabajan fuera del punto óptimo de rendimiento, generando así mayores gastos en mantenimiento, este factor sumado

la futura proyección de menor producción y a las operaciones inadecuadas que se han adoptado, pueden ocasionar que el crudo finalmente no alcance a llegar a su destino, al punto que el oleoducto de Repsol puede colapsar y no satisfacer la demanda de producto.

Si no se realiza el estudio para mejorar las condiciones de trabajo en las bombas principales de transferencia, éstas no trabajarán eficientemente y las operaciones de las estaciones NPF, Pompeya y Shushufindi no serán óptimas para los bajos caudales actuales y futuros producidos en los pozos del Bloque 16.

Formulación del Problema

¿Cómo incide el sistema de bombeo de bajos caudales, en el transporte de crudo y los procesos en las estaciones de transferencia del oleoducto de Repsol, ubicado en el bloque 16, Provincia de Orellana?

Interrogantes de la Investigación

- ¿Qué genera a los equipos de bombeo del oleoducto la baja producción de crudo?
- ¿Qué problemas de eficiencia se tiene en los equipos de bombeo por la baja producción de crudo en el oleoducto de Repsol?
- ¿Cómo se puede mejorar los procesos para el transporte de crudo con los volúmenes actuales y futuros de producción?

Delimitación del objeto de la investigación

Delimitación de contenidos

CAMPO: Ingeniería Industrial.

ÁREA: Transporte de crudo por el oleoducto de Repsol, ubicado en el Bloque 16, Provincia de Orellana

ASPECTO: Mejora en la transportación de crudo y los procesos de las estaciones de bombeo NPF, Pompeya y Shushufindi para los bajos caudales actuales y futuros.

Delimitación Espacial

La investigación se desarrolla en el oleoducto de crudos pesados de REPSOL en las estaciones NPF, Pompeya, Shushufindi y entrega en OCP

Delimitación Temporal

El presente trabajo se desarrolla en el período 2016.

Unidades de Observación

- Proceso productivo de bombeo en un instante determinado.
- Bombas principales de transferencia.
- Variables de transporte y características del producto.
- Eficiencia en los sistemas de bombeo.

Justificación de la Investigación

Debido a la explotación de petróleo desde 1994, las reservas de los pozos en los campos de Repsol han ido disminuyendo progresivamente esta razón genera una baja en la producción de crudo, condición que implica efectos negativos para el transporte del crudo. Los procesos del oleoducto son perjudicados ya que los equipos fueron diseñados para caudales aproximados a 70000 BOPD, en la actualidad estos rodean los 30000 BOPD. Para compensar el volumen no transportado, se realizan operaciones de recirculación para que los equipos trabajen dentro del punto óptimo de rendimiento.

Para que el oleoducto trabaje eficientemente, se debe realizar una investigación que brinde una alternativa para mejorar el proceso de transporte del crudo entre

las estaciones y las bombas principales de transferencia funcionen dentro del punto óptimo de rendimiento.

La empresa será beneficiada técnica y económicamente al realizar las mejoras en los procesos y los equipos sin parar las operaciones, aun con caudales de 30000 BOPD o menos de producción por un oleoducto diseñado para transportar 70000 BOPD.

Objetivos

Objetivo General

Analizar el sistema de bombeo con bajos caudales y su incidencia en el funcionamiento de las bombas principales de transferencia, sus internos y las variables del sistema, en la transportación del crudo por el oleoducto de Repsol con los bajos caudales actuales y futuros.

Objetivos Específicos

- Analizar la incidencia del sistema de bombeo en el transporte de crudo.
- Determinar las causas que afectan el funcionamiento de las bombas principales de transferencia.
- Simular el funcionamiento del sistema de transportación y validar los parámetros de eficiencia.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Antecedentes Investigativos

Para realizar el presente estudio se ha recopilado información científica de varias fuentes que contribuyen a la solución del transporte de crudo con bajos caudales.

En la investigación “Ahorro de Energía en sistemas de bombas centrífugas” de la Unidad de Planeación Minero energética de Colombia y el Instituto Colombiano para el desarrollo de la Ciencia y la Tecnología en colaboración con la Universidad del Atlántico y la Universidad Autónoma de Occidente, se desarrolla la teoría de las bombas centrífugas y los métodos de regulación de caudal, así como también las leyes de semejanza.

Para el desarrollo de diseño de los impulsores se ha tomado como referencia el proyecto “Modernización del set de bombas centrífugas marca Gilbert Gilkes y diseño de dos impulsores intercambiables para las prácticas experimentales del laboratorio de turbomáquinas del DECEM” de los autores Diego Avilés y Juan Burneo. Con la ayuda del software ANSYS CFX realizan simulaciones para obtener los parámetros de operación de las bombas centrífugas e impulsores.

En la publicación de los autores Brown Damián y Charcopa Caicedo, “Auditoría energética de la estación de bombeo de Esmeraldas del poliducto Esmeraldas-Quito”. Mediante el análisis de la eficiencia energética de los equipos

en la estación de bombeo, determinan las posibles soluciones para evitar el alto consumo energético de los sistemas de bombeo por medio de variadores de frecuencia o la eliminación de los sistemas de bombeo con motores de combustión interna y reemplazarlos por motores eléctricos para el bombeo del producto.

Para el mejoramiento de las condiciones de transporte de crudo por ductos en el Ecuador, en la “Propuesta de Optimización de transporte de crudo pesado en una red de oleoductos en Guatemala” del autor Pablo Arzú de la Universidad San Carlos de Guatemala (2013) se plantea que la problemática del transporte en el oleoducto se basa en la viscosidad, temperatura y densidad del crudo.

También se tomó en cuenta la tesis “Incremento de flujo de transferencia en oleoducto de crudos pesados mediante la mezcla con diluyente (crudo liviano mayor a 28 grados API a 60 grados F) en la estación Shushufindi” (2002) del autor Fabián Lara, por su parte menciona que para optimizar las operaciones en los equipos de la estación Shushufindi es necesario mejorar la calidad del crudo con diluyente.

La información técnica de Repsol acerca de las condiciones actuales de operación y equipos proporcionada por la Empresa Gasdynca ha servido para el desarrollo de este estudio y se ha podido analizar y comprender la situación actual y futura del transporte de crudo por el oleoducto y dar una solución adecuada al problema.

Fundamentaciones

La información a continuación suministrada tiene como finalidad sustentar aspectos de la investigación como son el legal, filosófico y técnico.

Fundamentación Legal

Esta investigación tiene el sustento legal en leyes, normativas y reglamentos ecuatorianos que se elaboraron con el fin de regularizar el transporte de crudo en ductos, dentro de la información recopilada se cita:

- Según la Asamblea Nacional Constituyente de Ecuador (2008), en el Título VI; Capítulo Quinto sobre los sectores estratégicos, servicios y empresas; Artículo 313 de la Constitución de la República del Ecuador se menciona:
El Estado se reserva el derecho de administrar, regular, controlar y gestionar los sectores estratégicos, de conformidad con los principios de sostenibilidad ambiental, precaución, prevención y eficiencia.
Los sectores estratégicos, de decisión y control exclusivo del Estado, son aquellos que por su trascendencia y magnitud tienen decisiva influencia económica, social, política o ambiental y deberán orientarse al pleno desarrollo de los derechos y al interés social.
Se consideran sectores estratégicos la energía en todas sus formas, las telecomunicaciones, los recursos naturales no renovables, el transporte y la refinación de hidrocarburos, la biodiversidad y el patrimonio genético, el espectro radioeléctrico, el agua y los demás que determine la ley.
- El Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos (1978) menciona en el Capítulo III, Artículo 31 de la Ley de Hidrocarburos:
EP PETROECUADOR y los contratistas o asociados, en exploración y explotación de hidrocarburos, en refinación, en transporte y en comercialización, están obligados, en cuanto les corresponda, a lo siguiente:
e) “Emplear maquinaria moderna y eficiente y aplicar los métodos más apropiados para obtener la más alta productividad en las actividades industriales y en la explotación de los yacimientos observando en todo caso la política de conservación de reservas fijada por el Estado”.
- Según el decreto Ejecutivo N° 2024, el Ex Presidente de la República Noboa Bejarano (2001) decreta el Reglamento para autorización de Actividades de

Comercialización de combustibles líquidos derivados de los Hidrocarburos, que en su Capítulo VII, Artículo 35 se menciona:

El control Anual tiene por objeto:

a)... para el caso de las instalaciones de almacenamiento y transportes verificar sus condiciones de operación.

Todos los reglamentos que contemplan temas de transporte de hidrocarburos mencionan que se deben realizar controles a las instalaciones y a sus procesos operativos, con la finalidad de asegurar su eficiencia, es por eso que radica la importancia de tomar en cuenta ese punto.

- Arboleda (2004) Ex Ministro de Energía y Minas en el Reglamento para el transporte de petróleo crudo a través el Sistema de Oleoducto Transecuatoriano y la Red de Oleoductos del Distrito Amazónico, en el Artículo 5 del Capítulo II menciona:

“Los usuarios contarán con las instalaciones adecuadas para efectuar las entregas de petróleo a la operadora y realizarán el mantenimiento y operación de las mismas, de conformidad con las normas de seguridad utilizadas en la industria petrolera”.

Con este inciso se trata de regular a las empresas que explotan y transportan crudo con la finalidad de que los equipos y las instalaciones estén en óptimas condiciones para el funcionamiento de acuerdo a normas.

En el Capítulo II; Artículo 11 Arboleda (2004) sugiere lo siguiente:

Cuando no haya sido posible recibir el petróleo crudo a los usuarios, para ser transportado por los Sistemas de Oleoductos Operados por PETROECUADOR, ésta deberá informar inmediatamente vía telefónica, fax, o correo electrónico y oficializar por escrito a la Dirección Nacional de Hidrocarburos y al usuario, dentro de los tres días laborables subsiguientes a la no recepción del petróleo crudo, indicando las razones que impidieron dicha recepción.

Hasta el momento toda la información legal proporcionada menciona la importancia que tiene la transportación de crudo a través de ductos en el Ecuador, además hace hincapié en que la maquinaria y equipos deben estar en correcto

funcionamiento para hacer el transporte y la operación eficiente. Inclusive se menciona que, en caso de no entregar el producto al usuario por cualquier circunstancia, el problema trasciende a la Agencia Reguladora de Hidrocarburos.

Por otro lado, si se llegase a plantear que como solución sea necesario realizar un diseño en el cuál sea necesario cambios en la infraestructura, nuevas instalaciones o tendido de línea se puede referir el siguiente reglamento:

- El Artículo 5 del Reglamento para la Construcción y Operación de Oleoductos Principales Privados para el Transporte de Hidrocarburos (Noboa Bejarano, 2000):

El diseño de un ducto principal privado contemplará el tendido de la tubería, la ruta, las estaciones de bombeo y reductoras de presión, el almacenamiento, el sistema SCADA y de telecomunicaciones, los sistemas de medición, las interconexiones, el despacho, las obras viales para una operación eficiente y confiable y demás elementos necesarios para su construcción y operación.

Se debe tomar en cuenta que se pretende evitar mayores impactos técnicos, económicos y ambientales debido a la ubicación geográfica de las estaciones. Esto se lo puede constatar en el siguiente agregado:

- Se realizó un estudio (ENTRIX, 2001) en el cual menciona las condiciones medioambientales a las que debe estar sujeta la construcción del OCP, por lo que de plantearse una solución que incurra en construcción de nueva infraestructura debe tomar en cuenta la siguiente recomendación:

...la secuencia constructiva tomará en cuenta el medio natural del entorno, se utilizará pocos equipos en la construcción y, por ende se reducirá la generación de ruido, el tiempo máximo de trabajo será 120 días, no existirá movimiento vehicular, no existirán pistas para helicópteros, no se construirán caminos de acceso y, para favorecer la revegetación natural, se utilizarán métodos de bioingeniería, hidro-siembra y revegetación con especies criadas en vivero y además se tomaran en cuenta áreas críticas (especies en peligro de extinción y amenazadas).

Fundamentación Técnica

Las normas, códigos y leyes sirven para dar un lineamiento acerca de un tema; rigen y regulan las actividades para llegar a un fin determinado. En éste ámbito, el sector petrolero en el país maneja estrictamente normas nacionales e internacionales con el fin de ejecutar los procedimientos de una manera adecuada manejando estándares de calidad y protegiendo al medio ambiente.

a) American Petroleum Institute, API:

- API-Spec-5L/ISO 3183 “Specification for Line Pipe”.
- API-STD-1104 “Standard for welding pipelines and related facilities”.
- API-RP 1110 “Pressure Testing of Steel Pipelines for the Transportation of Gas, Petroleum Gas, Hazardous Liquids, Highly Volatile Liquids or Carbon Dioxide”.
- API-Std-547 “General-purpose Form-wound Squirrel Cage Induction Motors—250 Horsepower and Larger”.
- API-Std-610 “Centrifugal Pumps for General Refinery Services”.

b) American National Standards Institute, ANSI:

- ANSI/ASME B31.3 “Process Piping”.
- ANSI/ASME B31.4 “Liquid Transportation System for Hydrocarbons, liquid Petroleum, other Liquids”.
- ASME B73.1 “Specification for Horizontal End Suction Centrifugal Pumps for General Refinery Services”.

c) American Society for Testing Materials, ASTM:

- A-53 “Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc Coated, Welded and Seamless”.
- A-105 “Forgings, Carbon Steel, for Piping Components”.

Categorías Fundamentales

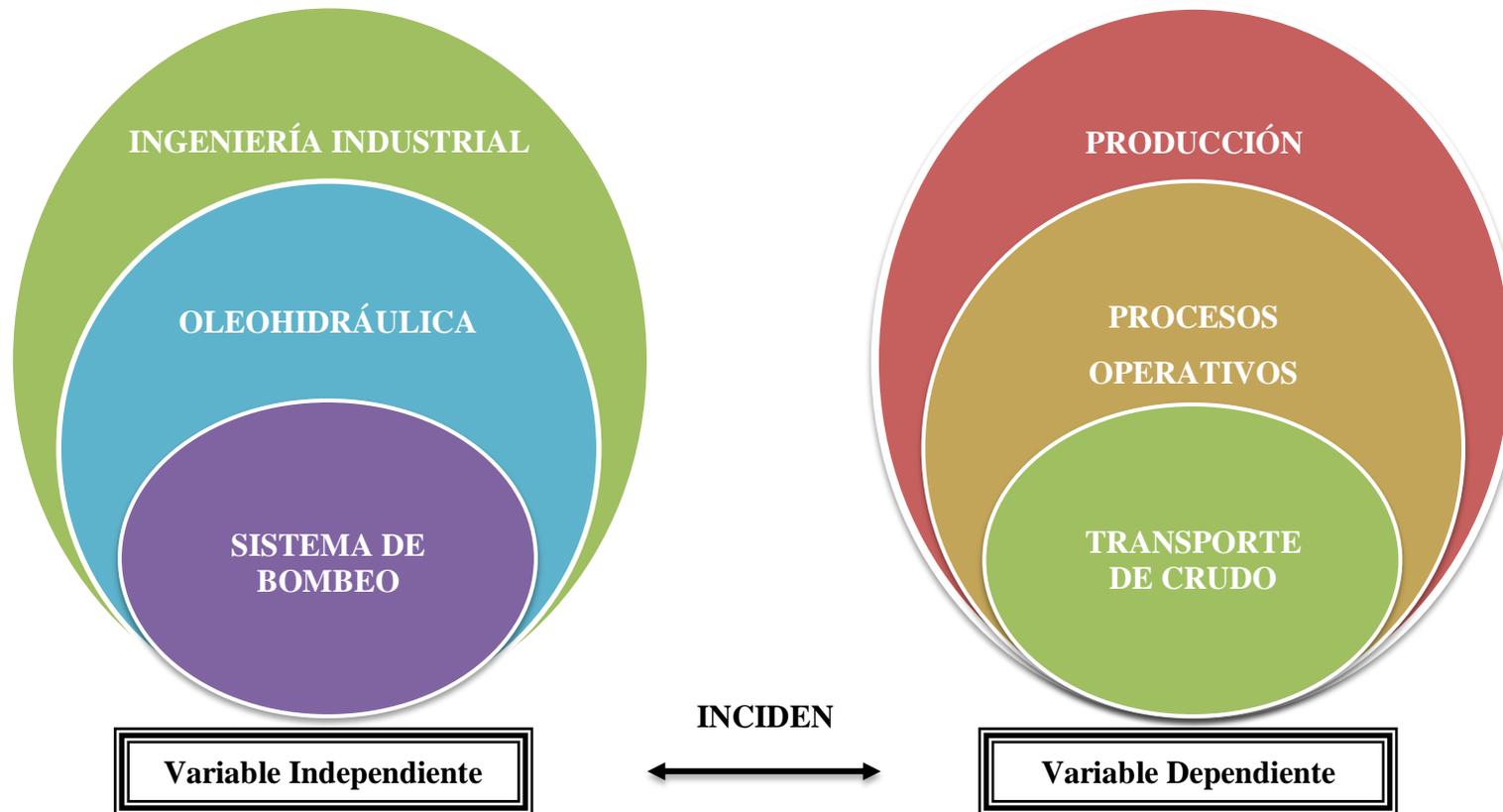


Figura N° 5: Organizador Lógico de Variables.
Fuente: Investigación directa.
Elaborado por: El Investigador.

Constelación de Ideas conceptuales de la Variable Independiente

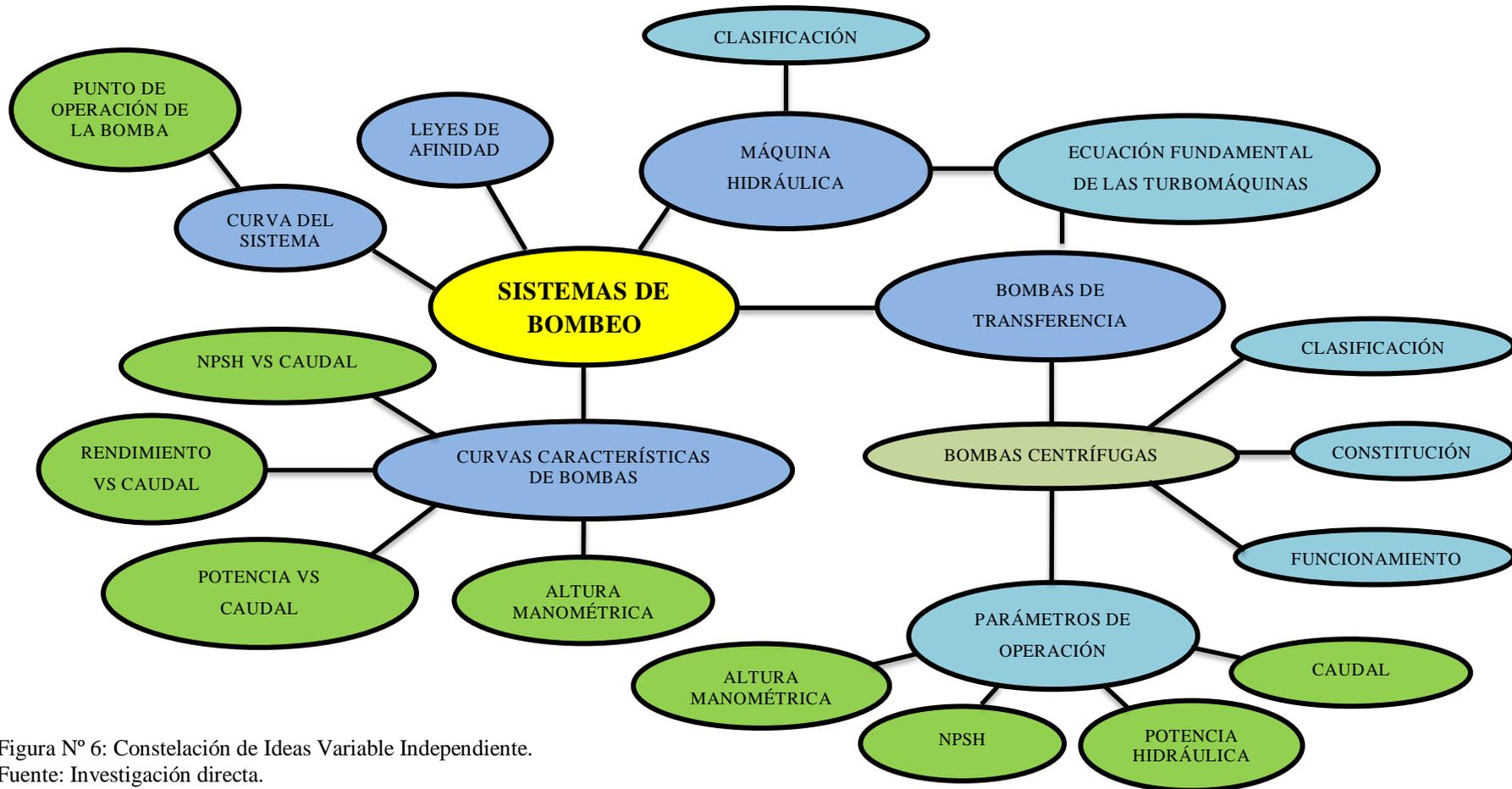


Figura N° 6: Constelación de Ideas Variable Independiente.
 Fuente: Investigación directa.
 Elaborado por: El Investigador.

Constelación de Ideas conceptuales de la Variable Dependiente

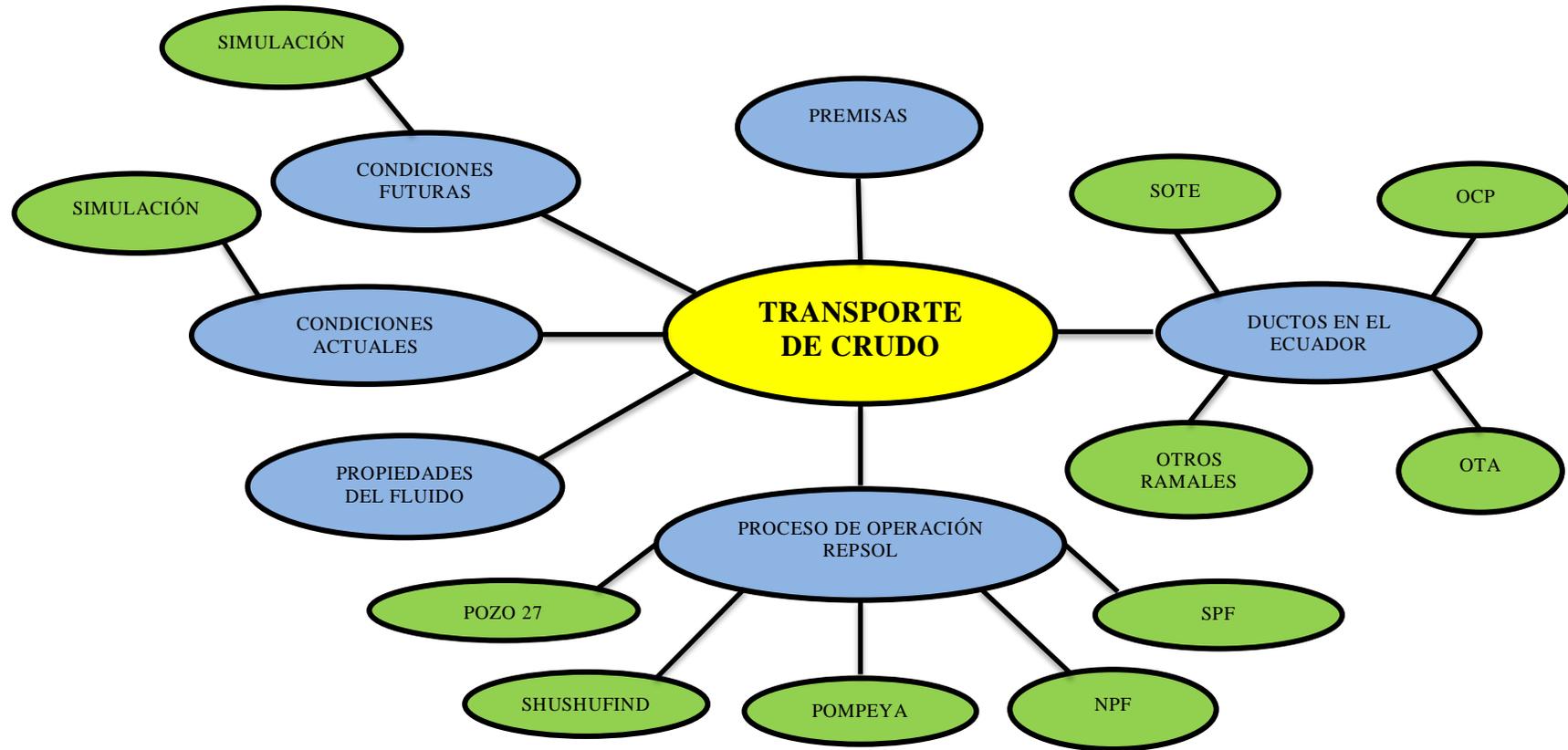


Figura N° 7: Constelación de Ideas Variable Dependiente.
Fuente: Investigación directa.
Elaborado por: El Investigador.

Desarrollo de Marco Teórico

Sistemas de bombeo

Una máquina de fluido es una herramienta mecánica creada con la finalidad de aportar energía al fluido que circula a través de ella, o a su vez provee la energía que recibe del fluido.

Las máquinas de fluido se subdividen en máquinas hidráulicas y máquinas térmicas, nos centraremos en las máquinas hidráulicas objetivo fundamental de la investigación.

Máquina hidráulica

Máquina hidráulica es aquella en la cual el fluido de trabajo que circula para intercambiar energía no varía sensiblemente su densidad, por lo tanto, se debe tomar en cuenta que la densidad es constante.

Clasificación de las máquinas hidráulicas

Para clasificar a las máquinas hidráulicas se toma en cuenta el elemento característico de la misma, es decir, donde se realiza el intercambio de la energía del fluido o a su vez donde el fluido entrega la energía.

Por lo tanto se clasifican en turbomáquinas y en máquinas de desplazamiento positivo o roto estáticas.

Las turbomáquinas poseen un rotor provisto de álabes que es el que realiza el intercambio de energía, de ahí que también son denominadas rotatorias.

Si la transferencia de energía se realiza desde el rotor hacia el fluido se denomina máquina generadora, aquí es donde se sitúan las bombas generadoras y compresores.

La clasificación de las máquinas hidráulicas se puede ver en la figura 8:

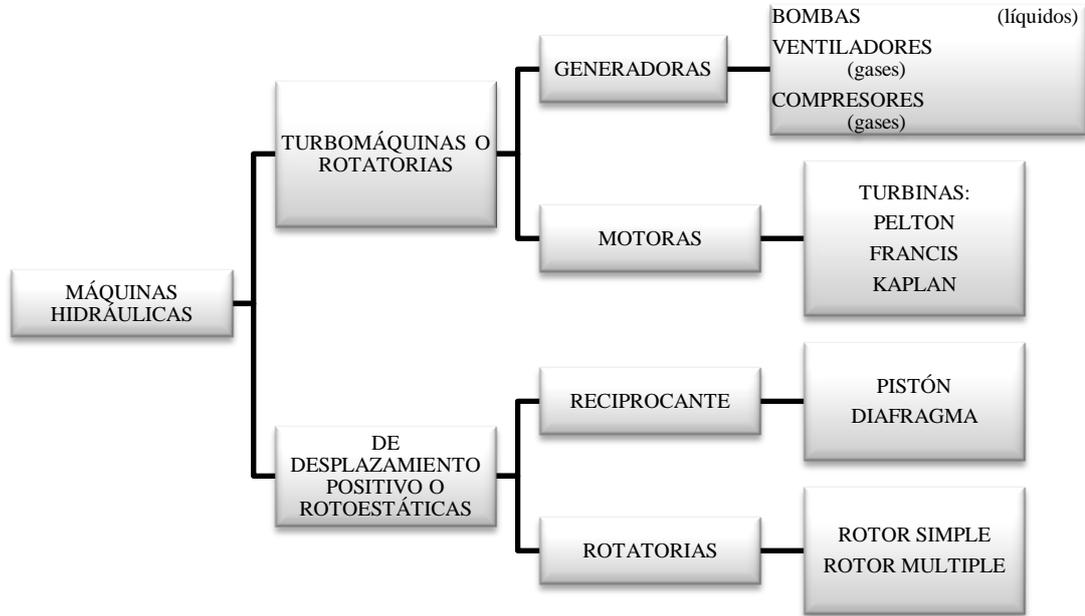


Figura N° 8: Clasificación de las máquinas hidráulicas.
Fuente: Máquinas Hidráulicas, Humberto Torio García.

Para ingresar en la teoría de las máquinas hidráulicas es imprescindible conocer la fundamentación teórica acerca de la energía que gana o pierde el fluido. Streeter, Wylie, y Bedford (1999) y Mataix (1982), deducen la fórmula del intercambio de energía en la máquina hidráulica de la siguiente manera.

Ecuación fundamental de las turbomáquinas (Ecuación de EULER)

La fórmula de Euler interviene explícitamente en los impulsores de todas las máquinas hidráulicas, expresando la energía intercambiada en dicho elemento.

Ecuación de momento de momentum

Las bombas entregan energía al fluido que circula por ellas mediante el álabe; debido a que el movimiento del álabe es en dirección tangencial, el trabajo es

realizado por las componentes tangenciales de la fuerza sobre el impulsor. Las componentes radiales se desplazan en sentido radial sin producir ningún trabajo.

Para este fenómeno se idealiza que las pérdidas en el equipo son despreciables, además que la velocidad del fluido es tangente al álabe. Con esto la ecuación de momento de momentum toma la siguiente forma:

$$T = \rho Q [rV_{t \text{ sale}} - rV_{t \text{ entra}}] \quad (1)$$

Dónde:

- T = torque que actúa sobre el fluido
- $rV_{t \text{ sale}}$ y $rV_{t \text{ entra}}$ momento de momentum que sale y entra al volumen de control.
- Q = caudal

Para comprender mejor esta teoría se utiliza el diagrama vectorial de la figura 9 que parte del corte transversal en el impulsor de una turbomáquina; generalmente se emplea el subíndice 1 para el fluido que entra y el subíndice 2 para el fluido que sale. Los esquemas se representan a continuación:

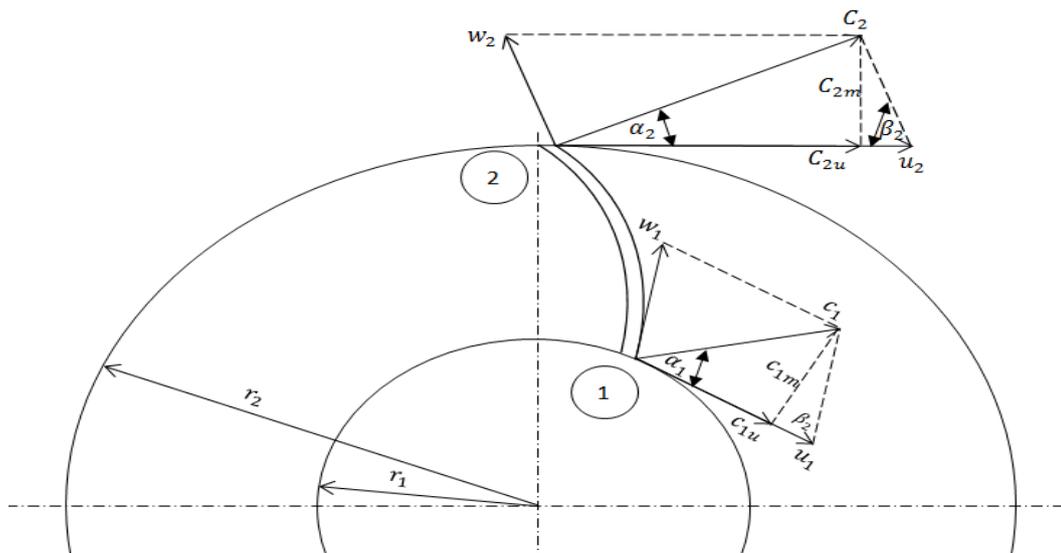


Figura N° 9: Corte transversal del rodete de una bomba centrífuga con dibujos de los triángulos de velocidad a la entrada y salida.

Fuente: Fuente Mott R., Mecánica de los fluidos y Máquinas hidráulicas.

Según el gráfico se tiene lo siguiente:

c = velocidad absoluta de una partícula de fluido

w = velocidad relativa del fluido (velocidad del rotor respecto al fluido)

u = velocidad lineal del rotor

Generalmente se utiliza el diagrama vectorial polar para el estudio de las relaciones en los álabes como se observa en la figura 10. En este gráfico las velocidades absolutas u y C se dibujan desde el punto 0, y la velocidad w las conecta. C_u es la componente de la velocidad absoluta en dirección tangencial, α es el ángulo de la velocidad absoluta con respecto a la velocidad periférica u , β es el ángulo que hace la velocidad relativa con u , es decir, el ángulo del álabe y C_m es la componente de la velocidad absoluta en el eje perpendicular o en sentido radial.

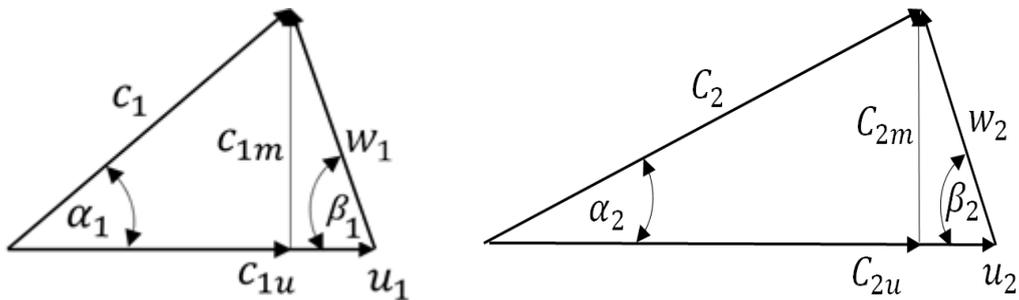


Figura N° 10: Triángulos de velocidad de entrada y salida de los álabes del rodete de una bomba o ventilador con la notación internacional para ángulos, velocidades y componentes de velocidades. Fuente: Fuente Mott R., Mecánica de los fluidos y Máquinas hidráulicas.

C_{1u} = componente periférica de la velocidad absoluta del fluido a la entrada

α_1 = ángulo que forman las dos velocidades C_1 y u_1

β_1 = ángulo que forma w_1 con $-u_1$

De la misma forma para el triángulo de salida sustituyendo el subíndice 1 por 2.

Con el conocimiento de los triángulos de velocidad la ecuación toma la siguiente forma:

$$T = \rho Q(r_2 C_2 \cos \alpha_2 - r_1 C_1 \cos \alpha_1) \quad (2)$$

$$T = \rho Q(r_2 C_{2u} - r_1 C_{1u}) \quad (3)$$

De esta forma cuando T es positivo el momento de momentum aumenta en el volumen de control, esto sucede en una bomba. Para T negativo el momento de momentum disminuye, así sucede en las turbinas. Cuando $T=0$ significa que el fluido circula en canales donde no hay álabes.

Relaciones de cabeza y energía

Multiplicando la ecuación anterior por la velocidad rotacional ω en rad por segundo se tiene

$$T\omega = \rho Q \omega r_2 C_{2u} - \omega r_1 C_{1u} = \rho Q(u_2 C_{2u} - u_1 C_{1u}) \quad (4)$$

Sin considerar pérdidas, la potencia disponible en una bomba es $Q\Delta p = Q\gamma H_u$, en donde H es la cabeza sobre el rotor. Similarmente, el rotor de una bomba produce trabajo $Q\gamma H$, en donde H_u es la cabeza o altura hidráulica de la bomba. El intercambio de potencia es:

$$T\omega = Q\gamma H_u \quad (5)$$

Despejando H_u , utilizando la ecuación 4 para eliminar T se obtiene;

$$H_u = \frac{u_2 C_{2u} - u_1 C_{1u}}{g} \quad (6)$$

Para turbinas el signo de la ecuación se invierte.

Aplicando la ecuación de la energía

$$H_u = \pm \left(\frac{u_1^2 - u_2^2}{2g} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g} \right) \quad (7)$$

Similar a la ecuación de Bernoulli entre la entrada y la salida del rodete, sin tener en cuenta las pérdidas.

$$H_u = \pm \left(\frac{p_1 - p_2}{\rho g} + z_1 - z_2 + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g} \right) \quad (8)$$

La Altura de presión del rodete está determinada por la siguiente ecuación

$$H_p = \pm \frac{p_1 - p_2}{\rho g} = \pm \left(\frac{c_1^2 - c_2^2}{2g} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} \right) \quad (9)$$

Ecuación general para fluidos en movimiento

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + H_{\text{total}} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + H_{\text{pérdidas}} \quad (10)$$

La altura dinámica de rodete

$$H_d = \pm \left(\frac{c_1^2 - c_2^2}{2g} \right) \quad (11)$$

Bombas de transferencia

Las estaciones de bombeo NPF, SPF, Pompeya y Shushufindi de Repsol disponen de equipos para transportar el producto entre las estaciones, estos equipos son bombas centrífugas.

Bombas centrífugas

Como su nombre lo dice en estas máquinas las fuerzas centrifugas provocan que el fluido sea desplazado en forma radial desde el eje de rotación del impulsor hacia la periferia. En esta trayectoria el fluido gana energía en forma de velocidad y presión, es por eso que la característica principal de estos equipos es convertir la

energía de una fuente (movimiento del motor) en velocidad (o energía cinética) y esta a su vez vence la presión del sistema.

Las bombas centrífugas o rotodinámicas son los equipos de transferencia que se utilizan con mayor frecuencia en la industria petrolera para el transporte de productos, esto debido a la flexibilidad de parámetros de operación que se pueden disponer, además de los bajos costos de operación y mantenimiento, caudal constante, ocupan relativamente poco espacio y producen bajos niveles de ruido dependiendo del accionamiento.

Clasificación de las bombas rotodinámicas

La clasificación de las bombas rotodinámicas es la siguiente, ver figura 11 y 12.



Figura N° 11: Clasificación de las bombas rotodinámicas.
Fuente: Fuente Mott R., Mecánica de los fluidos y Máquinas hidráulicas.

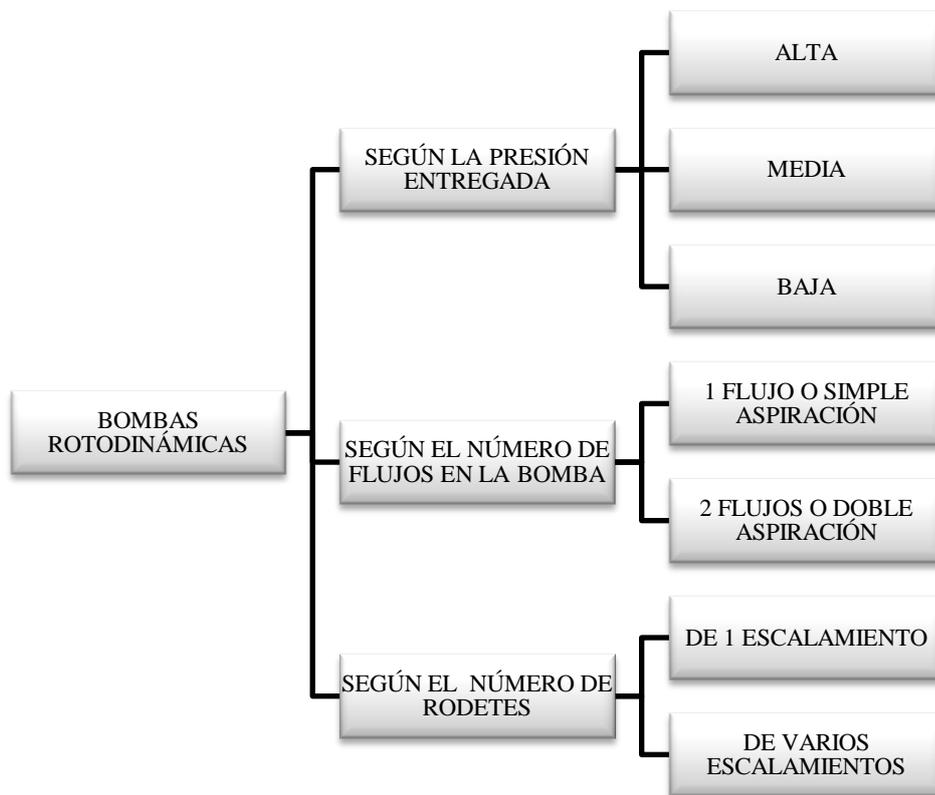


Figura N° 12: Clasificación de las bombas rotodinámicas.
Fuente Mott R., Mecánica de los fluidos y Máquinas hidráulicas.

Constitución

(GÓMEZ, s.f.) en su trabajo detalla de una manera concisa las definiciones de las partes fundamentales de la bomba: “Las bombas centrífugas consisten principalmente en un eje que sostiene un impulsor con varias aletas o aspas y una carcasa. Estos elementos en conjunto realizan el trabajo requerido de transportar el fluido de un lugar a otro”.

