

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA DE PETROLEO



**"ESTUDIO DE MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA
DEL BOMBEO DE PETROLEO CRUDO EN EL
TRAMO II DEL OLEOUCTO NOR - PERUANO"**

**TESIS:
PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO DE PETROLEO**

MANUEL VALER GARCIA

PROMOCION 92 - 0

LIMA - PERU

1999

INDICE GENERAL

		Página
	INTRODUCCION	5
	RESUMEN	7
CAPITULO I - ASPECTOS GENERALES DEL OLEODUCTO NOR – PERUANO (ONP)		
1.1	INTRODUCCION	14
1.2	DESCRIPCION GENERAL DEL ONP	16
	1.2.1 Oleoducto Principal	16
	1.2.2 Oleoducto Ramal Norte	17
1.3	CARACTERISTICAS GENERALES DEL ONP	20
	1.3.1 Tubería	20
	1.3.2 Equipos Principales	21
	1.3.3 Otros Datos de Referencia	28
1.4	CRITERIOS TOMADOS EN EL DISEÑO DEL ONP	29
CAPITULO II FUNDAMENTOS TEORICOS SOBRE TRANSPORTE DE FLUIDOS EN TUBERIAS		
2.1	FLUJO DE FLUIDOS	33
2.2	HIDRODINAMICA	36
2.3	PERDIDAS DE CARGA EN TUBERIAS	46
2.4	GRADIENTE HIDRAULICO	50
2.5	BOMBAS	52
	2.5.1 Bombas Centrifugas	52
	2.5.2 Bombas Reciprocantes	53
	2.5.3 Potencia de los Sistemas de Bombeo	55

2.5.4	Conexión de Bombas en Serie y Paralelo	56
2.5.5	Leyes de Afinidad de Bombas	56
2.5.6	Curvas Características de las Bombas	57
2.6	PRESION MAXIMA ADMISIBLE EN UNA TUBERIA	64
2.7	CONSUMO DE COMBUSTIBLE	64

CAPITULO III – DESCRIPCION DE LA SITUACIÓN ACTUAL

3.1	ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	67
3.2	SITUACION ACTUAL DEL BOMBEO DE CRUDO EN EL TRAMO II	68
3.3	DETERMINACION DE LA PROBLEMÁTICA	70
3.4	ALTERNATIVAS DE SOLUCION	71

CAPITULO IV – ANALISIS TECNICO DE ALTERNATIVAS

4.1	PARAMETROS DE OPERACION PARA LA EVALUACION DE ALTERNATIVAS	74
4.2	CALCULO DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE PARA CADA ALTERNATIVA	81
4.2.1	Metodología del cálculo	81
4.2.2	Evaluación de Alternativas	86
4.3	ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS	90
4.4	SELECCION DE LA ALTERNATIVA OPTIMA	91

CAPITULO V – ENSAYOS DE CAMPO

5.1	BASE PARA LOS ENSAYOS	93
5.2	AJUSTE DE CONDICIONES DE OPERACION PARA LOS ENSAYOS	95
5.3	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS CON BOMBEO A 190MB	99
5.4	ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS	111

CAPITULO VI – ANALISIS ECONOMICO DE ALTERNATIVAS

6.1	EVALUACION ECONOMICA DE LA ALTERNATIVA OPTIMA	114
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	116

ANEXOS

1.	DIAGRAMA DE MOODY	118
2.	CONSUMO ESPECIFICO DE COMBUSTIBLE EN TURBOBOMBAS	121
3.	DETERMINACION DE CAUDAL MAXIMO DE BOMBEO EN ESTACION 5	123
4.	CALCULO DE CAUDAL MAXIMO DE BOMBEO EN ESTACION 9 PARA 2 y 3 TURBOBOMBAS	142
5.	CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN LAS UNIDADES PARA LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS	145
6.	MISCELANEA : "SECUENCIA FOTOGRAFICA DEL SINIESTRO (DERRAME DE CRUDO) EN EL KM. 483, OCURRIDO EL 14/ 05/ 99 "	159
7.	TURBOBOMBAS EN ESTACION 5	164
8.	BOMBAS REFORZADORAS (BOOSTER) EN ESTACION 5	165
	BIBLIOGRAFIA	166

INTRODUCCION

La óptima operación del Oleoducto Nor Peruano se manifiesta principalmente a través de su productividad. Esta a su vez, tiene varias formas o manifestaciones, dependiendo del recurso con que se relacione el volumen de petróleo crudo bombeado, cuya utilización sea de importancia para el bombeo.

Uno de los recursos más importantes para lograr que el Oleoducto trabaje, es el combustible que consumen sus Estaciones de bombeo, el mismo que representa altos costos. Por esta razón, para el área operativa del Oleoducto, el índice de productividad que es necesario mejorar es el de volumen de petróleo crudo bombeado por unidad de volumen combustible consumido.

Siendo el Tramo II (Estación 5 Bayóvar) el más importante del Oleoducto Nor Peruano, por ser el de mayor longitud (549.3 Km), mayor diámetro (36 pulg) y tener mayor cantidad de Estaciones de bombeo, se ha elegido como área de estudio para realizar el presente trabajo de investigación, cuya finalidad es analizar diversas alternativas de bombeo que pueden aplicarse para reducir el consumo específico de combustible por bombeo del Tramo II y por consiguiente lograr un incremento en la productividad del Oleoducto.

RESUMEN

El fin primordial del presente Estudio es realizar un análisis de diferentes alternativas de bombeo, de tal manera que pueda escogerse una que represente la manera óptima de trabajar en el Tramo II del Oleoducto Nor Peruano, considerando la reducción en el consumo específico de combustible de sus unidades de bombeo.

El presente trabajo ha sido planteado, dada la necesidad que de reducir costos para hacer más rentable la operación, así como para mejorar los parámetros de operación del Oleoducto.

Para el desarrollo del presente Estudio se han propuesto cuatro alternativas de bombeo en el Tramo II. Estas han sido analizadas, primero en forma teórica, para tener un resultado que nos permita visualizar el comportamiento de las variables y poder efectuar las comparaciones correspondientes con los resultados obtenidos en las pruebas de campo.

El análisis teórico-técnico, fue realizado aplicando los fundamentos de flujo de fluidos. Este análisis permitió seleccionar una alternativa "óptima", la que luego fue sometida a ensayos de campo. Las alternativas "no óptimas" fueron desestimadas de incluirlas en los

ensayos, lográndose de esta manera tener más tiempo para efectuar las pruebas de la alternativa óptima.