Eje.- el eje es una pieza de sección circular que transmite el movimiento del elemento de fuerza (en este caso el motor) hacia el o los impulsores.

Impulsor.- es el elemento móvil que recibe el movimiento del eje, está formado por álabes divergentes que parten de un centro y de acuerdo a la aplicación, estos pueden ser: abiertos, semi abiertos o cerrados.

Carcasa.- el impulsor se encuentra encerrado en una bóveda denominada carcasa que es el cuerpo de la bomba, permite transformar la energía cinética de la bomba en presión mediante la reducción de la velocidad por aumento de sección.

Anillos de desgaste.- estos elementos absorben el desgaste del trabajo de la bomba, evitan el cambio de piezas grandes y costosas, y únicamente se requiere del cambio de los mismos.

Sellos.- este elemento impide la salida del flujo bombeado hacia el exterior.

Cojinetes.- cumplen la función de soportar el eje y absorben las vibraciones y cargas del trabajo producido.

En la figura 13 se puede observar claramente los componentes.

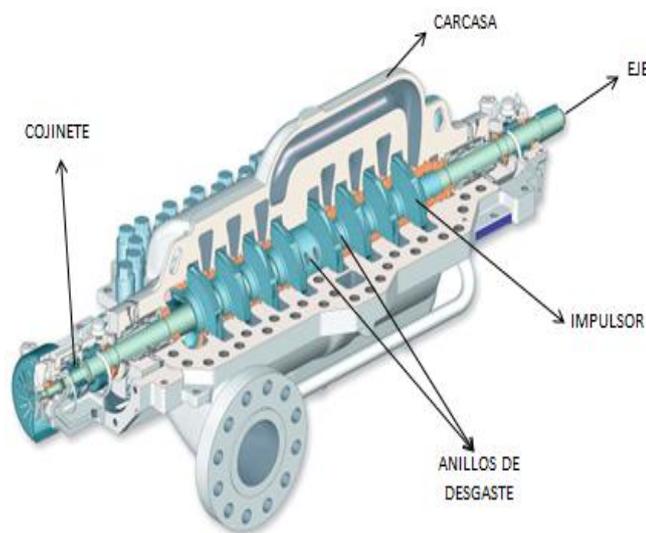


Figura N° 13: Componentes de una bomba centrífuga.
Fuente: Imágenes Google.

Funcionamiento

Estas máquinas vencen la presión que se encuentra en el sistema implantado y envían el fluido a través del circuito hasta el punto deseado, esto lo hacen de la siguiente manera:

El motor ya sea a combustión o eléctrico (en ciertos casos la energía proviene de fuentes naturales como ríos o el viento) genera la energía necesaria que es transferida al impulsor o rodete y este a su vez la transfiere al fluido que transita; esta transferencia de energía produce un aumento en la energía cinética del fluido y por ende en su velocidad. Este fenómeno se produce debido a que el fluido circula desde el ojo o centro del rodete en donde la sección es menor, hacia la periferia en dirección radial donde la sección es mayor, esta aceleración es la que produce el incremento en la energía cinética la cual a la salida del rodete y con la ayuda de la carcasa se convierte en cabeza de presión. El funcionamiento de la bomba se puede observar en la figura 14.

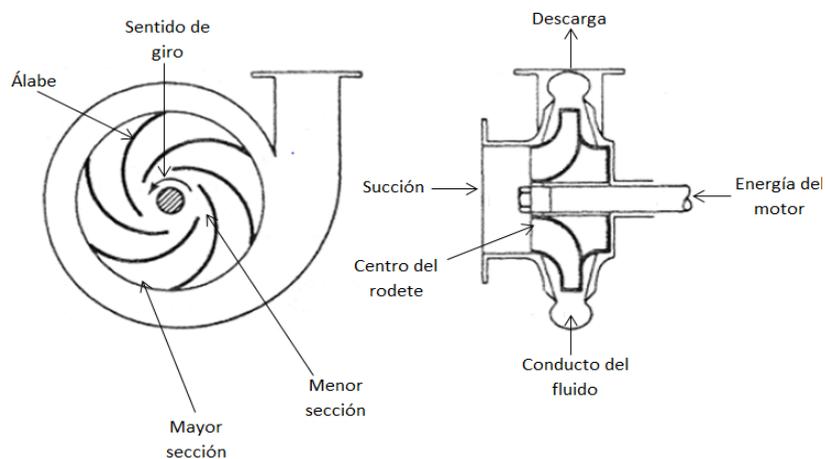


Figura N° 14: Funcionamiento de la bomba centrífuga.
Fuente: imágenes de Google.

Parámetros de operación de bombas centrífugas

A continuación, se presentan una serie de conceptos y fórmulas que permiten calcular los parámetros de funcionamiento de las bombas centrífugas.

a) Caudal

Cannut, Guerra, Guzmán, y Struck (2008) mencionan que el caudal es la cantidad de fluido que atraviesa un punto por unidad de tiempo, se expresa de la siguiente forma:

$$Q = v * A \tag{12}$$

Dónde:

Q = Caudal.

v = Velocidad del fluido.

A = Área transversal del punto por donde transita el fluido.

Al despejar la Ecuación 12 se puede obtener fácilmente la fórmula para la obtención del diámetro de la tubería o bien la velocidad del fluido, de la siguiente manera:

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \quad (13)$$

b) Potencia hidráulica de la bomba

En el estudio de Nieto (s.f.) consta que en un equipo de bombeo la potencia consumida por éste no es igual a la potencia que finalmente se transmite al fluido y que es la potencia útil realmente.

En efecto, la potencia teórica o potencia útil (P_u) que se transmite a un fluido, sea agua u otro cualquiera, es la que se invierte en proporcionarle una altura manométrica (H) a un caudal (Q) que pasa por el equipo de bombeo, viene dado por la siguiente expresión:

$$P_u = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{total} \quad (14)$$

Dónde:

P_u (teórica) = potencia proporcionada al fluido.

ρ = densidad del fluido.

g = aceleración de la gravedad: $9,81 \text{ m/s}^2$.

Q = caudal del fluido que atraviesa la bomba.

H_{total} = altura manométrica ganada por el fluido a su paso por la bomba.

Al producto ($\rho * g$) se le denomina peso específico, por lo que la fórmula queda de la siguiente manera:

$$\mathbf{Pu} = \boldsymbol{\gamma} * \mathbf{Q} * \mathbf{H}_{total} \quad (15)$$

Dónde:

$\boldsymbol{\gamma}$ = peso específico del fluido.

La potencia calculada por la expresión anterior, es la potencia teórica o útil (Pu) que ganaría el fluido a su paso por el equipo de bombeo. No obstante, una bomba está constituida, además por un motor de accionamiento acoplado mediante un eje y sistemas auxiliares.

La potencia finalmente consumida (Pe) por todo este equipo de bombeo es superior a la potencia útil (Pu), dado que habrá que considerar las pérdidas y rendimientos de cada uno de los componentes que intervienen.

En efecto, en primer lugar se tiene la potencia que debe absorber el eje de la bomba (Pb), para suministrar el caudal (Q) y la altura manométrica (H), y cuyo valor es el proporcionado por las siguientes expresiones, según las unidades de medida empleadas:

$$\mathbf{Pb [kW]} = \frac{\boldsymbol{\gamma} * \mathbf{Q} * \mathbf{H}}{367 * \boldsymbol{\eta}_H * \boldsymbol{\eta}_V} \quad (16)$$

$$\mathbf{Pb [CV]} = \frac{\boldsymbol{\gamma} * \mathbf{Q} * \mathbf{H}}{270 * \boldsymbol{\eta}_H * \boldsymbol{\eta}_V} \quad (17)$$

$$\mathbf{Pb [HP]} = \frac{\boldsymbol{\gamma} * \mathbf{Q} * \mathbf{H}}{274 * \boldsymbol{\eta}_H * \boldsymbol{\eta}_V} \quad (18)$$

Dónde:

Q = caudal que impulsa la bomba.

H = altura manométrica ganada por el fluido a su paso por la bomba.

γ = peso específico del fluido.

η_H = rendimiento hidráulico, expresado en porcentaje.

El rendimiento hidráulico se puede estimar en los siguientes valores:

0,95 – 0,97 para bombas de gran tamaño con condiciones de escurrimiento favorables

0,85 – 0,88 para bombas pequeñas y de diseño no tan elaborado

η_V = rendimiento volumétrico, expresado en porcentaje

El rendimiento volumétrico se puede estimar en los siguientes valores:

0,97 – 0,98 para bombas de cuidada ejecución y grandes caudales

0,94 – 0,96 para bombas de cuidada ejecución y pequeños caudales

0,89 – 0,92 para bombas de regular ejecución y pequeños caudales

Una vez tomadas en cuenta las pérdidas anteriores que reducen la eficiencia en una bomba, la relación entre la potencia útil (P_u) transmitida al fluido y la que debe recibir la bomba en su eje de entrada de accionamiento (P_b), es la siguiente en función de cada uno de los rendimientos anteriores:

$$P_u = P_b * \eta_H * \eta_V \quad (19)$$

Para el caso de motores eléctricos monofásicos:

$$P_e \text{ [kW]} = \frac{U * I * \cos \varphi}{1000} \quad (20)$$

Para el caso de motores eléctricos Trifásicos:

$$P_e \text{ [kW]} = \frac{\sqrt{3} * U * I * \cos \varphi}{1000} \quad (21)$$

Dónde:

U = tensión de servicio de la red eléctrica, en V

I = consumo de corriente, en A

$\cos \varphi$ = factor de potencia

Sin embargo, la potencia ofrecida por el motor eléctrico (P_m) en la salida de eje es menor que la potencia eléctrica consumida (P_e), debido a las pérdidas mecánicas que se producen en los órganos de transmisión del motor. De esta manera se obtiene que:

$$P_m \text{ [kW]} = P_e * \eta_M \quad (22)$$

η_M = rendimiento mecánico del motor, expresado en porcentaje

Se puede estimar en los siguientes valores

0,94 – 0,96 para bombas acopladas al eje del motor, de gran caudal y elaborado diseño

0,83 – 0,86 para bombas pequeñas con transmisión intermedia entre bomba y motor

Finalmente, y considerando todas las anteriores pérdidas, la relación entre la potencia útil (P_u) transmitida al fluido y el total de potencia consumida de la red eléctrica (P_e) por la bomba estarían relacionadas de la siguiente forma:

$$P_u = P_e * \eta_H * \eta_V * \eta_M = P_e * \eta_G \quad (23)$$

Dónde:

η_G = rendimiento global del equipo de bombeo que incluye (hidráulico, volumétrico y mecánico).

Una forma de simplificar las ecuaciones anteriores es aplicar la fórmula de rendimiento utilizando la potencia al freno como se observa a continuación:

$$P = T * N \quad (24)$$

Dónde:

P= Potencia al freno (utilizando un dinamómetro o freno se obtiene experimentalmente este valor).

T= par resistente de la bomba es igual al producto de la fuerza tangencial F por el radio r donde se aplica esta fuerza;

N= número de revoluciones de la bomba

El rendimiento de la bomba también se puede expresar de la siguiente forma:

$$\eta_G = \frac{P_u}{P} \quad (25)$$

η_G = rendimiento global del equipo de bombeo que incluye (hidráulico, volumétrico y mecánico).

P_u (teórica) = potencia proporcionada al fluido.

P= Potencia al freno (utilizando un dinamómetro o freno se obtiene experimentalmente este valor).

c) NPSH

Define la diferencia entre la presión del líquido en el eje del impulsor y su presión de vapor a la temperatura que se realiza el bombeo.

De acuerdo a Nieto (s.f.) se deben considerar dos tipos de NPSH:

NPSH disponible es un parámetro característico de cada instalación e independiente de la bomba empleada. La expresión que define el NPSH

disponible es la siguiente, obtenida a partir de aplicar el principio de conservación de la energía entre la superficie libre del líquido y el punto de aspiración:

$$\text{NPSHd} = \frac{10 \cdot P_a}{\gamma} - H_a - P_{ca} - \frac{10 \cdot P_v}{\gamma} \quad (26)$$

Dónde:

P_a = presión atmosférica o presión en el depósito de aspiración.

H_a = altura geométrica de aspiración.

P_{ca} = es la pérdida de carga originada en la aspiración (incluye todos los elementos que componen el circuito de aspiración: tuberías, válvulas, curvas, accesorios, etc.).

P_v = es la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo.

γ = peso específico del líquido.

NPSH requerido es un parámetro característico del tipo de bomba empleada, siendo un dato que suministra el fabricante de la bomba. La expresión que define el NPSH requerido es la siguiente:

$$\text{NPSHr} = H_z + \frac{V_a^2}{2 \cdot g} \quad (27)$$

Dónde:

H_z = representa la presión mínima necesaria inmediatamente anterior a los alabes del impulsor.

V_a^2 = es la velocidad de entrada del líquido en la bomba. La expresión

$\frac{V_a^2}{2 \cdot g}$ representa la altura dinámica (presión) que tiene el líquido a la entrada

de la bomba.

Cuando el impulsor trabaja, se crea a la entrada de éste una baja de presión que permite que el fluido sea succionado e impulsado hacia afuera; el límite permisible de esta baja de presión lo marca la presión de vapor del fluido

bombeado, de tal forma que si la presión de ingreso del fluido es menor que la presión de vapor éste se comienza a evaporar generando burbujas que ocasionan daños mecánicos en la bomba. Por lo tanto, la condición de no cavitación en la bomba es la siguiente:

$$\text{NPSHd} \geq \text{NPSHr} + 0,5 \text{ m} \quad (28)$$

d) Altura manométrica

Según Nieto (s.f.) la altura manométrica representa la resistencia que debe vencer el fluido desde el nivel de aspiración hasta el nivel de impulsión, se le conoce también como la presión que debe imprimir la bomba al fluido.

La altura manométrica comúnmente se la mide en metros, pero también existen correlaciones de unidades que son las siguientes:

$1 \text{ atm} = 1,033 \text{ Kg/cm}^2 = 1,013 \text{ bar} = 1,013 * 10^5 \text{ Pascal} = 10,33 \text{ metros de columna de agua (mca)}$

La expresión de la altura manométrica o carga estática se compone de los siguientes términos:

$$H = H_g + P_c + 10 * \frac{P_i - P_a}{\gamma} \quad (29)$$

Dónde:

H = altura manométrica

H_g = altura geométrica que debe vencer el fluido

P_c = pérdida de carga del fluido al pasar a través de las tuberías y accesorios

$\frac{P_i - P_a}{\gamma}$ = presión diferencial existente entre las superficies del líquido en la impulsión y la aspiración de la bomba, dividido por su peso específico. El

resultado se expresa en metros. Para los casos comunes donde los lugares desde donde se realice la aspiración y la impulsión estén abierto a la atmósfera, las presiones de aspiración e impulsión en la superficie del líquido serán iguales ($P_a = P_i$) y por lo tanto esta componente resultará cero ($P_a - P_i = 0$) y no deberá ser tomada en cuenta.

Para obtener la altura geométrica H_g se debe tomar en cuenta la siguiente expresión:

$$H_g = H_a + H_i \quad (30)$$

Dónde:

H_a = altura de aspiración, es la altura perpendicular medida desde el punto de succión hasta el eje de la bomba.

H_i = altura de impulsión, es la altura perpendicular medida desde el eje de la bomba hasta el nivel de máxima elevación.

Para entender mejor la altura manométrica se puede observar la figura 15.

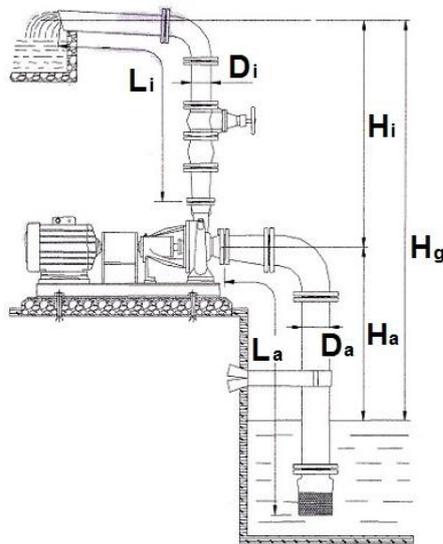


Figura N° 15: Componentes de la altura manométrica.
Fuente: ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn206.html.

La altura manométrica puede ser medida conectando un manómetro diferencial entre la succión y descarga de la bomba (de éste concepto proviene el nombre), la expresión se puede denotar de la siguiente forma:

$$H = \frac{P_i - P_a}{\gamma} \quad (31)$$

Para la obtención de la pérdida de carga por rozamiento en tuberías y accesorios P_c se debe considerar el caudal que circula y su diámetro interior. En la figura 16 se puede obtener los coeficientes necesarios para proceder con el cálculo.

PÉRDIDA DE CARGA EN TUBERÍA NUEVA DE HIERRO FUNDIDO

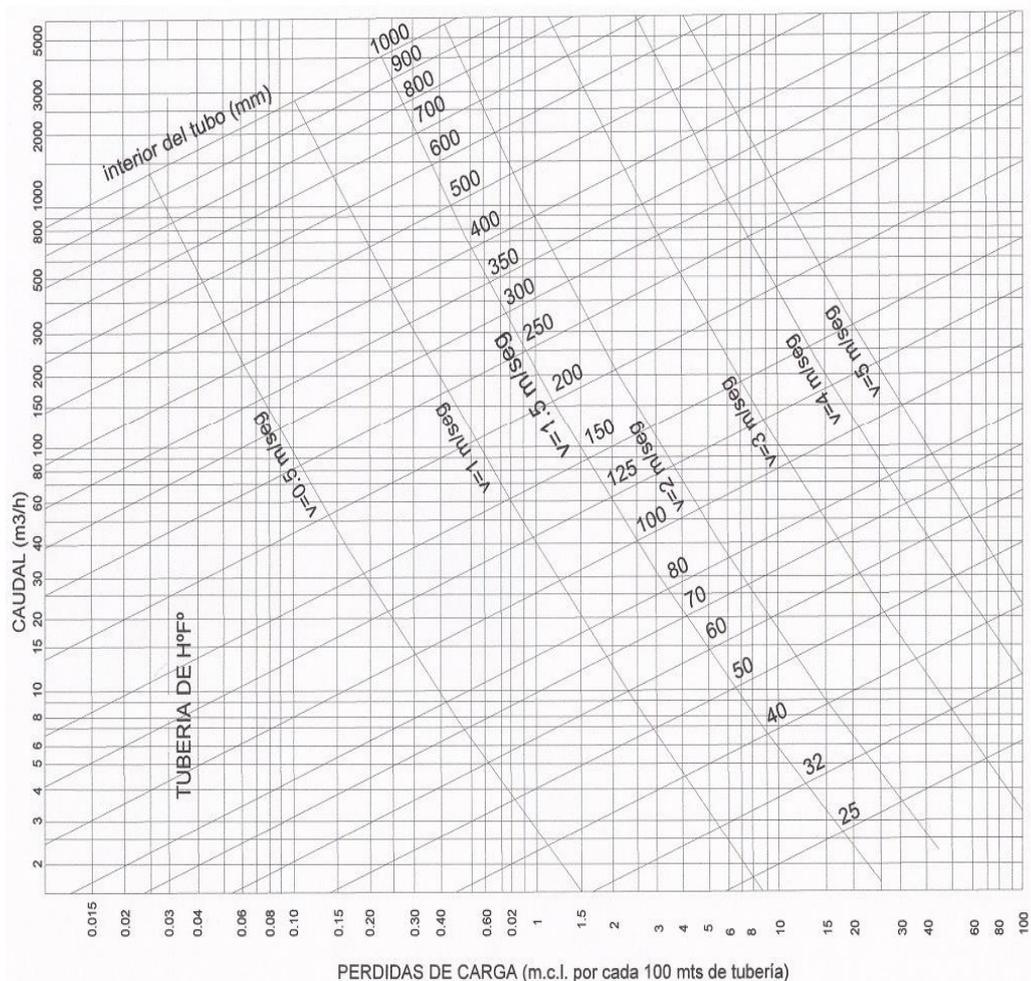


Figura N° 16: Pérdidas de carga en tubería de hierro fundido.
Fuente: ingmecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn206.html.

En caso de presentarse tuberías de otros materiales se debe multiplicar el coeficiente resultante por los factores indicados en la tabla 1.

Tabla N° 1: Factores de corrección para pérdidas de carga

TIPO DE TUBERÍA	COEFICIENTE CORRECTOR
Hierro forjado	0.76
Acero sin soldadura	0.76
Fibro-cemento	0.80
Cemento de paredes lisas	0.80
Gres	1.17
Hierro forjado muy usado	2.10
Hierro de paredes rugosas	3.60

Fuente: ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn206.html.

Además de la tubería existen accesorios como válvulas, codos, curvas y demás. A continuación, se presenta la tabla 2, que incluye la longitud equivalente en metros de algunos accesorios de uso común con respecto a diámetros de tubería utilizada.

Tabla N° 2: Factores de corrección de pérdidas de carga para accesorios

Ø TUBERÍA ACCESORIO	25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250	300	350	400	500	600	700
Curva 90°	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1	1,2	1,8	2	3	5	5	6	7	8	4	16
Codo 90°	0,3	0,4	0,6	0,7	0,9	1,3	1,7	2,5	2,7	4	5,5	7	8,5	9,5	11	19	22
Cono difusor	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Válvula de pie	6	7	8	9	10	12	15	20	25	30	40	45	55	60	75	90	100
Válvula de retención	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	35	40	50	60	75	85
V. Compuerta abierta	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	1,5	2	2	2	2,5	3	3,5	4	5
V. Compuerta 3/4 abierta	2	2	2	2	2	2	4	4	6	8	8	8	10	12	4	16	20
V. Compuerta 1/2 abierta	15	15	15	15	15	15	30	30	45	60	60	60	75	90	105	120	150

Fuente: ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn206.html.

Curvas características de una bomba centrífuga

El comportamiento de una bomba centrífuga frente a diferentes parámetros operativos viene dado por las curvas características que representan una relación entre caudal y altura manométrica. Para realizar los análisis es necesario comprender cada una de las curvas y comprobar si la bomba está trabajando en el punto óptimo de rendimiento para el cual fue diseñada. A continuación, se describe el cálculo de las curvas características de las bombas centrífugas.

Curva altura manométrica vs caudal

Esta curva muestra la altura que es capaz de desarrollar la bomba a un caudal determinado. En el eje de las ordenadas se colocan las unidades de altura a la que va a ser impulsado un caudal determinado; en el eje de las abscisas el caudal a ser bombeado.

Matemáticamente la ecuación de la curva puede ser expresada de la siguiente manera:

$$H = AQ^2 + BQ + C \quad (32)$$

Los coeficientes A, B y C pueden ser calculados tomando tres puntos (Q, H) de la curva del fabricante y resolviendo la ecuación 32 para cada uno de ellos.

Para el caso experimental en primer lugar se arranca la bomba con la válvula de descarga completamente cerrada en donde $Q=0$ obteniéndose una altura H tomando en cuenta la ecuación 32, obteniéndose la máxima altura. A continuación se realiza el mismo procedimiento abriendo paulatinamente la válvula para una velocidad de giro constante y un diámetro de impulsor determinado, obteniéndose una serie de puntos que permiten graficar una curva como la siguiente:

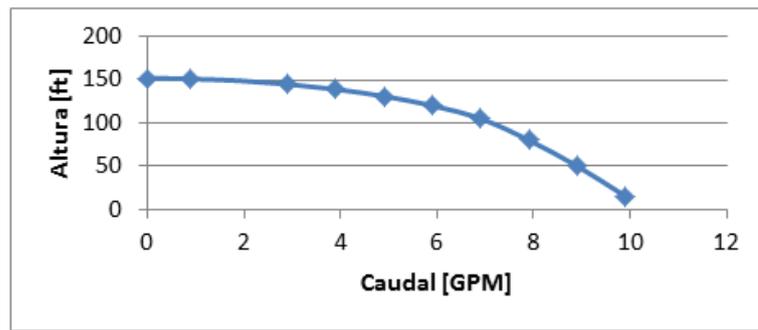


Figura N° 17: Curva característica de bomba centrífuga Q -H.
Fuente: Investigación directa.
Elaborado por: El Investigador.

Considerando los diseños del fabricante es posible tener variación en el diámetro de los impulsores que permiten modificar la curva resultante, comúnmente el fabricante de la bomba suministra una familia de curvas en función de los diámetros que pueden ser utilizados.

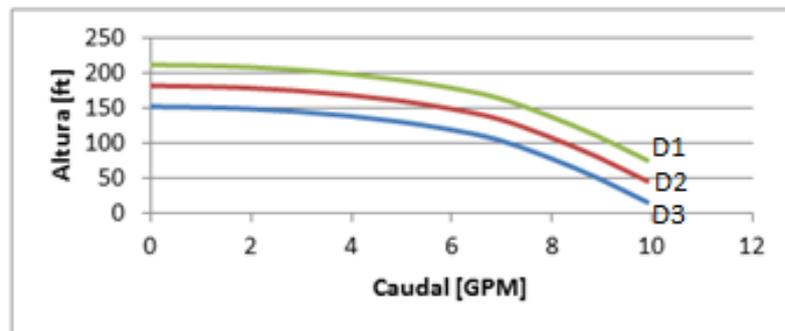


Figura N° 18: Familia de curvas de bomba centrífuga Q - H.
Fuente: Investigación directa.
Elaborado por: El Investigador.

Curva potencia vs caudal

La curva Q – P sirve para determinar el consumo del motor de la bomba en función del caudal suministrado. La curva Q-P se puede observar a continuación, matemáticamente la curva se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$P = Q\gamma H \tag{33}$$

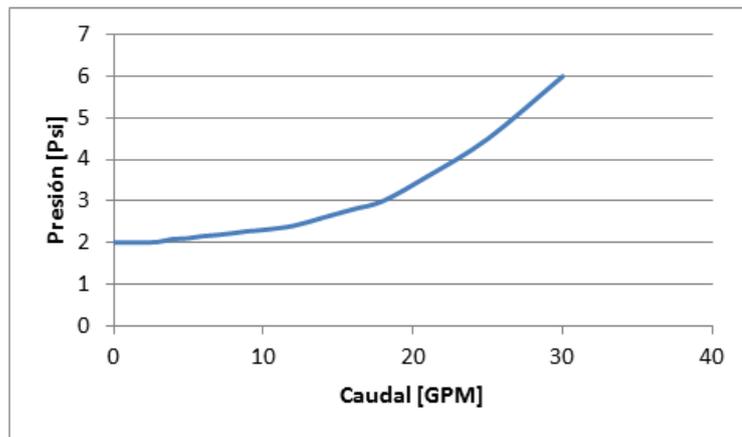


Figura N° 19: Curva Q - P.
 Fuente: Investigación directa.
 Elaborado por: El Investigador.

Curva rendimiento vs caudal

La curva de eficiencia de la bomba permite conocer la relación entre el suministro de potencia o potencia útil y la cantidad de potencia utilizada o potencia al freno. La gráfica de la figura 20 se puede ajustar matemáticamente a la siguiente expresión:

$$\eta = DQ + EQ^2 \quad (34)$$

Obteniéndose una curva como la siguiente:

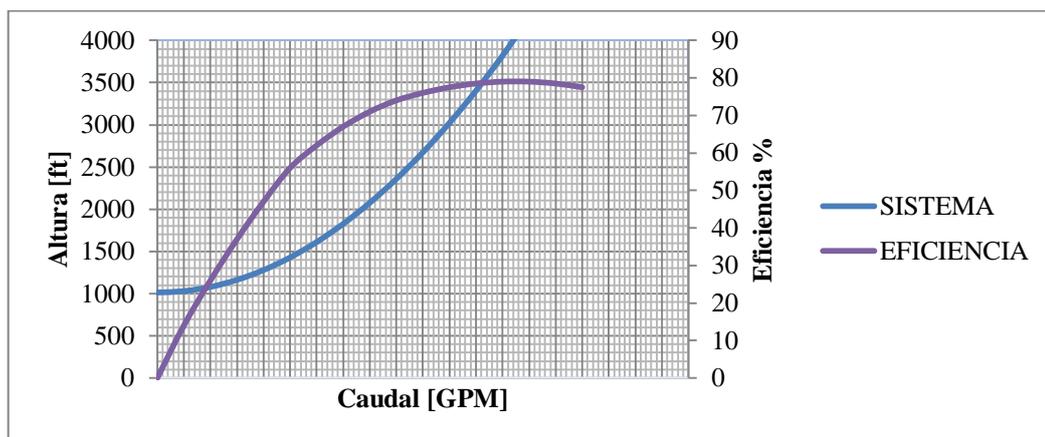


Figura N° 20: Curva Q - η.
 Fuente: Investigación directa.
 Elaborado por: El Investigador.

Curva NPSH vs caudal

Esta curva representa la energía mínima que el fluido necesita en la brida de succión, para asegurar el funcionamiento de la bomba evitando que se genere cavitación. Es medida como altura absoluta de líquido, se puede observar la curva en la siguiente figura:

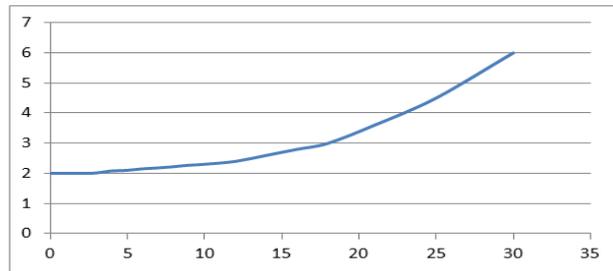


Figura N° 21: Curva Q - NPSH.
Fuente: Investigación directa.
Elaborado por: El Investigador.

Curva del sistema

Es posible determinar la altura que debe ser suministrada en una instalación hidráulica dependiendo del caudal. El sistema hidráulico está caracterizado por diferentes aspectos topografía del trazado, longitud, características de la tubería y accesorios instalados.

Matemáticamente la curva puede ser expresada de la siguiente forma:

$$H = H_i + K * Q^2 \quad (35)$$

Dónde:

H = altura

H_i = altura perpendicular de elevación.

$K * Q^2$ = pérdida de carga total en la conducción (h_r) en función del caudal

$$h_r = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad (36)$$

Sustituyendo la Ecuación 36 se tiene:

$$h_r = f * \frac{8}{\pi^2 * g} * \frac{L}{D^5} * Q^2 \quad (37)$$

Esta expresión corresponde a la **carga dinámica** que representa las pérdidas de presión que se originan por la fricción del fluido en las tuberías y accesorios del sistema hidráulico.

Dónde:

- Q = caudal
- D = diámetro de la tubería
- L = longitud de la tubería
- g = aceleración de la gravedad
- f = factor de fricción, adimensional
- v = velocidad del fluido

Por lo tanto:

$$h_r = K * Q^2 \quad (38)$$

La gráfica de esta curva se puede observar en la figura 22.

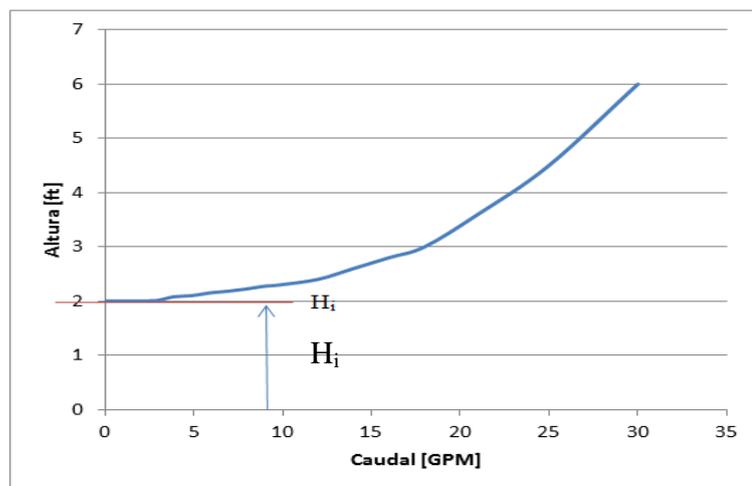


Figura N° 22: Curva de un sistema Hidráulico.
Fuente: Investigación directa.
Elaborado por: El Investigador.

Punto de operación de una bomba

Este punto representa el caudal real que la bomba va a enviar a través del sistema hidráulico a una altura o carga determinada, este punto está localizado en donde la curva posea su máxima eficiencia o cercano a ésta.

El punto de operación de una bomba gráficamente se obtiene en la intersección de la curva (Q - H) de la bomba correspondiente y la curva del sistema. Al trazar una línea horizontal y otra vertical que pase por este punto pueden obtenerse los valores de carga, caudal, eficiencia y NPSH requerido. Se puede observar en la figura 23.

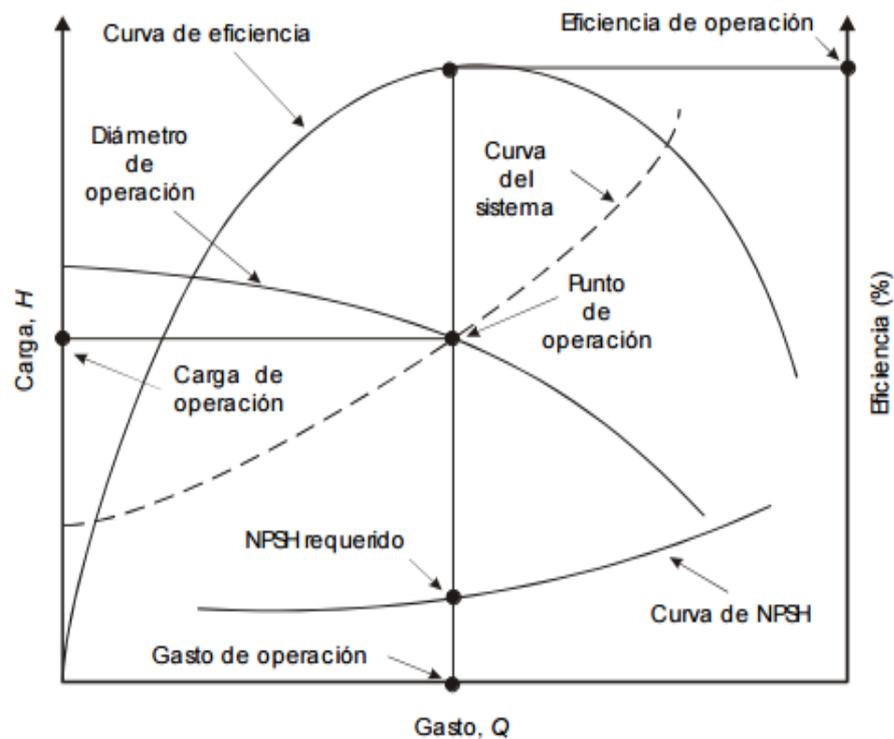


Figura N° 23: Punto de operación de una bomba en un sistema hidráulico.
Fuente: www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Tecnologias/bombas.pdf.

Leyes de afinidad para bombas centrífugas, teoría de la semejanza

En las bombas centrífugas es posible modificar los parámetros operacionales con la variación de: velocidades para obtener capacidades variadas, o los

diámetros de los impulsores que pueden entrar en una misma carcasa. Las reglas de afinidad definen las relaciones que existen entre la capacidad, cabeza y potencia cuando varía la velocidad o el diámetro del impulsor.

De acuerdo a Mott (2006), las relaciones son las siguientes:

Variación de la velocidad

La capacidad varía directamente con la velocidad

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (39)$$

La capacidad total de la cabeza varía con el cuadrado de la velocidad

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (40)$$

La potencia requerida por la bomba varía con el cubo de la velocidad

$$\frac{P_{u1}}{P_{u2}} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \quad (41)$$

Variación del diámetro del impulsor

La capacidad varía directamente con el diámetro del impulsor.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D_1}{D_2} \quad (42)$$

La cabeza total varía con el cuadrado del diámetro del impulsor.

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \quad (43)$$

La potencia requerida por la bomba varía con el cubo del diámetro del impulsor.

$$\frac{P_{u1}}{P_{u2}} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 \quad (44)$$

La eficiencia permanece casi constante cuando varía la velocidad y para pequeñas variaciones de diámetro.

Métodos para el ajuste de caudal

Por la baja producción de petróleo en el Bloque 16 se presenta el sobredimensionamiento de las bombas principales de transferencia. De acuerdo a GRUNDFOS INDUSTRY, (2004) en su Guía de referencia de Bombas, para solucionar este inconveniente se tienen varios métodos de regulación de caudal, para que se adapten a los nuevos requisitos de funcionamiento, limitando el rendimiento mediante:

- Regulación del caudal por estrangulamiento
- Control de derivación o By-Pass
- Cambio del diámetro del impulsor
- Cambio de velocidad

Control de estrangulamiento

La teoría desarrollada por la Universidad del Atlántico y Universidad Autónoma de Occidente (s.f.) menciona.

Estrangular una válvula en la descarga del sistema de tubería reduce el flujo de operación Q_{op} a los valores de flujo Q_1 o Q_2 , incrementando los valores de la carga dinámica (energía en pérdidas) a las magnitudes H_1 y H_2 . ΔH_1 y ΔH_2 representan los incrementos producto de las pérdidas por rozamiento. Como se aprecia en la figura 25, el consumo de potencia se reduce, pero se incrementa la potencia gastada en pérdidas.

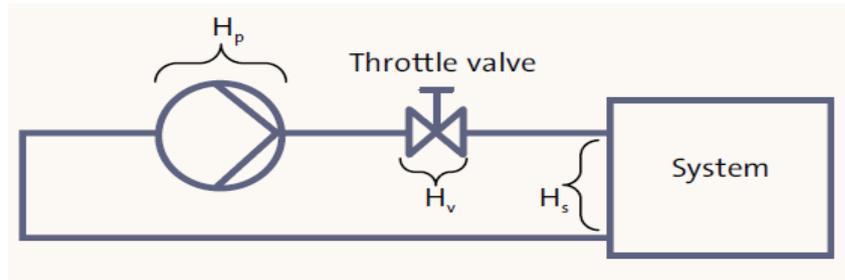


Figura N° 24: Esquema para control por estrangulamiento.
Fuente: GRUNDFOS INDUSTRY.

Para el punto 2 la potencia consumida se determina por la ecuación:

$$P_2 = \frac{\rho * g * Q_2}{1000 \eta_{bomba}} + \frac{\rho * g * Q_2 * \Delta H}{1000 \eta_{bomba}} \quad (45)$$

La potencia requerida por la máquina se emplea por dar una potencia útil al fluido (primer término de la ecuación) y en vencer las resistencias hidráulicas que ofrece el estrangulamiento (segundo término de la ecuación).

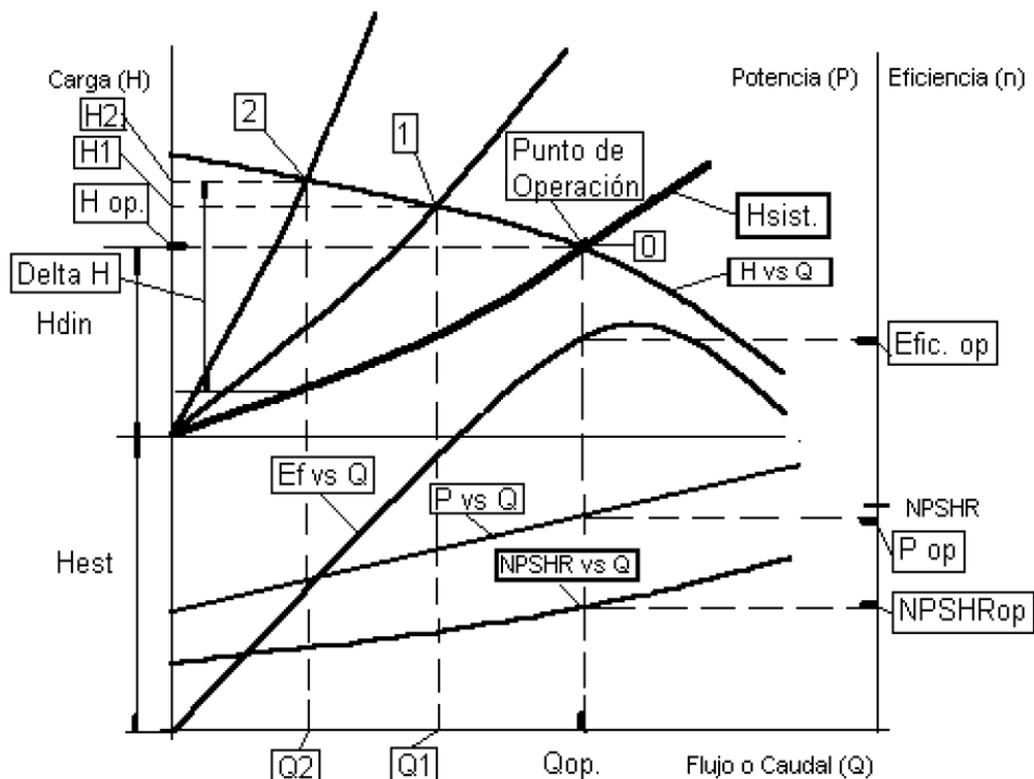


Figura N° 25: Curvas características, método control por estrangulamiento.
Fuente: Universidad del Atlántico y Universidad Autónoma de Occidente.

Control por derivación o By-Pass

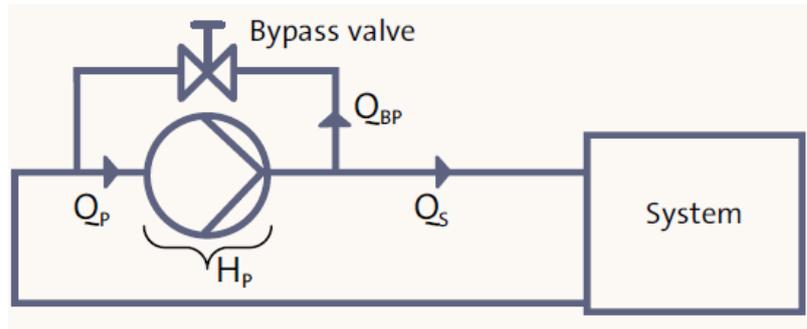


Figura N° 26: Esquema para control por derivación o By- Pass.
Fuente: GRUNDFOS INDUSTRY.

La teoría desarrollada por la Universidad del Atlántico y Universidad Autónoma de Occidente (s.f.) menciona.

Al pasar al punto de operación 2 la bomba maneja un menor flujo y reduce su carga de trabajo, demandando una mayor potencia y requiriendo una mayor carga neta positiva en la succión NPSHr.

Se reduce el flujo destinado al proceso, pero se paga una mayor cantidad de energía en esta operación. Como se aprecia en la gráfica siguiente.

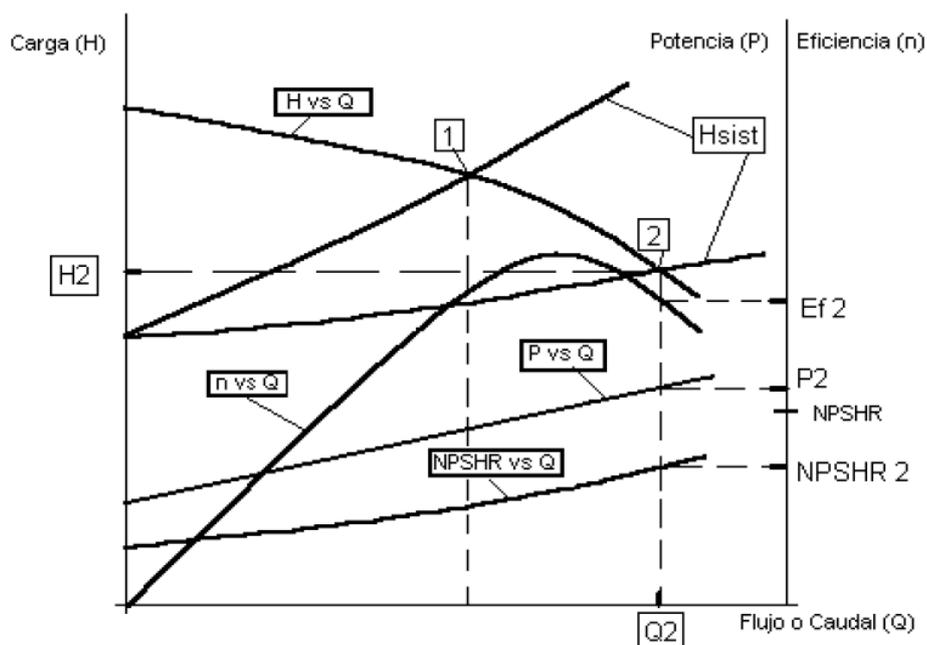


Figura N° 27: Curvas características, método control por derivación.
Fuente: Universidad del Atlántico y Universidad Autónoma de Occidente.

Cambio del diámetro del impulsor

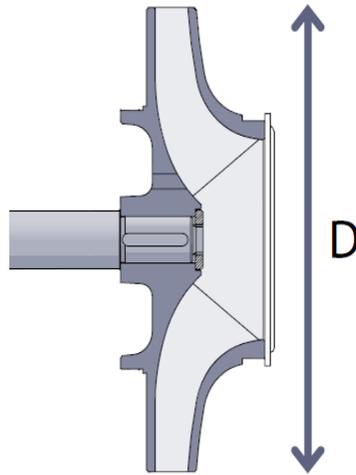


Figura N° 28: Esquema del método de control por cambio de diámetro.
Fuente: GRUNDFOS INDUSTRY.

Otro método para disminuir el caudal es reducir el diámetro del impulsor, para esto no se requiere implementar ningún componente extra. Al reducir el diámetro del impulsor disminuyen el caudal y la altura de la bomba como se observa en la figura 29.

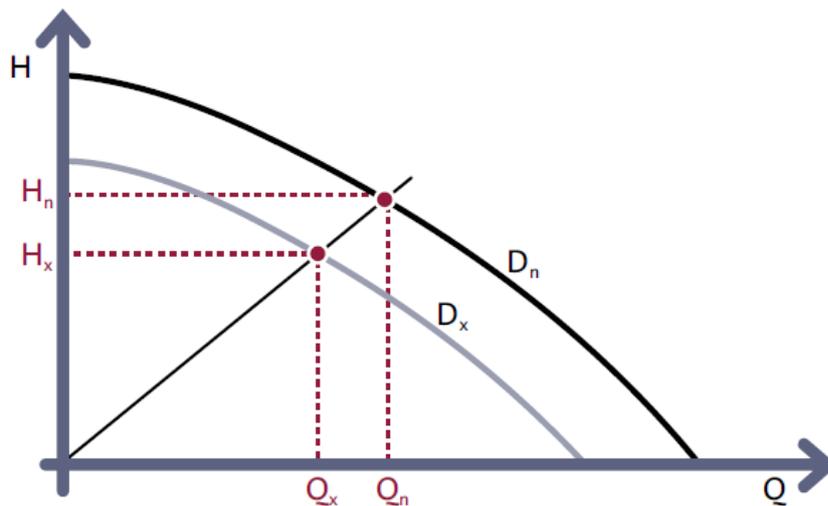


Figura N° 29: Curvas características, método control por cambio de diámetro del impulsor.
Fuente: GRUNDFOS INDUSTRY.

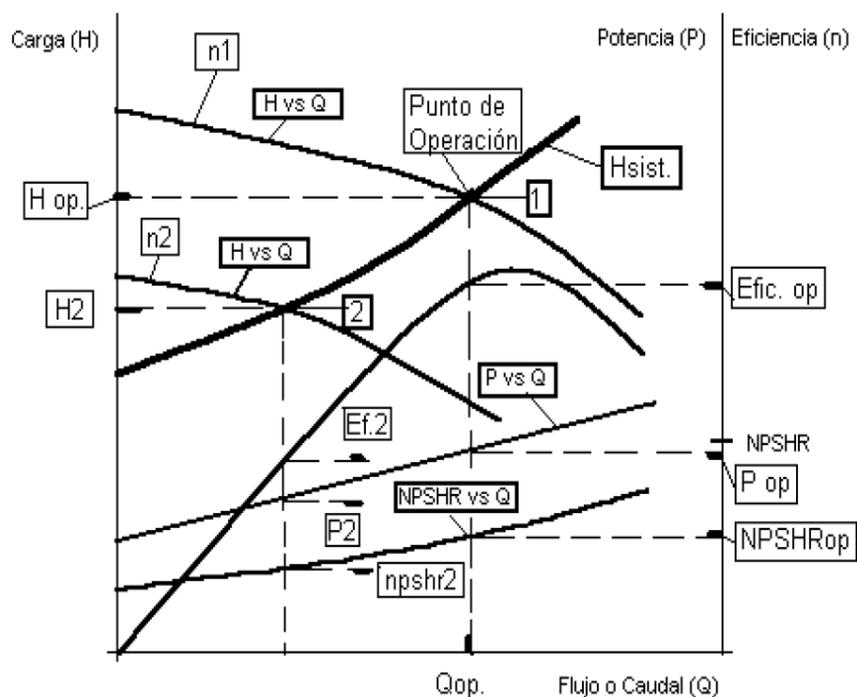


Figura N° 30: Curvas características, métodos: cambio de diámetro del impulsor y control por variación de velocidad.

Fuente: Universidad del Atlántico y Universidad Autónoma de Occidente.

Regulación por control de velocidad

De acuerdo a la Universidad del Atlántico y Universidad Autónoma de Occidente (s.f.).

En la figura 30 se observa que para una velocidad de rotación (n) se definen todas las características hidráulicas de la máquina. Al hacer funcionar la bomba en la nueva velocidad de rotación n_2 se obtiene un nuevo punto de operación. La figura ofrece las características hidráulicas de una bomba funcionando a diferentes rpm. Por lo que para el punto de operación 2, se obtienen nuevos valores de carga, potencia, rendimiento, eficiencia y $NPSH_r$.

La demanda de potencia decrece con el cubo de las revoluciones por lo que una reducción de flujo con este método resulta energéticamente conveniente. Con este procedimiento se puede regular el caudal con más facilidad y modifica las características de una bomba sujeta a condiciones de funcionamiento variables.

La mejor alternativa sería colocar un variador de frecuencia, pero no se puede aplicar ya que las premisas descritas a continuación, impiden colocar nuevas instalaciones y variadores.

Premisas

De acuerdo a las proyecciones la producción de petróleo está en un proceso de disminución, razón por la cual se debe hacer un ajuste a las condiciones operativas de las bombas principales de transferencia y en los procesos del oleoducto, para esto es necesario tomar en cuenta las premisas que son los requerimientos y parámetros emitidos por la empresa Repsol bajo los cuales se desarrollarán todos los análisis.

Las premisas son parámetros, requerimientos y limitaciones emitidas por la empresa Repsol, presiones máximas, caudales máximos y otros que son la guía para desarrollar cualquier actividad que sirva para solucionar el problema de transporte de crudo y encontrar la alternativa más idónea para la empresa.

Las premisas son las siguientes:

- Se establece como presión máxima de salida de la Estación NPF, 1200 psi.
- La presión de llegada al OCP debe ser mayor a 30 psi.
- La presión máxima que soporta la tubería actual es de 1200 psi.
- Se considera que la presión de entrada al sistema de calentamiento actual en la Estación Shushufindi menor o igual a 150 psi.
- El transporte de caudales debe ser igual o menor a 25000 BOPD.
- No se puede considerar diluciones con crudos más livianos.
- No son válidas soluciones que impliquen nuevas instalaciones o que no estén en las facilidades que posee la empresa.
- Se debe tomar en cuenta las características del fluido a transportar de acuerdo a los anexos adjuntos.

- Dentro de este estudio no se debe considerar la instalación de variadores de velocidad.
- Los estudios empiezan a partir de la Estación NPF
- Todos los sistemas y equipos, serán estudiados considerando el menor costo o inversión posible, tanto en construcción, operación y mantenimiento.
- En la alternativa seleccionada se debe tener en cuenta la seguridad del personal, de construcción, operación y mantenimiento del sistema.
- No se deberá considerar calentamiento con diésel o gas, por el impacto económico y ambiental.
- Se puede considerar calentamiento, únicamente utilizando como combustible el mismo crudo a transportar o calentadores eléctricos.
- Debido a que el transporte de crudo se realiza las 24 horas, es de vital importancia que la solución que se encuentre no interrumpa la operación por un lapso mayor a 12 horas, con la finalidad de reducir al máximo las pérdidas económicas por paro de operaciones.
- La alternativa seleccionada debe implicar simplicidad en las operaciones.
- Otra de las prioridades de la solución debe ser la generación del mínimo impacto ambiental.
- Todos los componentes y accesorios estarán ubicados de acuerdo a las mejores prácticas de Ingeniería para el mantenimiento y la operación segura.
- Se contempla optimizar los espacios considerando siempre los requerimientos de seguridad, mantenimiento y operaciones.

Hipótesis

Hi.- El sistema de bombeo incide en el transporte de crudo para los bajos caudales actuales y futuros por el Oleoducto de Repsol, ubicado en el Bloque 16 Provincia de Orellana.

Ho.- El sistema de bombeo no incide en el transporte de crudo para los bajos caudales actuales y futuros por el Oleoducto de Repsol, ubicado en el Bloque 16 Provincia de Orellana.

Señalamiento de variables

Variable Independiente

Sistema de Bombeo

Variable Dependiente

Transporte de crudo

Definición de términos técnicos

Transporte por ductos

El transporte por ductos es un mecanismo de traslado de sólidos, gases, o a su vez multifásico a través de líneas o tuberías que en general constituyen una red o un sistema de transporte en un determinado lugar. En general para que el transporte de productos se efectúe es necesario estaciones de bombeo, estaciones reductoras, plazas de almacenamiento y la tubería por la cual se va a conducir el producto.

Oleoducto

Sistema que transporta petróleo desde los pozos productores hasta las refinерías, estaciones de almacenamiento o plantas de comercialización. Los diámetros de un oleoducto son más grandes que los de un poliducto.

Ductos en el Ecuador

El INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR (s.f.) elabora un documento en donde menciona los sistemas de transporte de crudo en el Ecuador y sus características, se mencionan a continuación:

SOTE

El Sistema de Oleoducto Transecuatoriano o SOTE es una obra de ingeniería creada en el año 1972 tiene un diámetro de 26 pulgadas, una longitud de 503 km y transporta crudo desde Nueva Loja hasta Balao.

OCP

El Oleoducto de Crudos Pesados, Con una extensión de 485 km, es el segundo ducto para transporte de crudo de importancia en el Ecuador. Inició sus operaciones en el año 2003, puede transportar alrededor de 450000 BOPD desde Lago Agrio hasta Balao.

OTA

Ecuador dispone de un ramal de 26 km con el cual se conecta la ciudad de Nueva Loja con el Oleoducto Trasandino de la Empresa Estatal Colombiana. El proceso consiste en transportar crudo desde Nueva Loja hasta el Puerto de Tumaco y desde ahí mediante tráfico marino hacia la Refinería La Libertad en la Provincia de Santa Elena.

Otros ramales

Existen en el Ecuador ramales menores que permiten el transporte de crudo desde los pozos hacia los lugares de almacenamiento y refinación como son: el Edén – Yuturi – Yuralpa y el bloque 16, además de los ramales Villano – Baeza que con una extensión de 135 km transporta desde el campo Villano hacia Baeza una producción de 40000 BOPD.

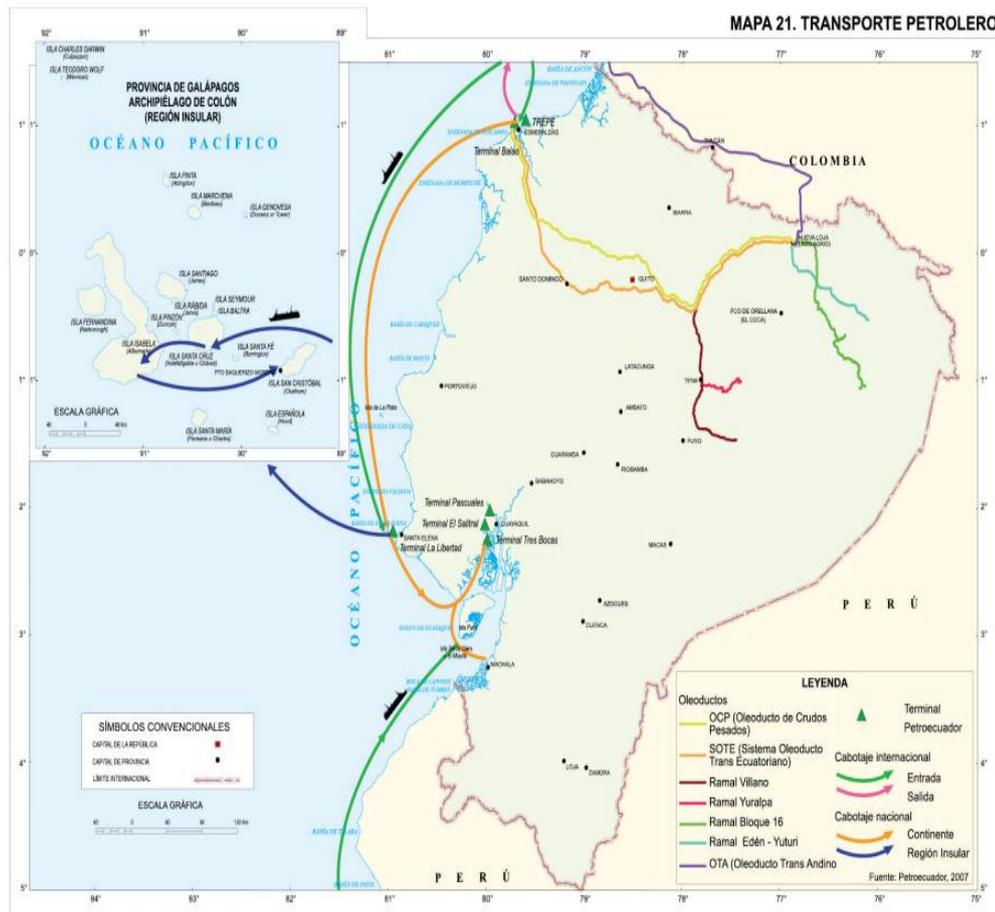


Figura N° 31: Sistemas de transporte de crudo en Ecuador.
Fuente: Geografía económica II.

Proceso de operación del oleoducto de Repsol

La empresa REPSOL dispone en el Bloque 16 de dos Facilidades de Producción, una de las cuales es la Estación SPF (Facilidades de Producción del Sur) ubicada en la zona sur, en dicha estación ingresa la producción de los campos Ginta, Iro, Daimi y Amo; y la Estación NPF (Facilidades de Producción del Norte) ubicada en la zona norte, cuya producción proviene de los campos Capirón, Bogi y Tivacuno.

También dispone para sus operaciones de transporte de crudo de un oleoducto de 16 pulgadas de diámetro, inicia en la Estación SPF pasando por la Estación NPF, de donde sale hacia una estación de bombeo ubicada en Pompeya, luego a la Estación Shushufindi donde el crudo es calentado y bombeado hacia una pequeña

estación de derivación en Lago Agrio en el sitio denominado Pozo 27, para luego de 10 kilómetros aproximadamente tener el punto de entrega en OCP.

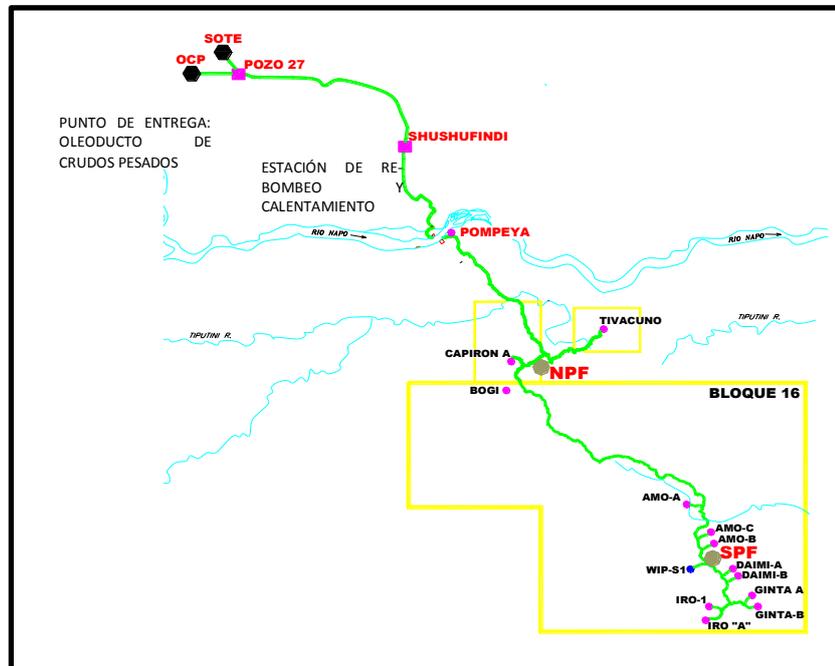


Figura N° 32: Proceso de operación Repsol.
Fuente: Gasdynca.

Estación SPF

La estación SPF almacena el crudo extraído de los campos Sur del Bloque 16 en dos tanques de 25000 barriles cada uno, estos tanques poseen un sistema de calentamiento con aceite térmico que mantiene el crudo a la temperatura adecuada para que no se eleve la viscosidad y se dificulte su transporte.

Posterior al almacenamiento, las bombas booster (5 en total) reciben el crudo desde los tanques a una presión aproximada de 15 psi (si la presión es menor es posible de que haya ocurrido taponamiento en filtros o los niveles del tanque son mínimos). Estas bombas aumentan la presión del crudo a 130 psi antes de ingresar a las bombas principales de transferencia (5 en total), que elevan la presión hasta 1350 psi y se envía el producto a través de la tubería con diámetro 16" y una longitud de 66803 Km hasta la estación NPF.

Estación NPF

El crudo procesado en los campos correspondientes a las facilidades norte es almacenado en dos tanques con capacidad de 15000 barriles cada uno, dichos tanques poseen un sistema de calentamiento con aceite térmico. Una operación adicional que se realiza en la estación es la extracción de diésel del crudo proveniente de los pozos productores. Las bombas booster reciben el crudo de los tanques de almacenamiento y envían el producto a las succiones de las bombas principales de transferencia en donde se mezclan con el crudo transportado desde SPF. Actualmente en NPF requiere recirculación de producto debido a la baja producción de crudo.

Estación Pompeya

Dependiendo del caudal, el crudo que proviene del campo de facilidades norte ingresa con una presión aproximada de 760 psi al calentador indirecto que posee la estación y resiste estas presiones.

Si el caudal es menor a 60000 BOPD es necesario calentar hasta 135°F para posteriormente ser enviado a la succión de las bombas principales de transferencia. Si el caudal que ingresa a la estación es mayor a 60000 BOPD, es enviado directamente a la succión de las bombas sin necesidad de calentarlo. Actualmente Pompeya requiere recirculación de producto debido a la baja producción de crudo.

Estación Shushufindi

El crudo llega a la Estación Shushufindi a una presión aproximada de 140 psi, con la cual ingresa en el calentador de fuego indirecto con capacidad de 15 MBtu/hr (E-1614-A), hasta llegar a una temperatura de 200 °F.

Existe un mecanismo de control diferencial de presión entre la succión y la descarga de las bombas principales de transferencia que permite recircular el crudo impulsado por las bombas de transferencia a la succión de las mismas.

Además, el diésel almacenado en las instalaciones se utiliza como refrigerante de sellos mecánicos de las bombas y como combustible de los turbogeneradores. Es posible también enviar diésel desde Shushufindi hasta NPF.

Entrega en Lago Agrio

En la ciudad de Lago Agrio existe un punto de entrega llamado OCP, el crudo se entrega con una presión de 30 psi y con una temperatura de 107,1 °F., el caudal de crudo es contado por los medidores electrónicos para posteriormente pasar a custodia de EP PETROECUADOR.

Propiedades del fluido

En los anexos 1 y 2, se muestran las propiedades de los crudos de las estaciones involucradas. Estos crudos serán mezclados para realizar las simulaciones respectivas.

Estación SPF

Las condiciones del fluido en la estación SPF se muestran a continuación en la tabla 3.

Tabla N° 3: Propiedades del crudo estación SPF

Estación SPF	
API a 60°F	15,3
Viscosidad a 50 °C (CsT)	766,3
Viscosidad a 80 °C (CsT)	136,4
Viscosidad a 100 °C (CsT)	101,2
Densidad Relativa (SG) a 60/60 °F	0,9642

Fuente: Gasdynca.

Estación NPF

Las condiciones del fluido en la estación NPF se muestran a continuación en la tabla 4.

Tabla N° 4: Propiedades del crudo estación NPF

Estación NPF	
API a 60°F	18,4
Viscosidad a 50 °C (CsT)	321,8
Viscosidad a 80 °C (CsT)	70,73
Viscosidad a 100 °C (CsT)	39,98
Densidad Relativa (SG) a 60/60 °F	0,9440

Fuente: Gasdynca.

Oleoducto

En las estaciones de SPF Y NPF se recibe el crudo de varios puntos, además en la estación NPF se realizan operaciones que implican el cambio en las propiedades del fluido a transportar. Un análisis de laboratorio permite verificar las propiedades del producto a la salida de la estación NPF como se indica en el anexo 3, el mismo que será transportado por el oleoducto hasta llegar a OCP.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

Enfoque de la Modalidad

Esta investigación tiene un enfoque cuantitativo porque se tomará información numérica recopilada de las variables, que se manejan en el proceso de transporte de crudo por el Oleoducto de Repsol, ubicado en el Bloque 16 Provincia de Orellana, como son Presión, Temperatura y Caudal. Los datos fueron recopilados en campo y a tiempo real en las estaciones de bombeo.

Es un proceso de investigación cualitativa porque realiza una revisión de la literatura para tener una idea del problema que se presenta por los bajos caudales actuales y futuros, realizando una exploración y obtener un diseño para la solución más acertada.

Modalidad y Tipos de Investigación

De Campo

La información ha sido recopilada en el sitio de la investigación, esta información ha sido recibida y ordenada por el autor de este proyecto de graduación.

Bibliográfica-Documental

La bibliografía para este proyecto de titulación se ha tomado de documentos científicos como artículos, libros, tesis académicas y toda la documentación recolectada en campo.

Exploratoria

El problema fue detectado por la dificultad del transporte de crudo por los bajos caudales actuales, altos costos de mantenimiento que produce el transporte de crudo por el Oleoducto de Repsol, ubicado en el Bloque 16 Provincia de Orellana y procesos inadecuados ya que el sistema se encuentra sobredimensionado para el caudal de trabajo actual.

Descriptivo

Se concluyó que el transporte de crudo por el oleoducto no es eficiente, dificulta el transporte de crudo, ya que las bombas principales de transferencia trabajan fuera del punto óptimo de rendimiento y representa altos costos de mantenimiento.

Población

Según (GALINDO, 2006): “Una población es una colección completa de personas, animales, plantas o cosas de las cuales se desean recolectar datos.”

Muestra: Es un grupo de unidades seleccionadas de un grupo mayor (la población), para el cálculo de la muestra para este proyecto de titulación se utilizó el método de error prefijado y se utilizó la siguiente ecuación debido a que se conoce exactamente el número de elementos de la población. (FeedBack Networks):

$$n = \frac{k^2 * p * q * N}{e^2 * N - 1 + k^2 * p * q} \quad (46)$$

Dónde:

k: es constante que depende del nivel de confianza.

El nivel de confianza se determina por $1-\alpha$, en este caso se toma el 85% ya que la media del caudal esta entre 905.45 y 906.05 con la confianza indicada, en cifra decimal es 0,85. Se obtiene un valor de 0.425 con el que se ingresa a la tabla de distribución de probabilidad normal estándar (ver anexo 4) determinando el nivel de confianza en 1.44, dato con el cuál se calcula el número de elementos de la muestra.

Tabla N° 5: Valores de k

k	1.15	1.28	1.44	1.65	1.96	2	2.58
Nivel de confianza	75	80	85	90	95	95.5	100

Fuente: feedbacknetworks.

e: error muestral deseado, entre este intervalo podrá estar el número de muestras.

N: es el número de elementos en la población.

n: es el número de elementos en la muestra

p: proporción de individuos que poseen en la población la característica de estudio.

q: es la proporción de individuos que no poseen esa característica.

Generalmente estos dos últimos datos son desconocidos y se suele suponer que $p=q=0.5$ que es la opción más segura.

Para este caso se requiere determinar cuál es el tamaño de la muestra teniendo en cuenta los siguientes datos.

$k = 1.44$ depende del nivel de confianza, para este caso se aplica una confianza del 85%.

$e = 5\%$ debido al número de datos.

$N = 120$ es el número de elementos que se dispone como población.

$p = q = 0.5$ ya que es la opción más segura.

$$n = \frac{1.44^2 * 0.5 * 0.5 * 120}{0.05^2 * 120 - 1 + 1.44^2 * 0.5 * 0.5}$$

$$n = 91.24$$

El número de elementos de la muestra es 91.

Operacionalización de Variables

Operacionalización de la Variable Independiente

Tabla N° 6: Proceso de transportación de crudo desde la estación NPF hasta la estación OCP.

CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIÓN	INDICADOR	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	INSTRUMENTO
<p style="text-align: center;">Sistema de bombeo</p> <p>Conjunto de elementos que sirven para elevar la presión de un fluido y vencer la resistencia que opone un circuito para la circulación</p>	Bomba	Impulsor	[m]	Determinar el diámetro del impulsor necesario para cada bomba.	Registros de la información del constructor
	Características del producto	Viscosidad cinemática	[m ² /s]	Resultado de la prueba de laboratorio según la ASTM D445, mediante la utilización de viscosímetros.	Hoja de datos
	Características del proceso	Caudal Presión Temperatura	[m ³ /s] [Pa] [°C]	Resultado de las mediciones que se realiza con la instrumentación análoga y digital en campo.	Observación y análisis de la información

Fuente: Investigación directa.
Elaborado por: El Investigador.

Operacionalización de la Variable Dependiente

Tabla N° 7: Operacionalización de la variable dependiente

CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIÓN	INDICADOR	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	INSTRUMENTO
Transportación de crudo Es un medio que sirve para la conducción de petróleo a través de tuberías entre estaciones	Eficiencia del proceso	Consumo de energía	[KW]	Este parámetro se va a obtener mediante el cálculo por fórmula con la utilización de las variables independientes	Hojas de datos
	Eficiencia de la bomba	Rendimiento de la máquina	%	Este parámetro se va a obtener mediante el cálculo por fórmula con la utilización de las variables independientes	Hojas de datos

Fuente: Investigación directa.
 Elaborado por: El Investigador.

Plan de Recolección de Información

Los datos que se obtuvieron para el análisis del transporte de crudo fueron tomados en los campos de operación de la empresa Repsol, la información tomada en tiempo real fue caudal, temperatura, rpm y presión, para la mejor comprensión de este proyecto de titulación se presentará la nomenclatura utilizada y sus unidades de medición.

Tabla N° 8: Variables

Variable	Unidad (Símbolo)
Temperatura	Grados Fahrenheit (°F)
Presión	Psi, Pa, Bar
Presión absoluta	Psia
Tiempo	día (D), hora (h), segundo (s)
Longitud	pies ('), pulgadas ("), metros (m), milímetros (mm)
Velocidad	Pies por segundo (pie/s), m/s, m/h
Potencia	Kilowatts (kW), horse power (HP)
Viscosidad	Centipoise (cP), centistokes (Cst)
Densidad	(lb/ pie ³), Kg/m ³
Gravedad específica	° API
Volumen	Barriles (Bbl), galones (G)
Tasa de Flujo	Galones por minutos (GPM), Barriles de crudo por día (BOPD)

Fuente: Investigación directa.
Elaborado por: El Investigador.

Los datos de los anexos 5,6, 7, 8 y 9 fueron tomados secuencialmente durante un periodo de 8 días con intervalos de cada dos días y fueron obtenidos desde un

centro de control y lecturas de campo, las lecturas se toman cada hora, durante todo el día.

Aplicación de instrumentos de recolección de datos

Para la recolección de la información utilizaremos los Registros Diarios de Operación que permite tener toda la información de una manera ordenada, el software que se utilizó para el manejo de datos en este proyecto de titulación es Microsoft Excel que permite realizar los cálculos respectivos.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y SITUACIÓN ACTUAL

Procesamiento y Análisis de la Información

La información fue entregada por la empresa Repsol a Gasdynca y se obtuvieron datos recolectados en campo, se mostrarán las variables de proceso, esta recolección de datos se realizó secuencialmente cada dos días, detallado en los anexos 5, 6, 7, 8 y 9.

Análisis

Para encontrar la relación que existe entre las variables, se ha realizado un análisis de correlación de los datos tomados en campo.

En el campo se han tomado los datos de los procesos y se ha realizado un análisis para determinar la correlación existente entre la variable independiente sistema de bombeo y la variable dependiente transporte de producto.

Para determinar la relación existente entre las variables se han considerado la muestra equivalente a 91 datos de la población considerada. Los datos que se requieren para el cálculo de la correlación son:

x = Variable independiente

$$x = \text{velocidad del impulsor} * \text{radio} = U \frac{Ft}{s}$$

y = Variable dependiente

y = caudal = Q[GPM]

Se ha considerado el diámetro de 10,25 pulgadas de un impulsor que está trabajando con las condiciones actuales, detallados en la tabla 9.

Tabla N° 9: Muestra tomada de la población

#	CAUDAL [GPM]	VELOCIDAD IMPULSOR [RPM]	U [FT/S]
1	895	3570	25,31
2	900,1	3570	25,31
3	905,2	3569	25,30
4	901,3	3569	25,30
5	896,3	3571	25,32
6	902,8	3570	25,31
7	900	3569	25,30
8	901,2	3570	25,31
9	901,5	3570	25,31
10	946	3568	29,80
11	900,3	3570	25,31
12	956,8	3571	25,32
13	888,6	3570	25,31
14	898,5	3570	25,31
15	897,2	3568	25,30
16	903,6	3569	25,30
17	902	3570	25,31
18	902,1	3570	25,31
19	889,3	3569	25,30
20	901	3570	25,31
21	901,5	3570	25,31
22	887,2	3569	25,30
23	902,5	3570	25,31
24	900	3570	25,31
25	895	3568	25,30

#	CAUDAL [GPM]	VELOCIDAD IMPULSOR [RPM]	U [FT/S]
26	900,1	3572	25,32
27	905,2	3570	25,31
28	901,3	3570	25,31
29	896,3	3569	25,30
30	902,8	3570	25,31
31	900	3571	25,32
32	901,2	3570	25,31
33	901,5	3568	25,30
34	906	3569	25,30
35	900,3	3569	25,30
36	956,8	3570	25,31
37	888,6	3568	25,30
38	898,5	3567	25,29
39	897,2	3570	25,31
40	903,6	3570	25,31
41	902	3569	25,30
42	902,1	3568	25,30
43	889,3	3569	25,30
44	901	3570	25,31
45	901,5	3569	25,30
46	887,2	3569	25,30
47	902,5	3568	25,30
48	924	3570	28,56
49	910	3570	25,31
50	915	3569	25,30
51	918,5	3571	28,56
52	920	3565	25,27
53	914	3565	25,27
54	946	3570	29,80
55	915,6	3565	25,27
56	918,6	3568	25,30
57	914,3	3569	25,30
58	905,6	3568	25,30
59	900,8	3569	25,30
60	917,3	3570	25,31
61	930	3570	28,46
62	914,8	3569	25,30
63	914	3569	25,30
64	916	3568	25,30
65	918	3569	25,30

#	CAUDAL [GPM]	VELOCIDAD IMPULSOR [RPM]	U [FT/S]
66	914	3567	25,29
67	914	3569	25,30
68	917	3570	25,31
69	908,6	3571	25,32
70	910,5	3571	25,32
71	905,3	3569	25,30
72	914	3570	25,31
73	946	3570	29,80
74	924	3570	29,50
75	916,3	3571	25,32
76	905,7	3569	25,30
77	914	3569	25,30
78	916	3570	25,31
79	907	3570	25,31
80	916	3569	25,30
81	915,6	3568	25,30
82	899	3568	25,30
83	915	3569	25,30
84	914	3571	25,32
85	905	3570	25,31
86	912,6	3568	25,30
87	920	3569	25,30
88	916	3573	25,33
89	908,6	3570	25,31
90	904	3571	25,32
91	925,6	3570	25,80

Fuente: toma de datos en campo Repsol.
Elaborado por: El Investigador.

En la tabla 9 se encuentran las variables dependiente que es el caudal y la independiente U, que es el resultado de la multiplicación de las revoluciones del impulsor por el radio del mismo, siendo la velocidad tangencial de la partícula a la salida del impulsor.

Con estos datos se realiza la tabla de los cálculos necesarios en el software Microsoft Excel, para determinar la correlación existente entre las variables.

Tabla N° 10: Variables para determinar la correlación

#	x U[ft/s]	y CAUDAL [GPM]	X ²	XY	(x-xprom) ²	(y-yprom) ²	(x-xprom)* (y-yprom)
1	25,31	895,00	640,59	22652,28	0,09	189,08	4,14
2	25,31	900,10	640,59	22781,36	0,09	74,83	2,60
3	25,30	905,20	640,23	22904,02	0,09	12,61	1,09
4	25,30	901,30	640,23	22805,34	0,09	55,51	2,29
5	25,32	896,30	640,95	22691,54	0,09	155,02	3,66
6	25,31	902,80	640,59	22849,70	0,09	35,41	1,79
7	25,30	900,00	640,23	22772,45	0,09	76,57	2,70
8	25,31	901,20	640,59	22809,20	0,09	57,01	2,27
9	25,31	901,50	640,59	22816,80	0,09	52,57	2,18
10	29,80	946,00	887,78	28186,67	17,51	1387,52	155,89
11	25,31	900,30	640,59	22786,42	0,09	71,41	2,54
12	25,32	956,80	640,95	24223,21	0,09	2308,75	-14,12
13	25,31	888,60	640,59	22490,30	0,09	406,04	6,06
14	25,31	898,50	640,59	22740,87	0,09	105,07	3,08
15	25,30	897,20	639,87	22695,24	0,10	133,42	3,64
16	25,30	903,60	640,23	22863,54	0,09	26,53	1,59
17	25,31	902,00	640,59	22829,45	0,09	45,57	2,03
18	25,31	902,10	640,59	22831,98	0,09	44,23	2,00
19	25,30	889,30	640,23	22501,71	0,09	378,32	5,99
20	25,31	901,00	640,59	22804,14	0,09	60,07	2,33
21	25,31	901,50	640,59	22816,80	0,09	52,57	2,18
22	25,30	887,20	640,23	22448,58	0,09	464,43	6,64
23	25,31	902,50	640,59	22842,11	0,09	39,07	1,88
24	25,31	900,00	640,59	22778,83	0,09	76,57	2,63
25	25,30	895,00	639,87	22639,59	0,10	189,08	4,33
26	25,32	900,10	641,30	22794,12	0,08	74,83	2,48
27	25,31	905,20	640,59	22910,44	0,09	12,61	1,07
28	25,31	901,30	640,59	22811,73	0,09	55,51	2,24
29	25,30	896,30	640,23	22678,83	0,09	155,02	3,83
30	25,31	902,80	640,59	22849,70	0,09	35,41	1,79

#	x U[ft/s]	y CAUDAL [GPM]	X ²	XY	(x- xprom) ²	(y- yprom) ²	(x-xprom)* (y-yprom)
31	25,32	900,00	640,95	22785,21	0,09	76,57	2,57
32	25,31	901,20	640,59	22809,20	0,09	57,01	2,27
33	25,30	901,50	639,87	22804,01	0,10	52,57	2,28
34	25,30	906,00	640,23	22924,27	0,09	7,57	0,85
35	25,30	900,30	640,23	22780,04	0,09	71,41	2,60
36	25,31	956,80	640,59	24216,43	0,09	2308,75	-14,46
37	25,30	888,60	639,87	22477,70	0,10	406,04	6,35
38	25,29	898,50	639,51	22721,76	0,10	105,07	3,30
39	25,31	897,20	640,59	22707,96	0,09	133,42	3,48
40	25,31	903,60	640,59	22869,95	0,09	26,53	1,55
41	25,30	902,00	640,23	22823,06	0,09	45,57	2,08
42	25,30	902,10	639,87	22819,19	0,10	44,23	2,10
43	25,30	889,30	640,23	22501,71	0,09	378,32	5,99
44	25,31	901,00	640,59	22804,14	0,09	60,07	2,33
45	25,30	901,50	640,23	22810,40	0,09	52,57	2,23
46	25,30	887,20	640,23	22448,58	0,09	464,43	6,64
47	25,30	902,50	639,87	22829,31	0,10	39,07	1,97
48	28,56	924,00	815,66	26389,27	8,70	232,55	44,97
49	25,31	910,00	640,59	23031,93	0,09	1,56	-0,38
50	25,30	915,00	640,23	23151,99	0,09	39,06	-1,92
51	28,56	918,50	815,50	26229,51	8,68	95,05	28,72
52	25,27	920,00	638,79	23252,42	0,11	126,55	-3,78
53	25,27	914,00	638,79	23100,77	0,11	27,56	-1,77
54	29,80	946,00	888,03	28190,62	17,55	1387,52	156,04
55	25,27	915,60	638,79	23141,21	0,11	46,91	-2,30
56	25,30	918,60	639,87	23236,57	0,10	97,01	-3,10
57	25,30	914,30	640,23	23134,28	0,09	30,80	-1,71
58	25,30	905,60	639,87	22907,73	0,10	9,93	0,99
59	25,30	900,80	640,23	22792,69	0,09	63,21	2,45
60	25,31	917,30	640,59	23216,69	0,09	73,09	-2,57
61	28,46	930,00	809,96	26467,63	8,12	451,54	60,54

#	x U[ft/s]	y CAUDAL [GPM]	X ²	XY	(x- xprom) ²	(y- yprom) ²	(x-xprom)* (y-yprom)
62	25,30	914,80	640,23	23146,93	0,09	36,60	-1,86
63	25,30	914,00	640,23	23126,69	0,09	27,56	-1,62
64	25,30	916,00	639,87	23170,80	0,10	52,55	-2,28
65	25,30	918,00	640,23	23227,90	0,09	85,55	-2,85
66	25,29	914,00	639,51	23113,73	0,10	27,56	-1,69
67	25,30	914,00	640,23	23126,69	0,09	27,56	-1,62
68	25,31	917,00	640,59	23209,10	0,09	68,05	-2,48
69	25,32	908,60	640,95	23002,94	0,09	0,02	0,04
70	25,32	910,50	640,95	23051,04	0,09	3,06	-0,51
71	25,30	905,30	640,23	22906,56	0,09	11,91	1,06
72	25,31	914,00	640,59	23133,17	0,09	27,56	-1,58
73	29,80	946,00	888,03	28190,62	17,55	1387,52	156,04
74	29,50	924,00	870,24	27257,83	15,13	232,55	59,31
75	25,32	916,30	640,95	23197,88	0,09	56,99	-2,22
76	25,30	905,70	640,23	22916,68	0,09	9,31	0,94
77	25,30	914,00	640,23	23126,69	0,09	27,56	-1,62
78	25,31	916,00	640,59	23183,79	0,09	52,55	-2,18
79	25,31	907,00	640,59	22956,00	0,09	3,06	0,53
80	25,30	916,00	640,23	23177,29	0,09	52,55	-2,23
81	25,30	915,60	639,87	23160,68	0,10	46,91	-2,16
82	25,30	899,00	639,87	22740,77	0,10	95,07	3,07
83	25,30	915,00	640,23	23151,99	0,09	39,06	-1,92
84	25,32	914,00	640,95	23139,65	0,09	27,56	-1,54
85	25,31	905,00	640,59	22905,38	0,09	14,07	1,13
86	25,30	912,60	639,87	23084,79	0,10	14,82	-1,21
87	25,30	920,00	640,23	23278,51	0,09	126,55	-3,46
88	25,33	916,00	641,66	23203,27	0,08	52,55	-2,03
89	25,31	908,60	640,59	22996,50	0,09	0,02	0,05
90	25,32	904,00	640,95	22886,48	0,09	22,57	1,40
91	25,80	925,60	665,63	23880,31	0,04	283,90	3,19
Σ	2330,57	82696,30	59788,71	2118633,83	101,04	16755,33	722,84

Fuente: Investigación directa
Elaborado por: El Investigador

En la tabla 10 se encuentra el cálculo de los datos velocidad tangencial de la partícula U que es la variable independiente x, el caudal que es la variable dependiente y los datos calculados por medio de las dos variables para encontrar la correlación entre las variables.