Luego de los ensayos de campo de la alternativa óptima, se compararon los resultados "reales" con los "teóricos", obteniendo variaciones mínimas, lo que significa que los ensayos fueron llevados correctamente, siendo sus resultados por lo tanto confiables, además de confirmar la validez de la selección de la alternativa óptima teórica.

Para tener una idea de los ahorros económicos que representa para la Empresa la puesta en ejecución de la alternativa óptima, se ha efectuado un análisis económico comparando el consumo de combustible por la aplicación del caudal propuesto, con el consumo de combustible que se obtiene con el caudal de bombeo actual en el Tramo II.

El esquema desarrollado para el presente Estudio, presenta seis capítulos, los cuales describen y sustentan el trabajo realizado.

El Capítulo I, - ASPECTOS GENERALES DEL OLEODUCTO NOR-PERUANO - describe las características más importantes de éste y su desarrollo. Es necesario conocer y tener en

cuenta sus parámetros de diseño y características principales para poder buscar mejoras en su trabajo.

En el Capítulo II FUNDAMENTOS TEORICOS SOBRE TRANSPORTE DE FLUIDOS EN TUBERIAS se exponen los principios teóricos de flujo de fluidos que se han empleado para efectuar el análisis técnico de las alternativas.

El Capítulo III - DESCRIPCION DE LA SITUACION ACTUAL - describe las condiciones de operación y régimen de bombeo actual del Tramo II. Se analiza y presenta la problemática, formulándose las alternativas de solución.

En el Capítulo IV - ANALISIS TECNICO DE ALTERNATIVAS - se efectúa la evaluación técnico-teórica de las alternativas de bombeo propuestas para el Tramo II, calculándose para cada una su productividad y luego seleccionando la "óptima".

El Capítulo V - ENSAYOS DE CAMPO - se describen las bases tomadas en cuenta para los ensayos, las instrucciones dadas para la ejecución de las pruebas, los principales sucesos ocurridos durante los ensayos y los datos técnicos obtenidos de éstos. Se hace luego la comparación de los resultados "reales" y "teóricos", determinando sus variaciones. Finalmente, se determina

la alternativa óptima y los parámetros de operación recomendados (caudal y presiones).

En el Capítulo VI - ANALISIS ECONOMICO - se efectúa la evaluación económica de la alternativa óptima, comparando los gastos de combustible al bombear con caudales de 190 mil barriles por día de petróleo crudo (caudal propuesto) y de 150 mil (caudal actual), determinándose los ahorros que se generarían en caso de trabajar en el Tramo II con el caudal propuesto para este Estudio.

En la sección CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES se anota, entre otros, como conclusión principal, que bombeando en el Tramo II, caudales cercanos a 190 mil barriles por día, se logran ahorros significativos, los que estarían alrededor de 800,000 US\$/año.

En consecuencia, dado lo beneficioso que es bombear con caudales como el propuesto, se recomienda aplicar esta alternativa. Otra recomendación importante anotada, es la necesidad de evaluar las consecuencias que generaría en el control de corrosión del Oleoducto, la aplicación de esta alternativa.

Se presentan al final de este Estudio, en la sección "ANEXOS", los cálculos de caudales máximos de bombeo cuando Estación 5 trabaja con una o dos turbobombas y luego, cuando Estación 9 trabaja con tres o cuatro turbobombas. Además, se presentan en esta sección, los cálculos detallados de los consumos de combustibles de la Estaciones, para los diferentes caudales incluidos en las cuatro alternativas de bombeo estudiadas; así como las Gráficas de Consumo de Combustible y Potencia Disponible de las Turbinas entre otros.

CAPITULO I

ASPECTOS GENERALES DEL OLEODUCTO

NOR - PERUANO

1.1. INTRODUCCION

El Oleoducto Nor-Peruano (ONP) tiene como objetivo principal el transporte de petróleo crudo extraído en la Selva, hacia la Costa, de manera eficiente y rentable minimizando sus costos y optimizando el empleo de sus recursos técnicos y humanos.

Se encuentra ubicado en la Zona Norte del Perú y atraviesa las tres regiones naturales del Perú: Selva, Sierra y Costa. Está dividido operativamente en tres tramos: Tramo I, que comprende las Estaciones 1 y 5, con un recorrido de 306.1 kilómetros de tubería de 24 pulgadas de diámetro; el Tramo II, que comprende las Estaciones 5, 6, 7, 8, 9 y el Terminal Bayóvar con un recorrido de 549.3 kilómetros de tubería de 36 pulgadas de diámetro; y el Tramo Ramal Norte (ORN) que comprende las Estaciones Andoas (ENA), Morona (EMO) y 5, con un recorrido de 252.0 kilómetros de tubería de 16 pulgadas de diámetro. Los Tramos I y II conforman el Oleoducto Principal con un total de 855.4 kilómetros de recorrido.

Desde la puesta en operación del Oleoducto Nor Peruano en el año 1,977, se ha buscado lograr una operación de la manera más eficiente y rentable posible, de acuerdo a

las variaciones que ha sufrido la calidad del crudo transportado, las condiciones operativas de la tubería y las máquinas afectadas por los años de operación.

La mejora de la productividad del Oleoducto, implica entre otras cosas, buscar la posibilidad de bombear mayores volúmenes de crudo obteniendo un menor consumo de combustible por barril bombeado y una mejor utilización de las instalaciones del Oleoducto.

Siendo el consumo de combustible de las unidades de bombeo uno de los rubros más importantes para la operación del Oleoducto, la reducción de los niveles de consumo específico haría más rentable la Operación y obtener ahorros significativos.

Con el presente Estudio se busca analizar las diferentes alternativas para mejorar la productividad en el Oleoducto y obtener las que sean más aplicables y ofrezcan una mayor posibilidad de ahorro económico, haciendo un óptimo uso de las máquinas, equipos y tubería del Oleoducto Nor-Peruano.

1.2. DESCRIPCION GENERAL DEL ONP

1.2.1. OLEODUCTO PRINCIPAL

TRAMO I: El Oleoducto Nor Peruano se inicia en la Estación Recolectora N°1, ubicada en la Selva Peruana, a inmediaciones del pueblo de San José de Saramuro, a orillas del río Marañón a 200 Km al Sur-Oeste de Iquitos.

Avanza con dirección oeste cruzando densos bosques y pantanos corriendo paralelo al río Marañón, hasta la Estación Recolectora N°5.

Estación 1 recibe crudo proveniente del Lote 8/8X y lo bombea hacia Estación 5.