Se procede a calcular el valor de la correlación r:

$$r = \frac{(x-x_{prom})(y-y_{prom})}{(x-x_{prom})^2 * (y-y_{prom})^2} \quad (47)$$

$$r = \frac{722,84}{101,04 * 16755,33}$$

$$r = \frac{722,84}{1301.11}$$

$$r=0,555547169$$

Dando como resultado $r = 0,555547169$ que es una correlación positiva de las variables independiente y dependiente. Este resultado se comprueba mediante el empleo del software “Minitab 17” como se observa en la figura 33.

CORRELATION: U (ft/s).Q(GPM)
Pearson correlation of U (ft/S) and Q(GPM) = 0.556
P-value = 0,000

Figura N° 33: Resultado de correlación software Minitab 17.
Fuente: Minitab 17.

Análisis de la situación actual

Condiciones Actuales

Las instalaciones existentes en las estaciones del oleoducto de Repsol fueron diseñadas para caudales de 70000 BOPD aproximadamente, la baja producción de

crudo en SPF y NPF 30000 BOPD provoca un sobredimensionamiento de los equipos, con la producción actual estas instalaciones dejan de ser óptimas, teniendo problemas en los procesos y transportación de producto ya que las bombas de transferencia principales trabajan alejadas del punto óptimo de rendimiento.

Actualmente en las estaciones se han optado métodos para trabajar con los equipos en condiciones de sobredimensionamiento, esta medida ha sido trabajar con un by-pass desde la descarga de las bombas hacia la succión mediante la abertura de una válvula, este proceso hace que recircule cierta cantidad de producto estimado, necesario para cumplir con el proceso y descargar únicamente los 30000 barriles de producción.

Para comprender el proceso es necesario realizar simulaciones con los parámetros actuales de operación, con el fin de validar la información ingresada al software de los datos obtenidos de campo en las estaciones de bombeo del oleoducto. Para el análisis de los datos se utilizará el programa de simulación de transporte de fluidos PIPEPHASE 9.8.

Simulación con condiciones actuales

Validación del esquema de simulación actual

Para la validación del proceso actual de transporte de crudo desde la estación NPF hasta OCP, se utilizaron como datos de entrada los valores operacionales actuales establecidos en la tabla 11, los cuales son: caudal, presión y temperatura de entrada y salida de las estaciones, además se toman como referencia los valores de condiciones del fluido a transportar del anexo 1, anexo 2 y anexo 3.

Tabla N° 11: Condiciones actuales de operación

	CAUDAL (BOPD)	PRESIÓN (psi)		TEMPERATURA (°F)	
		P ent.	P sal.	T ent.	T sal.
NPF	30902	-	1159	-	200
PPY	30902	710	830	128,34	128,34
SSF	30902	84	1157	108	167
OCP	30902	40	-	84,4	-

Fuente: Gasdynca.

Ingresando las variables requeridas en cada punto, se ejecuta el programa para comprobar si los resultados de las corridas no arrojan errores, de ser el caso se deben corregir. De la simulación realizada se tienen los resultados que se muestran a continuación en la figura 34.

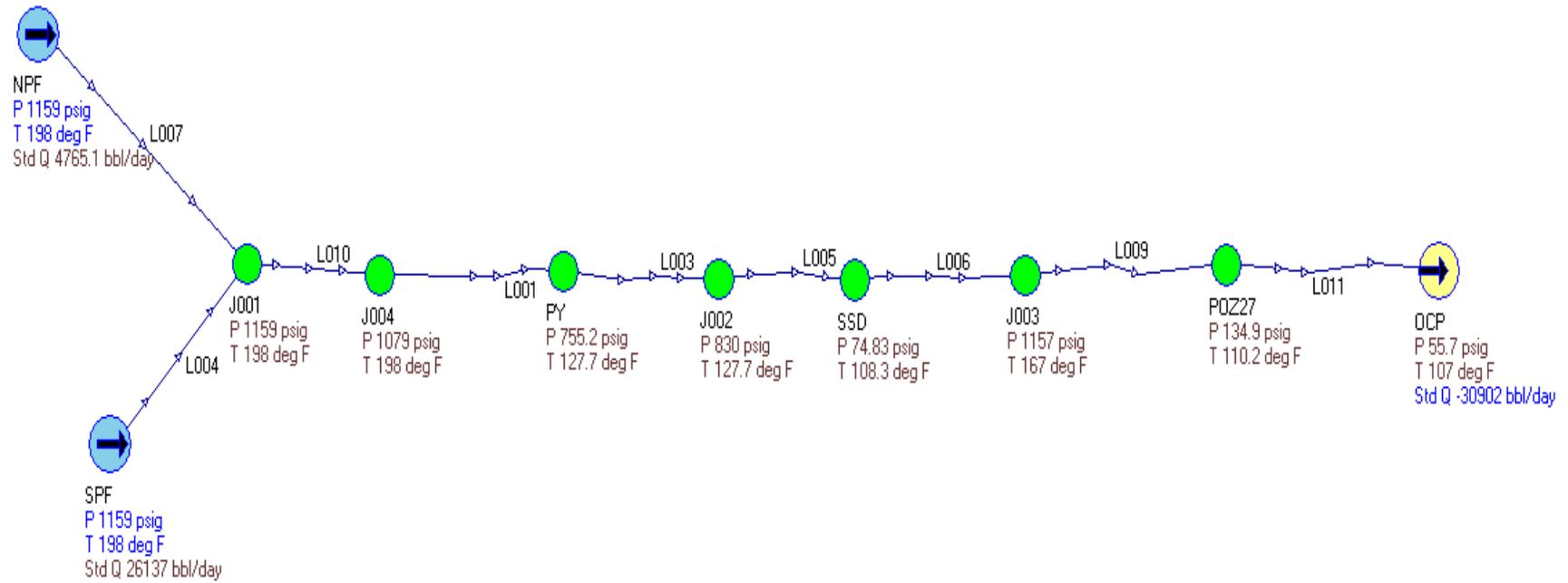


Figura N° 34: Resultados de simulación con condiciones actuales.

Fuente: Investigación directa.

Elaborado por: El Investigador.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las variables que intervienen en el transporte del fluido de acuerdo a la simulación realizada.

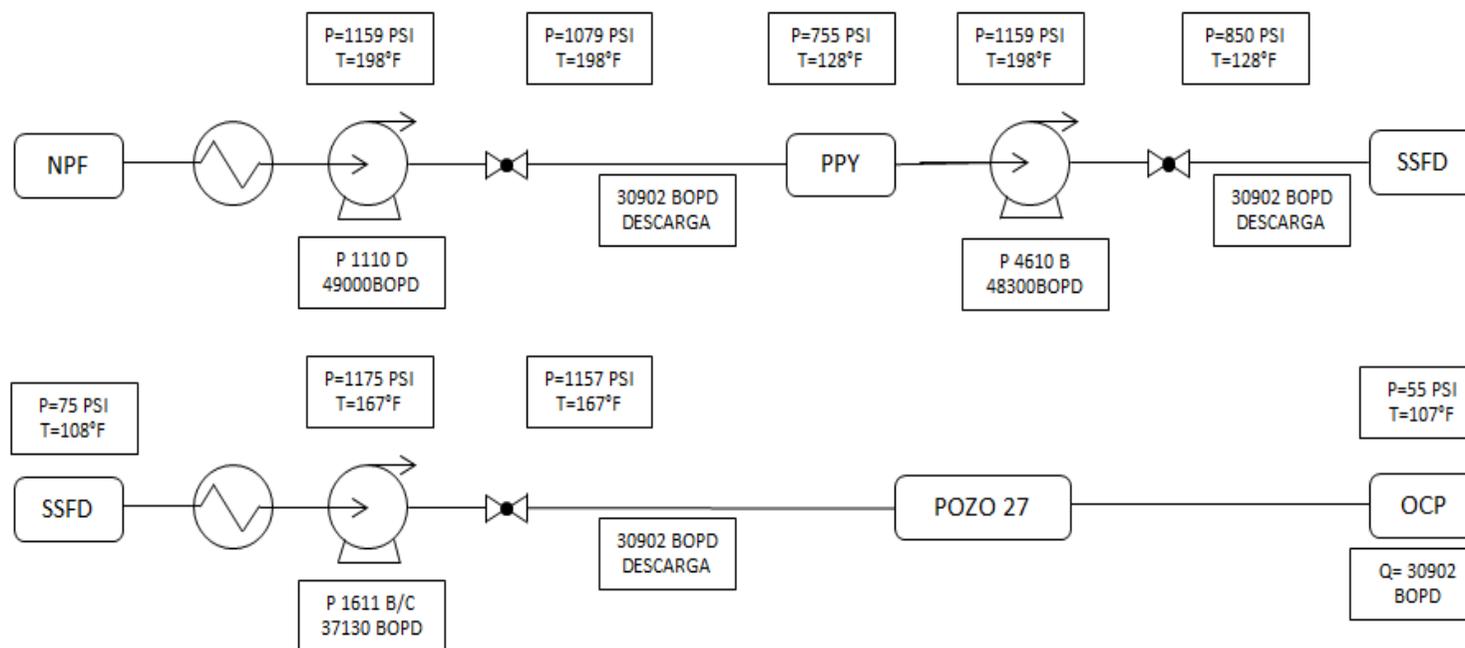


Figura N° 35: Diagrama del proceso actual y condiciones operacionales del sistema de transporte de Repsol.
 Fuente: Investigación directa.
 Elaborado por: El Investigador.

Tabla N° 12: Resultados de simulación (variables calculadas) para un caudal de 30.902 BOPD

	VARIABLES FIJADAS			VARIABLES CALCULADAS		DATO REFERENCIAL Tabla 17		VARIACIÓN Calculado- Referencial	
	P (psi)	T (°F)	Q (BOPD)	P (psi)	T (°F)	P (psi)	T (°F)	ΔP (psi)	ΔT (°F)
NPF	1159	198	-	-	-	1159	198	-	-
PPY	-	-	-	755,2	127,7	710	128,34	45,2	0,94
SSFD	-	-	-	74,83	108,3	84	108	9,17	0,3
OCP	-	-	30.902	55,7	107	40	84,4	15,7	22,6

Fuente: PIPEPHASE 9.8.

Los resultados de la simulación demuestran que los valores obtenidos luego de la corrida, poseen una diferencia aceptable entre el modelo matemático (simulador) con los datos reales obtenidos de la información proporcionada por Gasdynca.

Una vez determinado la similitud del esquema planteado en el simulador con los datos reales, se considera acorde proceder con la utilización del modelo para evaluar la alternativa, en busca de dar solución a la situación planteada con el transporte de crudo de bajos caudales actuales y futuros.

Simulaciones del comportamiento de eficiencia del sistema de transporte de Repsol

Las curvas del sistema para el caudal 30902 BOPD tienen una eficiencia del 80% y una cabeza de 2700 ft, en el futuro para un caudal de 20000 BOPD, que es la proyección de producción, la eficiencia es de 69% con una cabeza de 3000 ft y las bombas de transferencia principales trabajan fuera del punto óptimo de rendimiento, como se ve en la figura 36 con el fin de compensar el bajo caudal producido se realizan operaciones de recirculación innecesarias para que los equipos trabajen en condiciones cercanas al punto óptimo de rendimiento, lo que

ocasiona un gasto energético y de mantenimiento innecesario. Por tanto se requiere encontrar la solución más adecuada y que se ajuste a los nuevos caudales de operación.

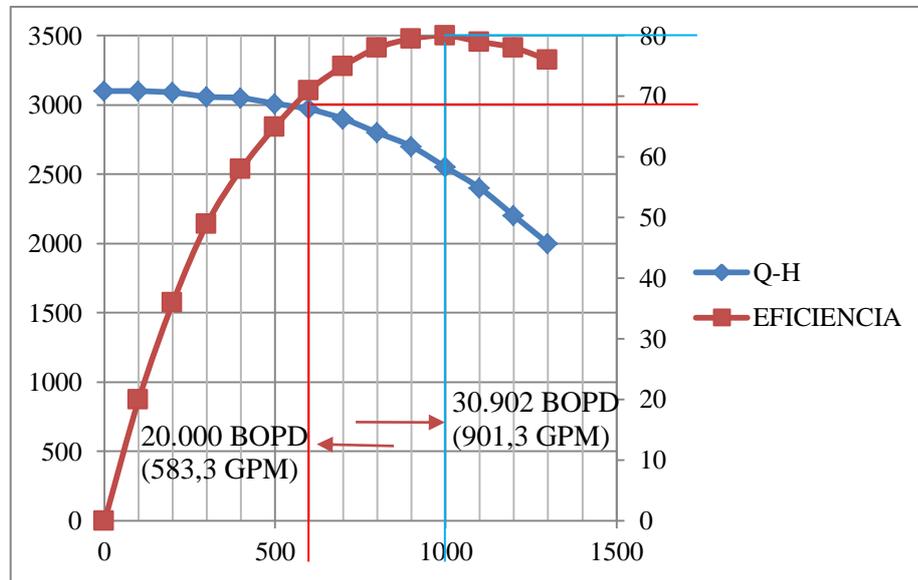


Figura N° 36: Curva Q vs H del sistema.
 Fuente: Investigación directa.
 Elaborado por: El Investigador.

Aplicación de la teoría de la semejanza

Con la teoría de la semejanza es posible determinar el diámetro del impulsor necesario que se ajuste a las condiciones de operación del sistema.

Tomando en cuenta que el caudal actual es de 30000 BOPD y haciendo una proyección para caudales futuros de 25000 BOPD se procede a calcular los diámetros necesarios para las estaciones:

Estación NPF

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D_1}{D_2}$$

$$D_2 = \frac{D_1 * Q_2}{Q_1} = \frac{11.50" * 25000BOPD}{30000BOPD} = 9.583 \approx 9.75"$$

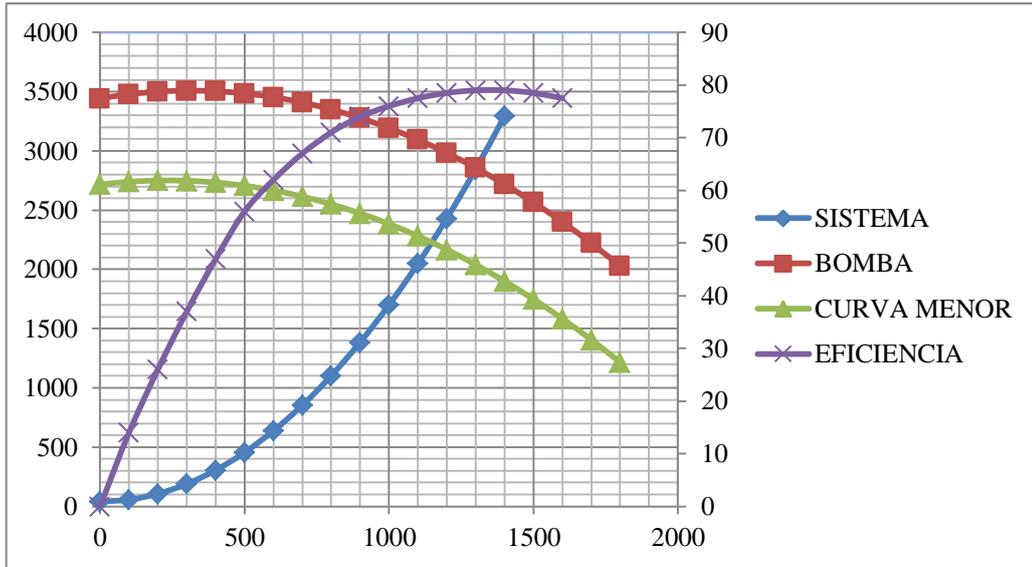


Figura N° 37: Curvas Q vs H estación NPF.

Fuente: Investigación directa.

Elaborado por: El Investigador.

Estación Pompeya

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D_1}{D_2}$$

$$D_2 = \frac{D_1 \cdot Q_2}{Q_1} = \frac{11.06'' \cdot 25000 \text{BOPD}}{30000 \text{BOPD}} = 9.21 \approx 9.65''$$

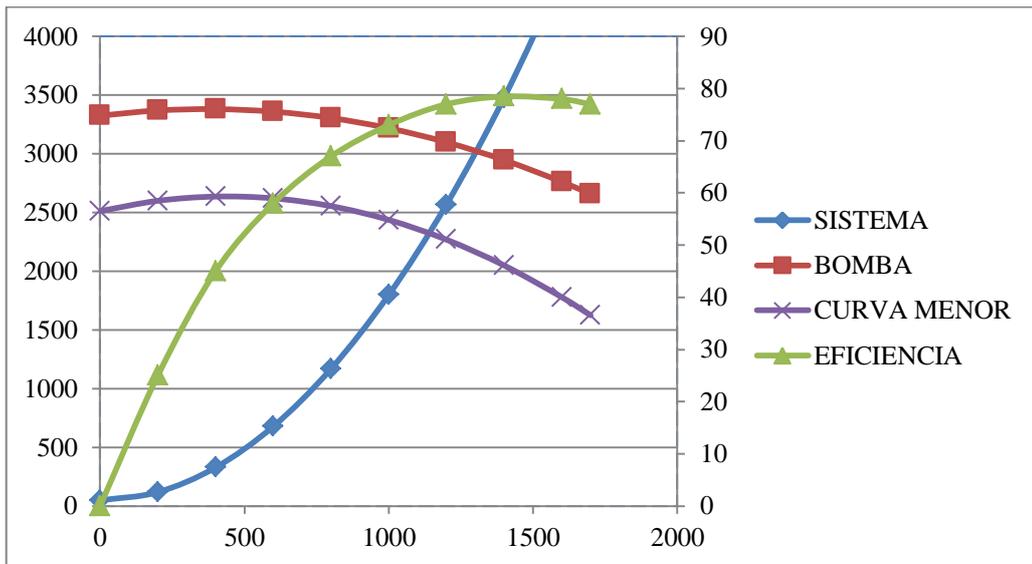


Figura N° 38: Curva Q vs H estación Pompeya.

Fuente: Investigación directa.

Elaborado por: El Investigador.

Estación Shushufindi

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D_1}{D_2}$$

$$D_2 = \frac{D_1 * Q_2}{Q_1} = \frac{11.50" * 25000 \text{ BOPD}}{30000 \text{ BOPD}} = 9.583 \approx 9.75"$$

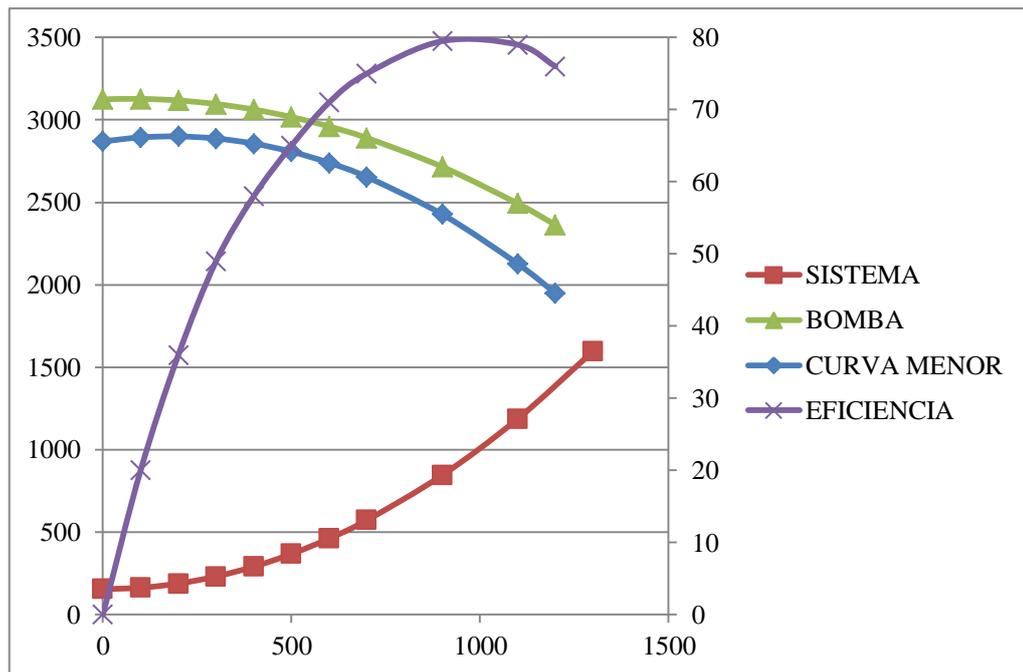


Figura N° 39: Curva Q vs H estación Shushufindi.

Fuente: Investigación directa.

Elaborado por: El Investigador.

Análisis del comportamiento de las bombas con la teoría de semejanza

Las bombas de las estaciones NPF, Pompeya y Shushufindi tienen una capacidad de 49000, 48300 y 38900 BOPD respectivamente y el rango de trabajo en el punto óptimo de rendimiento dado por el fabricante esta entre 38400 y 34970 BOPD. La producción pozos está en el parámetro de los 30000 BOPD (tendiendo a la baja) por lo que las bombas de transferencia principales trabajan fuera del punto óptimo de rendimiento. Este estudio encontrará a mejor solución para el transporte de crudo tomando en consideración las premisas emitidas por Repsol.

Para la solución del problema se ha considerado reducir el diámetro de los impulsores en las bombas principales de transferencia de las estaciones NPF, Pompeya, Shushufindi.

Se envió al fabricante de las bombas principales de transferencia marca SULZER las premisas, caudal: 25000 BOPD, presión de succión: 150 psi, presión de descarga 1200 psi, viscosidad 101.2 Cst, gravedad específica: 0.9542 a una temperatura de operación de 200 °F, para mejorar los procesos y el funcionamiento de los equipos de bombeo. El fabricante realiza las simulaciones necesarias en campo y envía los resultados de las curvas descritas en los anexos 8, 9, 10.

Los cálculos realizados mediante la aplicación de la teoría de la semejanza en las estaciones de NPF, Pompeya y Shushufindi coinciden con los parámetros enviados por el fabricante. Por esta razón, de los gráficos, se obtienen los datos que se describen a continuación.

Como se observa en el anexo 10, Al disminuir el diámetro de los impulsores en las bombas de NPF de 11.50" a 9,75" estas trabajarán con caudales de 25000 hasta 21600 BOPD dentro del punto óptimo de rendimiento, la potencia requerida por la bomba disminuye considerablemente de 1000 a 620 BHP, el NPSH_r disminuye de 18 a 15 Ft. De esta manera se consigue bombear con un solo equipo los bajos caudales actuales y futuros, ahorrando energía trabajando eficientemente disminuyendo los costos de mantenimiento y sin realizar la operación de recirculación en la estación.

De acuerdo al anexo 11, en el caso de la estación de bombeo Pompeya se reduce el diámetro de los impulsores de los estados 1, 3, 6 y 7 es de 11,06" y los estados 2, 4 y 5 es 10,23"; a un diámetro inferior de 9,65" y trabajará entre 25370 y 21260 BOPD dentro del punto óptimo de rendimiento, la potencia requerida por la bomba disminuye considerablemente de 1100 a 700 BHP, el NPSH_r disminuye de 20 a 15 Ft. De esta manera se consigue bombear con un solo equipo los bajos

caudales actuales y futuros, ahorrando energía trabajando eficientemente disminuyendo los costos de mantenimiento y sin realizar la operación de recirculación en la estación.

Finalmente en el anexo 12 las bombas de la estación Shushufindi tienen impulsores con un diámetro 10,25”, de acuerdo al cálculo de las leyes de afinidad para este caso el diámetro debe ser 8.75” y trabajará entre 25000 y 20570 BOPD dentro del punto óptimo de rendimiento, la potencia requerida por la bomba disminuye considerablemente de 800 a 600 BHP, el NPSH_r disminuye de 28 a 15 Ft. De esta manera se consigue bombear con un solo equipo los bajos caudales actuales y futuros, ahorrando energía trabajando eficientemente disminuyendo los costos de mantenimiento y sin realizar la operación de recirculación en la estación.

En todas las bombas principales de transferencia de las estaciones con los nuevos diámetros de impulsor calculados, obtendremos una cabeza de 2515 Ft, con una succión de 150 Psi, una descarga máxima de 1200 PSI, una viscosidad de 101,2 Cst y una gravedad específica de 0,9642, una temperatura de 200°F a las descargas de las bombas de cada una de las estaciones.

Simulación con diámetros modificados 25000 BOPD

En la siguiente tabla y esquema se puede observar el resumen de los parámetros de la operación entre estaciones con un caudal de 25000 BOPD:

Tabla N° 13: Resumen de parámetros

CAUDAL 25.000 BOPD										
°API 14.5 API										
NPF		POMPEYA				SHUSHUFINDI				OCP
Psa	1200	P. Ileg	784	P.	1200	P. Ileg	260.	P.	1200	P: 64.18
Tsa	200	T. Ileg	119.7	T.	200	T. Ileg	109.	T.	200	T: 106

Fuente: Investigación directa.
Elaborado por: El Investigador.

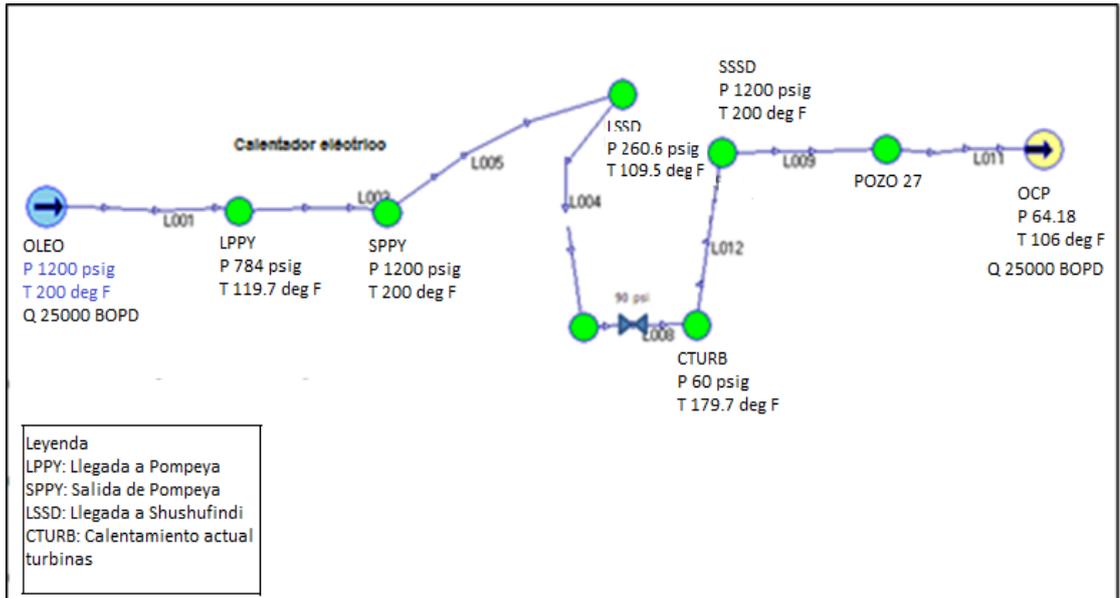


Figura N° 40: Simulación con caudales de 25000 BOPD.

Fuente: PIPEPHASE 9.8.

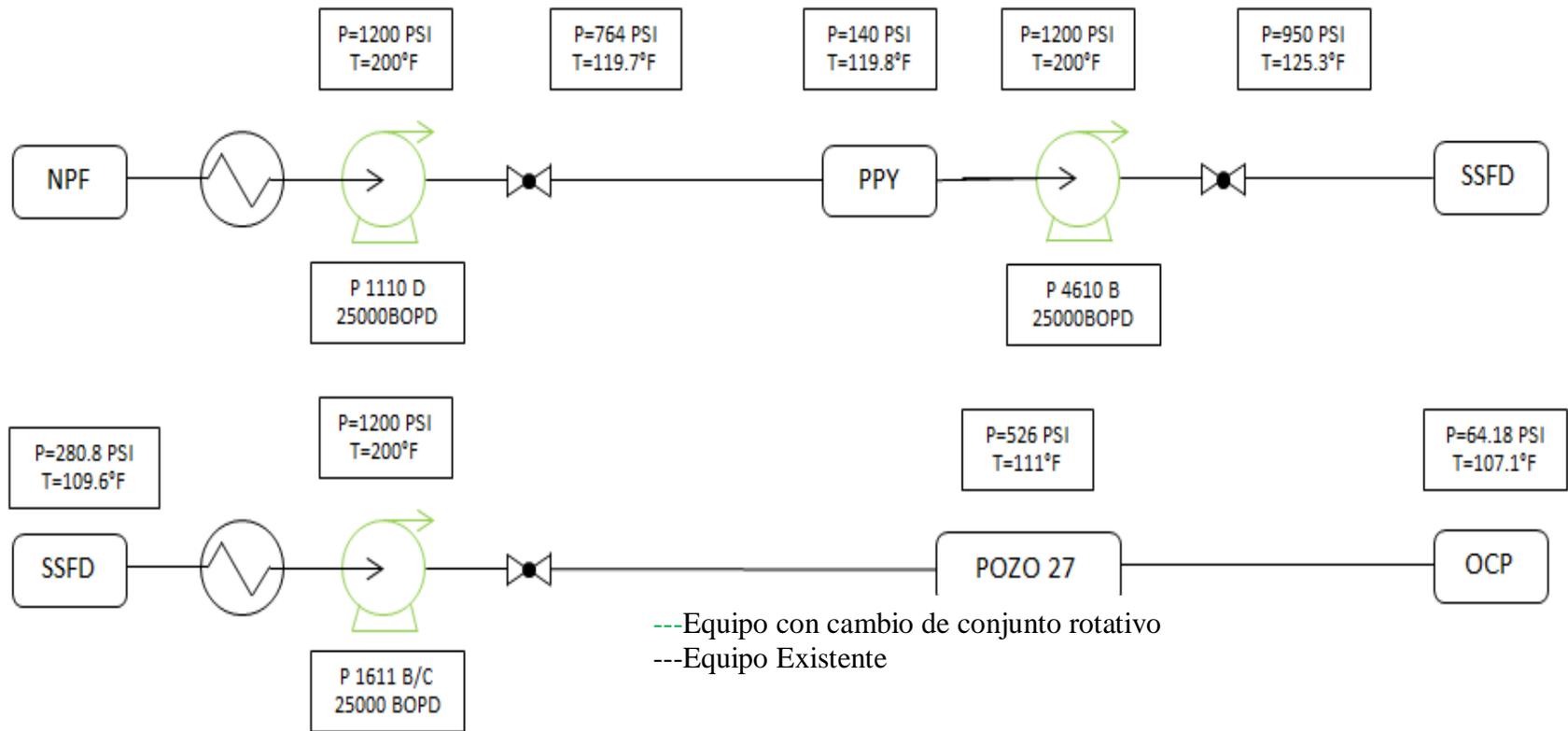


Figura N° 41: Esquema resumen de parámetros simulación de 25000 BOPD.

Fuente: Investigación directa.

Elaborado por: El Investigador.

Verificación de la Hipótesis

Como se observa en la figura 33, el caudal posee una correlación positiva con la velocidad del producto, que es igual a 0,556. La velocidad del producto es determinada por el radio del impulsor multiplicado por la velocidad de rotación del eje de la bomba.

Esta correlación indica el porcentaje que va a ser influenciada la variable dependiente por medio de la variable independiente, entonces se ha determinado los tipos de variables que interesa modificar.

Variable dependiente = Caudal GPM

La variable independiente es el radio del impulsor que multiplicada por la velocidad del eje principal da como resultado la velocidad del producto:

velocidad del producto = radio del impulsor * velocidad del impulsor

Entonces se deduce que la velocidad del producto es directamente proporcional al radio del impulsor.

Las bombas principales de transferencia están diseñadas para un caudal entre 49000 y 38900 BOPD, pero en la actualidad están funcionando con caudales de 30000 BOPD tendiendo a la baja, por este motivo trabajan fuera del punto óptimo de rendimiento. Mediante los cálculos realizados con las leyes de afinidad y las simulaciones, se determinaron los nuevos diámetros para que las bombas trabajen dentro del punto óptimo de rendimiento entre 25000 y 21000 BOPD. Entonces la reducción del diámetro de los impulsores mejora el trabajo de las bombas y los procesos son más eficientes en la transportación de los bajos caudales de crudo actuales y futuros por el Oleoducto de Repsol, ubicado en el Bloque 16 Provincia de Orellana.

Las bombas principales de transferencia se encuentran trabajando en el punto óptimo de rendimiento con las nuevas condiciones de caudal, presión, temperatura y viscosidad necesarias. La variable dependiente se ve afectada positivamente como se muestra en la figura 41, aun con un caudal de 25000 BOPD, ya que el producto llega a su punto de entrega en OCP sin dificultad, el análisis del sistema de bombeo con bajos caudales incide en el transporte de crudo en el oleoducto de Repsol, ubicado en el bloque 16 Provincia de Orellana.

Conclusiones y Recomendaciones de la Investigación

Conclusiones

- Las bombas principales de transferencia inciden en los procesos de transporte de crudo. Con la mejora en los internos de las bombas y con los nuevos parámetros de operación se realizarán los procesos de una manera eficiente ahorrando energía y evitando problemas en el funcionamiento de los equipos.
- Con la reducción de caudal la bomba trabaja fuera el punto óptimo de rendimiento, por lo que se requieren operaciones de recirculación. La operación con bajos caudales incrementa el deterioro de los sellos mecánicos, aros de desgaste y rodamientos provocados a su vez por desalineamientos del eje.
- La alternativa para resolver el problema de eficiencia en el funcionamiento de las bombas por el bajo caudal existente es el análisis de los internos de las bombas principales de transferencia, que mediante la aplicación de las leyes de la semejanza y el análisis de las curvas y métodos de ajuste de caudal se demuestra que es la alternativa más óptima y económica para la solución del transporte de crudo.
- Se ha presentado la simulación con los caudales actuales de operación y se validó el proceso, con estos resultados se realizaron las simulaciones de las alternativas para la solución del problema de transporte.

Recomendaciones

- Para la solución del problema de transporte de bajos caudales se recomienda el análisis de los internos de las bombas principales de transferencia, tomando en cuenta los parámetros emitidos por el fabricante y las premisas entregadas por Repsol.

- Se recomienda la revisión de las variables y procesos del sistema de bombeo por el oleoducto de Repsol, ya que esto permitirá una óptima operación asegurando las instalaciones y los equipos.
- Realizar periódicamente simulaciones de los procesos y sus variables para optimizar el funcionamiento de las bombas y los equipos.

CAPÍTULO V

PROPUESTA

Título

“REDISEÑO DE LOS IMPULSORES DE LAS BOMBAS PRINCIPALES DE TRANSFERENCIA Y SU INCIDENCIA EN EL TRANSPORTE DE CRUDO EN EL OLEODUCTO DE REPSOL, UBICADO EN EL BLOQUE 16 PROVINCIA DE ORELLANA”

Datos Informativos de la Empresa

Repsol es una multinacional energética y petroquímica española, con sede social en Madrid, que fue fundada en octubre de 1987, esta empresa se encuentra realizando la extracción de crudo en el bloque 16 ubicada en el Parque Nacional Yasuní en Ecuador.

Ubicación

La ubicación de los campos de producción y las estaciones de bombeo de Repsol se encuentran en Bloque 16, Parque Nacional Yasuní, Provincia de Orellana.

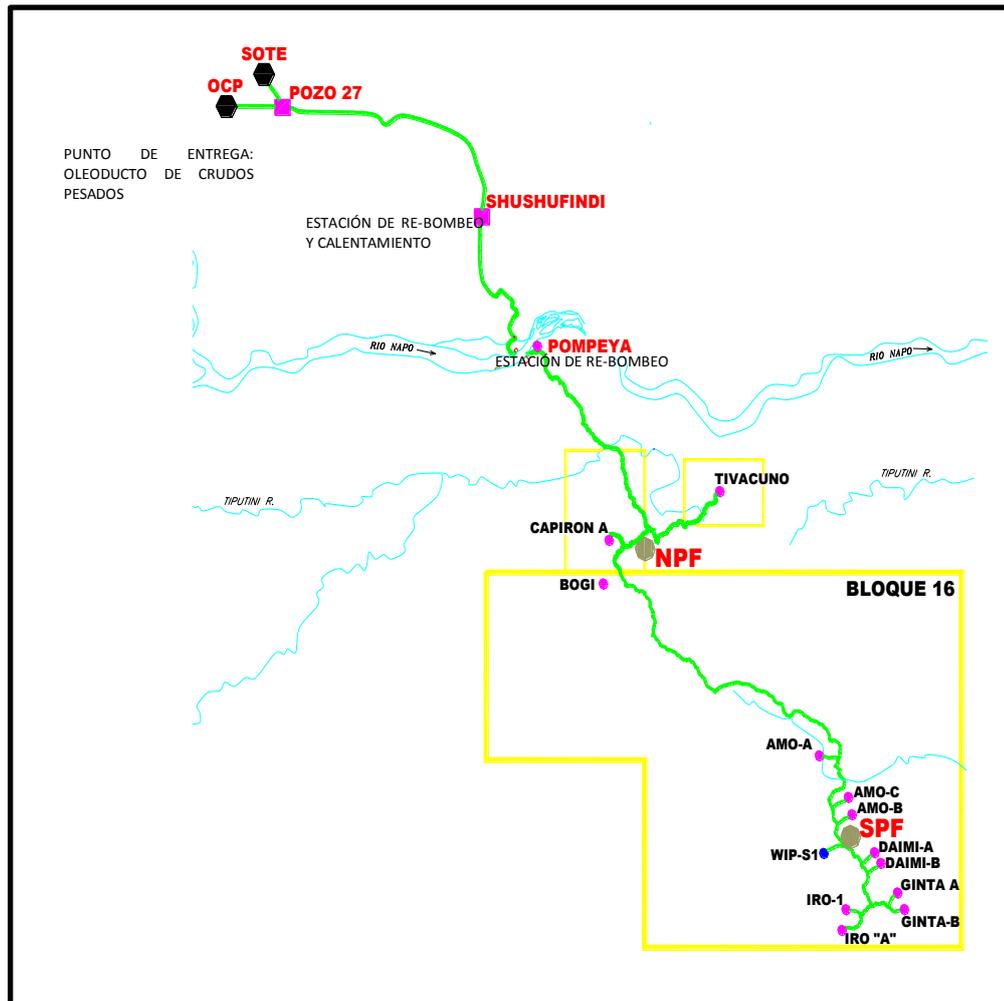


Figura N° 42: Bloque 16 Provincia de Orellana.
Fuente: Gasdynca.

Antecedentes de la propuesta

El problema planteado en este proyecto se enfoca en el trabajo ineficiente de las bombas principales de transferencia como el de transporte de crudo, por los bajos caudales actuales y futuros debido a la disminución de la producción de los campos de las Facilidades Norte y Sur, este caudal ha disminuido en un 40% aproximadamente por lo que se presenta un sobredimensionamiento en los equipos que fueron construidos para un caudal de 70000 BOPD.

En las estaciones se realizan operaciones de recirculación para compensar la falta de producto y las bombas trabajen cercanas al punto óptimo de rendimiento.

El problema de transporte de la empresa Repsol se produce por una baja presión de descarga a la salida de las estaciones y una baja velocidad de producto por la tubería causando sedimentación a lo largo del oleoducto.

Objetivos

Objetivo General

Rediseñar el diámetro de los internos de las bombas principales de transferencia para mejorar los procesos y el transporte de crudo con los bajos caudales actuales y futuros en el oleoducto de Repsol.

Objetivos Específicos

- Determinar los parámetros de diseño de los impulsores para que los grupos de bombeo trabajen el punto óptimo de rendimiento.
- Analizar las operaciones y procesos de transporte de crudo por el oleoducto para mejorar el transporte de crudo.
- Realizar el diseño de los impulsores por medio de las leyes de afinidad.
- Simular el proceso de transporte con varios caudales.
- Realizar un análisis de costo beneficio de la propuesta planteada.

Justificación de la Propuesta

Este proyecto es una oportunidad para que El investigador ponga en práctica sus conocimientos adquiridos en la carrera de Ingeniería Industrial.

Este proyecto de investigación es muy **importante** para la empresa ya que solucionará el problema que se genera en el transporte de crudo por la disminución de caudal, para el planteamiento de la solución se tomó en cuenta las condiciones de operación, funcionamiento de los equipos y encontrar la mejor solución al problema.

La **factibilidad** para resolver el problema de transporte es la reducción del diámetro de los impulsores y que las bombas trabajen en el punto óptimo de rendimiento con los bajos caudales actuales y futuros.

Esta propuesta presenta por parte de la empresa Repsol mucho **interés**, ya que al comparar con otras soluciones como reemplazo de bombas de menor caudal, cambio de tubería, instalación de variadores de velocidad y mezcla con químicos o producto más liviano se constata que es la solución más económica, eficiente y práctica, encontrando así la mejor solución para el problema de transporte de crudo.

Para el investigador este proyecto tiene una **utilidad teórica-práctica**, donde se aplicarán todos los conocimientos adquiridos en la carrera de Ingeniería Industrial. En este tipo de proyectos se requiere la apertura de las empresas, permitiendo que los investigadores apliquen sus capacidades en solucionar problemas reales de las industrias y que su preparación sirva para proponer soluciones inteligentes y viables a los problemas que se presenten.

Desarrollo de la Propuesta

Factibilidad

Análisis de Factibilidad Legal

Para el análisis y solución del problema de transporte de la empresa Repsol se ha tomado en cuenta leyes, normativas y reglamentos nacionales e internacionales que se elaboraron para regular las acciones que se realicen en el ámbito petrolero y garantizar el transporte de crudo en ductos.

- Según la Asamblea Nacional Constituyente de Ecuador (2008), en el Título VI; Capítulo Quinto sobre los sectores estratégicos, servicios y empresas; Artículo 313 de la Constitución de la República del Ecuador.

- El Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos (1978) menciona en el Capítulo III, Artículo 31 de la Ley de Hidrocarburos.

Estas normativas hacen referencia a la importancia que posee el sector hidrocarburífero en el desarrollo del país y el especial cuidado que se debe tener en los equipos que intervienen en estas operaciones.

Análisis de Factibilidad Técnica

Técnicamente la investigación es factible ya que se cuenta con los datos de las operaciones actuales, lo que permitirá formular las hipótesis necesarias, simular y obtener los resultados reales de operación actual y futura para plantear una solución. Es posible implementar una solución técnica adecuada, ya que la empresa dispone de la tecnología y talento humano para realizar los cambios, adecuaciones necesarias en las instalaciones y en sus procesos.

Análisis de Factibilidad Económica

La empresa Repsol dispone de los recursos económicos necesarios para la investigación, análisis y solución del problema de transporte, ya que envía alrededor de 30000 BOPD de crudo al OCP.

Análisis de Factibilidad Ambiental

Es importante tomar en cuenta que cuando los equipos trabajan fuera de la zona de eficiencia producen contaminación, y sus procesos un gasto excesivo de energía lo cual genera problemas ambientales al consumir más hidrocarburos.

Los resultados que se obtienen de esta investigación técnica mejoran los procesos y el trabajo de los equipos, por lo tanto el medio ambiente.

Metodología

Se realizó este proyecto utilizando metodologías hipotéticas-deductivas que sigue El investigador para hacer de su actividad una práctica científica, de esta forma realiza la observación del fenómeno a estudiar, crea una hipótesis para explicar el fenómeno, verifica y comprueba la verdad de los enunciados comparándolos con la experiencia.

Para la resolución del problema planteado del bombeo de crudo para bajos caudales se tomaron en cuenta variables como costos, conocimientos teóricos, prácticos y la experiencia del investigador para solucionar este caso en particular, se valida la hipótesis propuesta mediante los cálculos, el conocimiento de los procesos de operación y el software de simulación de transporte de fluidos PIPEPHASE 9.5, SIMSCI.

Cronograma de Actividades del Proyecto de Titulación

El cronograma de actividades se realizó en el software Microsoft Project, describiendo la ejecución de cada una de ellas, finalmente con el diagrama de Gantt se realiza el resumen de todo el proyecto.

Tabla N° 14: Cronograma de actividades

	NOMBRE DE TAREA	DURACIÓN	COMIENZO	FIN	PRED
2	PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	109 días	mié 01/06/16	lun 31/10/16	
3	ASIGNACIÓN DE TEMA DE INVESTIGACIÓN	0 días	mié 01/06/16	mié 01/06/16	
4	INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA	45 días	mié 01/06/16	mar 02/08/16	
5	FUENTES ESCRITAS	40 días	mié 01/06/16	mar 26/07/16	3
6	FUENTES DIGITALES	20 días	mié 01/06/16	mar 28/06/16	3
7	INFORMACIÓN ENTREGADA POR GASDYNCA	30 días	mié 01/06/16	mar 12/07/16	3
8	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	5 días	mié 27/07/16	mar 02/08/16	5,6,7

	NOMBRE DE TAREA	DURACIÓN	COMIENZO	FIN	PRED
9	DESARROLLO DEL MARCO TEÓRICO	30 días	mié 03/08/16	mar 13/09/16	
10	FUNDAMENTACIONES	5 días	mié 03/08/16	mar 09/08/16	8
11	CATEGORÍAS FUNDAMENTALES	10 días	mié 03/08/16	mar 16/08/16	8
12	HIPÓTESIS	3 días	mié 03/08/16	vie 05/08/16	8
13	SEÑALAMIENTO DE VARIABLES	5 días	mié 03/08/16	mar 09/08/16	8
14	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS TÉCNICOS	2 días	mié 03/08/16	jue 04/08/16	8
15	METODOLOGÍA	20 días	mié 17/08/16	mar 13/09/16	10,11,12,13,14
16	ESTUDIO DE CAMPO	25 días	mié 14/09/16	mar 18/10/16	
17	RECOLECCIÓN DE DATOS	20 días	mié 14/09/16	mar 11/10/16	15
18	ESTUDIO DE VARIABLES	5 días	mié 14/09/16	mar 20/09/16	15
19	ANÁLISIS DE PREMISAS Y VARIABLES CON TÉCNICOS DE CAMPO	10 días	mié 14/09/16	mar 27/09/16	15
20	ANÁLISIS ESTUDIOS DE CAMPO	5 días	mié 12/10/16	mar 18/10/16	17,18,19
21	DETERMINACIÓN DE ALTERNATIVAS	5 días	mié 19/10/16	mar 25/10/16	
22	ANÁLISIS DE ALTERNATIVA #1 CAMBIO DE INTERNOS	5 días	mié 19/10/16	mar 25/10/16	20
23	ANÁLISIS DE ALTERNATIVA #2 CAMBIO DE EQUIPOS	5 días	mié 19/10/16	mar 25/10/16	20
24	ELECCIÓN DE ALTERNATIVA	2 días	mié 26/10/16	jue 27/10/16	22,23
25	COMPROBACIÓN DE ALTERNATIVA	2 días	vie 28/10/16	lun 31/10/16	24

Fuente: Investigación directa.

Elaborado por: El Investigador.

Para el desarrollo del diagrama de Gantt se elaboró la tabla 14 en la que se determinan las actividades realizadas para la ejecución del proyecto de titulación, detallando todas las fases, el inicio y el final del tiempo de ejecución, así como también las actividades predecesoras.

Cálculo de Ruta Crítica

Para el cálculo de ruta crítica se ha utilizado el método PERT, donde To: tiempo optimista, Te: tiempo esperado, Tp: tiempo pesimista.

$$\text{duración} = T = \frac{t_o + 4 \cdot t_e + t_p}{6} \quad (48)$$

En la siguiente tabla se detallan las tareas y los parámetros para los cálculos de la ruta crítica.

Tabla N° 15: Parámetros para cálculo de la ruta crítica mediante el método PERT

#	NOMBRE DE LA TAREA	CÓDIGO	To	Te	Tp	T	VARIANZA
1	ASIGNACIÓN DE TEMA DE INVESTIGACIÓN	0				0	
2	FUENTES ESCRITAS	A	38	40	42	40	0,4
3	FUENTES DIGITALES	B	18	20	22	20	0,4
4	INFORMACIÓN ENTREGADA POR GASDYNCA	C	28	30	32	30	0,4
5	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	D	3	5	7	5	0,4
6	FUNDAMENTACIONES	E	3	5	7	5	0,4
7	CATEGORÍAS FUNDAMENTALES	F	8	10	12	10	0,4
8	HIPÓTESIS	G	1	3	5	3	0,4
9	SEÑALAMIENTO DE VARIABLES	H	3	5	7	5	0,4
10	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS TÉCNICOS	I	1	2	3	2	0,1
11	METODOLOGÍA	J	18	20	22	20	0,4
12	RECOLECCIÓN DE DATOS	K	18	20	22	20	0,4
13	ESTUDIO DE VARIABLES	L	3	5	7	5	0,4

#	NOMBRE DE LA TAREA	CÓDIGO	To	Te	Tp	T	VARIANZA
14	ANÁLISIS DE PREMISAS Y VARIABLES CON TÉCNICOS DE CAMPO	M	8	10	12	10	0,4
15	ANÁLISIS ESTUDIOS DE CAMPO	N	3	5	7	5	0,4
16	CAMBIO DE INTERNOS DE BOMBAS	O	3	5	7	5	0,4
17	CAMBIO DE BOMBAS DE MENOR CAPACIDAD	P	3	5	7	5	0,4
18	ELECCIÓN DE ALTERNATIVA	Q	1	2	3	2	0,1
19	COMPROBACIÓN DE ALTERNATIVA	R	1	2	3	2	0,1

Fuente: Investigación directa.
Elaborado por: El Investigador.

Ruta Crítica

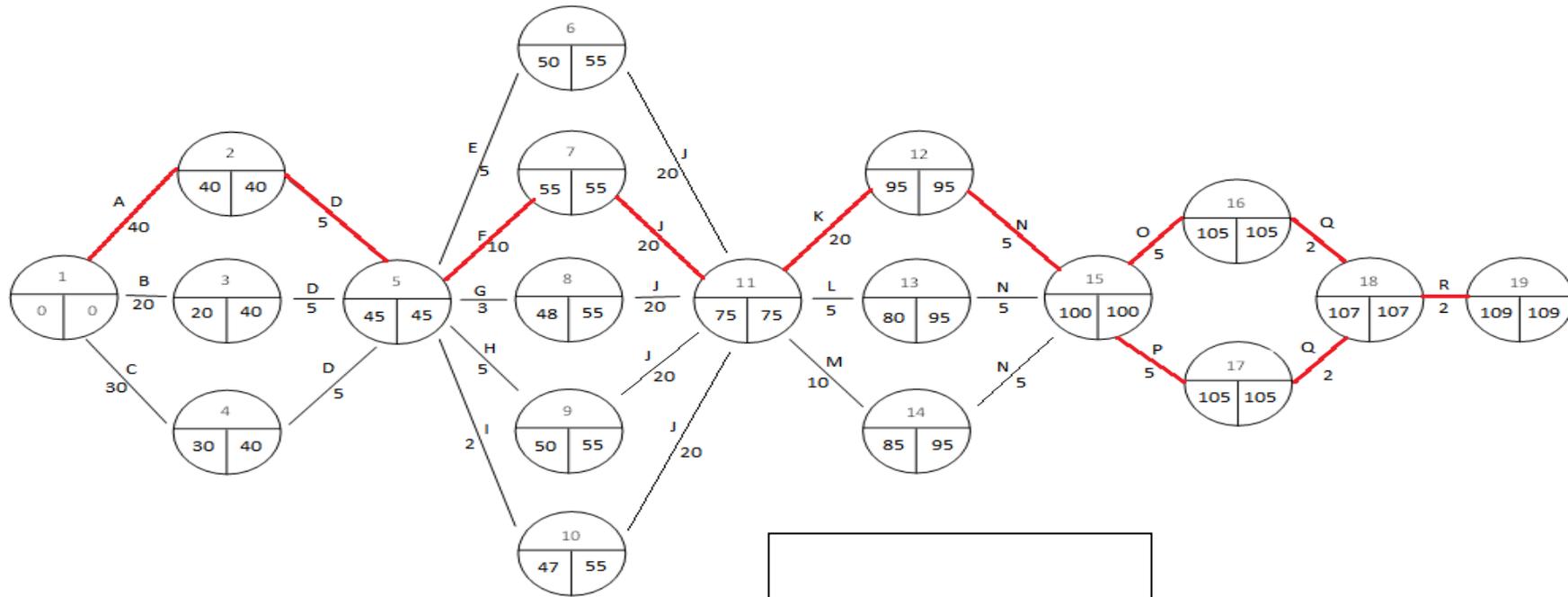


Figura N° 44: Método Pert.
 Fuente: Investigación directa.
 Elaborado por: El Investigador.



TIEMPO DE EJECUCIÓN: 109 DÍAS

VARIANZA: 3,72 DÍAS

DURACIÓN: 109 ± 3.72 DÍAS

Estudio de la Ingeniería

Simulación Proceso Actual

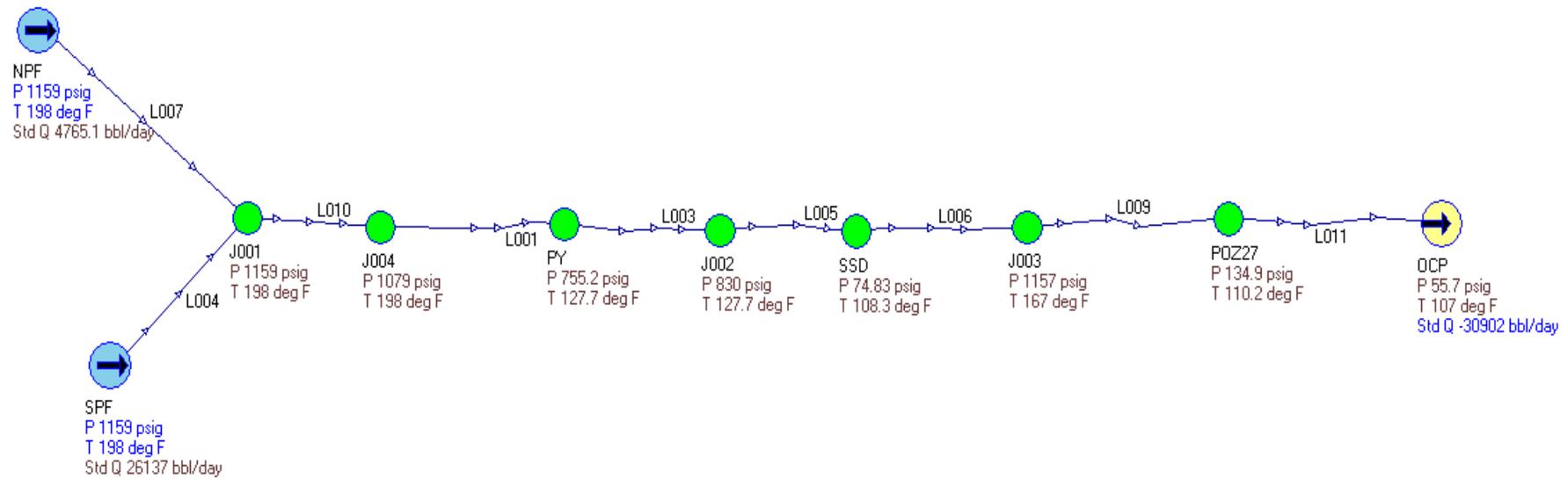


Figura N° 45: Simulación del proceso actual.
Fuente: PIPEPHASE 9.5.

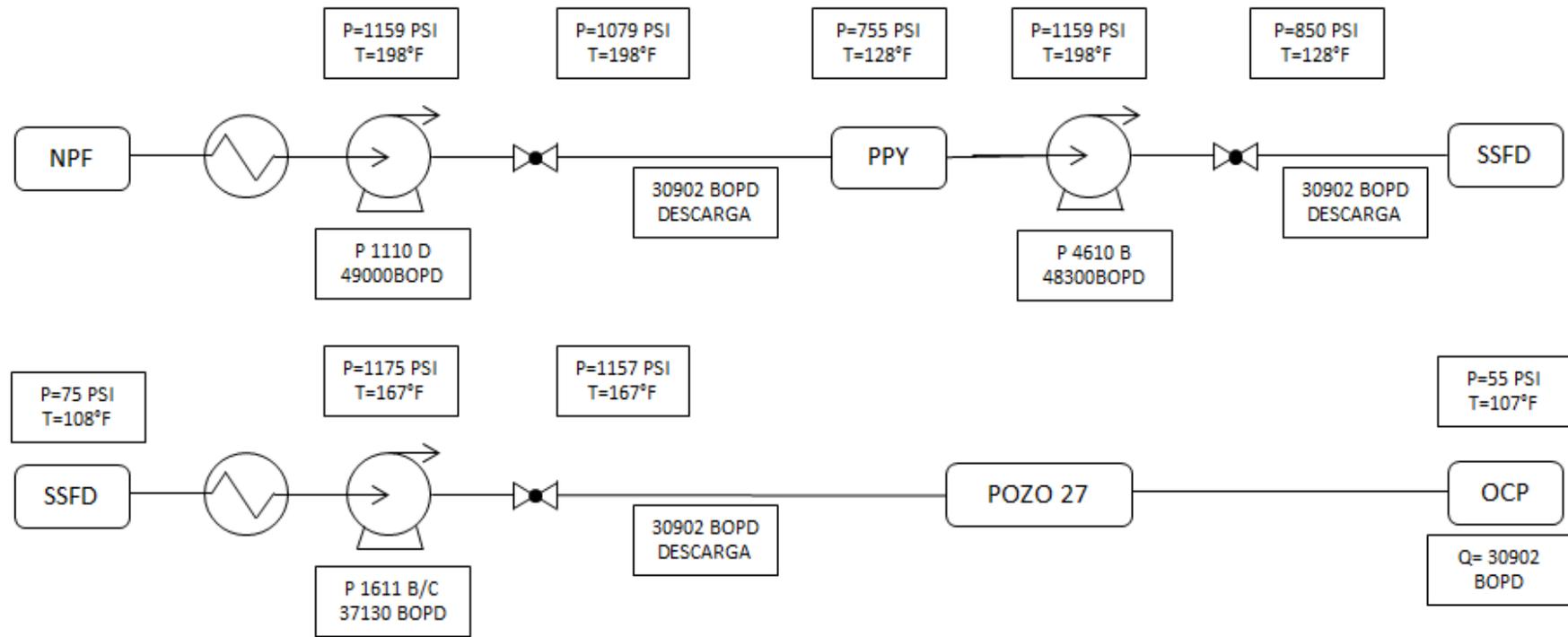


Figura N° 46: Esquema de simulación del proceso actual.
 Fuente: Investigación directa.
 Elaborado por: El Investigador.

El proceso del oleoducto con un caudal de 30902 BOPD presenta varios problemas:

Las bombas principales de transferencia de NPF se encuentran operando con un caudal de 49000 BOPD a una presión de 1160 psi, a la salida de la estación se descargan únicamente 30902 BOPD con una presión de 1079 psi debido a la recirculación de 18098 BOPD.

En Pompeya se recibe el producto con una presión de 755 psi, luego del trabajo de las bombas principales de transferencia se incrementa a 1270 psi, la recirculación de 17398 BOPD dentro de la estación hace que la presión de descarga sea de 830 psi.

En la estación de Shushufindi se realiza una operación de re-bombeo del crudo que proviene de la estación de Pompeya y es conducido a Pozo 27. La recirculación de la estación es de 6228 BOPD que se controla mediante una válvula ubicada en la descarga de las bombas. La presión de llegada a Shushufindi es de 75 psi incrementándose a 1175 psi por el trabajo de las bombas, saliendo de la estación con una presión 1157 psi debido a la recirculación. El crudo pasa por Pozo 27 con una presión de 135 psi y llega a OCP con una presión de 55 psi.

Del análisis de las simulaciones la recirculación dentro de las estaciones sirve únicamente para compensar la falta de producto y que las bombas trabajen cerca del punto óptimo de rendimiento, pero afecta directamente al proceso ya que reduce la presión de descarga en todas las estaciones. Esta operación dificulta el transporte de crudo y provoca un gasto innecesario de recursos.

Cálculo de variables condiciones actuales

Tabla N° 16: Datos de partida caudal de 30902 BOPD:

DATOS DE PARTIDA	
Z1 [m]	0
Z2 [m]	47.03
P1 [psi]	57
P2 [psi]	1177
L [m]	66923
Q [BOPD]	30902
Ø [inch]	16
ρ [Kg/m ³]	943.4
θcinemática @160°F[Cst]	292.8

Fuente: Investigación directa.

Elaborado por: El Investigador.

En la tabla 16 se detallan los datos de partida para realizar los cálculos de velocidad, número de Reynolds, factor de fricción, altura total, potencia, eficiencia de las bombas principales de transferencia y poder comparar las condiciones de operación. Estos datos provienen de la información proporcionada por la empresa Gasdynca.

Se procede a realizar el cálculo de la velocidad.

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi * r^2} = \frac{0.0552 \text{ [m}^3 \text{ s]}}{3.14 * (0.2032 \text{ [m]})^2} = 0.425 \text{ [m s]}$$

La velocidad calculada se mantiene durante todo el recorrido entre las estaciones.

Las velocidades de 0.425 [m/s] en esta alternativa está dentro de los parámetros de velocidad recomendados que debe tener un líquido viscoso en una tubería como se observa en la siguiente tabla:

Tabla Nº 17: Velocidades recomendadas para fluidos en tuberías

FLUIDO	TIPO DE FLUJO	VELOCIDAD	
		[ft/s]	[m/s]
Líquidos poco viscosos	Flujo por gravedad	0,5-1	0,15-0,30
	Entrada de bomba	1-3	0,3-0,9
	Salida de bomba	4-10	1,2-3
	Línea de conducción	4-8	1,2
FLUIDO	TIPO DE FLUJO	VELOCIDAD	
		[ft/s]	[m/s]
Líquidos viscosos	Entrada de bomba	0,2-0,5	2,4
	Salida de bomba	0,5-2	0,06-0,15
Vapor de agua		30-50	0,15-0,6
Aire o gas		30-100	9-30

Fuente: www.ugr.es/~aulavirtualpfcicq/descargas/documentos/BOMBAS%20Y%20TUBERIAS.pdf.

Con la velocidad se obtiene el número de Reynolds de la siguiente forma:

$$Re = \frac{V * D}{\nu_{cinemática}} = \frac{0.425 \text{ [m/s]} * 0.406 \text{ [m]}}{0.000293 \text{ [m}^2\text{/s]}} = 590.24$$

De acuerdo al resultado se tiene un flujo laminar, por lo que es posible aplicar la siguiente fórmula para calcular el factor de fricción:

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64}{590.24} = 0.10843$$

Con los datos de entrada y los parámetros calculados se aplica la ecuación 10 de la energía entre el P1 y el P2

$$\frac{P1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z1 + H_{total} = \frac{P2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z2 + H_{pérdidas}$$

La ecuación puede quedar distribuida de la siguiente manera

ENERGÍA POTENCIAL
PRESIÓN
ENERGÍA CINÉTICA
PÉRDIDAS MAYORES
PÉRDIDAS MENORES



$$H_{\text{total}} = Z_2 - Z_1 + \frac{P_2 - P_1}{\rho * g} + \cancel{\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}} + f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} - \cancel{K \frac{V^2}{2g}}$$

La velocidad es constante en todos los puntos del oleoducto (diámetro de la tubería 16”) por lo que se simplifica, las pérdidas menores son despreciables debido a que la tubería tiene una longitud considerable y no posee, en su mayoría, accesorios. Resolviendo la ecuación con el reemplazo correspondiente de datos se tiene:

$$H_{\text{total}} = 47.03 - 0 \text{ m} + \frac{8115132.52 - 393001.32 \text{ Kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2}{943.4 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 0.108 * \frac{66923 \text{ m}}{0.406 \text{ m}} * \frac{(0.425 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2 * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

$$H_{\text{total}} = 47.03 + 834.4 + 164.8 \text{ m}$$

$$H_{\text{total}} = 1046.22 \text{ m} = 3452.55 \text{ [ft]}$$

La Potencia aplicada al fluido se calcula de la siguiente forma

$$P = H_{\text{total}} * \gamma * Q$$

Para este caso se puede aplicar la fórmula de la siguiente manera

$$P = H_{\text{total}} * \rho * g * Q$$

$$P_u = 1046.22 \text{ [m]} * 943.4 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0.057 \text{ [m}^3 \text{ s]}$$

$$P_u = 564542.68 \text{ W} = 564.5 \text{ Kw} = 757[\text{Hp}]$$

Luego del cálculo de la potencia se procede a calcular el rendimiento de la bomba

$$\eta = \frac{Q * H_{total} * SG}{P_u * 367} * 100 = \frac{204.7 \text{ m}^3 \text{ h} * 1046.22 \text{ m} * 0.9}{564.5 \text{ kW} * 367} * 100 = 93\%$$

Por lo tanto la eficiencia del sistema es del 93%

Alternativas

Para la solución del problema de transporte de crudo y que las bombas principales de transferencia trabajen dentro del punto óptimo de rendimiento se proponen las siguientes alternativas:

Alternativa 1: Disminución del diámetro de los impulsores de las bombas de transferencia existentes en las estaciones NPF, Pompeya y Shushufindi de Repsol, con una mejora en los procesos.

Alternativa 2: Instalación de equipos de transferencia nuevos en las estaciones NPF, Pompeya y Shushufindi, con una mejora en los procesos.

Alternativa #1

En este escenario se consideran las siguientes premisas:

- Caudal de Crudo: 25000 BOPD
- Presión de descarga en las Estaciones NPF, Pompeya y Shushufindi: 1200 psi
- Presión de llegada a las Estaciones Pompeya y Shushufindi: 150 psi
- Temperatura a la salida de las Estaciones: 200 °F
- Presión llegada en OCP \geq 30 psi

- La solución no debe interrumpir la operación por un lapso mayor a 12 horas.
- La alternativa seleccionada debe implicar simplicidad en las operaciones.

Con esta alternativa se mejorará el trabajo de las bombas principales de transferencia ya que trabajarán en el punto óptimo de rendimiento y los procesos serán más eficientes.

Cambio de los conjuntos rotativos con todos sus accesorios para las nuevas condiciones de operación en las estaciones NPF, Pompeya y Shushufindi del oleoducto de Repsol. Mediante estudios y simulaciones realizadas con las empresas Gsdynca y Sulzer (proveedor de bombas), se establece que para una mejor operación en la estaciones se debe calentar el producto a 200 °F para controlar su viscosidad a lo largo del oleoducto.

Se pueden realizar adaptaciones a los equipos existentes en las estaciones ya que las bombas son compatibles con los nuevos conjuntos rotativos que se ajustarán a las condiciones actuales y futuras de operación con caudales de 25000 BODP o menores.

Los cambios de conjuntos rotativos se realizarán en dos de las bombas que posee cada estación, por lo que se podrá operar continuamente. Esta condición es una premisa de Repsol.

Por el cambio de conjuntos rotativos se suprime el proceso de recirculación interno en las estaciones, esta modificación incrementa la presión de descarga a 1.200 psi obteniendo presiones a la entrada de cada una de ellas superiores a los 150 psi, debido a esto, es necesario implementar válvulas de control de presión PCV, para controlar la presión de ingreso a las facilidades.

Simulación alternativa #1

A continuación se muestra en la figura 47 el esquema del proceso simulado propuesto en la alternativa #1, a través del cual se observan las características operativas.

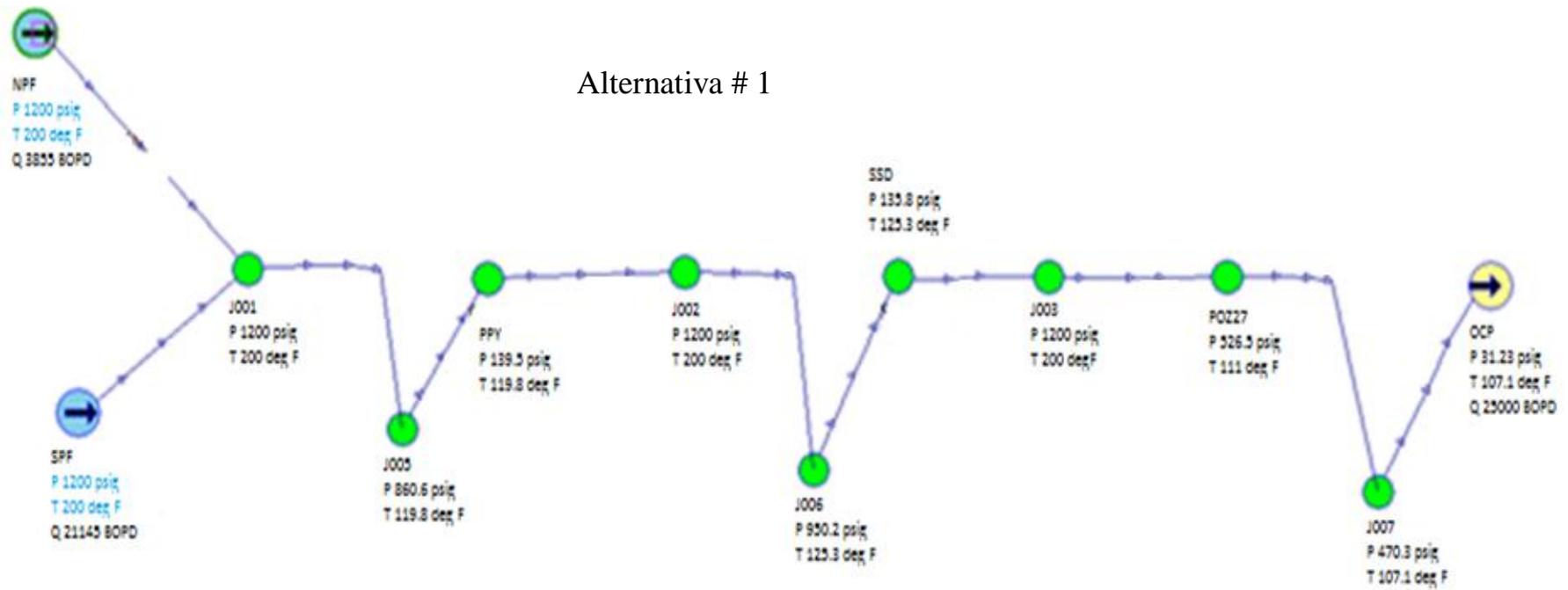


Figura N° 47: Esquema de Simulación alternativa #1.
Fuente: PIPEPHASE 9.8.

Resultados de la Simulación

Tabla N° 18: Resultados de la Simulación para un caudal de 25.000 BFPD.

ESTACIONES	CAUDAL BOPD		PRESIÓN PSIG			TEMPERATURA °F	
	Q ENTRADA	Q SALIDA	P ENTRADA	P REDUCTORA	P DESCARGA	T ENTRADA	T SALIDA
NPF	25000	25000	80-130	-----	1200	200	200
PPY	25000	25000	860	140	1200	119,8°F	200
SSD	25000	25000	950,2	136	1200	125,3 °F	200
POZO 27	25000	25000	526,5	-----	526,5	111 °F	111
OCP	25000	25000	470	31	-----	107,1°F	-----

Fuente: Investigación directa.
Elaborado por: El Investigador.

En el siguiente diagrama se muestra el esquema propuesto con los valores de simulación.

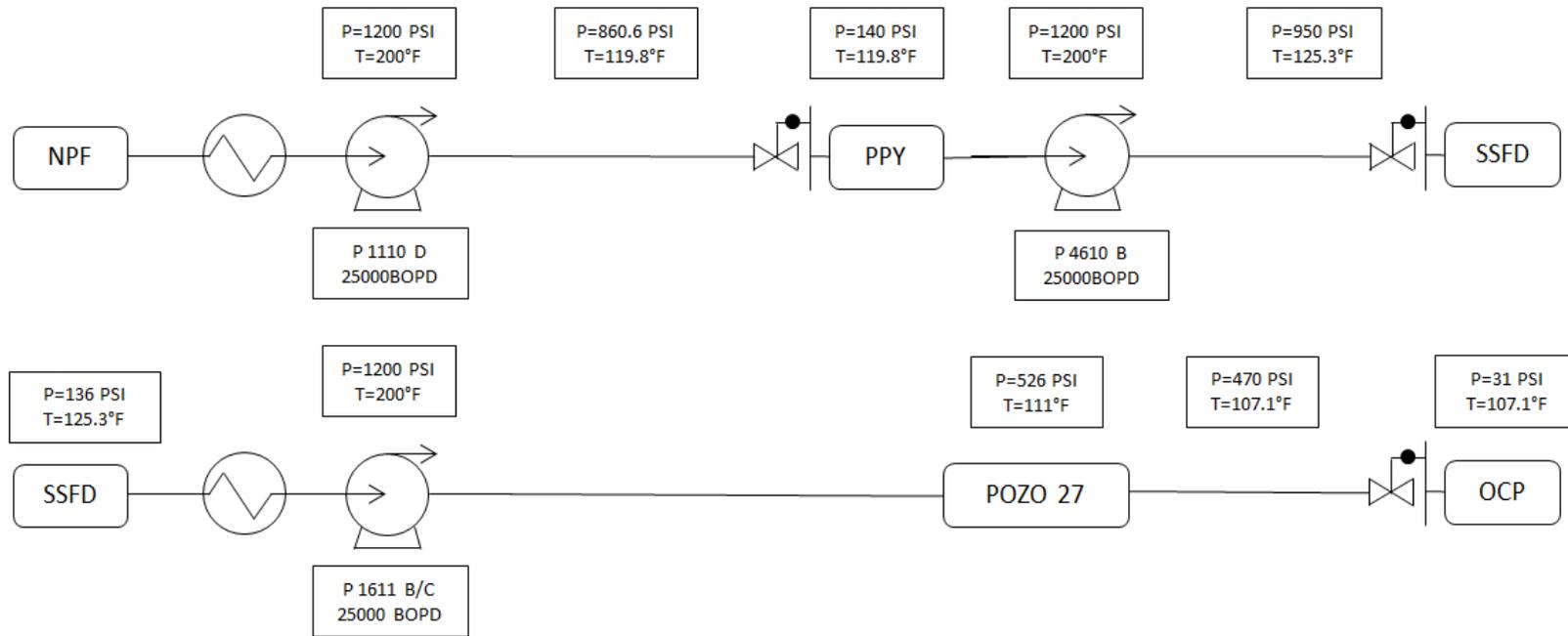


Figura N° 48: Diagrama del Proceso alternativa #1.

Fuente: Investigación directa.

Elaborado por: El Investigador.

Esta alternativa permite la utilización de los equipos de transferencia existentes en las estaciones del oleoducto, mejorando el punto óptimo de rendimiento de las bombas con el cambio del conjunto rotativo para el nuevo caudal de 25000 BOPD.

Con esta alternativa, no se realizarán cambios en las tuberías de succión y descarga de las bombas ya que se utilizaran los mismos equipos de bombeo, además se utilizarán las mismas facilidades con las que cuentan las estaciones.

Cálculo de variables caudal de 25.000 BOPD

Tabla N° 19: Datos de partida caudal de 25000 BOPD:

DATOS DE PARTIDA	
Z1 [m]	0
Z2 [m]	47.03
P1 [psi]	57
P2 [psi]	1177
L [m]	66923
Q [BOPD]	25000
Ø [inch]	16
ρ [Kg/m ³]	943.4
ϑcinemática @160°F[Cst]	292.8

Fuente: Investigación directa.
Elaborado por: El Investigador.

En la tabla 19 se detallan los datos de partida para realizar los cálculos de velocidad, número de Reynolds, factor de fricción, altura total, potencia, eficiencia de las bombas principales de transferencia y poder comparar las condiciones de operación. Estos datos provienen de la información proporcionada por la empresa Gasdynca.

Se procede a realizar el cálculo de la velocidad.

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi * r^2} = \frac{0.046 \text{ [m}^3 \text{ s]}}{3.14 * (0.2032 \text{ [m]})^2} = 0.354 \text{ [m s]}$$

La velocidad calculada se mantiene durante todo el recorrido entre las estaciones.

Las velocidades de 0.354 [m/s] en esta alternativa está dentro de los parámetros de velocidad recomendados que debe tener un líquido viscoso en una tubería como se observa en la tabla 17.

Con la velocidad se obtiene el número de Reynolds de la siguiente forma:

$$Re = \frac{V * D}{\nu_{cinemática}} = \frac{0.354 \text{ [m s]} * 0.406 \text{ [m]}}{0.000293 \text{ [m}^2 \text{ s]}} = 491.86$$

De acuerdo al resultado se tiene un flujo laminar, por lo que es posible aplicar la siguiente fórmula para calcular el factor de fricción:

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64}{491.86} = 0.13$$

Con los datos de entrada y los parámetros calculados se aplica la Ecuación 10 de la energía entre el P1 y el P2.

$$\frac{P1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z1 + H_{total} = \frac{P2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z2 + H_{pérdidas}$$

La ecuación puede quedar distribuida de la siguiente manera:

ENERGÍA POTENCIAL	PRESIÓN	ENERGÍA CINÉTICA	PÉRDIDAS MAYORES	PÉRDIDAS MENORES
$H_{total} = Z2 - Z1 + \frac{P2 - P1}{\rho * g} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + f \frac{L V^2}{D 2g} - K \frac{V^2}{2g}$				

La velocidad es constante en todos los puntos del oleoducto por lo que se simplifica, las pérdidas menores son despreciables debido a que la tubería tiene una longitud considerable y no posee accesorios. Resolviendo la ecuación con el reemplazo correspondiente de datos se tiene:

$$H_{\text{total}} = 47.03 - 0 \text{ m} + \frac{8115132.52 - 393001.32 \text{ Kg}}{943.4 \text{ Kg} \cdot \text{m}^3 \cdot 9.81 \text{ m/s}^2} + 0.108 * \frac{66923 \text{ m}}{0.406 \text{ m}} * \frac{(0.354 \text{ [m/(s)]}^2)}{2 * 9.81 \text{ m/s}^2}$$

$$H_{\text{total}} = 47.03 + 834.4 + 137.33 \text{ m}$$

$$H_{\text{total}} = 1018.75 \text{ m} = 3361.90 \text{ [ft]}$$

La Potencia aplicada al fluido se calcula de la siguiente forma:

$$P = H_{\text{total}} * \gamma * Q$$

Para este caso se puede aplicar la fórmula de la siguiente manera:

$$P = H_{\text{total}} * \rho * g * Q$$

$$P_u = 1018.75 \text{ [m]} * 943.4 \text{ Kg/m}^3 * 9.81 \text{ m/s}^2 * 0.046 \text{ [m}^3 \text{ s]}$$

$$P_u = 549721.68 \text{ W} = 549.72 \text{ Kw} = 737.19 \text{ [Hp]}$$

Luego del cálculo de la potencia se procede a calcular el rendimiento de la bomba

$$\eta = \frac{Q * H_{\text{total}} * SG}{P_u * 367} * 100 = \frac{165.6 \text{ m}^3 \text{ h} * 1018.75 \text{ m} * 0.9}{549.72 \text{ kW} * 367} * 100 = 75\%$$

Por lo tanto la eficiencia del sistema es del 75%.

Alternativa #2

En este escenario se consideran las siguientes premisas para el proceso:

- Caudal de Crudo: 25000 BOPD
- Presión máxima de trasportación de crudo: 1200 psi
- Presión de llegada a la estación Shushufindi <150 psi
- Temperatura a la salida de las Estaciones: 200 °F
- Presión llegada en OCP \geq 30 psi
- La alternativa seleccionada debe implicar simplicidad en las operaciones.

La Alternativa #2, consiste en la instalación de bombas principales de transferencia **nuevas** en las estaciones NPF, Pompeya y Shushufindi que funcionarán con los requerimientos de caudales, presiones y temperaturas necesarias para una eficiente transportación de crudo por el oleoducto de Repsol.