TRAMO II: De la Estación 5, que es el punto de confluencia del Ramal Norte que transporta el crudo proveniente del Lote 1-AB (Andoas), la tubería continúa en dirección Sur-Oeste hasta la Estación de Rebombeo N°6, siguiendo la misma dirección y paralela a la carretera que va de Mesones Muro hasta Bagua, en el Dpto. de Amazonas. Toca la Estación 7 y siempre siguiendo

la carretera en dirección Sur-Oeste, llega a la Estación 8, que se encuentra en las inmediaciones de la localidad de Pucará, en el Dpto. de Cajamarca.

En este punto, el Oleoducto, cambia de dirección al Nor-Oeste, hasta la Estación 9, que es la última Estación de Bombeo. Desde esta Estación, inicia el ascenso de la Cordillera de los Andes, cruzándola en el Paso de Porculla a una altura máxima de 2,380 metros sobre el nivel del mar, descendiendo luego a través del desierto hasta el Terminal de Bayóvar en la Bahía de Sechura, Departamento de Piura.

1.2.2. OLEODUCTO RAMAL NORTE

El Oleoducto Ramal Norte (ORN), se encuentra ubicado en la zona norte de la Selva Peruana. Parte de la Estación Andoas, en dirección Nor-Oeste y cambia al Sur-Oeste en el Km 13 de su recorrido, cruzando luego los ríos Pastaza, Huituyacu y Huallaga llegando al cruce del Río Morona donde está la Estación de Rebombeo del mismo nombre. Siempre en la misma dirección, llega hasta el río Marañón, continuando por el

terreno plano y seco hasta el cruce del Río Saramiriza en su recorrido final antes de hacer su ingreso a la Estación 5 del Oleoducto Principal (ver Fig. N° 1).

Estación Andoas recibe petróleo crudo de los campos que explota la Cía. Occidental Peruana Inc. (OXY) y lo bombea hacia Estación 5.

OLEODUCTO NOR - PERUANO



1.3. CARACTERISTICAS PRINCIPALES DEL ONP

1.3.1. TUBERIA

El Oleoducto Principal tiene una longitud de 855.4 Kms dividido en dos tramos. El Tramo I es de 306.1 Kms y su diámetro es de 24 pulgadas. Une las Estaciones 1 y 5, pudiendo bombearse hasta 70 mil barriles diarios de petróleo. Esta capacidad de bombeo podría ser aumentada a 200 mil barriles diarios en el futuro con la construcción de las Estaciones 2, 3 y 4.

El Tramo II, va desde la Estación 5, hasta Bayóvar. Tiene una longitud de 549.3 Kms y un diámetro de 36 pulgadas. La capacidad actual de bombeo de la Estación 5 a Bayóvar es de 200 mil barriles diarios (MBD).

El Oleoducto opera con la tubería totalmente llena en su mayor extensión y parcialmente llena en los tramos de bajada (libre escurrimiento). La tubería está recubierta para su protección y tiene instalado un sistema de protección catódica contra la corrosión.

A lo largo de su recorrido, la tubería se encuentra sumergida en canales de flotación o enterrada, con excepción de algunos cruces aéreos de quebradas o ríos.

A su vez el Ramal Norte, tiene una longitud de 252 Kms va desde la Estación Andoas hasta la Estación 5 del Oleoducto Principal. Este Oleoducto tiene 16 pulgadas de diámetro y su tendido es completamente en superficie (no enterrado)

1.3.2. EQUIPOS PRINCIPALES

a). Bombas principales

El Oleoducto tiene instaladas 16 turbobombas (turbinas RUSTON y bombas BINGHAM) para el movimiento del petróleo.

Una de estas turbobombas es de 1,500 HP hallándose instalada en la Estación 1. Las 15 restantes son de 3000 HP cada una de potencia nominal. En la Estación 5 hay dos turbobombas y en la Estación 9 cinco, ya que esta Estación debe generar la potencia necesaria

para que el petróleo ascienda hasta los 2,380 msnm que tiene el Paso de Porculla en la Cordillera de los Andes. Las demás Estaciones 6, 7, 8 y Andoas, tienen dos turbobombas de 3,000 HP cada una (ver Cuadro 1).

De las seis motobombas Caterpillar-Bingham que tiene el ONP, la Estación Morona tiene cinco y la Estación 1 una.

b) . Generadores

En las Estaciones del Oleoducto Principal y Ramal Norte, se han instalado 11 turbogeneradores de 1,100 KW (turbina RUSTON y generador GENERAL ELECTRIC), distribuidos de la siguiente forma: dos en Estación 1, dos en Estación 5, uno en Estación 6, dos en Estación 7, uno en Estación 8, dos en Estación 9 y uno en Bayóvar.

Se han instalado también, 8 motogeneradores, distribuidos de la siguiente forma: dos en Estación Andoas, tres en Estación Morona, uno en Estación 6, uno en Estación 8 y uno en

Bayóvar, éstos últimos sustituyen a los turbogeneradores por ser de alto consumo de combustible.

c). Tanques de almacenamiento

El Oleoducto cuenta con cuatro Estaciones en las que se almacena el petróleo crudo.

UNIDADES DE BOMBEO EN EL OLEODUCTO NOR – PERUANO

EST.	UNIDAD	DENOMI- NACION	ACCIONAMIENTO POR :	POTENCIA (HP)	TIPO	BOMBA	
						ETAPAS	CAPAC.(gpm)
1	TB	1GT-2	TURBINA TA-1750	1,750	BINGHAM	3	2,200
	MB	1MB-1	MOTOR CATERPILLAR	750	BINGHAM	7	950
	BB	1G-6	MOTOR ELECTRICO	150	ING. RAND	2	2,250
	BB	1G-7	MOTOR ELECTRICO	150	ING. RAND	2	2,250
ENA	TB	BA-2 ^a	TURBINA TB-4000	3,400	BINGHAM	8	4,900
	TB	BA-2B	TURBINA TB-4000	3,400	BINGHAM	8	4,900
	BB	1-A	MOTOR ELECTRICO	200	ING. RAND	2	3,063
	BB	1-B	MOTOR ELECTRICO	200	ING. RAND	2	3,063
EMO	MB	P-1301	MOTOR CATERPILLAR	825	BINGHAM	7	950
	MB	P-1303	MOTOR CATERPILLAR	825	BINGHAM	7	950
	MB	P-1304	MOTOR CATERPILLAR	750	ING. RAND	8	740
	MB	P-1305	MOTOR CATERPILLAR	750	ING. RAND	8	740
	MB	P-1306	MOTOR CATERPILLAR	750	ING. RAND	8	740
5	TB	5GT-1	TURBINA TB-4000	3,250	BINGHAM	3	4,680
	TB	5GT-2	TURBINA TB-4000	3,250	BINGHAM	3	4,680
	BB	5G-6	MOTOR ELECTRICO	280	ING. RAND	3	3,625
	BB	5G-7	MOTOR ELECTRICO	280	ING. RAND	3	3,625
	BB	5G-8	MOTOR ELECTRICO	280	ING. RAND	3	3,625
6	TB	6GT-1	TURBINA TB-4000	3,180	BINGHAM	2	6,125
	TB	6GT-2	TURBINA TB-4000	3,180	BINGHAM	2	6,125
7	TB	7GT-1	TURBINA TB-4000	3,150	BINGHAM	2	6,125
	TB	7GT-2	TURBINA TB-4000	3,150	BINGHAM	2	6,125
8	TB	8GT-1	TURBINA TB-4000	3,020	BINGHAM	2	6,125
	TB	8GT-2	TURBINA TB-4000	3,020	BINGHAM	2	6,125
9	TB	9GT-1	TURBINA TB-4000	2,800	BINGHAM	2	1,970
	TB	9GT-2	TURBINA TB-4000	2,800	BINGHAM	2	1,970
	TB	9GT-3	TURBINA TB-4000	2,800	BINGHAM	2	1,970
	TB	9GT-4	TURBINA TB-4000	2,800	BINGHAM	2	1,970
	TB	9GT-5	TURBINA TB-4000	2,800	BINGHAM	2	1,970