Simulación alternativa #2

En las simulaciones se ingresarán varias alternativas de parámetros de presión y temperatura con un caudal de 25000 BOPD, para alcanzar las premisas entregadas por Repsol.

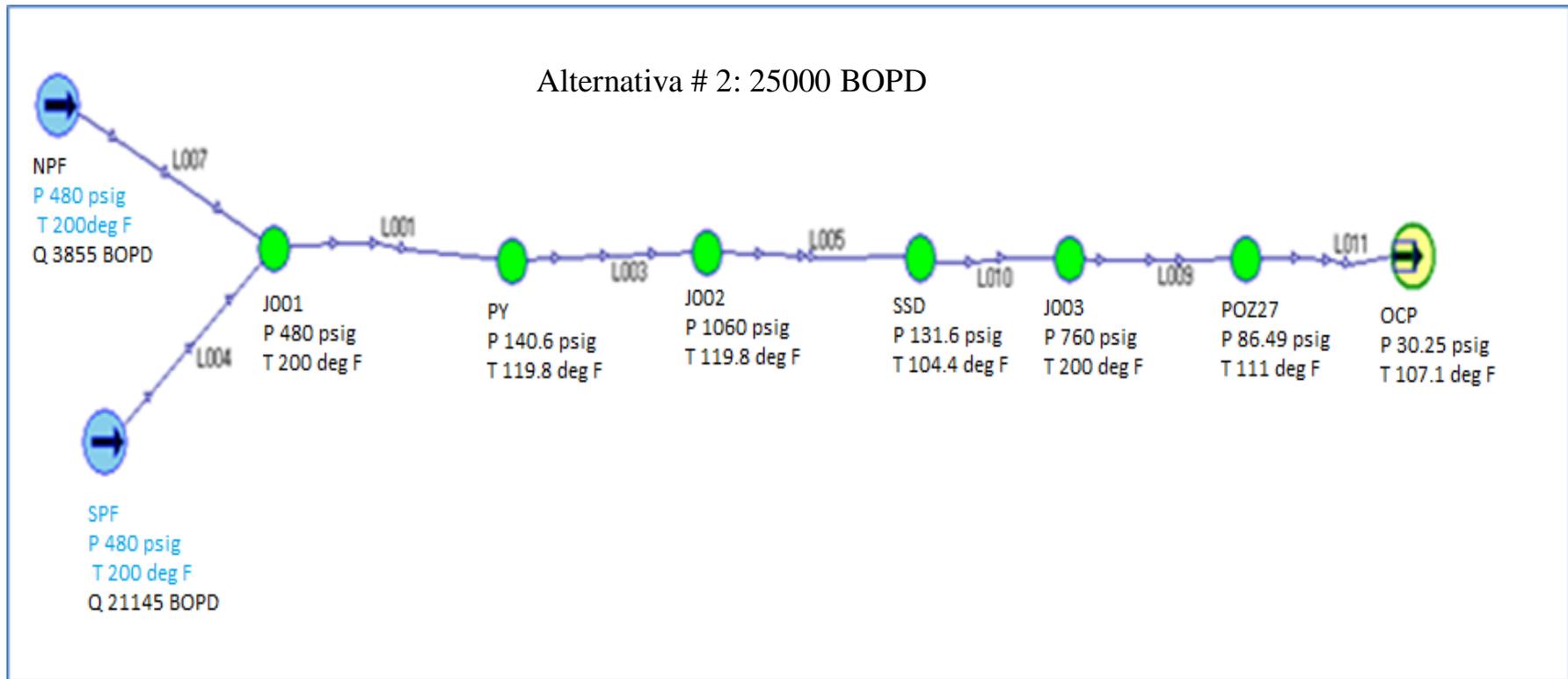


Figura N° 49: Esquema de Simulación alternativa #2.
Fuente: PIPEPHASE 9.8

Resultados de la Simulación

Tabla N° 20: Resultados de la Simulación para un caudal de 25.000 BFPD.

ESTACIONES	CAUDAL BFPD		PRESIÓN psig		TEMPERATURA °F	
	Q ENTRADA	Q SALIDA	P SUCCIÓN	P DESCARGA	T ENTRADA	T SALIDA
NPF	-----	25.000	-----	480	200	200
PPY	25.000	25.000	140,6	1060	119,8	119,8
SSD	25.000	25.000	131,6	760	104,4	200
POZO 27	25.000	25.000	86,49	86,49	111	111
OCP	25.000	25.000	30.25	-----	107,1	107,1

Fuente: Investigación directa.

Elaborado por: El Investigador.

El siguiente esquema, muestra el sistema propuesto con los valores obtenidos de la simulación.

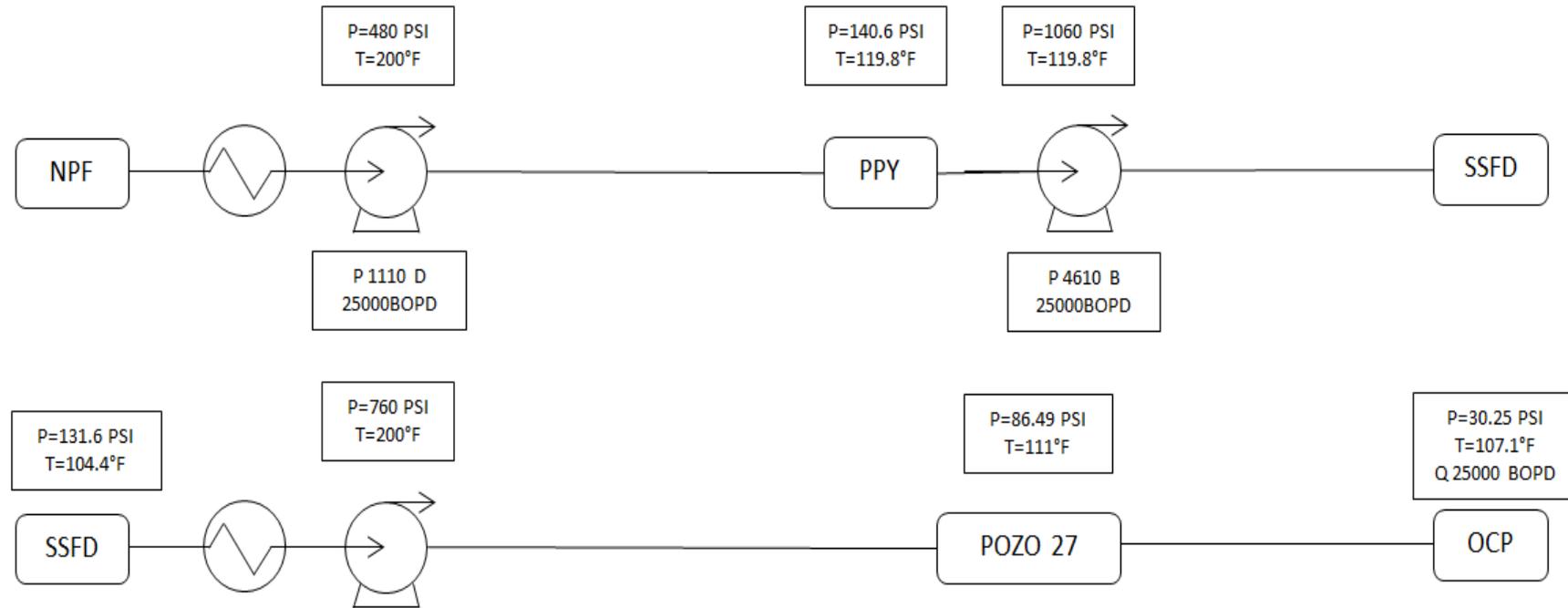


Figura N° 50: Diagrama del Proceso alternativa #2.

Fuente: Investigación directa.

Elaborado por: El Investigador.

Esta alternativa cumple con los requerimientos de transportación eficiente de crudo con las presiones de descarga necesarias para que el producto llegue a cada una de las estaciones sin la implementación de válvulas reductoras ni calentadores intermedios.

Para llevar a cabo el proceso propuesto en este escenario, se plantea la instalación de bombas y motores eléctricos nuevos para las estaciones de NPF, Pompeya y Shushufindi que trabajen de acuerdo a las condiciones entregadas por la simulación y requerimientos de Repsol, por lo que los equipos deberán ser construidos con las variables de cada una de las estaciones.

Se debe mencionar que en esta alternativa se presentan varias dificultades como son:

- No se podrán utilizar los repuestos que se tienen en stock.
- No se cumple con la premisa de no cambiar equipos en las estaciones.
- Se debe modificar las bases y facilidades para la instalación de los nuevos equipos.
- El tiempo de entrega de los equipos nuevos es muy extenso.
- Se deben adquirir por lo menos dos equipos nuevos para cada estación.
- Se deberá adquirir repuestos nuevos para el mantenimiento de los equipos de cada una de las estaciones.

Evaluación de la matriz de alternativas #1 y #2

Esta matriz se elaboró con un estudio que se indica en el anexo 13 donde consta el desarrollo de:

- Estudios especiales
- Criterios de ambiente
- Criterios técnicos
- Criterios económicos

Posteriormente se realizó la matriz de evaluación indicada en la tabla 21.

Tabla N° 21: Matriz de evaluación

MATRIZ DE EVALUACIÓN						
ESTUDIO Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVA DE TRANSPORTE DE CRUDO						
PTOS.	PESO (%)	CRITERIOS DE EVALUACIÓN	OPCIONES EVALUADAS			
			ALTERNATIVA 1		ALTERNATIVA 2	
			Ptos.	% Peso	Ptos.	% Peso
40	2,97%	I. ESTUDIOS ESPECIALES				
20	1,49%	Levantamiento Topográfico y Detección de Metales	1	0,49566295	1	0,49566295
20	1,49%	Estudio de Impacto Ambiental	1	0,49566295	1	0,49566295
150	11,15%	II. CRITERIOS AMBIENTE				
150	11,15%	Impacto Ambiental	1	3,71747212	1	3,71747212
1030	76,58%	III. CRITERIOS TÉCNICOS				
300	22,30%	A. Operacionales				
250	18,59%	Hidráulica	2	12,3915737	2	12,3915737
30	2,23%	Continuidad de la Filosofía Actual	3	2,23048327	3	2,23048327
20	1,49%	Accesibilidad de Operaciones	3	1,48698885	2	0,9913259
680	50,56%	B. Constructibilidad				
50	3,72%	Impacto sobre las Instalaciones existentes	3	3,71747212	2	2,47831475
80	5,95%	Impacto de Construcción sobre las Operaciones	3	5,94795539	2	3,96530359
80	5,95%	Complejidad para la Instalación	2	3,96530359	2	3,96530359
110	8,18%	Disponibilidad de Espacio Requerido	3	8,17843866	1	2,72614622
120	8,92%	Tiempo de Procura	3	8,92193309	2	5,94795539
90	6,69%	Tiempo de Construcción	3	6,69144981	2	4,46096654
150	11,15%	Aprovechamiento de las rutas existentes	2	7,43494424	2	7,43494424

PTOS.	PESO (%)	CRITERIOS DE EVALUACIÓN	OPCIONES EVALUADAS			
			ALTERNATIVA 1		ALTERNATIVA 2	
			Ptos.	% Peso	Ptos.	% Peso
50	3,72%	<i>C. Mantenimiento</i>				
50	3,72%	Acceso para Mantenimiento e Inspección	2	2,47831475	2	2,47831475
125	9,29%	IV. CRITERIOS ECONÓMICOS				
<i>125</i>	<i>9,29%</i>	<i>A. Costos de Inversión</i>				
5	0,37%	Materiales, Suministros y Mano de Obra Procesos	2	0,24783147	2	0,24783147
30	2,23%	Materiales, Suministros y Mano de Obra Mecánica	3	2,23048327	2	1,48698885
40	2,97%	Materiales, Suministros y Mano de Obra Civil	3	2,9739777	2	1,9826518
30	2,23%	Materiales, Suministros y Mano de Obra Electricidad	3	2,23048327	2	1,48698885
20	1,49%	Materiales, Suministros y Mano de Obra Instrumentación	2	0,9913259	2	0,9913259
1345	100%	PUNTUACIÓN TOTAL	45	76,8277571	35	59,9752169
OPCIONES			PUNTOS ACUMULADOS	% PESO ACUMULADO		
Opción 1 (Modificación rotores bombas actuales)			45	76,82775713		
Opción 2 (Cambio bombas)			35	59,97521685		

Fuente: Investigación directa.

Elaborado por: El Investigador.

Resultados de la Evaluación

De acuerdo con la matriz de evaluación la opción favorecida fue la de implantar la alternativa #1, la cual presento un peso porcentual de 76,8%.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

- Se concluye que la alternativa #1 presenta ventajas sobre la alternativa #2, en cuanto a costos, montaje e instalación de los equipos de bombeo sin intervención en las instalaciones existentes.
- La alternativa #1, permite el transporte del crudo a través del oleoducto existente con los parámetros establecidos en las premisas para el estudio, con la utilización de los actuales equipos de bombeo.
- De acuerdo con las sensibilidades realizadas con la herramienta de simulación, del esquema de operación planteado en las alternativas #1 y #2, se determina que es viable operar a caudales de 25000BOPD o menores.
- Con el análisis del estudio, se considera indispensable el proceso de calentamiento de crudo en las estaciones: NPF, Pompeya y Shushufindi a 200 °F, para lograr una eficiencia en el flujo del crudo.
- Se recomienda poner en ejecución la alternativa # 1, ya que representa la más factible, rápida y económica alternativa analizada.
- En los planos de implantación mostrados en los anexos 17, 18 y 19 se detalla todas las facilidades de las estaciones de NPF, Pompeya y Shushufindi que pertenecen al oleoducto de Repsol ubicado en el Bloque 16 y delimitan los lugares específicos en los que se encuentran los sistemas de bombeo para realizar los cambios de los internos, así como también los lugares donde se implantarán los calentadores eléctricos.

Beneficios de la Propuesta

En la alternativa #1 a pesar de que se deben instalar PCVs y calentadores, es la más eficiente y económica para resolver los problemas de transportación y procesos por los siguientes factores:

- Se utilizarán los repuestos que se tienen en stock.
- No se modificarán las instalaciones.
- Se tiene control sobre las presiones y temperaturas de los procesos para la transportación del crudo.

- El talento humano tiene la experticia necesaria para resolver cualquier problema que se presente en los equipos.
- Se podrá bombear con caudales inclusive menores a 25000 BOPD de acuerdo a la producción.
- Con las modificaciones de los impulsores las bombas principales de transferencia trabajarán dentro del punto óptimo de rendimiento, teniendo un ahorro en los mantenimientos.
- Al implantar esta propuesta no será necesario parar las operaciones en las estaciones.
- Se suprime las recirculaciones internas en las estaciones ahorrando energía, de esta forma los procesos mejoran.
- El costo para la implantación de la alternativa #1 es el más beneficioso para la empresa ya que únicamente se interviene en los internos de las bombas principales de transferencia.

Luego de haber propuesto la alternativa 1 como la mejor solución al problema de transporte de crudos pesados con bajos caudales, se realiza la propuesta económica.

Evaluación Económica

Costos Alternativa #1

Los costos de los trabajos a realizar en una bomba principal de transferencia de la alternativa #1 se detallan en la tabla 22.

Tabla N° 22: Costo de los trabajos en bombas principales de transferencia

Costo de trabajos en bombas	
Ajuste y cambio de elementos conjunto rotativo	\$ 88.044,00
Reparación de volutas	\$ 43.090,50
Armado conjunto	\$ 12.249,80
Pintura	\$ 2.944,00
Evaluación y adaptación de sellos	\$ 3.450,00
Alineación bomba motor	\$ 3.680,00

Costo de trabajos en bombas	
SUBTOTAL 1	\$ 153.458,30
Supervisión de técnicos de fábrica SULZER (Suiza)	\$ 32.500,00
Gastos de logística, transporte, grúa, combustible, empaque	\$ 25.600,00
SUBTOTAL 2	\$ 58.100,00
10 % de imprevistos	\$ 21.155,83
30% de utilidad	\$ 63.467,49
COSTO TRABAJOS BOMBAS	\$ 296.181,62
**El desglose de los rubros se detalla en el anexo 14	

Fuente: Investigación directa.

Elaborado por: El Investigador.

Los costos de los trabajos a realizar para la procura e instalación de calentadores y válvulas de control de la alternativa #1 se detallan en la tabla 23.

Tabla N° 23: Costos de procura e instalación de calentadores y válvulas

INSTALACIÓN DE CALENTADORES Y VÁLVULAS					
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD DE MEDIDA	CANT.	PRECIO UNITARIO US\$	PRECIO TOTAL US\$
1 GENERALES					
1,1	Ingeniería	Global	1	\$ 230.000,00	\$ 230.000,00
1,2	Gestión de Compras	Global	1	\$ 30.000,00	\$ 30.000,00
1,3	Movilización	Global	1	\$ 365.640,00	\$ 365.640,00
1,4	Pre-Comisionado, Pruebas y Ensayos, Comisionado y puesta en marcha	Global	1	\$ 125.000,00	\$ 125.000,00
1,5	Desmovilización	Global	1	\$ 250.000,00	\$ 250.000,00
1,6	Planos AS-BUILT	Global	1	\$ 18.500,00	\$ 18.500,00
SUB-TOTAL ÍTEM 1					\$ 1.019.140,00

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD DE MEDIDA	CANT.	PRECIO UNITARIO US\$	PRECIO TOTAL US\$
2 MONTAJE ELECTROMECAÁNICO					
2,1	Obras Civiles	Global	1	\$ 282.329,40	\$ 282.329,40
2,2	Obras Mecánicas	Global	1	\$ 1.459.319,96	\$ 1.459.319,96
2,3	Obras Eléctricas	Global	1	\$ 484.275,90	\$ 484.275,90
2,4	Obras Instrumentación y Control	Global	1	\$ 233.830,00	\$ 233.830,00
SUB-TOTAL ÍTEM 2					\$ 2.459.755,26
DESCRIPCIÓN					USD
SUBTOTAL ÍTEM 1 (GENERALES)					\$ 1.019.140,00
SUBTOTAL ÍTEM 2 (MONTAJE ELECTROMECAÁNICO)					\$ 2.459.755,26
SUBTOTAL					\$ 3.478.895,26
IVA (14%)					\$ 487.045,34
COSTO TOTAL ESTIMADO DEL PROYECTO					\$ 3.965.940,60
**El desglose de los rubros se detalla en el anexo 15					

Fuente: Investigación directa.
Elaborado por: El Investigador.

Después del análisis de los trabajos en las bombas, procura e instalación de calentadores y válvulas, los costos de la inversión total de la alternativa #1 se presentan en la tabla 24.

Tabla N° 24: Costo total de inversión Alternativa #1

	COSTO UNITARIO	CANTIDAD	COSTO TOTAL
INVERSIÓN POR BOMBA	\$ 296.181,62	6 PZA	\$ 1.777.089,72
PROCURA E INSTALACIÓN DE CALENTADORES Y VÁLVULAS	\$ 3.965.940,60	1 GLB	\$ 3.965.940,60
TOTAL INVERSIÓN			\$ 5.743.030,32

Fuente: Investigación directa.
Elaborado por: El Investigador.

Análisis de Factibilidad

Flujo de Caja

El flujo de caja es un informe financiero que presenta un detalle de los flujos, ingresos y egresos de dinero que tienen una empresa en un período dado.

Ingresos:

- Ventas
- Cobro de deudas
- Alquileres
- Cobro de préstamos
- Intereses

Egresos:

Son los gastos que realiza la empresa para la operación, en los egresos se encuentran:

Costos Operacionales

Son los costos constantes para mantener el proyecto en funcionamiento, tales como:

- Servicios
- Salarios
- Energía
- Logística
- Pago de facturas
- Pago de impuestos
- Préstamos
- Intereses

Costos no Operacionales

Son los imprevistos del proceso y representan los costos no planificados.

Para determinar el flujo neto de caja se considera:

La inversión inicial resumida en la tabla 24 que consta de la procura e instalación de calentadores, válvulas PCV y ajuste en los internos de las bombas principales de transferencia.

El costo de ganancia por ventas que se obtiene con los parámetros de la tabla 25.

Tabla N° 25: Ganancia mensual por concepto de ventas de petróleo

PERÍODO	COSTO POR BARRIL	PROD [BOPD]	GANANCIA DIARIA	GANANCIA MENSUAL
ENE	\$ 34,00	25000	\$ 850.000,00	\$ 25.500.000,00
FEB	\$ 19,36	25000	\$ 484.000,00	\$ 14.520.000,00
MAR	\$ 37,90	25000	\$ 947.500,00	\$ 28.425.000,00
ABR	\$ 42,17	25000	\$ 1.054.250,00	\$ 31.627.500,00
MAY	\$ 39,03	25000	\$ 975.750,00	\$ 29.272.500,00
JUN	\$ 42,26	25000	\$ 1.056.500,00	\$ 31.695.000,00
JUL	\$ 43,11	25000	\$ 1.077.750,00	\$ 32.332.500,00
AGO	\$ 44,49	25000	\$ 1.112.250,00	\$ 33.367.500,00
SEP	\$ 44,44	25000	\$ 1.111.000,00	\$ 33.330.000,00
OCT	\$ 43,80	25000	\$ 1.095.000,00	\$ 32.850.000,00
NOV	\$ 43,32	25000	\$ 1.083.000,00	\$ 32.490.000,00
DIC	\$ 52,98	25000	\$ 1.324.500,00	\$ 39.735.000,00
PROMEDIO	\$ 40,57			

Fuente: Banco Central del Ecuador.

- Para el costo operacional se tomó en cuenta todos los gastos que se requieren para la producción de crudo, este costo es el 70% de la ganancia por ventas.

- El costo no operacional tiene un costo del 15% de la ganancia por ventas.

El flujo neto de caja es la diferencia entre las ventas menos la sumatoria del costo operacional y no operacional.

Tabla N° 26: Flujo de caja de Repsol en el período 2016

MES	INVERSIÓN	VENTAS	COSTO OPERACIONAL	COSTO NO OPERACIONAL	FLUJO NETO DE CAJA
0	\$ 5.743.030,32				\$ 5.743.030,32
ENE		\$ 25.500.000,00	\$ 17.850.000,00	\$ 3.825.000,00	\$ 3.825.000,00
FEB		\$ 14.520.000,00	\$ 10.164.000,00	\$ 2.178.000,00	\$ 2.178.000,00
MAR		\$ 28.425.000,00	\$ 19.897.500,00	\$ 4.263.750,00	\$ 4.263.750,00

MES	INVERSIÓN	VENTAS	COSTO OPERACIONAL	COSTO NO OPERACIONAL	FLUJO NETO DE CAJA
ABR		\$ 31.627.500,00	\$ 22.139.250,00	\$ 4.744.125,00	\$ 4.744.125,00
MAY		\$ 29.272.500,00	\$ 20.490.750,00	\$ 4.390.875,00	\$ 4.390.875,00
JUN		\$ 31.695.000,00	\$ 22.186.500,00	\$ 4.754.250,00	\$ 4.754.250,00
JUL		\$ 32.332.500,00	\$ 22.632.750,00	\$ 4.849.875,00	\$ 4.849.875,00
AGO		\$ 33.367.500,00	\$ 23.357.250,00	\$ 5.005.125,00	\$ 5.005.125,00
SEP		\$ 33.330.000,00	\$ 23.331.000,00	\$ 4.999.500,00	\$ 4.999.500,00
OCT		\$ 32.850.000,00	\$ 22.995.000,00	\$ 4.927.500,00	\$ 4.927.500,00
NOV		\$ 32.490.000,00	\$ 22.743.000,00	\$ 4.873.500,00	\$ 4.873.500,00
DIC		\$ 39.735.000,00	\$ 27.814.500,00	\$ 5.960.250,00	\$ 5.960.250,00

Fuente: Investigación directa.

Elaborado por: El Investigador.

Tasa de Inflación

La tasa de inflación es el incremento del precio de los bienes y servicios durante un período de tiempo. Este valor se ha tomado de los datos del Banco central y el promedio para el período 2016 es 1.73%, de acuerdo al anexo 16. Este indicador se utilizó para calcular la tasa de descuento.

Tasa de Descuento

Es un factor financiero que se utiliza para determinar el valor del dinero en el tiempo, para calcular el valor actual de un capital futuro o para evaluar proyectos de inversión. Es la tasa mínima que se debe aceptar para invertir en un proyecto.

$$\text{Tasa de descuento} = \% \text{créd} * \% \text{int} + \% \text{inv} * (\% \text{riesgo} + \% \text{infl} + (\% \text{riesgo} * \% \text{infl}))$$

Los datos del proyecto para la ejecución de la alternativa #1 son los siguientes:

Tabla N° 27: Parámetros para la inversión del proyecto

INVERSIÓN PROPIA	100,00%
PRÉSTAMO	0,00%
INTERÉS	0,00%
PRIMA DE RIESGO	20,00%
INFLACIÓN	1.73%

Fuente: Investigación directa.
Elaborado por: El Investigador

$$\text{Tasa de descuento} = 0.00\% * 0.00\% + 100.00\% * 20.00\% + 1.73\% + 20.00\% * 1.73\%$$

$$\text{Tasa de descuento} = 22.08\%$$

VAN

El VAN o Valor Actual Neto se define de la siguiente manera: diferencia entre el dinero que entra a la empresa y la cantidad que se invierte en un mismo producto para ver si realmente es un producto (o proyecto) que puede dar beneficios a la empresa.

La fórmula para el cálculo del VAN es la siguiente, donde I es la inversión, Qn es el flujo de caja del año n, r la tasa de interés con la que estamos comparando y N el número de años de la inversión.

$$VAN = -I + \sum_{n=1}^N \frac{Q_n}{(1+r)^n} \quad (49)$$

- $VAN > 0$: el valor actualizado de los cobros y pagos futuros de la inversión, a la tasa de descuento elegida generará beneficios.
- $VAN = 0$: el proyecto de inversión no generará ni beneficios ni pérdidas, siendo su realización, en principio, indiferente.
- $VAN < 0$: el proyecto de inversión generará pérdidas, por lo que deberá ser rechazado.

TIR

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es la tasa de interés o rentabilidad que ofrece una inversión. Es decir, es el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá una inversión para las cantidades que no se han retirado del proyecto.

Es una medida utilizada en la evaluación de proyectos de inversión que está muy relacionada con el Valor Actualizado Neto (VAN). También se define como el valor de la tasa de descuento que para un proyecto de inversión dado, hace que el VAN sea igual a 0.

La tasa interna de retorno (TIR) nos da una medida relativa de la rentabilidad, es decir, va a venir expresada en tanto por ciento.

TIR < 22.08% SE RECHAZA

TIR > 22.08% SE ACEPTA

Con el flujo de caja de la tabla 28 y la tasa de descuento de 22.08%, se procedió a calcular en el software Microsoft Excel el VAN y la TIR de la alternativa #1:

Cálculo de VAN y TIR

En la tabla 28 se muestra el Valor Actual Neto del proyecto que es positivo hasta el 64.14%, lo que indica que es factible su ejecución.

Tabla N° 28: TIR y VAN del proyecto

TASA DE DESCUENTO	VAN
0,00%	\$ 49.028.719,68
5,00%	\$ 33.700.073,77
10,00%	\$ 23.838.972,63
15,00%	\$ 17.244.469,22
20,00%	\$ 12.675.764,23
25,00%	\$ 9.407.359,99
30,00%	\$ 7.000.482,24
35,00%	\$ 5.181.322,37
40,00%	\$ 3.773.980,08
45,00%	\$ 2.662.369,13
50,00%	\$ 1.767.942,30
55,00%	\$ 1.036.310,65
60,00%	\$ 429.000,33
64,14%	\$ 0,00
65,00%	-\$ 81.746,68
70,00%	-\$ 516.325,16
75,00%	-\$ 889.973,65
80,00%	-\$ 1.214.255,72
85,00%	-\$ 1.498.072,38
90,00%	-\$ 1.748.365,93
95,00%	-\$ 1.970.617,07
100,00%	-\$ 2.169.201,40

Fuente: Investigación directa.
Elaborado por: El Investigador.

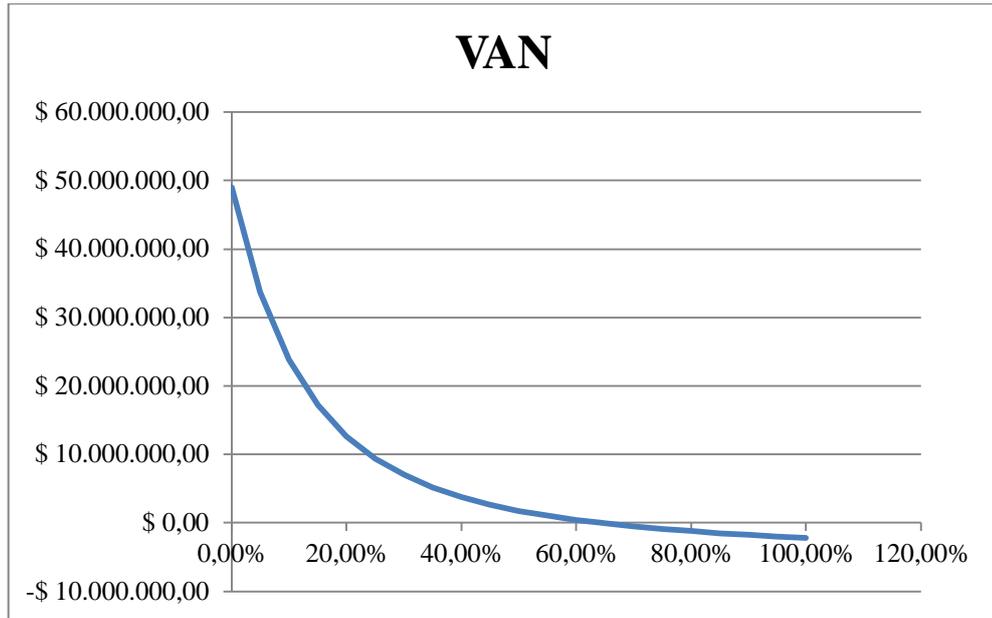


Figura N° 51: VAN del proyecto.
 Fuente: Investigación directa.
 Elaborado por: El Investigador.

Resultados de cálculo de VAN y TIR

Tabla N° 29: Resultados de Van y TIR

RESULTADOS	
TIR	64,14%
VAN	\$ 11.190.814,19

Fuente: Investigación directa.
 Elaborado por: El Investigador.

Resultados

- El proyecto es viable ya que presenta un TIR de 64.14% y es mayor a la Tasa de descuento de 22.08%.
- El proyecto es viable ya que presenta un valor actual neto positivo.

Conclusiones

- La solución planteada para este problema es la disminución del radio de los impulsores ya que presenta una correlación directa con el caudal de trabajo de

las bombas, es decir, si disminuye el radio del impulsor disminuirá el caudal requerido de las bombas principales de transferencia, mejorando el rendimiento de la bomba y procesos, solucionando el problema de transporte por oleoducto de Repsol.

- Se determinaron los diámetros de los impulsores por medio de las leyes de semejanza, con esto se obtendrá un buen funcionamiento de las bombas dentro del punto óptimo de rendimiento.
- Realizado el análisis de las operaciones, procesos del transporte de crudo y con la mejora en el funcionamiento de las bombas principales de transferencia se tendrá una operación más eficiente sin recirculación de producto mediante el by-pass y aumentando la presión de descarga en las estaciones de bombeo.
- Con las simulaciones realizadas con los caudales de 30902 y 25000 BOPD con las alternativas 1 y 2, se determina que la alternativa 1 es la más viable.
- Se realizó el análisis económico de la alternativa 1 determinando por medio de criterios financieros VAN con un valor de \$ 11.190.814,19 y TIR con un valor de 64,14% que es mayor a la tasa de descuento, por lo que la ejecución del proyecto para la implantación de esta propuesta es la más eficiente y económica.

Recomendaciones

- Se recomienda verificar los parámetros de funcionamiento de las bombas principales de transferencia para su óptimo desempeño en el transporte de crudo.
- Luego de la implantación de la propuesta elaborar un nuevo manual de operaciones con los procesos mejorados eliminando los procesos inadecuados.
- Verificar mediante simulaciones las características del producto para un mejor desempeño de las bombas de transferencia principales.
- Se recomienda finalmente la implantación y ejecución de este proyecto porque mejora los procesos, las bombas principales de transferencia trabajarán dentro del punto óptimo de rendimiento y es una alternativa eficiente y económica.

BIBLIOGRAFÍA

- ARBOLEDA, C. (26 de Febrero de 2004). *Reglamento para el transporte del petróleo crudo a través del Sistema de Oleoducto Transecuatoriano y la red de Oleoductos del Distrito Amazónico*. Quito, Pichincha, Ecuador.
- ARZÚ SALAZAR, P. M. (2013). *Propuesta de Optimización del Transporte de Crudo Pesado en una Red de Oleoductos en Guatemala*. Septiembre.
- Asamblea Nacional Constituyente del Ecuador. (28 de Septiembre de 2008). *Constitución de la República del Ecuador*. Montecristi, Manabí, Ecuador.
- BROWN ESPINOZA, D. A., & CHARCOPA CAICEDO, R. J. (2009). *Auditoría energética de la estación de bombeo Esmeraldas del poliducto Esmeraldas-Quito*. Riobamba.
- Cannuta Noval, A. M., Guerra, M. F., Guzmán Plaza, B., & Struck Garza, A. (2008). *Curvas de Bombas*. México D.F.
- ENTRIX. (Abril de 2001). *Oleoducto de Crudos Pesados Estudios Ambientales*. Quito, Pichincha, Ecuador.
- FeedBack Networks. (s.f.). *FeedBack Networks la información viva*. Recuperado el 20 de agosto de 2016, de <https://www.feedbacknetworks.com/cas/experiencia/sol-preguntar-calculador.html>
- GALINDO, E. (2006). *Estadística métodos y aplicaciones*. Quito: ProCiencia.
- GARCÍA, F., & GARCÉS, P. (2013). *La Industrialización del Petróleo en América Latina y el Caribe*. OLADE, págs. 5-20.
- GASDYNCA-REPSOL. (01 de Enero de 2016). *Ingeniería para la optimización de Oleoducto de Bajos Caudales*. Quito, Pichincha, Ecuador.
- GÓMEZ, M. (s.f.). *Bomba Centrífuga*. Callao.
- GRUNDFOS INDUSTRY. (2004). *Guía de referencia de Bombas*.
- GUARANDA MENDOZA, W. (s.f.). *Apuntes sobre la Explotación Petrolera en el Ecuador*. Recuperado el 19 de Noviembre de 2015, de Fundación Regional de Asesoría en Derechos Humanos INREDH ECUADOR: <http://www.inredh.org>

- INEXA, *Ingeniería y Exportación de Tecnología S.L.* (2016). www.inexa.es. Recuperado el 10 de Noviembre de 2016, de <http://www.inexa.es/documentos/ARTICULOS%20INTERES/DETERIORO%20DEL%20RENDIMIENTO%20EN%20BOMBAS.pdf>
- Instituto Geográfico Militar. (s.f.). *Geografía Económica II: Recursos, Sectores e Infraestructura*. Quito, Pichincha, Ecuador.
- LARA RAMOS, F. (2002). *Incremento de Flujo de Transferencia en Oleoducto de Crudos Pesados Mediante Mezcla con Diluyente en la Estación Shushufindi*. Quito-Ecuador.
- MATAIX, C. (1982). *Mecánica de fluidos y Máquinas Hidráulicas*. México D.F.: Ediciones de Castillo.
- McDonald, A. T., Fox, R. W., & McDonald, A. T. (s.f.).
- Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos. (10 de Mayo de 1978). *Ley de Hidrocarburos*. Quito, Pichincha, Ecuador.
- MONALDI, F. (2010). *La Economía Política del Petróleo y el gas en América Latina*. Plataforma Democrática, 1-2.
- MOTT, R. L. (2006). *Mecánica de Fluidos, sexta edición*. México D.F.: Pearson Educación.
- NIETO PÉREZ, I. (s.f.). *Ingemecánica*. Recuperado el 18 de Noviembre de 2015, de <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn206.html#seccion21>
- NOBOA BEJARANO, G. (1 de Noviembre de 2001). *Reglamento para Autorización de Actividades de Comercialización de Combustibles Líquidos Derivados de los Hidrocarburos*. Quito, Pichincha, Ecuador.
- NOBOA BEJARANO, G. (27 de Julio de 2000). *Transporte por Oleoducto de Crudo Pesado (OCP) de propiedad privada*. Quito, Pichincha, Ecuador.
- NURINKIAS SALAZAR, A. (19 de enero de 2014). *El auge petrolero durante las dictaduras en el Ecuador en la década de los 70's*. Quito, Pichincha, Ecuador: Unidad Educativa "La Providencia".
- OIL WATCH. (Octubre de 2004). Recuperado el 01 de Febrero de 2017, de <http://www.oilwatch.org/doc/boletin/bole50es.pdf>

PATZY, F. (s.f.). *Actualidad ambiental*. Recuperado el 1 de febrero de 2017, de <http://www.actualidadambiental.pe/wp-content/uploads/2011/11/Contexto-petrolero-en-AL-F-Patzy.pdf>

STREETER, V. L., WYLIE, E. B., & BEDFORD, K. W. (1999). *Mecánica de Fluidos*. Bogotá: McGraw-Hill.

Universidad del Atlántico y Universidad Autónoma de Occidente. (s.f.). *Ahorro de Energía en Sistemas de Bombas Centrífugas*. Colombia.

ANEXOS

ANEXO 1. PROPIEDADES DEL FLUIDO EN SPF

CLIENT ORDER NUMBER :	230927	SGS ORDER NO.:	3268541
CLIENT ID :	CONSORCIO PETROLERO BLOQUE 16	PRODUCT DESCRIPTION :	Crude Oil - Mezcla SPF Whole Crude
LOCATION :	Deer Park, TX	VESSEL :	Whole Crude
SAMPLE SOURCE :	As Supplied	SOURCE ID :	Linen de Transporte
SAMPLE TYPE :	As Submitted		
SAMPLED :	24-Jul-2013 10:16	RECEIVED :	08-Oct-2013 10:16
ANALYSED :	25-Oct-2013 16:14 - 31-Oct-2013 14:21	COMPLETED :	31-Oct-2013 14:21

PROPERTY	METHOD	RESULT UNITS	MIN	MAX
API at 60°F	ASTM D4052	15.3 °API	--	--
Relative Density (SG) at 60/60°F	ASTM D4052	0.9642 ---	--	--
Density at 15°C	ASTM D4052	963.6 kg/m³	--	--
Pour Point	ASTM D97	-3 °C	--	--
Total Sulfur Content	ASTM D4294	2.55 % (m/m)	--	--
Kinematic Viscosity at 50°C	ASTM D445	766.3 cSt	--	--
Kinematic Viscosity at 80°C	ASTM D445	136.4 cSt	--	--
Kinematic Viscosity at 100°C	ASTM D445	101.2 cSt	--	--
Kinematic Viscosity at 140°F (Viscosity ran at 140 Deg. C.)	ASTM D445	43.18 cSt	--	--
Carbon Residue - Micro Method	ASTM D4530	16.01 % (m/m)	--	--
Asphaltenes as n-Heptane Insolubles	ASTM D3279	14.6 % (m/m)	--	--
Nitrogen Content	ASTM D5762	4457.0 ppm	--	--
Acid Number (Inflection end-point)	ASTM D664 (Method A)	0.21 mg KOH/g	--	--
Water Content by Distillation	ASTM D4006	0.225 % (v/v)	--	--
Characterization Factor K	UOP 375B	11.2 ---	--	--
Salt (as electrometric Chloride)	ASTM D3230	24 lbs/1000 Bbls	--	--
Reid Vapour Pressure - Procedure A (<26 psi)	ASTM D323	1.80 psi	--	--
Mercaptan Sulfur Content	UOP 163	23 ppm (m/m)	--	--
Hydrogen Sulfide Content	UOP 163	<1 ppm (m/m)	--	--
Na, Ni, V in Crude Oils and Residual Fuels by AAS	ASTM D5863 (Method B)			
Vanadium		501 ppm (m/m)	--	--
Nickel		283 ppm (m/m)	--	--

ANEXO 2. PROPIEDADES DEL FLUIDO EN NPF.

CLIENT ORDER NUMBER :	230927	SGS ORDER NO.:	3268533
CLIENT ID :	CONSORCIO PETROLERO BLOQUE 16	PRODUCT DESCRIPTION :	Crude Oil - Whole Crude - Mezcla NPF
LOCATION :	Deer Park, TX	VESSEL :	Whole Crude - Mezcla NPF
SAMPLE SOURCE :	As Supplied	SOURCE ID :	Mezcla - NPF
SAMPLE TYPE :	As Submitted	SAMPLED BY :	SGS
SAMPLED :	24-Jul-2013 15:46	RECEIVED :	04-Sep-2013 10:32
ANALYSED :	19-Sep-2013 13:28 - 25-Sep-2013 14:29	COMPLETED :	25-Sep-2013 14:29
REPORT COMMENT :	Amended 10-8-2013 To correct D240, results were entered as BTU /LB and now are reported correctly as MJ/ Kg Amended 10-23-2013 To change the name of the crude oil to Mezcla NPF per the clients request		

PROPERTY	METHOD	RESULT UNITS	MIN	MAX
API at 60°F	ASTM D4052	18.4 °API	-	-
Relative Density (SG) at 60/60°F	ASTM D4052	0.9440 ---	-	-
Density at 15°C	ASTM D4052	943.4 kg/m³	-	-
Total Sulfur Content	ASTM D4294	2.32 % (m/m)	-	-
Pour Point	ASTM D97	-6 °C	-	-
Kinematic Viscosity at 50°C	ASTM D445	321.8 cSt	-	-
Kinematic Viscosity at 80°C	ASTM D445	70.73 cSt	-	-
Kinematic Viscosity at 100°C	ASTM D445	39.98 cSt	-	-
Kinematic Viscosity at 140°F	ASTM D445	13.89 cSt	-	-
<i>(Viscosity was run at 140 Deg. C.)</i>				
Carbon Residue - Micro Method	ASTM D4530	13.86 % (m/m)	-	-
Asphaltenes as n-Heptane Insolubles	ASTM D3279	11.5 % (m/m)	-	-
Nitrogen Content	ASTM D5762	4343.0 ppm	-	-
Vanadium	ASTM D5863 (Method A)	358.0 ppm	-	-
Nickel	ASTM D5863 (Method A)	162.0 ppm	-	-
Acid Number (Inflection end-point)	ASTM D664 (Method A)	0.1 mg KOH/g	-	-
Water Content by Distillation	ASTM D4006	0.150 % (v/v)	-	-
Characterization Factor K	UOP 375B	11.7 ---	-	-
Salt (as electrometric Chloride)	ASTM D3230	28 lbs/1000 Bbls	-	-
Reid Vapour Pressure - Procedure A (<26 psi)	ASTM D323	1.20 psi	-	-
Mercaptan Sulfur Content	UOP 163	<1 ppm (m/m)	-	-

**ANEXO 3. PROPIEDADES DEL CRUDO A TRANSPORTAR HACIA
OCP.**



Valued Quality. Delivered.

REPORT OF ANALYSIS 14.5 API

TAG:	: SALIDA A SHUSHUFINDI	DATE	: 08, 2014
PORT / TERMINAL	: NPF	YOUR REF	: N/D
SAMPLE OF **	: PETROLEO	ICB REF	: ECL-447-14
DRAWN BY	: REPSOL	WITNESSED BY	: N/A
ANALYZED BY	: INTERTEK	LAB REF. No.	: 533-14-LA

TEMPERATURE (C):	: 23,4	PRESSURE (mm Hg):	731,8	HUMIDITY (%):	56,0
-------------------------	---------------	--------------------------	--------------	----------------------	-------------

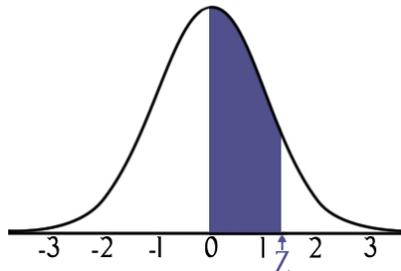
CLIENT	: REPSOL
ADDRESS	: NPF
SAMPLE DATE	: Octubre 04, 2014
RECEPTION DATE	: Octubre 07, 2014
ANALYSIS DATE	: Octubre 08, 2014

Identified as: CRUDO SALIDA A SHUSHUFINDI

	TEST	UNITS	METHOD	RESULTS	UNCERTAINTY	
1.	Viscosidad Cinematica a 100 °F	cSt	ASTM D 445	3750	±	N/A
2.	Viscosidad Cinematica a 130 °F	cSt	ASTM D 445	902,6	±	N/A
3.	Viscosidad Cinematica a 160 °F	cSt	ASTM D 445	292,8	±	N/A
4.	Viscosidad Cinematica a 200 °F	cSt	ASTM D 445	91,58	±	N/A

ANEXO 4. DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD NORMAL ESTÁNDAR

Áreas bajo la distribución de probabilidad Normal Estándar entre la media y valores positivos de Z



Z	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0	0	0,00399	0,00798	0,01197	0,01595	0,01994	0,02392	0,0279	0,03188	0,03586
0,1	0,03983	0,0438	0,04776	0,05172	0,05567	0,05962	0,06356	0,06749	0,07142	0,07535
0,2	0,07926	0,08317	0,08706	0,09095	0,09483	0,09871	0,10257	0,10642	0,11026	0,11409
0,3	0,11791	0,12172	0,12552	0,1293	0,13307	0,13683	0,14058	0,14431	0,14803	0,15173
0,4	0,15542	0,1591	0,16276	0,1664	0,17003	0,17364	0,17724	0,18082	0,18439	0,18793
0,5	0,19146	0,19497	0,19847	0,20194	0,2054	0,20884	0,21226	0,21566	0,21904	0,2224
0,6	0,22575	0,22907	0,23237	0,23565	0,23891	0,24215	0,24537	0,24857	0,25175	0,2549
0,7	0,25804	0,26115	0,26424	0,2673	0,27035	0,27337	0,27637	0,27935	0,2823	0,28524
0,8	0,28814	0,29103	0,29389	0,29673	0,29955	0,30234	0,30511	0,30785	0,31057	0,31327
0,9	0,31594	0,31859	0,32121	0,32381	0,32639	0,32894	0,33147	0,33398	0,33646	0,33891
1	0,34134	0,34375	0,34614	0,34849	0,35083	0,35314	0,35543	0,35769	0,35993	0,36214
1,1	0,36433	0,3665	0,36864	0,37076	0,37286	0,37493	0,37698	0,379	0,381	0,38298
1,2	0,38493	0,38686	0,38877	0,39065	0,39251	0,39435	0,39617	0,39796	0,39973	0,40147
1,3	0,4032	0,4049	0,40658	0,40824	0,40988	0,41149	0,41308	0,41466	0,41621	0,41774
1,4	0,41924	0,42073	0,4222	0,42364	0,42507	0,42647	0,42785	0,42922	0,43056	0,43189
1,5	0,43319	0,43448	0,43574	0,43699	0,43822	0,43943	0,44062	0,44179	0,44295	0,44408
1,6	0,4452	0,4463	0,44738	0,44845	0,4495	0,45053	0,45154	0,45254	0,45352	0,45449
1,7	0,45543	0,45637	0,45728	0,45818	0,45907	0,45994	0,4608	0,46164	0,46246	0,46327
1,8	0,46407	0,46485	0,46562	0,46638	0,46712	0,46784	0,46856	0,46926	0,46995	0,47062
1,9	0,47128	0,47193	0,47257	0,4732	0,47381	0,47441	0,475	0,47558	0,47615	0,4767
2	0,47725	0,47778	0,47831	0,47882	0,47932	0,47982	0,4803	0,48077	0,48124	0,48169
2,1	0,48214	0,48257	0,483	0,48341	0,48382	0,48422	0,48461	0,485	0,48537	0,48574
2,2	0,4861	0,48645	0,48679	0,48713	0,48745	0,48778	0,48809	0,4884	0,4887	0,48899
2,3	0,48928	0,48956	0,48983	0,4901	0,49036	0,49061	0,49086	0,49111	0,49134	0,49158
2,4	0,4918	0,49202	0,49224	0,49245	0,49266	0,49286	0,49305	0,49324	0,49343	0,49361
2,5	0,49379	0,49396	0,49413	0,4943	0,49446	0,49461	0,49477	0,49492	0,49506	0,4952
2,6	0,49534	0,49547	0,4956	0,49573	0,49585	0,49598	0,49609	0,49621	0,49632	0,49643
2,7	0,49653	0,49664	0,49674	0,49683	0,49693	0,49702	0,49711	0,4972	0,49728	0,49736
2,8	0,49744	0,49752	0,4976	0,49767	0,49774	0,49781	0,49788	0,49795	0,49801	0,49807
2,9	0,49813	0,49819	0,49825	0,49831	0,49836	0,49841	0,49846	0,49851	0,49856	0,49861
3	0,49865	0,49869	0,49874	0,49878	0,49882	0,49886	0,49889	0,49893	0,49896	0,499

Z	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
3,1	0,49903	0,49906	0,4991	0,49913	0,49916	0,49918	0,49921	0,49924	0,49926	0,49929
3,2	0,49931	0,49934	0,49936	0,49938	0,4994	0,49942	0,49944	0,49946	0,49948	0,4995
3,3	0,49952	0,49953	0,49955	0,49957	0,49958	0,4996	0,49961	0,49962	0,49964	0,49965
3,4	0,49966	0,49968	0,49969	0,4997	0,49971	0,49972	0,49973	0,49974	0,49975	0,49976
3,5	0,49977	0,49978	0,49978	0,49979	0,4998	0,49981	0,49981	0,49982	0,49983	0,49983
3,6	0,49984	0,49985	0,49985	0,49986	0,49986	0,49987	0,49987	0,49988	0,49988	0,49989
3,7	0,49989	0,4999	0,4999	0,4999	0,49991	0,49991	0,49992	0,49992	0,49992	0,49992
3,8	0,49993	0,49993	0,49993	0,49994	0,49994	0,49994	0,49994	0,49995	0,49995	0,49995
3,9	0,49995	0,49995	0,49996	0,49996	0,49996	0,49996	0,49996	0,49996	0,49997	0,49997
4	0,49997	0,49997	0,49997	0,49997	0,49997	0,49997	0,49998	0,49998	0,49998	0,49998

ANEXO 5. TABLA DE DATOS 15/07/2015

						BOMBAS TRANSFERENCIA								
ENTRADA ESTACIÓN						RPM	SUCCIÓN		DESCARGA		SALIDA ESTACIÓN			
HORA	PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	CAUDAL [GPM]	μ [Cp]	ρ [kg/m ³]		PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	PRESIÓN [PSI]	CAUDAL [GPM]	μ [Cp]	ρ [lb/ft ³]
00H00	74,5	38,4	895,3	3474,56	963,6	3570	68,3	75,3	1178	73,5	1151	895	253,55	963,6
01H00	74,2	37,5	899	3822,97	963,6	3570	57,5	75	1171	73,0	1160	900,1	261,06	963,6
02H00	75	37,5	905,2	3822,97	963,6	3569	59,3	75	1172	73,5	1152	905,2	253,55	963,6
03H00	74,3	38	901	3643,54	963,6	3569	59,4	75	1171	73,5	1159	901,3	253,55	963,6
04H00	73,9	37	895	4012,67	963,6	3571	58,6	74,9	1170	74,0	1160	896,3	246,3	963,6
05H00	75,1	38	902,5	3643,54	963,6	3570	59,4	75,3	1173	73,0	1152	902,8	261,06	963,6
06H00	75	38,3	900	3540,56	963,6	3569	60,0	75	1178	73,0	1155	900	261,06	963,6
07H00	74	38	901,5	3643,54	963,6	3570	62,3	75	1172	73,0	1158	901,2	261,06	963,6
08H00	74	38,5	900	3473,77	963,6	3570	65,7	74,8	1172	73,0	1151	901,5	261,06	963,6
09H00	74,2	38,5	906,2	3473,77	963,6	3568	57,3	74,9	1176	73,5	1155	946	253,55	963,6
10H00	73,5	39	902,3	3313,08	963,6	3570	56,3	75,1	1170	74,1	1154	900,3	244,88	963,6

HORA	ENTRADA ESTACIÓN					RPM	SUCCIÓN		DESCARGA		SALIDA ESTACIÓN			
	PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	CAUDAL [GPM]	μ [Cp]	ρ [kg/m ³]		PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	PRESIÓN [PSI]	CAUDAL [GPM]	μ [Cp]	ρ [lb/ft ³]
11H00	74	38,4	896,2	3474,56	963,6	3571	59,5	75	1174	74,0	1156	956,8	246,3	963,6
12H00	74	39	889	3313,08	963,6	3570	55,6	75,5	1171	74,5	1157	888,6	239,3	963,6
13H00	74,8	39	898,6	3313,08	963,6	3570	57,0	76	1176	73,0	1157	898,5	261,06	963,6
14H00	75,3	38	896	3643,54	963,6	3568	57,0	75	1176	74,0	1155	897,2	246,3	963,6
15H00	74,2	38	903,5	3643,54	963,6	3569	58,6	74,8	1174	73,5	1158	903,6	253,55	963,6
16H00	75	38	901,6	3643,54	963,6	3570	57	74,9	1172	74,5	1157	902	239,3	963,6
17H00	75	38,7	902,5	3408,44	963,6	3570	59	73,5	1178	72,0	1155	902,1	276,93	963,6
18H00	74,7	38,5	900	3473,77	963,6	3569	63,4	74,5	1172	72,0	1159	889,3	276,93	963,6
19H00	74,1	38,5	903	3473,77	963,6	3570	58	75	1172	73,5	1158	901	253,55	963,6
20H00	74,8	38,8	908,5	3376,3	963,6	3570	59,4	75,1	1171	73,6	1157	901,5	252,08	963,6
21H00	73	39,3	901,5	3220,8	963,6	3569	57	75	1170	73,5	1153	887,2	253,55	963,6
22H00	75	38,7	900	3408,44	963,6	3570	59,3	74,8	1170	74,0	1157	902,5	246,3	963,6
23H00	74,8	38,3	908,5	3540,56	963,6	3570	57	74,8	1172	74,0	1152	900	246,3	963,6

ANEXO 6. TABLA DE DATOS 17/07/2015

						BOMBAS TRANSFERENCIA								
ENTRADA ESTACIÓN						RPM	SUCCIÓN		DESCARGA		SALIDA ESTACIÓN			
HORA	PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	CAUDAL [GPM]	μ [Cp]	ρ [kg/m ³]		PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	PRESIÓN [PSI]	CAUDAL [GPM]	μ [Cp]	ρ [lb/ft ³]
00H00	82,5	38	920	3644,9	963,6	3568	67,3	77	1177	75,2	1156	895	229,92	963,6
01H00	82,5	38	928,3	3644,9	963,6	3572	66,0	76,7	1175	74,9	1150	900,1	233,88	963,6
02H00	81,4	37,5	928,6	3822,16	963,6	3570	68,3	78	1177	76,3	1158	905,2	216,06	963,6
03H00	81,7	37	928	4009,68	963,6	3570	67,0	77,5	1176	75,5	1153	901,3	226,03	963,6
04H00	81,3	37	925	4009,68	963,6	3569	68,5	77,5	1176	75,8	1151	896,3	222,23	963,6
05H00	82	39,3	929,3	3226,13	963,6	3570	67,5	77,5	1176	75,8	1156	902,8	222,23	963,6
06H00	82	38	918	3644,9	963,6	3571	66,0	77,3	1176	75,7	1156	900	223,48	963,6
07H00	82,4	38	925	3644,9	963,6	3570	68,0	76,9	1175	74,9	1158	901,2	233,88	963,6
08H00	80	38,5	925,2	3476,68	963,6	3568	67,3	76,5	1175	74,7	1159	901,5	236,57	963,6
09H00	81,5	38,5	925	3476,68	963,6	3569	66,0	77,3	1175	75,8	1159	906	222,23	963,6
10H00	81,8	39	931	3317,56		3569	65,0	76,9	1173	75,5	1157	900,3	226,03	963,6

HORA	ENTRADA ESTACIÓN					RPM	SUCCIÓN		DESCARGA		SALIDA ESTACIÓN			
	PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	CAUDAL [GPM]	μ [Cp]	ρ [kg/m ³]		PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	PRESIÓN [PSI]	CAUDAL [GPM]	μ [Cp]	ρ [lb/ft ³]
11H00	82	40,2	924,5	2968,88	963,6	3570	65,3	76,9	1175	75,5	1152	956,8	226,03	963,6
12H00	81,9	40	918	3023,93	963,6	3568	68,0	78	1175	77,0	1152	888,6	207,77	963,6
13H00	82,5	41	926,3	2760	963,6	3567	68,0	77,3	1173	75,5	1158	898,5	226,03	963,6
14H00	81,5	41,5	925	2638,13	963,6	3570	68,0	77,1	1175	75,9	1156	897,2	220,97	963,6
15H00	82	40	920	3023,93	963,6	3570	67,5	77,5	1176	76,0	1152	903,6	219,73	963,6
16H00	81,8	39	927,1	3317,56	963,6	3569	69,2	78	1175	76,7	1155	902	211,28	963,6
17H00	82	41,5	925	2638,13	963,6	3568	67	77,1	1174	75,3	1151	902,1	228,61	963,6
18H00	80,4	41,5	925,6	2638,13	963,6	3569	67,5	78,1	1177	75,8	1155	889,3	222,23	963,6
19H00	81	38	925	3644,9	963,6	3570	66	77,5	1174	76,5	1158	901	213,65	963,6
20H00	80,7	40,5	924,1	2888,47	963,6	3569	66	76,9	1173	74,9	1153	901,5	233,88	963,6
21H00	79,2	39,3	928	3226,13	963,6	3569	66,5	77,5	1177	75,8	1150	887,2	222,23	963,6
22H00	81	38,7	925,3	3411,999	963,6	3568	67	77,3	1176	75,4	1150	902,5	227,32	963,6
23H00	81	40	925	3023,93	963,6	3570	67	77,9	1172	75,4	1155	924	227,32	963,6

ANEXO 7. TABLA DE DATOS 19/07/2015

						BOMBAS TRANSFERENCIA								
ENTRADA ESTACIÓN						RPM	SUCCIÓN		DESCARGA		SALIDA ESTACIÓN			
HORA	PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	CAUDAL [GPM]	μ [Cp]	ρ [kg/m ³]		PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	PRESIÓN [PSI]	CAUDAL [GPM]	μ [Cp]	ρ [lb/ft ³]
00H00	75	38,5	918	3473,77	963,6	3570	61,3	75,6	1172	73,4	1152	910	255,03	963,6
01H00	76,3	37,5	905	3822,97	963,6	3569	60,5	76	1176	75,0	1158	915	232,55	963,6
02H00	76	38	910	3643,54	963,6	3571	60,5	75,5	1171	74,3	1156	918,5	242,07	963,6
03H00	76,5	38,3	915	3540,56	963,6	3565	60,3	75,5	1173	74,5	1152	920	239,3	963,6
04H00	75,2	37	913,5	4012,67	963,6	3565	59,0	76	1174	74,5	1152	914	239,3	963,6
05H00	75	37,6	914	3786,28	963,6	3570	58,0	75,5	1172	75,0	1156	946	232,55	963,6
06H00	75	37,9	918	3678,63	963,6	3565	58,0	75	1176	75,1	1158	915,6	231,23	963,6
07H00	76	35,9	905	4469,55	963,6	3568	59,3	75	1171	75,1	1158	918,6	233,88	963,6
08H00	76,3	38	916	3643,54	963,6	3569	59,0	75	1171	75,5	1153	914,3	226,03	963,6
09H00	75	38,2	913	3574,51	963,6	3568	59,0	75	1172	75,4	1154	905,6	227,32	963,6
10H00	76,2	35	916	4888,28	963,6	3569	59,5	75,6	1175	75,4	1153	900,8	227,32	963,6

HORA	ENTRADA ESTACIÓN					RPM	SUCCIÓN		DESCARGA		SALIDA ESTACIÓN			
	PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	CAUDAL [GPM]	μ [Cp]	ρ [kg/m ³]		PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	PRESIÓN [PSI]	CAUDAL [GPM]	μ [Cp]	ρ [lb/ft ³]
11H00	74	37,6	916	3786,28	963,6	3570	61,0	75,3	1174	75,3	1153	917,3	228,61	963,6
12H00	73	38	923	3643,54	963,6	3570	61,3	74,9	1175	74,9	1154	930	233,88	963,6
13H00	75	39	914	3313,08	963,6	3569	60,5	75,7	1173	75,0	1153	914,8	232,55	963,6
14H00	76	38,6	916	3440,93	963,6	3569	62,0	76	1175	75,0	1155	914	232,55	963,6
15H00	76	36,4	915	4254,83	963,6	3568	62,0	75	1172	75,1	1157	916	233,88	963,6
16H00	75,8	36,9	915	4051,91	963,6	3569	62,5	75	1170	75,0	1156	918	232,55	963,6
17H00	76	35	915	4888,28	963,6	3567	60,3	75,2	1171	75,3	1158	914	228,61	963,6
18H00	75,9	36,5	923	4213,32	963,6	3569	59,3	75,1	1173	75,3	1153	914	228,61	963,6
19H00	76,5	37	913	4012,67	963,6	3570	60,2	74,9	1172	74,2	1152	917	243,47	963,6
20H00	75,5	36	910	4425,62	963,6	3571	59,3	75,9	1171	75,5	1153	908,6	226,03	963,6
21H00	75	38,5	915	3473,77	963,6	3571	60,3	76,2	1170	75,0	1152	910,5	232,55	963,6
22H00	75	38	915	3643,54	963,6	3569	61	75,3	1172	75,0	1154	905,3	232,55	963,6
23H00	75	38,5	916	3473,77	963,6	3570	61	74,8	1173	75,0	1154	914	232,55	963,6

ANEXO 8. TABLA DE DATOS 21/07/2015

HORA	ENTRADA ESTACIÓN					RPM	BOMBAS TRANSFERENCIA				SALIDA ESTACIÓN			
	PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	CAUDAL [GPM]	μ [Cp]	ρ [kg/m ³]		SUCCIÓN		DESCARGA		PRESIÓN [PSI]	CAUDAL [GPM]	μ [Cp]	ρ [lb/ft ³]
							PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]				
00H00	76,2	38,9	918	3344,52	963,6	3569	62,5	76,7	1175	74,5	1156	912	239,3	963,6
01H00	75,3	39	905	3313,08	963,6	3568	63,0	77	1176	75,6	1151	915	224,75	963,6
02H00	75	39,5	910	3160,93	963,6	3570	63,5	77,1	1172	75,8	1153	915	222,23	963,6
03H00	75	39,2	915	3251,23	963,6	3570	64,0	77	1171	75,6	1155	918	224,75	963,6
04H00	76,7	39,6	913,5	3131,48	963,6	3570	62,3	76,2	1172	74,9	1156	921	233,88	963,6
05H00	79	38,5	914	3473,77	963,6	3569	62,0	75	1176	73,9	1155	910	247,73	963,6
06H00	79	38,8	918	3376,3	963,6	3569	61,6	77,3	1176	75,1	1154	916	231,23	963,6
07H00	78,5	37,9	905	3678,63	963,6	3567	61,0	76	1172	74,6	1150	914	237,93	963,6
08H00	76	38,6	916	3440,93	963,6	3570	62,7	76,9	1172	73,8	1156	913	249,17	963,6
09H00	76,5	39,6	913	3131,48	963,6	3570	60,0	77	1173	74,5	1152	916	239,3	963,6
10H00	76,5	37,7	916	3750	963,6	3569	59,5	77	1175	74,5	1151	920	239,3	963,6
11H00	77	38,2	916	3574,51	963,6	3568	60,1	77,1	1174	75,7	1150	918	223,48	963,6
12H00	77	39	923	3313,08	963,6	3569	60,9	75,9	1178	73,1	1155	913	259,54	963,6

HORA	ENTRADA ESTACIÓN					RPM	SUCCIÓN		DESCARGA		SALIDA ESTACIÓN			
	PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	CAUDAL [GPM]	μ [Cp]	ρ [kg/m ³]		PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	PRESIÓN [PSI]	CAUDAL [GPM]	μ [Cp]	ρ [lb/ft ³]
13H00	77	37,9	914	3678,63	963,6	3568	61,0	75,8	1177	72,9	1150	907	262,6	963,6
14H00	77,3	37,2	916	3935,52	963,6	3569	61,0	78	1176	76,0	1154	910	219,73	963,6
15H00	77	36,9	915	3973,88	963,6	3569	61,0	78,1	1177	76,5	1152	916	213,65	963,6
16H00	76,9	37,1	915	3973,88	963,6	3569	61,3	77,6	1172	74,9	1156	921	233,88	963,6
17H00	77	37	915	4012,67	963,6	3570	62,2	77,9	1173	74,2	1151	905	243,47	963,6
18H00	76,5	37	923	4012,67	963,6	3570	61	78	1173	75,2	1154	909	229,92	963,6
19H00	77,1	36,5	913	4213,32	963,6	3569	62,9	76,9	1177	74,3	1155	916	242,07	963,6
20H00	76,2	39,8	910	3073,53	963,6	3571	60,9	77,1	1172	73,6	1152	915	252,08	963,6
21H00	77,3	39,1	915	3281,99	963,6	3571	61	78,2	1175	75,2	1151	917	229,92	963,6
22H00	76,8	39	915	3313,08	963,6	3569	61,2	75,5	1178	75,0	1154	906	232,55	963,6
23H00	77	39	916	3313,08	963,6	3571	61	77,3	1176	75,0	1153	913	232,55	963,6

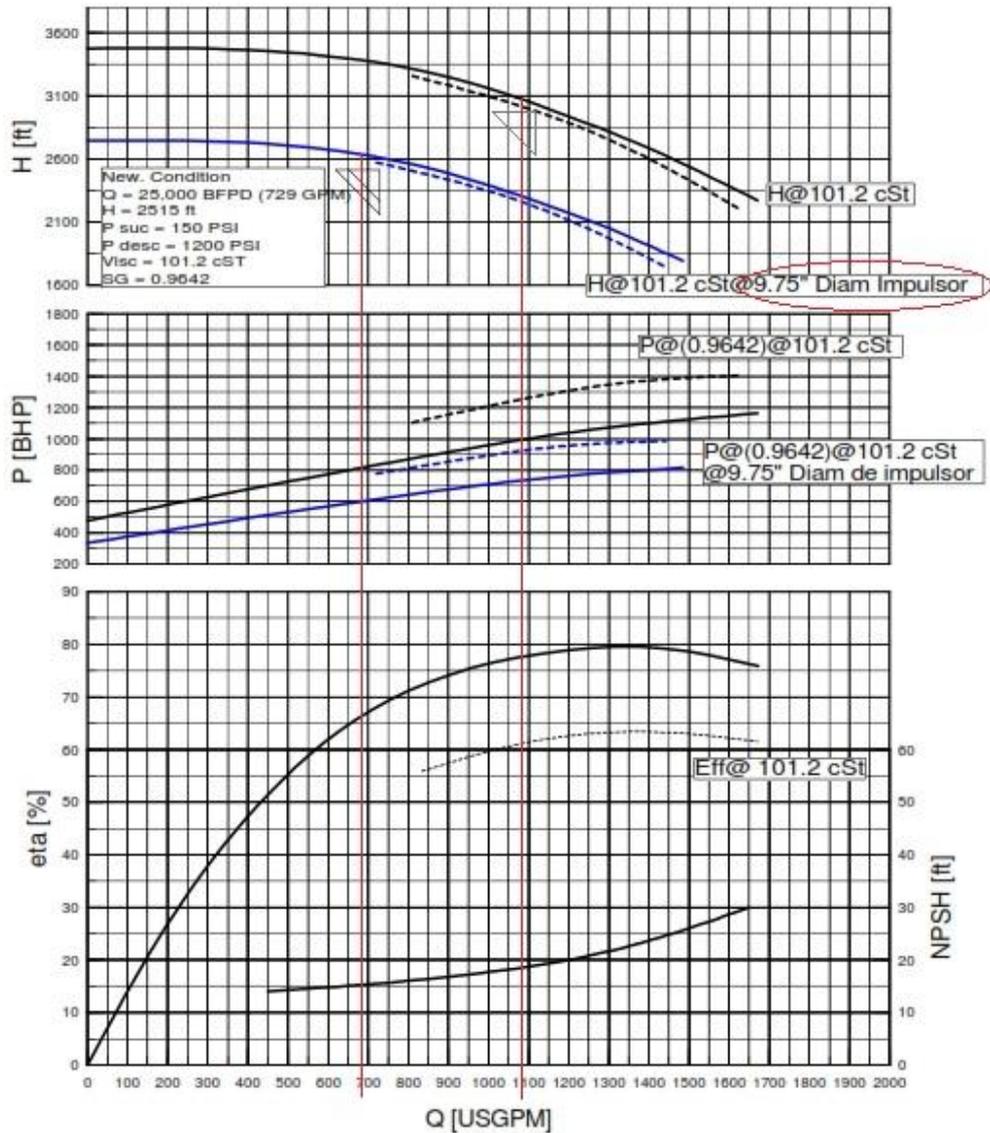
ANEXO 9. TABLA DE DATOS 23/07/2015

						BOMBAS TRANSFERENCIA								
ENTRADA ESTACIÓN						RPM	SUCCIÓN		DESCARGA		SALIDA ESTACIÓN			
HORA	PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	CAUDAL [GPM]	μ [Cp]	ρ [kg/m ³]		PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	PRESIÓN [PSI]	CAUDAL [GPM]	μ [Cp]	ρ [lb/ft ³]
00H00	78,5	39,6	910,3	3131,48	963,6	3570	63,2	77	1174	74,0	1159	946	246,3	963,6
01H00	79,6	38,5	916	3473,77	963,6	3570	62,3	76,3	1178	73,6	1159	924	252,08	963,6
02H00	79,6	38,9	905	3344,52	963,6	3571	65,0	79	1173	75,0	1155	916,3	232,55	963,6
03H00	78,6	38,4	906	3506,98	963,6	3569	62,3	75	1177	73,2	1152	905,7	258,03	963,6
04H00	78,5	39	906	3313,08	963,6	3569	61,0	78,6	1179	77,0	1154	914	207,77	963,6
05H00	78,5	39	913	3313,08	963,6	3570	61,2	74,2	1177	72,6	1159	916	267,27	963,6
06H00	79,6	37,6	913	3786,28	963,6	3570	61,2	76,9	1178	74,2	1157	907	243,47	963,6
07H00	78,5	39	917	3313,08	963,6	3569	65,0	77,7	1178	75,1	1154	916	231,23	963,6
08H00	82,5	38	900	3643,54	963,6	3568	63,5	77,1	1177	75,1	1153	915,6	231,23	963,6
09H00	79	38,2	906	3574,51	963,6	3568	64,9	76,9	1173	74,7	1159	899	236,57	963,6
10H00	79	35	916	4888,28	963,6	3569	62,0	77,6	1174	76,0	1157	915	219,73	963,6
11H00	78,6	37,6	913	3786,28	963,6	3571	63,5	77	1177	74,2	1152	914	243,47	963,6
12H00	77,4	38	918	3643,54	963,6	3570	62,0	77,9	1179	73,9	1156	905	247,73	963,6

HORA	ENTRADA ESTACIÓN					RPM	SUCCIÓN		DESCARGA		SALIDA ESTACIÓN			
	PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	CAUDAL [GPM]	μ [Cp]	ρ [kg/m ³]		PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	PRESIÓN [PSI]	TEMP [°C]	PRESIÓN [PSI]	CAUDAL [GPM]	μ [Cp]	ρ [lb/ft ³]
13H00	79,3	39	906	3313,08	963,6	3568	62,2	78,1	1179	75,5	1152	912,6	226,03	963,6
14H00	81,5	38,6	913	3440,93	963,6	3569	63,5	78	1174	75,6	1152	920	224,75	963,6
15H00	79,9	36,4	900,6	4254,83	963,6	3573	64,9	77,2	1176	73,5	1154	916	253,55	963,6
16H00	81	36,9	918	4051,91	963,6	3570	62,5	76,5	1175	72,9	1158	908,6	262,6	963,6
17H00	78,6	35	907,9	4888,28	963,6	3571	62	77,8	1178	73,5	1152	904	253,55	963,6
18H00	78,6	36,5	912,2	4213,32	963,6	3570	63,5	79,6	1175	76,6	1153	925,6	212,46	963,6
19H00	79,3	37	916	4012,67	963,6	3568	62	78,6	1174	74,5	1156	914	239,3	963,6
20H00	79	36	905,5	4425,62	963,6	3569	69,8	79,5	1176	76,1	1152	919,5	218,5	963,6
21H00	79	38,5	912	3473,77	963,6	3570	64	76,3	1174	72,3	1157	910	272,05	963,6
22H00	80,6	38	910	3643,54	963,6	3569	63,5	78,6	1176	74,0	1154	917,5	246,3	963,6
23H00	77	38,5	907	3473,77	963,6	3571	62	78,2	1176	74,9	1154	901	233,88	963,6

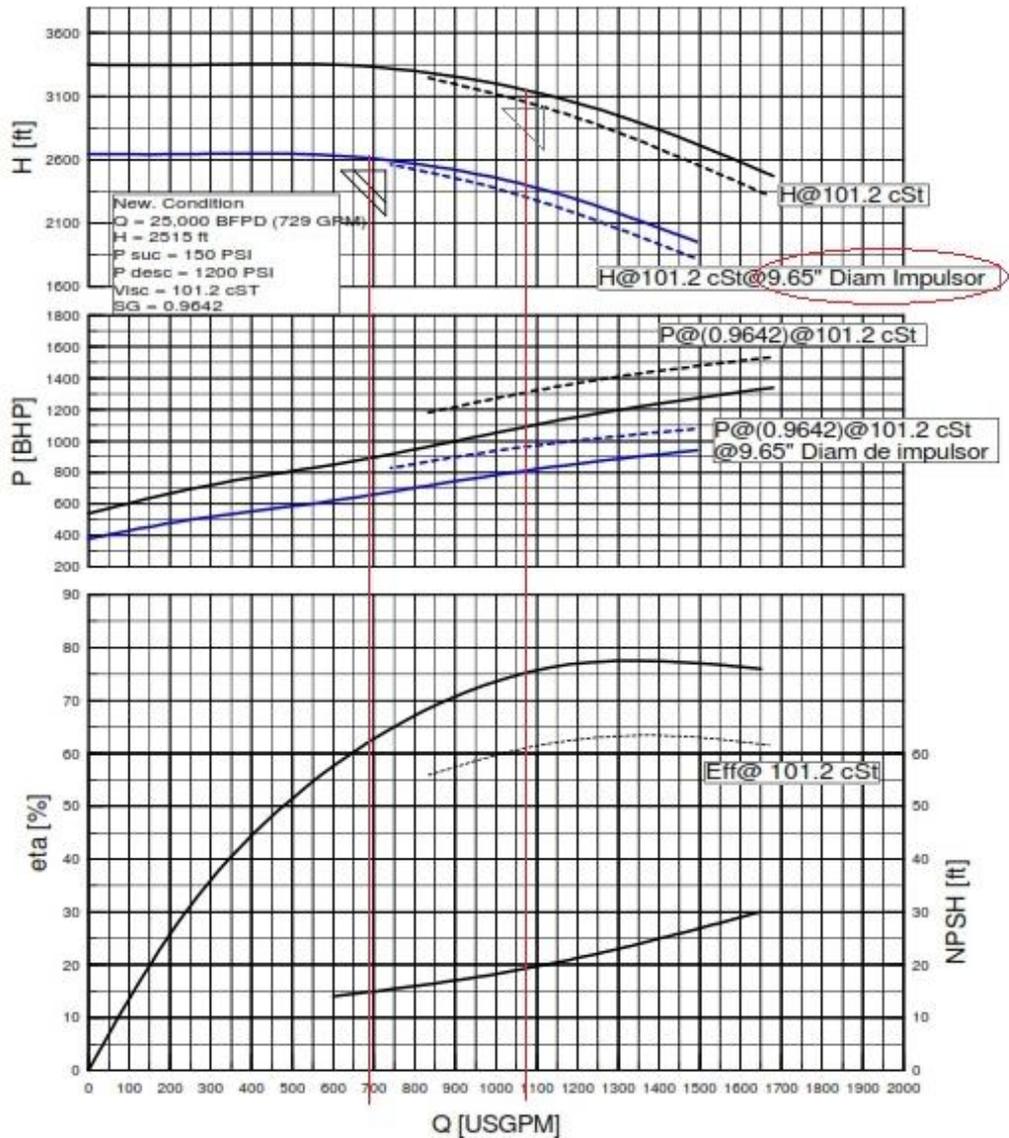
ANEXO 10. CURVAS ORIGINALES Y MODIFICADAS BOMBAS PRINCIPALES DE TRANSFERENCIA NPF

SULZER		Dibujo No. Drawing-No.	Material	No. Orden 01718452	
Curva de Prueba SC-0097 Test Curve Ref:62524		Impulsor Impeller	613MSD	Sulzer Comm.Nr.	
Cliente Customer REPSOL YPF-ECUADOR		Difusor Diffuser	813CPB 1&2	Tipo Type 6x8x11D MSD 7 STG	
Orden Compra Order No. 4500023662		Gehäuse Casing		Bomba de Transferencia NPF	
No. Identificación Ident No. BOMBA TRANSF CRUDO					
No. Serie Item No. P-1110A		D2 Diseño: D2 design. \varnothing 10.75"		Reporte No. Test Report No.	Fecha dated 14.06.16
Nombre Name PONCE		D2 mín. D2 min. \varnothing		n= 3560 t/min.	i= 7 Pasos Stages
Fecha Date 14.06.16 gez.: sig.:		D2 máx. D2 max. \varnothing 11.50"		DN _s 8"	DN _d 6"



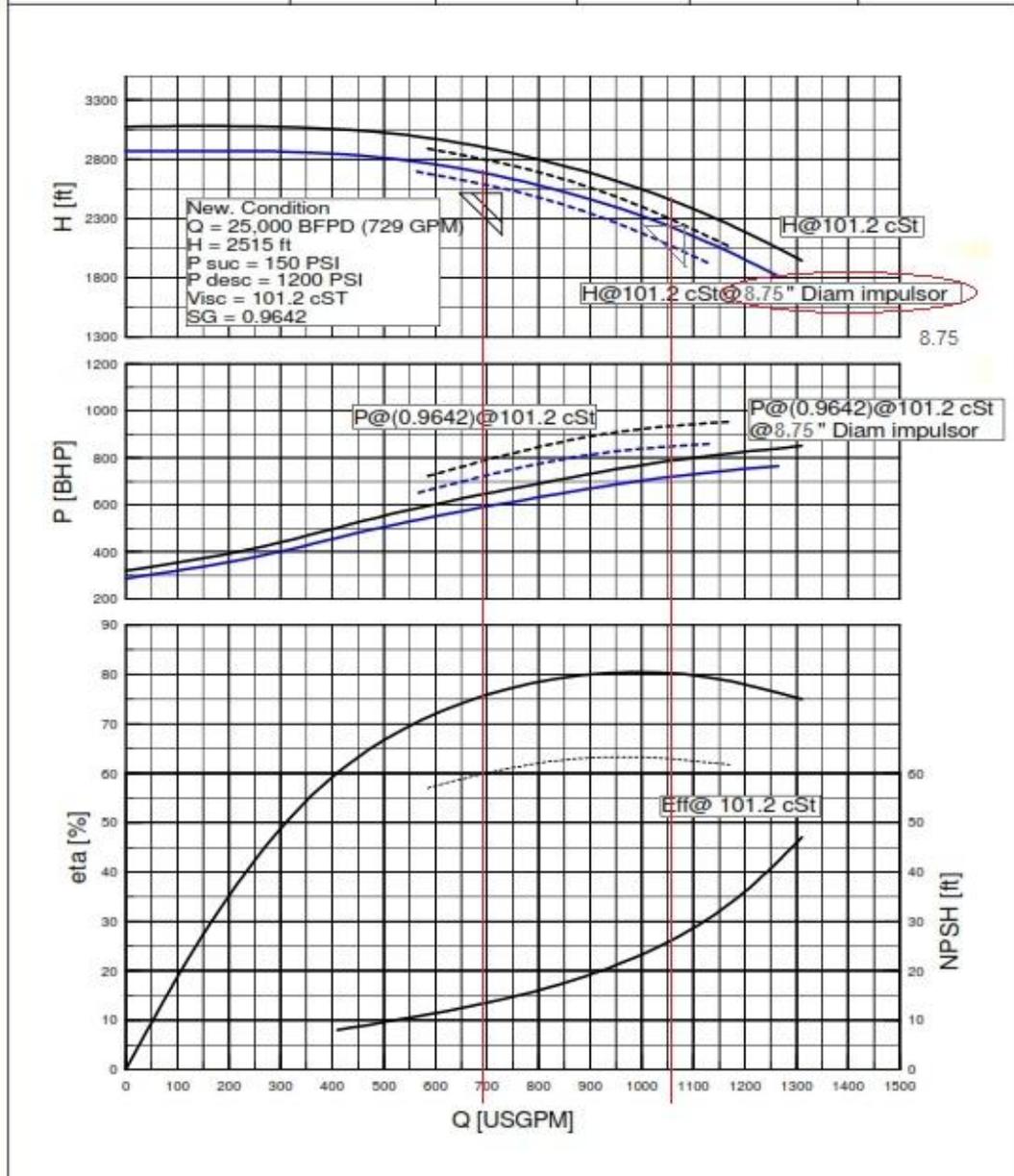
ANEXO 11. CURVAS ORIGINALES Y MODIFICADAS BOMBAS PRINCIPALES DE TRANSFERENCIA POMPEYA

SULZER		Dibujo No. Drawing-No.	Material	No. Orden 01718381-02	
Curva de Prueba SC-0099 Test Curve Ref: 62492		Impulsor Impeller	813MSD	Sulzer Comm.Nr.	
Cliente Customer: FLOWTRONEX / REPSOL		YPF	813CPB-1&2	Tipo Type: 6x8x11D MSD 7 STG	
Orden Compra Order No.: 2009092		Diffusor Diffuser		POMPEYA	
BOMBA TRANF. CRUDO		Cashäuse Casing			
No. Serie. Item No.: P-4610B	D2 Diseño. D2 design: Ø 11.06" STG 1,3,6 & 7			Reporte No. Test Report No.	Fecha dated: 14.06.16
Nombre Name: PONCE	D2 mín. D2 min.: Ø			n = 3560 t/min.	l = 7 Pasos Stages
Fecha Date: 14.06.16	D2 máx. D2 max.: Ø 11.50"			DN _s 8"	DN _d 6"



ANEXO 12. CURVAS ORIGINALES Y MODIFICADAS BOMBAS PRINCIPALES DE TRANSFERENCIA SHUSHUFINDI

SULZER		Dibujo No. Drawing-No.		Material		No. Orden 1E091 / 94	
Curva de Prueba SC-0101 Test Curve Ref: 49497		Impulsor Impeller		413MSD-13		Sulzer Comm.Nr.	
Cliente BROWN & ROOT / MAXUS		Difusor Diffuser		413MSD-21 & 22		Tipo Type	
Orden Compra Order No.		Cebaluz Casing				SHUSHUFINDI	
No. Identif. Ident No.		D2 Diseño D2 design		Venas, Vane		Reporte No. /09 Test Report No.	
No. Serie Item No.		Ø 10.09"		Ø 10.09"		Fecha dated	
Nombre Name		D2 min. D2 min.				n= 3570 t/min. l= 7 Pasos Stages	
Fecha Date		D2 max. D2 max.				DN _s 6" DN _d 4"	
14.06.16		Ø 8.25"					
gez.: sig.:		Ø 10.25"					



ANEXO 13. DESARROLLO DE LA MATRIZ DE ALTERNATIVAS

Se realizó una matriz de evaluación para determinar la mejor alternativa en el transporte de crudo, la matriz se realizó tomando en cuenta varios criterios y son los siguientes:

1. Estudios especiales
2. Criterios de ambiente
3. Criterios técnicos
4. Criterios económicos

A cada uno de estos criterios se le asigna un puntaje por las siguientes consideraciones:

Estudios Especiales

Los estudios especiales son utilizados como insumos importantes o claves en la fase de diseño de los proyectos, los cuales garantizan la eficiencia en la construcción, operatividad y favorecen a definir la vida útil del proyecto. Permiten identificar estudios indispensables y/o necesarios para concretar una o alguna de las alternativas planteadas, y que su tiempo de obtención de estos resultados es vital para el inicio y desarrollo del proyecto. El diseñador asignará mayor puntaje a aquellos estudios que considere indispensables para lograr el objetivo en función de la importancia relativa del estudio especial con cada opción evaluada. Los estudios considerados para la matriz fueron:

- Levantamiento Topográfico y Detección de Metales.
- Estudio de Impacto Ambiental.