Notas:

TB	Turbobomba
MB	Motobomba
BB	Bomba Booster

(Cuadro 1)

Estación 1: Tiene 8 tanques de almacenamiento (incluyendo 3 tanques de crudo salado). Su capacidad total de almacenamiento es de 478,433 barriles.

Estación 5: Cuenta con 6 tanques con una capacidad total de almacenamiento de 839,617 barriles.

Estación Andoas: Tiene 3 tanques de almacenamiento con una capacidad total de 178,350 barriles.

Terminal Bayóvar: Tiene en operación 14 tanques. Su capacidad total de almacenamiento es de 1'963,805 barriles.

d). Sistema de alivio de presión

Las instalaciones de las Estaciones, están protegidas de las sobrepresiones que pudieran crearse por el cierre indebido de una válvula a los tanques o presiones estáticas mayores que las de diseño en caso de parada del equipo de bombeo en una Estación.

e) . Terminal y muelle de carga de Bayóvar

El petróleo, se recepciona actualmente en 14 tanques de almacenamiento.

Una tubería de 42 pulgadas de diámetro, lleva el petróleo crudo hasta el muelle, pasando antes por un sistema de medición de caudal.

En el muelle, la carga a los buques-tanques se realiza a través de 4 brazos de carga de 16 pulgadas, de accionamiento hidráulico.

El muelle tiene 113 metros de largo desde la orilla y 500 metros entre sus extremos en forma de "T" y está construido sobre pilotes de acero hincados en el fondo del mar.

La capacidad del muelle está diseñada para recibir buques-tanques de hasta 250 mil toneladas de peso muerto.

f). Capacidad de almacenamiento de crudo y combustibles en el ONP.

Estación	Crudo (MB)	COMBUSTIBLES (Miles de Galones)			
		Turbo	Gasolina	Diesel I	Diesel II
ENA	178				504
EMO		22.3			420
E1	478	11	4.5		375
E5	840	64.2	3.0		1130
E6			2.6	567	570
E7		52.9	5.8	562	567
E8		3.0	2.5	570	570
E9		3.5	2.5	1680	10
BAY	1963		5.5	562	565
TOTAL	3460	156.9	26.4	3373	5269

g). Tanques de alivio

ESTACION	TANQUES	CAPACIDAD (Bls)	TOTAL ESTACION
5	5-D-12	21,658	41,954
	5-TV10	20,295	
6	6-D-1	21,162	21,162
7	7-D-1	21,162	21,162
8	8-D-1	18,770	18,770
9	9-D-1	18,770	18,770
BAY	11-D25	1,681	22,843
	11-D10	21,161	
CAPACIDAD DE ALIVIO TOTAL OLE:			144,665

1.3.3. OTROS DATOS DE REFERENCIAa). Ubicación de las estaciones del ONP

ESTACION	PROGRESIVA (Km)	ALTURA (msnm)
1	0.000	122
ENA	0.000	154
EMO	170.000	124
5	306.130	282
6	417.818	360
7	518.546	428
8	593.440	816
9	648.894	1,162
BAYOVAR	855.420	161

(*) Respecto a Estación 1 y Km 252 respecto a ENA.

b). Longitud, diámetro y capacidad de tubería

TRAMO	LONGITUD (Kms)	DIAMETRO (Pulg)	CAPACIDAD (MBI)
I	306.1	24	539.042
II	549.3	36	2173.516
ORN	252.0	16	197.265

c). Puntos más altos en el ONP

TRAMO	PROGRESIVA (Km)	ALTURA (msnm)
E5-E6	325.58	900
E6-E7	457.40	875
E9-BAY	671.90	2380

1.4. CRITERIOS TOMADOS EN EL DISEÑO DEL ONP

El diseño de la tubería estuvo basado en los siguientes caudales para el petróleo crudo con las características:

API°: 26.6°

VISCOSIDAD: 38 Centistokes

- Caudales para el Tramo II:

	CAUDAL DE DISEÑO (M ³ /H)	GASTO NOMINAL AL FACTOR 95% (M ³ /H)	MBPD
Sistema Inicial	1,394	1,324	200
Sistema Futuro	3,486	3,312	500

- Presiones Máximas Admisibles:

Las Presiones Máximas Permisibles en el Tramo II al inicio de la operación (1,977) fueron:

<u>DIAMETRO DEL TUBO</u>	<u>ESPESOR EN Pulgadas</u>	<u>PRESION MAX. PERMISIBLE Kg/cm²</u>	
36"	0.312	45.7	*
	0.344	50.3	*
	0.375	54.8	*
	0.406	59.4	*
	0.438	64.0	*
	0.500	73.2	*
	0.561	97.6	**
	0.875	128.1	***

Nota :

* Usado para presiones de trabajo mínimas, puntos más altos, tramos de libre escurrimiento y llegadas a estaciones.

* Usados en puntos más bajos del tramo (cruce de ríos , quebradas y salidas de estaciones con excepción de la Estación 9.

*** Usado exclusivamente a la salida de Estación 9.

La Presión Máxima que puede soportar una tubería esta dada por la siguiente fórmula:

$$P = 200 * \frac{S * t}{D} \quad \text{Referencia Cap.2.6}$$

P : kg/cm^2

S : Esfuerzo admisible (Kg/cm^2)

S : 72% del Límite de Fluencia, para tubería del ONP.

L : Límite de fluencia (36.6 Kg/cm^2).

t : Espesor de la pared del tubo (pulgadas).

D : Diámetro exterior del tubo (pulgadas).

Por datos estadísticos se considera una tasa de disminución del espesor por corrosión igual a 0.5 MPY (milésimas de pulgadas por año), y luego de 21 de operación tenemos:

Presión Máxima Permisible (Kg/cm^2)

<u>Espesor del tubo (pulg)</u>	<u>Inicio</u>	<u>Actual</u>
0.312	45.7	44.1
0.344	50.3	48.8
0.375	54.8	53.3
0.406	59.4	57.9
0.438	64.0	62.5
0.500	73.2	71.6
0.561	97.6	80.5
0.875	128.1	119.2

CAPITULO II

FUNDAMENTOS TEORICOS SOBRE TRANSPORTE DE FLUIDOS EN TUBERIAS

2.1. FLUJO DE FLUIDOS

Los fluidos son sustancias que se deforman continuamente cuando se someten a un esfuerzo cortante. Adoptan la forma del recipiente que los contiene.

La naturaleza del flujo de fluidos real es muy compleja ya que las leyes básicas que describen el movimiento completo de un fluido no se formulan ni manejan fácilmente, del punto de vista matemático, requiriéndose de su experimentación. Se requiere del concurso de la mecánica, termodinámica y la experimentación ordenada.

Los principales propiedades del petróleo que intervienen en el flujo por tuberías son:

- DENSIDAD.-

Es la masa por unidad de volumen.

- GRAVEDAD ESPECIFICA (s). -

La Gravedad Específica de un fluido es su densidad comparada con la de un fluido base. Para líquidos, la base es el agua.

- GRAVEDAD API (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE)

Es una forma de expresar la densidad de los productos del petróleo.

$$\text{API} = \frac{141.5}{\text{Grav.Esp.}} - 131.5$$

El API de los productos del petróleo oscila normalmente entre 10° API a 65° API. Un incremento en el API equivale a una disminución en la densidad.

- VISCOSIDAD (u). -

Es la resistencia que se opone al escurrimiento de un fluido y es provocada por el rozamiento de moléculas unas contra otras.

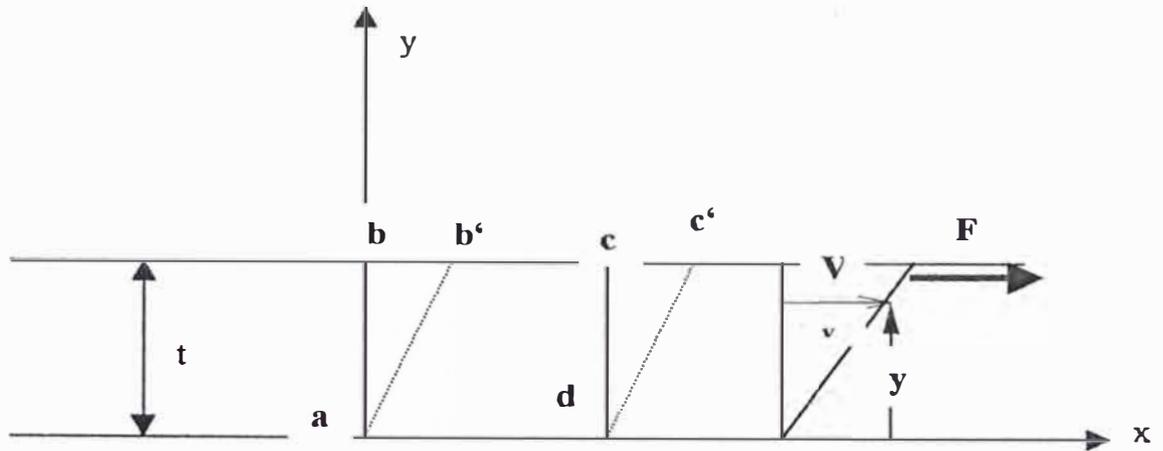
La viscosidad absoluta se mide en poise y centipoise.

La viscosidad cinemática es la relación de la viscosidad absoluta y la densidad, medidas a la misma temperatura. Sus unidades de medida son el stoke y centistoke.

$$1 \text{ stoke} = 1 \text{ cm}^2/\text{seg.}$$

$$1 \text{ Cstk} = \frac{1 \text{ Centipoise}}{\text{Grav.Espec.}}$$

Teóricamente, si tenemos un fluido abcd representado en un eje de coordenadas "XY", de tal forma que la placa inferior es fija y se aplica una fuerza F a la



Deformación resultante de la aplicación de una fuerza constante.

Figura (2)

placa superior, ejerciéndose entonces un esfuerzo cortante

Donde "u" es el factor de proporcionalidad denominado viscosidad del fluido.

Si $\tau = F/A$, es llamado esfuerzo cortante entonces:

$$\tau = u V/t, \text{ la razón } V/t \text{ es la velocidad}$$

angular de la línea ab, o es la rapidez de deformación angular del fluido, es decir, la rapidez del decremento del ángulo bad. La velocidad angular también se puede escribir $\delta V/ \delta t$, ya que, V/t y $\delta V/ \delta y$

expresan la velocidad de cambio dividida por la distancia sobre la cual ocurre el cambio. Sin embargo, $\delta V / \delta y$ es más general, ya que es válida para situaciones en las que la velocidad angular y el esfuerzo cortante cambian con y . El gradiente de velocidad $\delta V / \delta y$ también se puede visualizar como la rapidez con la que una capa se mueve en relación con una capa adyacente.

En forma diferencial, la ecuación

$\tau = \mu \delta V / \delta y \dots (*)$, es la relación entre el esfuerzo cortante y la rapidez de la deformación angular para el flujo unidimensional de un fluido.

2.2. HIDRODINAMICA

Parte de la Mecánica de Fluidos que estudia el movimiento de los líquidos y la resistencia que ejercen al movimiento de los cuerpos que se hallan sumergidos en ellos.

2.2.1 FLUIDOS PERFECTOS Y FLUIDOS REALES

Los fluidos perfectos o ideales, son una hipótesis introducida para facilitar el estudio del movimiento de los fluidos, entendiéndose como fluidos incompresibles con sus moléculas que se deslizan una sobre otras sin consumir energía por rozamiento, es decir carecen de viscosidad.

Los fluidos reales, tienen viscosidad y consumen una cierta cantidad de energía para vencer las resistencias que se

oponen a su desplazamiento. El objeto de la hidrodinámica es el estudio de estos fluidos, pero como el mismo es muy complejo, se introduce el concepto de fluido ideal, del que se deducen las leyes generales y mediante la aplicación de determinados coeficientes de corrección, se llega a resultados bastante aproximados a las condiciones reales de flujo.