Criterios ambientales

Se considerarán en este punto los criterios a suponer en el estudio de impacto ambiental del proyecto en caso de requerirse.

- Afectación a recursos naturales (vegetación, cuerpos de agua, entre otros).
- Contaminación atmosférica.
- Distancia respecto a áreas clasificadas.

Criterios Técnicos

Los criterios técnicos permiten evaluar, a través de una ponderación cualitativa y relativa, las ventajas técnicas, los aspectos y/o condiciones que influyen sobre las formas de ejecutar la construcción; llevar a cabo las operaciones, disponer de los servicios industriales, garantizar la mantenibilidad, confiabilidad y seguridad para la satisfacción y rápida identificación de la opción seleccionada.

A continuación se destacan los criterios técnicos seleccionados para la matriz de evaluación:

a) Operacionales

Los criterios operacionales permitirán calificar dentro de la matriz las ventajas y desventajas que presentan entre sí, cuando se analizan aspectos operacionales relevantes para el buen funcionamiento y aceptación por parte del grupo operacional. Los sub-criterios operacionales considerados en la evaluación fueron:

- *Comportamiento hidráulico*: califica el requerimiento en presión de bombeo que requieren las bombas de transferencia de crudo, de acuerdo a la ubicación de las estaciones.
- *Continuidad en filosofía*: analiza los cambios obligantes que pueden inferirse sobre la filosofía operacional actual como consecuencia de las nuevas condiciones de operación, de forma que provoque cambio relevante en la forma actual de operar.
- *Accesibilidad de operaciones*: mide la garantía que ofrece el sitio de implantación para crear todas las facilidades necesarias para dotar de la mejor accesibilidad al personal operacional y de mantenimiento a las instalaciones propias.

b) Constructibilidad

Este parámetro evalúa el grado de complejidad de las opciones desde el punto de vista de la construcción. Los sub-parámetros de evaluación de este factor fueron:

- *Impacto sobre las instalaciones existentes:* califica el nivel de impacto ya sea por interrupción de servicios, reubicación de procesos y/o equipos, cambios en la configuración de accesibilidad a procesos, alteraciones en áreas de seguridad, entre otros, como consecuencia del proceso constructivo.
- *Impacto de construcción sobre las operaciones:* incidencia desfavorable sobre las operaciones de producción con afectación económica.
- *Complejidad para la instalación:* se interpreta el grado de complejidad o dificultad para adecuar la instalación de las nuevas bombas, acoples a tuberías existentes, conexiones eléctricas y de los sistemas de instrumentación y control como una función de la extensión y ubicación del área de procesos destinada para la construcción. Ocurre normalmente en instalaciones con áreas operacionales congestionadas por tuberías, equipos e instrumentos u otros. La opción con menor grado de complejidad para la instalación ofrece ventaja relativa con respecto a las otras.
- *Disponibilidad de espacio requerido:* establece una comparación entre la extensión de área disponible para logra una construcción e implantación acorde a las exigencias del proceso.
- *Tiempo de procura:* involucra el tiempo requerido en espera para realizar todo el proceso de compra y envío de los equipos e insumos para la construcción.
- *Tiempo de construcción:* aquella opción visualizada con menor tiempo de construcción en función al número de actividades involucradas y necesarias para implantación ofrece ventajas para el proyecto.
- *Aprovechamiento de las rutas existentes:* mide la oportunidad de aprovechar al máximo las rutas existentes de tuberías, bancadas de cables eléctricos o instrumentación.

c) Mantenimiento

Este criterio valoriza en cada opción la posibilidad de poner en práctica actividades de mantenimiento preventivo y/o correctivos, considerando como variable de interés el tiempo para ejecución de éstas, como la frecuencia de mantenimiento, el uso de equipos y/o herramientas especiales y la accesibilidad para ejecutar las labores de mantenimiento. Los sub-criterios incluidos en la matriz fueron los siguientes:

- Accesibilidad para mantenimiento e inspección: aquella opción cuyo diseño ofrezca mayor accesibilidad para el mantenimiento, menor frecuencia de mantenimiento, menor tiempo en ejecución del mantenimiento y requiera poco uso de herramientas y/o equipos especiales tendrá ventaja sobre las otras opciones.

Criterios Económicos

El criterio de costos por inversión inicial permite identificar y diferenciar cuantitativamente entre las opciones de implantación. La opción con menores costos ofrece ventajas sobre aquella cuyos costos de inversión inicial sean superiores. Los sub-criterios incluidos en la matriz fueron los siguientes, tomando en cuenta la experiencia de la empresa consultora y el aporte del investigador:

- Materiales, Suministros y Mano de Obra Procesos.
- Materiales, Suministros y Mano de Obra Mecánica.
- Materiales, Suministros y Mano de Obra Civil.
- Materiales, Suministros y Mano de Obra Electricidad.
- Materiales, Suministros y Mano de Obra Instrumentación.

A cada uno de los criterios se les asignaron los siguientes puntajes:

Tabla N° 30: Asignación de puntaje a los criterios

I. ESTUDIOS ESPECIALES	40
Levantamiento Topográfico y Detección de Metales	20
Estudio de Impacto Ambiental	20
II. CRITERIOS AMBIENTE	150
Impacto Ambiental	150
III. CRITERIOS TÉCNICOS	1030
A. Operacionales	300
Hidráulica	250
Continuidad de la Filosofía Actual	30
Accesibilidad de Operaciones	20
B. Constructibilidad	680
Impacto sobre las Instalaciones existentes	50
Impacto de Construcción sobre las Operaciones	80
Complejidad para la Instalación	80
Disponibilidad de Espacio Requerido	110
Tiempo de Procura	120
Tiempo de Construcción	90
Aprovechamiento de las rutas existentes	150
C. Mantenimiento	50
Acceso para Mantenimiento e Inspección	50
IV. CRITERIOS ECONÓMICOS	125
A. Costos de Inversión	125
Materiales, Suministros y Mano de Obra Procesos	5
Materiales, Suministros y Mano de Obra Mecánica	30
Materiales, Suministros y Mano de Obra Civil	40
Materiales, Suministros y Mano de Obra Electricidad	30
Materiales, Suministros y Mano de Obra Instrumentación	20
PUNTUACIÓN TOTAL	1345

Fuente: Investigación directa.

Elaborado por: El Investigador.

Del total de 1345 puntos aplicados para distribuir en la matriz de criterios, por acuerdo interdisciplinario se designó al criterio “Requerimiento de Estudios Especiales” un puntaje de 40 unidades, los cuales se distribuyen en función de la

importancia y prioridad para el proyecto a los diferentes sub-criterios que conforman los criterios analizados. La valoración porcentual de cada sub-criterio dentro de la matriz se obtiene al dividir el puntaje asignado a cada uno de ellos entre el puntaje total de la matriz (1345). En la tabla 31 se destacan los porcentajes de peso de estos sub-criterios dentro de la matriz.

Tabla N° 31: Pesos porcentuales del Criterio “Requerimiento de Estudios Especiales”.

PUNTOS	PESO (%)	CRITERIOS DE EVALUACIÓN
40	2,97%	I. ESTUDIOS ESPECIALES
20	1,485%	Levantamiento Topográfico y Detección de Metales
20	1,485%	Estudio de Impacto Ambiental

Fuente: Investigación directa.
Elaborado por: El Investigador.

La misma estrategia de cálculo se utiliza para estimar los pesos porcentuales de cada uno de los sub-criterios que conforman la matriz.

Para la ponderación de la evaluación se utiliza la tabla 32.

Tabla N° 32: Criterios de evaluación.

VALORACIÓN	CALIFICACIÓN	% PESO	DESCRIPCIÓN
Excelente	3	100	La opción Supera los requerimientos del Proyecto
Bueno	2	66,67	La opción Satisface los requerimientos del Proyecto
Regular	1	33,33	La opción Satisface poco los requerimientos del Proyecto
Malo	0	0	La opción No Satisface los requerimientos del Proyecto

Fuente: Investigación directa.
Elaborado por: El Investigador.

**ANEXO 14. COSTOS DE CAMBIOS DE ROTORES DE LA BOMBA
(CAMBIO DE DIÁMETRO DE LOS ROTORES)**

RUBRO	DESCRIPCIÓN	TIEMPO	CANT	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL USD
		[DÍAS]	[Gb]		
1	Trabajos en impulsores y componentes				
1,1	Evaluación y metrología del conjunto	5	1	\$ 7.024,20	\$ 7.024,20
1,2	Construcción en throttle sleeve, throttle bushing y center bushing	9	1	\$ 16.543,90	\$ 16.543,90
1,3	Construcción de anillos desgaste móviles de impulsores	7	1	\$ 20.204,35	\$ 20.204,35
1,4	Construcción de anillos desgaste fijos	6	1	\$ 17.129,25	\$ 17.129,25
1,5	Metalización y rectificación de eje	4	1	\$ 8.691,70	\$ 8.691,70
1,6	Verificación y corrección de pandeo en eje	2	1	\$ 4.025,00	\$ 4.025,00
1,7	Rectificación de impulsores a diámetros requeridos	3	1	\$ 4.370,00	\$ 4.370,00
1,8	Desmontaje y montaje de impulsores , elementos rotativos y balanceo de conjunto rotativo	5	1	\$ 10.055,60	\$ 10.055,60
1,2	Reparación carcasas				
1,2,1	Relleno de carcasas y/o cajas de cojinetes-rodamientos	8	1	\$ 11.559,80	\$ 11.559,80
1,2,2	Evaluación , metrología de carcasa y verificación de planitud	2	1	\$ 3.622,50	\$ 3.622,50
1,2,3	Corrección planitud, metalización de superficie y rectificación.	2	1	\$ 16.178,20	\$ 16.178,20
1,2,4	Relleno de zonas erosionadas de las volutas y Rectificación del túnel de la bomba	6	1	\$ 10.005,00	\$ 10.005,00
1,2,5	Recuperación de asiento de sello mecánico en carcasa	2	1	\$ 1.725,00	\$ 1.725,00
1,3	Armado conjunto rotativo				
1,3,1	Cierre de carcasas con torque requerido, fijación de juegos axiales, montaje de sellos, cojinetes y rodamientos	1	1	\$ 12.249,80	\$ 12.249,80
RUBRO	DESCRIPCIÓN	TIEMPO	CANT	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL USD
		[DÍAS]	[Gb]		
1,3,2	Pintura externa	1	1	\$ 2.944,00	\$ 2.944,00
1,3,3	Trabajos de adaptación	1	1	\$ 3.450,00	\$ 3.450,00
1,3,4	Alineación bomba motor	1	1	\$ 3.680,00	\$ 3.680,00
TIEMPO TOTAL		65	COSTO TOTAL		\$ 153.458,30

ANEXO 15. COSTOS DE PROCURA E INSTALACIÓN DE CALENTADORES Y VÁLVULAS DE CONTROL

RUBRO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD DE MEDIDA			CANTIDAD ESTIMADA	PRECIO UNITARIO USD	MONTO USD
PRECIOS UNITARIOS			SHSH	PPY			
1	MOVILIZACIÓN PERSONAL						\$ 111.000,00
1.1	CAMIONETA	GLB	3,00	3,00	6,00	\$ 5.400,00	\$ 32.400,00
1.2	BUSETA	GLB	1,00	1,00	2,00	\$ 4.200,00	\$ 8.400,00
1.3	ALIMENTACIÓN	GLB	1,00	1,00	2,00	\$ 35.100,00	\$ 70.200,00
2	EQUIPOS ADICIONALES						\$ 48.240,00
2.1	EQUIPOS DE CONTROL DE CALIDAD	GLB	1,00	1,00	2,00	\$ 9.000,00	\$ 18.000,00
2.2	EQUIPOS DE SEGURIDAD	GLB	1,00	1,00	2,00	\$ 3.000,00	\$ 6.000,00
2.3	TANQUERO AGUA	GLB	1,00	1,00	2,00	\$ 2.520,00	\$ 5.040,00
2.4	TANQUERO COMBUSTIBLE	GLB	1,00	1,00	2,00	\$ 4.200,00	\$ 8.400,00
2.5	AIRE ACONDICIONADO	M2	50,00	50,00	100,00	\$ 54,00	\$ 5.400,00
2.6	MOBILIARIO	M2	50,00	50,00	100,00	\$ 54,00	\$ 5.400,00
3	INSTALACIONES CAMPAMENTO						\$ 206.400,00
3.1	CONTENEDOR DORMITORIOS STAFF	GLB	5,00	5,00	10,00	\$ 2.880,00	\$ 28.800,00
3.2	CARPA DORMITORIOS OBREROS	GLB	5,00	5,00	10,00	\$ 4.200,00	\$ 42.000,00
3.3	CARPA COMEDOR	GLB	5,00	5,00	10,00	\$ 4.200,00	\$ 42.000,00
3.4	CONTENEDOR OFICINA	GLB	5,00	5,00	10,00	\$ 2.400,00	\$ 24.000,00
3.5	CONTENEDOR BODEGA	GLB	5,00	5,00	10,00	\$ 5.400,00	\$ 54.000,00
3.6	INSTALACIONES CAMPAMENTO	GLOBAL	1,00	1,00	2,00	\$ 5.400,00	\$ 10.800,00
3.7	CUBETO DE COMBUSTIBLES	UNIDAD	1,00	1,00	2,00	\$ 2.400,00	\$ 4.800,00
SUBTOTAL							\$ 365.640,00

4	CIVIL							\$ 282.329,40
4.1	ESTUDIO DE SUELOS Y RESISTIVIDAD	DIA	1,00	1,00	2,00	\$ 5.000,00	\$ 10.000,00	
4.2	REPLANTEO	DIA	60,00	60,00	120,00	\$ 200,00	\$ 24.000,00	
4.3	CARGA, TRANSPORTE Y BOTE DE MATERIAL DESECHABLE PRODUCTO DE EXCAVACIONES PARA FUNDACIONES	M3	17,27	14,09	31,359	\$ 29,33	\$ 919,70	
4.4	HORMIGÓN CON RESISTENCIA DE 240 Kg/cm² PARA CIMENTACIONES	M3	20,96	18,46	51,25	\$ 320,20	\$ 16.411,47	
4.5	HORMIGÓN CON RESISTENCIA DE 140 Kg/cm² PARA CIMENTACIONES	M3	2,94	2,84	7,50	\$ 224,20	\$ 1.682,02	
4.6	ACERO ESTRUCTURAL CALIDAD A-36	KG	17.821,26	1.710,00	23.437,51	\$ 8,82	\$ 206.718,86	
4.7	ACERO DE REFUERZO CON RESISTENCIA DE 4200 Kg/cm² PARA CIMENTACIONES	KG	2.896,48	1.487,00	5.698,52	\$ 4,78	\$ 27.216,15	
4.8	REJILLAS ELECTROSOLDADAS (GRAITING) e=2X30mm DIMENSION 1000X2000	KG	46,80	46,80	93,60	\$ 6,12	\$ 572,83	
4.9	ESCALERA METALICA MARINERA DE ACCESO A PLATAFORMAS (TIPO GATO)	M	4,00	4,00	8,00	\$ 226,69	\$ 1.813,54	
4.10	ENCOFRADO DE MADERA, TIPO RECTO, ACABADO CORRIENTE, BASES Y ESCALONES, PEDESTALES, TIRANTES, LOSA DE FUNDACION Y BASE DE PAVIMENTO.	M2	24,28	21,28	45,56	\$ 12,70	\$ 578,43	
4.11	EXCAVACIÓN A MANO	M3	6,29	5,54	11,83	\$ 10,25	\$ 121,21	
4.12	MEJORAMIENTO SUB-BASE CL III	M3	8,00	8,00	20,80	\$ 34,56	\$ 718,85	
4.13	GROUT CEMENTICIO	M3	2,10	1,85	5,13	\$ 307,56	\$ 1.576,36	
5	MECANICA							\$ 1.459.319,96
5.1	MANIPULACIÓN, TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE MATERIALES Y EQUIPOS SUMINISTRADOS POR REPSOL	Sg	1,00		1,00	\$ 20.868,00	\$ 20.868,00	
5.2	MOVILIZACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE OBRAS PROVISIONALES	Sg	1,00		1,00	\$ 19.140,00	\$ 19.140,00	
5.3	REPLANTEO MECANICO	Sg	1,00		1,00	\$ 9.180,00	\$ 9.180,00	
5.4	INSTALACIÓN DE CALENTADORES	und	1,00	1,00	2,00	\$ 14.400,00	\$ 28.800,00	
	FABRICACIÓN DE TUBERÍA EN TALLER E INSTALACIÓN EN SITIO							

5.5	Ø = 12", Sch – 80, A-106 Gr. B.	P-D	453,60		453,60	\$ 54,00	\$ 24.494,40
5.6	Ø = 10", Sch – 80, A-106 Gr. B.	P-D	1.248,00		1.248,00	\$ 54,00	\$ 67.392,00
5.7	Ø = 4", Sch – STD, A-106 Gr. B.	P-D	33,60		33,60	\$ 54,00	\$ 1.814,40
5.8	Ø = 3/4", Sch – STD, A-106 Gr. B.	P-D	13,50		13,50	\$ 54,00	\$ 729,00
	INSTALACIÓN DE VÁLVULAS						
5.9	Válvula de Bola, Ø 12", CLASE 600, RF	Pza	2,00		2,00	\$ 2.160,00	\$ 4.320,00
5.10	Válvula de Bola, Ø 10", CLASE 600, RF	Pza	8,00		8,00	\$ 1.680,00	\$ 13.440,00
5.11	Válvula de Bola, Ø 4", CLASE 150, RF	Pza	2,00		2,00	\$ 720,00	\$ 1.440,00
5.12	Procura e instalación Válvula PCV Ø 8", CLASE 600, RF	Pza	3,00		3,00	\$ 300.000,00	\$ 900.000,00
	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN TUBERÍAS Y ELEMENTOS MECÁNICOS						
	Inspección Visual y Tinte Penetrante						
5.13	Ø = 12", Sch – 80, A-106 Gr. B.	P-D	45,36		45,36	\$ 36,00	\$ 1.632,96
5.14	Ø = 10", Sch – 80, A-106 Gr. B.	P-D	124,80		124,80	\$ 24,00	\$ 2.995,20
5.15	Ø = 4", Sch – STD, A-106 Gr. B.	P-D	3,36		3,36	\$ 12,00	\$ 40,32
5.16	Ø = 3/4", Sch – STD, A-106 Gr. B.	P-D	1,35		1,35	\$ 36,00	\$ 48,60
	Gammagrafía						
5.17	Ø = 12", Sch – 80, A-106 Gr. B.	P-D	45,36		45,36	\$ 96,00	\$ 4.354,56
5.18	Ø = 10", Sch – 80, A-106 Gr. B.	P-D	124,80		124,80	\$ 78,00	\$ 9.734,40
5.19	Ø = 4", Sch – STD, A-106 Gr. B.	P-D	3,36		3,36	\$ 54,00	\$ 181,44
	PRUEBA HIDROSTÁTICA Y PRUEBA NEUMÁTICA DE TUBERÍAS						
5.20	Ø = 12", Sch – 80, A-106 Gr. B.	GLB	1,00		1,00	\$ 7.800,00	\$ 7.800,00
5.21	Ø = 10", Sch – 80, A-106 Gr. B.	GLB	1,00		1,00	\$ 7.800,00	\$ 7.800,00
	LIMPIEZA, SUMINISTRO, PREPARACIÓN DE SUPERFICIE, APLICACIÓN DE PINTURA E IDENTIFICACIÓN DE TUBERÍAS						
	Preparación de Superficie de Tuberías						

5.22	Ø = 12", Sch – 80, A-106 Gr. B.	m ²	15,45		15,45	\$ 82,80	\$ 1.279,16
5.23	Ø = 10", Sch – 80, A-106 Gr. B.	m ²	98,92		98,92	\$ 82,80	\$ 8.190,88
	Aplicación de Pintura e Identificación de Tuberías						
5.24	Ø = 12", Sch – 80, A-106 Gr. B.	m ²	15,45		15,45	\$ 108,00	\$ 1.668,48
5.25	Ø = 10", Sch – 80, A-106 Gr. B.	m ²	98,92		98,92	\$ 108,00	\$ 10.683,76
5.26	ARRANQUE Y PUESTA EN SERVICIO DE LAS INSTALACIONES	Día	1,00		1,00	\$ 8.160,00	\$ 8.160,00
5.27	AISLAMIENTO TERMICO 120M 10" Y 40 M 12"	SG	1,00	1,00	2,00	\$ 70.000,00	\$ 140.000,00
5.28	HEAT TRACING 120 M 10" Y 40 M 12"	SG	1,00		1,00	\$ 81.500,00	\$ 81.500,00
5.29	DRENAJES Y VENDEOS DE SISTEMAS	SG	1,00	1,00	2,00	\$ 12.000,00	\$ 24.000,00
5.30	NIPLE DE ACERO AL CARBONO ASTM A106 Gr.B, SCH STD, SIN COSTURA, EXTREMOS ROSCADOS, L= 200 mm, DIMENSIONES SEGÚN ASME B36.10M.	PZA	2,00	2,00	4,00	\$ 58,80	\$ 235,20
5.31	NIPLE DE ACERO AL CARBONO ASTM A106 Gr.B, SCH 160, SIN COSTURA, EXTREMOS PLANOS, L= 100 mm, DIMENSIONES SEGÚN ASME B36.10M.	PZA	8,00	8,00	16,00	\$ 25,20	\$ 403,20
5.32	VÁLVULA DE BOLA, CLASE 600, CUERPO ASTM A 216 GR. WCB, TRIM ASTM A-316 SS, PUERTO REGULAR, OPERADA POR PALANCA, EXTREMOS BRIDADOS RF, ACABADOS DE CARAS DE BRIDAS 125 – 200 AARH, TIPO TRUNNION.	PZA	2,00	2,00	4,00	\$ 7.776,00	\$ 31.104,00
5.33	VÁLVULA DE COMPUERTA, CLASE 2000 CWP, CUERPO DE ACERO AL CARBONO ASTM A105, GUARNICIÓN 13%Cr., ASIENTOS DUROS, CUÑA SOLIDA, EXTREMO ROSCADO HEMBRA.	PZA	6,00	6,00	12,00	\$ 186,00	\$ 2.232,00
5.34	BRIDA CLASE 150, RF, ACERO AL CARBONO ASTM A105, CUELLO SOLDABLE (WN), SCH. STD, ACABADO DE CARA 125 - 200 AARH. DIMENSIONES SEGÚN ASME B16.5	PZA	4,00	4,00	8,00	\$ 80,40	\$ 643,20
5.35	TREDOLET, CLASE 3000, ACERO AL CARBONO ASTM A105, EXTREMO ROSCADOS.	PZA	6,00	6,00	12,00	\$ 15,60	\$ 187,20
5.36	TAPON MACHO ROSCADO NPT, CLASE 3000, ACERO AL CARBONO ASTM A105, CABEZA HEXAGONAL, DIMENSIONES ACORDE CON ASME B16.11.	PZA	6,00	6,00	12,00	\$ 4,50	\$ 54,00

5.37	EMPACADURA DEVANADA EN ESPIRAL 304SS RELLENA CON GRAFITO FLEXIBLE, ESPESOR 0.175", PARA BRIDA ANSI 600, ACORDE CON ASME B16.20.	PZA	4,00	4,00	8,00	\$ 11,40	\$ 91,20
5.38	ESPÁRRAGOS, ACERO DE ALEACIÓN ASTM A193 GR. B7; CON DOS TUERCAS HEXAGONALES PESADAS ASTM A 194 GR. 2H, ROSCA UNC (PARA BRIDAS DE 12"-ANSI 600).	PZA	84,00	84,00	168,00	\$ 37,20	\$ 6.249,60
5.39	ESPÁRRAGOS, ACERO DE ALEACIÓN ASTM A193 GR. B7; CON DOS TUERCAS HEXAGONALES PESADAS ASTM A 194 GR. 2H, ROSCA UNC (PARA BRIDAS DE 10"-ANSI 600).	PZA	202,00	202,00	404,00	\$ 37,20	\$ 15.028,80
5.40	ESPÁRRAGOS, ACERO DE ALEACIÓN ASTM A193 GR. B7; CON DOS TUERCAS HEXAGONALES PESADAS ASTM A 194 GR. 2H, ROSCA UNC (PARA BRIDAS DE 4"-ANSI 150).	PZA	34,00	34,00	68,00	\$ 6,60	\$ 448,80
5.41	CONEXIÓN RÁPIDA A VACCUM, ACERO AL CARBONO ASTM A105, CLASE 2000, EXTREMO ROSCADO HEMBRA (FNPT), WECO HAMMER UNIONS Ó SIMILAR	PZA	2,00	2,00	4,00	\$ 238,80	\$ 955,20
6	ELECTRICIDAD E INSTRUMENTACION						\$ 484.275,90
6.1	SUMINISTRO, TRANSPORTE E INSTALACIÓN, PRUEBAS Y PUESTA EN SERVICIO DE INTERRUPTOR EN VACIO DE MEDIA TENSIÓN, 5 KV, 50 KAsim, 1200 A , PARA INSTALACIÓN EN CELDA EXISTENTE. INCLUYENDO PROTECCIONES (PARA TRANSFORMADOR DE POTENCIA), TRANSFORMADORES DE POTENCIAL Y DE CORRIENTE PARA MEDICIÓN/PROTECCIÓN Y PARARRAYO DE 5 KV. MARCA SIEMENS, MODELO SIMILAR A EXISTENTE.	Und	1,00		1,00	\$ 21.396,00	\$ 21.396,00
6.2	SUMINISTRO, TRANSPORTE, INSTALACIÓN PRUEBAS Y PUESTA EN SERVICIO DE CELDA DE MEDIA TENSIÓN, 4,16KV, 1 COLUMNA, TIPO METAL-ENCLOSED, AUTOSOPORTADA, NEMA 12. EQUIPADA CON INTERRUPTOR EN VACIO, PROTECCIONES (PARA TRANSFORMADOR DE POTENCIA), TRANSFORMADORES DE POTENCIAL Y DE CORRIENTE PARA MEDICIÓN/PROTECCIÓN Y PARARRAYO DE 5 KV. MARCA SIEMENS O SIMILAR.	Und		1,00	1,00	\$ 34.230,00	\$ 34.230,00

6.3	SUMINISTRO, TRANSPORTE E INSTALACIÓN, PRUEBAS Y PUESTA EN SERVICIO DE PANEL DE POTENCIA 480 V, DE 18 CIRCUITOS, BARRA PRINCIPAL 1600 A, CERRAMIENTO NEMA 4, CON INTERRUPTORES TIPO CAJA MOLDEADA DE SALIDA: 1 DE 3x1200A-TRIFASICO, UNIDAD ELECTRÓNICA DE DISPARO CON CONTACTOS PARA SEÑALIZACIÓN REMOTA; 1 DE 2X20A PARA LAS LUMINARIAS Y 2 DE 3X20A PARA TRANSFORMADOR SECO (10kVA-480/240-120V).	Und	1,00	1,00	2,00	\$ 16.140,00	\$ 32.280,00
6.4	SUMINISTRO, TRANSPORTE, INSTALACIÓN, PRUEBAS Y PUESTA EN SERVICIO DE TRANSFORMADOR TRIFÁSICO TIPO SECO 480-240/120 V, 10 KVA, CERRAMIENTO NEMA 4.	Und	1,00	1,00	2,00	\$ 4.200,00	\$ 8.400,00
6.5	SUMINISTRO, TRANSPORTE, INSTALACIÓN, PRUEBAS Y PUESTA EN SERVICIO DE TABLERO ELÉCTRICO PARA SERVICIOS 240/120 V, BARRA PRINCIPAL 100 A, 18 CIRCUITOS	Und	1,00	1,00	2,00	\$ 5.040,00	\$ 10.080,00
6.6	TRANSPORTE LOCAL, INSTALACIÓN, PRUEBAS Y PUESTA EN SERVICIO DE TRANSFORMADOR DE POTENCIA TRIFÁSICO DE 1.000 kVA - 4160/480-277 V.	Und	1,00	1,00	2,00	\$ 11.400,00	\$ 22.800,00
6.7	TRANSPORTE LOCAL, INSTALACIÓN, PRUEBAS Y PUESTA EN SERVICIO DE CALENTADOR ELÉCTRICO RESISTIVO, 480 V, 800 KW.	Und	1,00	1,00	2,00	\$ 15.000,00	\$ 30.000,00
6.8	SUMINISTRO, TRANSPORTE, TENDIDO, CONEXIONADO Y PRUEBAS DE CABLE DE POTENCIA MONOPOLAR DE COBRE BLANDO CALIBRE #500 MCM, TIPO MV-90, XLPE-PVC, 5 KV. MARCA OKONITE O SIMILAR. PARA CONEXIONADO A NUEVA CELDA DE 5kV	m		60,00	60,00	\$ 114,00	\$ 6.840,00
6.9	SUMINISTRO, TRANSPORTE, TENDIDO, CONEXIONADO Y PRUEBAS DE CABLE DE POTENCIA ARMADO MULTICONDUCTOR DE COBRE BLANDO 4C # 500 MCM + 1C # 4/0 AWG, TIPO MV-90, XLPE-PVC, 5 KV. MARCA OKONITE O SIMILAR. PARA CONEXIONADO ENTRE NUEVA CELDA DE 5kV Y TRANSFORMADOR DE POTENCIA DE 1 MVA.	m	100,00	100,00	200,00	\$ 384,00	\$ 76.800,00
6.10	SUMINISTRO, TRANSPORTE, TENDIDO, CONEXIONADO Y PRUEBAS DE CABLE DE POTENCIA ARMADO MULTICONDUCTOR DE COBRE BLANDO 4C # 500 MCM + 1C # 4/0 AWG, TIPO MC-HL, XHHW-PVC, 600 V. MARCA OKONITE O SIMILAR	m	400,00	200,00	600,00	\$ 228,00	\$ 136.800,00

6.11	SUMINISTRO, TRANSPORTE, TENDIDO, CONEXIONADO Y PRUEBAS DE CABLE DE POTENCIA MULTICONDUCTOR DE COBRE BLANDO 3C #10 AWG + 1C # 12 AWG, TIPO MC-HL, XHHW-PVC, 600 V. MARCA OKONITE O SIMILAR	m	100,00	100,00	200,00	\$ 27,36	\$ 5.472,00
6.12	SUMINISTRO, TRANSPORTE, TENDIDO, CONEXIONADO Y PRUEBAS DE CABLE DE CONTROL ARMADO MULTICONDUCTOR 1 X 24C #14 AWG, TIPO TC, XHHW-PVC, 600 V. MARCA OKONITE O SIMILAR	m	100,00	100,00	200,00	\$ 31,57	\$ 6.314,00
6.13	SUMINISTRO, INSTALACIÓN Y CONEXIONADO DE TERMINAL A COMPRESIÓN, DOS HUECOS, PARA CABLE 500 MCM, 600 V.	Und	40,00	12,00	52,00	\$ 42,00	\$ 2.184,00
6.14	SUMINISTRO, INSTALACIÓN Y CONEXIONADO DE TERMINAL A COMPRESIÓN, DOS HUECOS, PARA CABLE 4/0 AWG, 600 V.	Und	20,00	20,00	40,00	\$ 25,20	\$ 1.008,00
6.15	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE BANDEJAS PORTACABLES DE ALUMINIO 90 CM. MARCA METALECTRO.	m	60,00	60,00	120,00	\$ 120,00	\$ 14.400,00
6.16	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE LUMINARIA CON LÁMPARA DEL TIPO METAL HALIDE, 250 W, 277 V.	Und	2,00	2,00	4,00	\$ 2.160,00	\$ 8.640,00
6.17	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE CAJA CON TOMACORRIENTES EN 240 Y 120 V, PARA MONTAJE SUPERFICIAL.	Und	2,00	2,00	4,00	\$ 686,40	\$ 2.745,60
6.18	SUMINISTRO, TENDIDO, E INSTALACIÓN DE TUBERÍA TIPO CONDUIT A LA VISTA ARG Ø 1", INCLUYE ACCESORIOS Y ELEMENTOS DE FIJACIÓN Y SOPORTERÍA.	m	30,00	30,00	60,00	\$ 39,18	\$ 2.350,80
6.19	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE FOTOCELDA 277V.	Und	1,00	1,00	2,00	\$ 180,00	\$ 360,00
6.20	SUMINISTRO E INSTALACIÓN EN TECHO, DE PARARRAYOS TIPO PUNTA FRANKLIN DE 0,6m x 5/8" DIAMETRO.	Und	2,00	2,00	4,00	\$ -	\$ -
6.21	SUMINISTRO E HINCADO DE BARRAS TIPO COOPER WELD 5/8", LONGITUD 2,4 m.	Und	10,00	10,00	20,00	\$ 94,02	\$ 1.880,40
6.22	SUMINISTRO, TRANSPORTE E INSTALACIÓN DE CONEXIÓN APERNADA CON CONDUCTOR 4/0 AWG, CONECTOR DE COBRE A COMPRESIÓN, 1/2".	Und	10,00	10,00	20,00	\$ 25,20	\$ 504,00
6.23	SUMINISTRO, TRANSPORTE E INSTALACIÓN DE CONEXIÓN APERNADA CON CONDUCTOR 2 AWG, CONECTOR DE COBRE A COMPRESIÓN, 1/2".	Und	64,00	30,00	94,00	\$ 15,00	\$ 1.410,00

6.24	SUMINISTRO, TRANSPORTE, TENDIDO EN ZANJA, INSTALACIÓN Y CONEXIONADO DE CONDUCTOR DE COBRE DESNUDO, TRENZADO, CALIBRE 4/0 AWG.	m	160,00	125,00	285,00	\$ 29,80	\$ 8.493,00
6.25	SUMINISTRO, TRANSPORTE, TENDIDO, INSTALACIÓN Y CONEXIONADO DE CONDUCTOR DE COBRE DESNUDO, TRENZADO, CALIBRE 2 AWG.	m	80,00	50,00	130,00	\$ 10,27	\$ 1.335,10
6.26	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE CONEXIÓN EXOTÉRMICA (TIPO CADWELD) EN DERIVACIÓN, TIPO "T", DE CONDUCTOR N° 4/0 A 4/0 AWG	Und	10,00		10,00	\$ 75,86	\$ 758,60
6.27	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE CONEXIÓN EXOTÉRMICA (TIPO CADWELD) EN DERIVACIÓN, TIPO "T", DE CONDUCTOR N° 4/0 A 2 AWG	Und	64,00	30,00	94,00	\$ 66,50	\$ 6.251,00
6.28	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE CONEXIÓN EXOTÉRMICA (TIPO CADWELD) EN DERIVACIÓN, TIPO "T", DE CONDUCTOR N° 4/0 AWG A BARRA COOPERWELD 5/8".	Und	10,00		10,00	\$ 75,86	\$ 758,60
6.29	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE CONEXIÓN EXOTÉRMICA (TIPO CADWELD) EN DERIVACIÓN, TIPO "L", DE CONDUCTOR N° 4/0 A 4/0 AWG	Und	6,00	6,00	12,00	\$ 66,50	\$ 798,00
6.30	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE CONEXIÓN EXOTÉRMICA (TIPO CADWELD) EN DERIVACIÓN, TIPO "L", DE CONDUCTOR N° 4/0 AWG A BARRA COPPERWELD 5/8".	Und	2,00	2,00	4,00	\$ 66,50	\$ 266,00
6.31	CONSTRUCCIÓN DE SALIDAS A LA SUPERFICIE (STUB - UP) CON CONDUCTOR 2/0 AWG DESNUDO Y TUBO DE PVC SCH 40 DE Ø2".	Und	64,00	30,00	94,00	\$ 23,40	\$ 2.199,60
6.32	CONSTRUCCIÓN DE SALIDAS A LA SUPERFICIE (STUB - UP) CON CONDUCTOR 4/0 AWG DESNUDO Y TUBO DE PVC SCH 40 DE Ø2".	Und	10,00	10,00	20,00	\$ 31,56	\$ 631,20
6.33	CONFIGURACION SCADA DE PROCESOS	Und	1,00	1,00	2,00	\$ 9.000,00	\$ 18.000,00
6.34	CONFIGURACION SCADA ELECTRICO	Und	1,00	1,00	2,00	\$ 7.440,00	\$ 14.880,00
6.35	SUMINISTRO, INSTALACIÓN Y CONEXIONADO DE TERMINAL A COMPRESIÓN, DOS HUECOS, PARA CABLE 500 MCM, 600 V.	Und		40,00	40,00	\$ 42,00	\$ 1.680,00
6.36	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE CONEXIÓN EXOTÉRMICA (TIPO CADWELD) EN DERIVACIÓN, TIPO "T", DE CONDUCTOR N° 4/0 A 4/0 AWG	Und		10,00	10,00	\$ 66,50	\$ 665,00

6.37	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE CONEXIÓN EXOTÉRMICA (TIPO CADWELD) EN DERIVACIÓN, TIPO "T", DE CONDUCTOR N° 4/0 AWG A BARRA COOPERWELD 5/8".	Und		10,00	10,00	\$ 66,50	\$ 665,00
7	INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL	Glb	1,00	1,00	1,00	\$ 233.830,00	\$ 233.830,00
8	PLANOS COMO CONSTRUIDO (AS BUILT)	Glb	1,00	0,00	1,00	\$ 18.500,00	\$ 18.500,00
9	DESMOVLIZACIÓN	Glb	1,00	1,00	2,00	\$ 125.000,00	\$ 250.000,00
10	INGENIERÍA	Glb	1,00	1,00	2,00	\$ 115.000,00	\$ 230.000,00
11	GESTIÓN DE COMPRAS	Glb	1,00	1,00	2,00	15000	\$ 30.000,00
12	PRE-COMISIONADO, PRUEBAS Y ENSAYOS, COMISIONADO Y PUESTA EN MARCHA	Glb	1,00	1,00	2,00	\$ 62.500,00	\$ 125.000,00
TOTAL PROYECTO							\$ 3.478.895,26

**ANEXO 16. TABLA DE INFLACIÓN DEL 2016 DE ACUERDO AL
BANCO CENTRAL**

INFLACIÓN	
MES	VALOR %
DICIEMBRE	1,12
NOVIEMBRE	1,05
OCTUBRE	1,31
SEPTIEMBRE	1,3
AGOSTO	1,42
JULIO	1,58
JUNIO	1,59
MAYO	1,63
ABRIL	1,78
MARZO	2,32
FEBRERO	2,6
ENERO	3,09
PROMEDIO	1,7325