2.2.2 FLUIDOS NEWTONIANOS Y NO NEWTONIANOS

Si tomamos como referencia la sección 2.1 referente a viscosidad tenemos que en un fluido newtoniano existe una relación lineal entre la magnitud del esfuerzo cortante " τ " aplicado y la rapidez de deformación resultante $\delta v / \delta y$, es decir la viscosidad " μ " es constante en la ecuación (*)

En un fluido no newtoniano hay una relación no lineal entre la magnitud del esfuerzo cortante y la rapidez de la deformación angular.

2.2.3 NATURALEZA DEL MOVIMIENTO DE LOS LÍQUIDOS

El movimiento de un fluido que tiene lugar a lo largo de un conducto, se presenta según tres regímenes de distinta naturaleza, denominados

- Régimen sin rozamiento (ideal) o de Bernoulli.
- Régimen laminar o de Poiseville
- Régimen turbulento o de Venturi.

El **régimen sin rozamiento** se representa cuando la velocidad del líquido no es muy grande, la conducción no presenta cambios bruscos de dirección y el líquido no tiene viscosidad. Se caracteriza porque todas las partículas que en un momento dado se encuentran en una misma sección S1 del conducto, se mueven simultáneamente a otra sección S2 (ver gráfico).

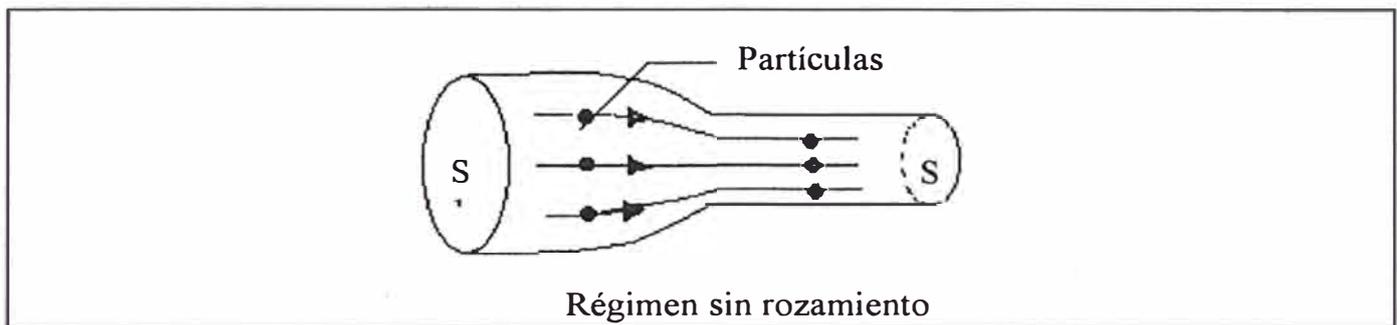


Figura (3)

El **régimen laminar** se produce cuando se dan las mismas circunstancias que en el régimen sin rozamiento, salvo una el líquido posee viscosidad. Se caracterizan porque todas las partículas se mueven con mayor velocidad cuando más alejadas se encuentran de las paredes del conducto, de tal modo que todas las que en un instante dado se encuentran en la misma sección S1, en otro instante posterior no lo están, debido a que las que se hallan en el centro de la conducción se desplazan una distancia mayor que las situadas en las proximidades o en contacto con las paredes.

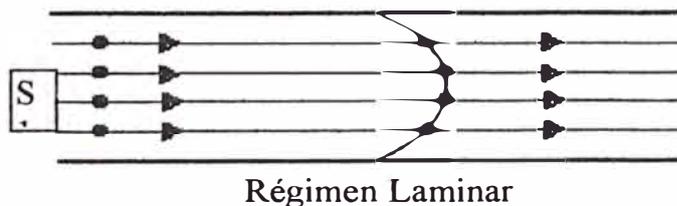


Figura (4)

El régimen turbulento se presenta cuando la velocidad del líquido es muy grande y presenta bruscos cambios de dirección. Se caracteriza por la presencia torbellinos porque las líneas de corriente se cortan entre si constituyendo un movimiento caótico.



Régimen Turbulento

Figura (5)

2.2.4 Leyes básicas del Movimiento de Fluidos

- Conservación de masa o Ecuación de Continuidad.-

Establece que la cantidad de materia que pasa por una determinada sección del sistema debe también pasar por cualquier otra. También se le denomina Balance de Materia.

Un balance de materiales no es otra cosa que una contabilidad de flujos en el inventario de un sistema. es la aplicación de la ley de la conservación que dice : "*La masa (energía) no se crea ni se destruye, sólo se transforma*".

La siguiente ecuación describe en palabras el principio de balance de materia a procesos sin reacción química :

(Entradas al sistema) - (Salidas del sistema) = (Acumulación dentro del sistema)

o (Entradas al sistema) - (Salidas del sistema) = (Stock final - Stock inicial)

El balance o ecuación se aplica a un intervalo de tiempo, ya sea una hora, un día, mes, etc.

La acumulación puede ser positiva o negativa y viene a ser la diferencia de inventarios.

Si reordenamos la ecuación anterior, quedaría la fórmula que se usa en los reportes para el inventario de crudo diario :

$$\boxed{(\text{Stock final} - \text{Stock inicial}) - (\text{Entradas al sistema}) + (\text{Salidas del sistema}) = 0}$$

Si al aplicar esta ecuación el resultado no sale cero, significa que ha habido pérdidas (resultado negativo) o ganancias (resultado positivo)

Cuando se aplica este principio al flujo uniforme de fluidos, tenemos lo que se conoce como la *ecuación de continuidad*, la que establece que la cantidad de materia que pasa por una determinada sección (área) del sistema debe también pasar por cualquier siguiente sección.

Es decir, el flujo Q es constante:

$$Q = \text{Constante}$$

donde : $Q(\text{m}^3/\text{hr}) = v(\text{m}/\text{hr}) \times A(\text{m}^2)$

En una tubería con diámetro variable tenemos :

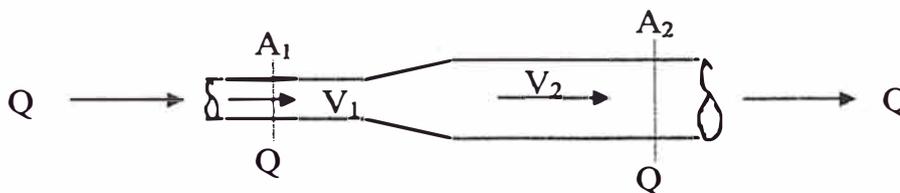


Figura (6)

Por definición : $Q_1 = Q_2 = Q$

Entonces $Q = V_1 \times A_1 = V_2 \times A_2$

Para aplicaciones prácticas, la anterior fórmula la utilizamos para determinar la velocidad del crudo que viene a ser igual a la velocidad del raspatubo, en la siguiente forma :

$$V(\text{km / hr}) = 13.075 \frac{Q(\text{MBPD})}{d^2(\text{pulg})}$$

- Conservación o Balance de Energía. -

La **energía** es la capacidad de un cuerpo o sistema para realizar un trabajo, e interviene en todos los fenómenos que ocurren en el universo, desde el movimiento de un objeto a la transformación de unas sustancias en otras, etc.

El investigador alemán Julius Robert von Mayer fue el primero que demostró, a mediados del siglo XIX, que el origen de toda esta energía se encuentra en el Sol, donde el hidrógeno se transforma en helio y libera una gran cantidad de energía, de la que sólo llega hasta nosotros una pequeña parte. Mayer señaló además que la energía nunca se destruye, sino que se transforma en otro tipo de energía diferente, con lo que estableció el principio de conservación de la energía: la energía total de un sistema aislado, es decir, si sobre él no actúan fuerzas exteriores, permanece constante.

Las explosiones atómicas confirmaron la inmensa cantidad de energía que hay encerrada en una pequeña cantidad de materia cuando toda esta masa se convierte en radiaciones. Existen, por tanto, numerosas clases de energía, que se transforman unas en otras.

La **energía potencial** es la que tiene un cuerpo debido a su posición en un campo de fuerzas. La energía potencial gravitatoria es la que posee un cuerpo debido a su posición dentro del campo gravitatorio de la superficie terrestre y se

calcula mediante la fórmula

$$E_p = m \times g \times h,$$

donde m es la masa, g la aceleración de la gravedad y h la altura en la que se encuentra el cuerpo.

La **energía cinética** es la que tiene un cuerpo en movimiento responde a la fórmula

$$E_c = 1/2m \times v^2$$

donde m es la masa y v la velocidad.

La **energía calorífica** es la que se transmite de los cuerpos calientes a los fríos.

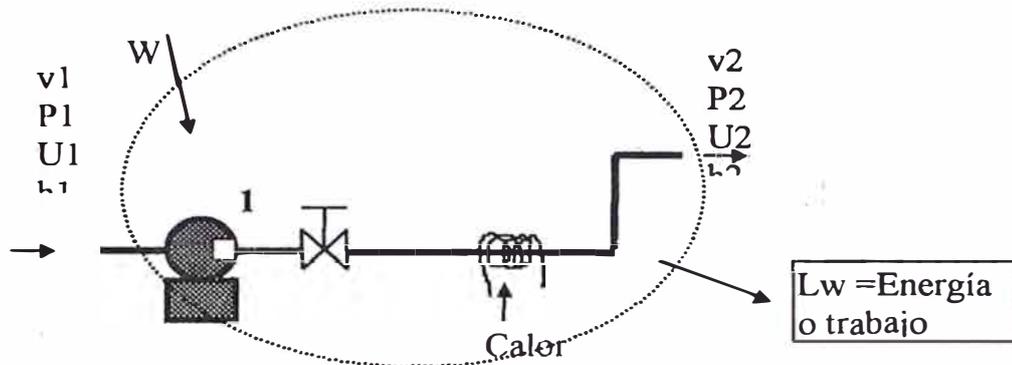
La **energía interna** (U), es una medida macroscópica de las energías moleculares o atómicas(energías de traslación , rotación y vibración)

El **trabajo** (W) es otra forma de energía, que se define como la energía transferida entre el sistema y los alrededores por medio de una fuerza que actúa sobre un desplazamiento.

$$(W = F \times d)$$

Otras formas de energía la luminosa (producida por los cuerpos que emiten luz), la eléctrica (producida por las cargas eléctricas), la nuclear (almacenada en el núcleo de los átomos), la solar (producida por el Sol), la eólica (producida por el viento), la maremotriz (producida por las mareas), la sonora (producida por las vibraciones de algunos cuerpos), la química (producida por la unión de los átomos al formar moléculas), etc.

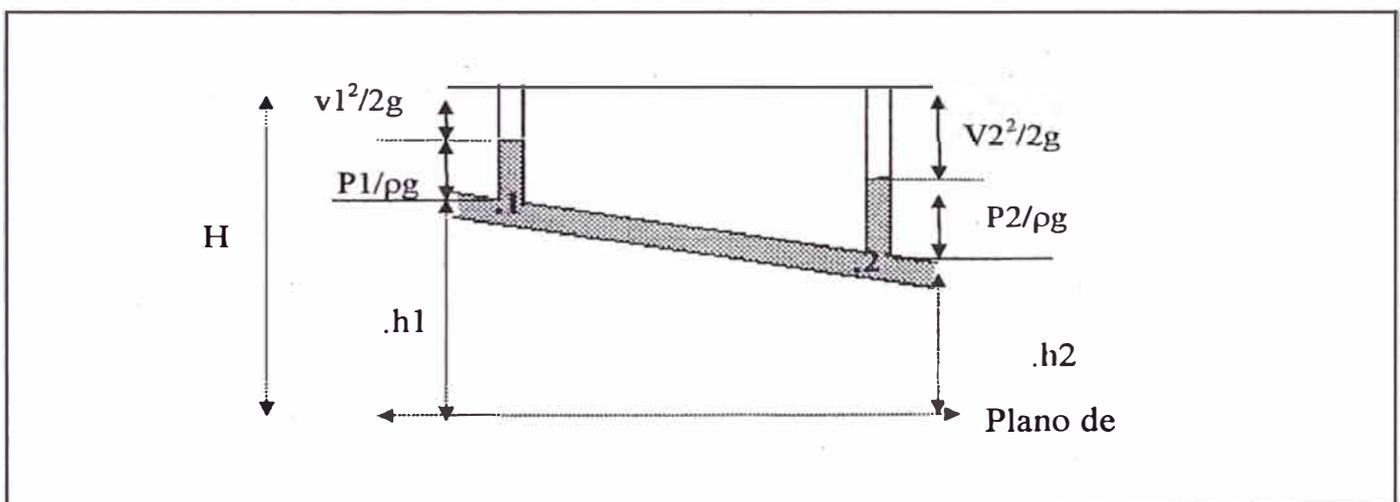
Balance de Energía Mecánica a un sistema con flujo líquido incompresible y uniforme:



$$\text{Calor} + W = (U_2 + h_2 + P_2/\rho g + v_2^2/2g) - (U_1 + P_1/\rho g + v_1^2/2g) + Lw$$

La aplicación de la Ley de la conservación de la energía al flujo de fluidos sin viscosidad en un conducto se expresa mediante el teorema de Bernoulli, el cual dice que la energía total (H), en cualquier punto del sistema, expresada como carga hidrostática, por encima de un plano horizontal arbitrario, es igual a la suma de la carga por diferencia de nivel (h) (energía potencial), la equivalente a la presión estática (P), y la carga debido a la velocidad (v) (energía cinética), así :

$$h + P/\rho g + v^2/2g = H$$



Si no se consideran pérdidas, la carga hidrostática total H , será constante para cualquier punto del sistema.

Sin embargo, en la práctica, se producen pérdidas de carga, en forma de calor, debido a la fricción y a la viscosidad, que deben considerarse en la ecuación anterior; en estas condiciones, escribiremos un balance de energía para dos puntos del sistema, llamando h_f a la pérdida por fricción entre los puntos 1 y 2 :

$$h_1 + P_1/\rho g + v_1^2/2g = h_2 + P_2/\rho g + v_2^2/2g + h_f$$

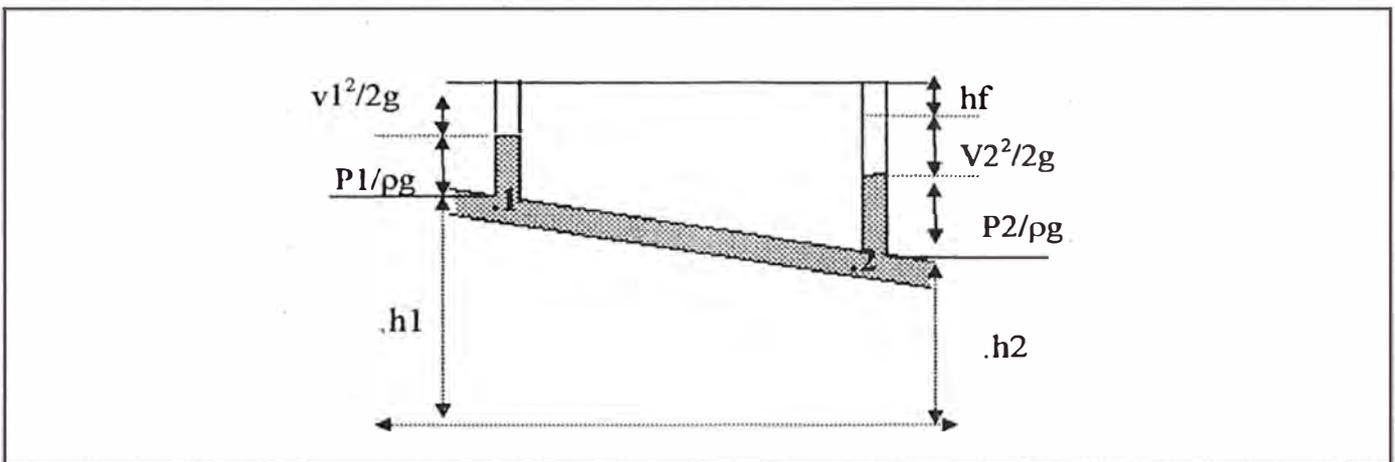


Figura (9)

- Conservación del Momentum. -

Se puede deducir la Ecuación de la Cantidad de Movimiento a partir del Segundo Principio de Newton para un sistema.

Para flujo permanente la cantidad de movimiento en las direcciones "x", "y", "z", dentro del volumen de control permanece constante, entonces:

$$\Sigma F_x = f\rho V_x.v.\delta A$$

$$\Sigma F_y = f\rho V_y.v.\delta A$$

$$\Sigma F_z = f\rho V_z.v.\delta A$$

donde ΣF_i , es la fuerza neta que actúa sobre una partícula o sistemas de partículas y :

ρ , densidad

V_i , volumen

V , velocidad

A , área del sistema

En forma general tenemos :

$$\Sigma F = f\rho V_i.v.\delta A$$

- Caudal (Q). -

Es la cantidad de fluido que pasa por una sección transversal dada en una unidad de tiempo.

$$Q = v.A$$

Donde :

v = Velocidad del fluido.

A = Area de la tubería.

2.3. PERDIDAS DE CARGA EN TUBERIAS

* NUMERO DE REYNOLDS (Re).

Reynolds demostró que la naturaleza del flujo de un fluido newtoniano en una tubería (laminar ó turbulento) depende del diámetro de la tubería (D), la densidad (d), viscosidad (u) del fluido y la velocidad del flujo (v).

Usando el análisis dimensional y con la combinación de estas cuatro variables, obtuvo una expresión adimensional que se conoce como el Número de Reynolds, cuya expresión matemática es la siguiente:

$$Re = \frac{d.v.D}{u}$$

Se presentan otras formas, dependiendo del sistema de unidades que se usen:

$$Re = 13,918 \frac{Q}{D.u}$$

Donde:

Q = Caudal (m³/hr).

D = Diám.interno (pulg)

u = Viscosidad (Cstks)

$$Re = 92.24 \frac{Q}{D.u}$$

Donde:

Q = Caudal (BPD).

D = Diám.interno (pulg)

u = Viscosidad (Cstks)

Si el Número de Reynolds (Re) es:

- Menor que 2,000 el Flujo es Laminar.
- Mayor que 4,000 el Flujo es Turbulento.

Cuando $2,000 < Re < 4,000$, está en una zona de transición y no puede definirse exactamente si el flujo es laminar ó turbulento.

* COEFICIENTE DE FRICCIÓN (f):

Es una función del Número de Reynolds y de la rugosidad relativa. Se obtiene del Gráfico de Moody-Nikuradse ó Rouse (ANEXO 1). Existe una fórmula práctica que se aplica para FLUJO TURBULENTO en tuberías para transporte de hidrocarburos que es la siguiente:

$$f = \frac{0.3305}{Re^{0.252}}$$

Para Flujo Laminar, se utiliza la fórmula siguiente:

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

Donde :

f : Coeficiente de fricción del sistema.

Re : Número de Reynolds.

* CURVA DE FRICCIÓN DEL SISTEMA (h) :

Las pérdidas de carga por fricción en un sistema de bombeo, están en función del tamaño de la tubería, longitud, número y tipo de los accesorios, velocidad del flujo del líquido y naturaleza de éste. Para un sistema dado, éstos varían aproximadamente al cuadrado de la velocidad del líquido en el sistema (ver FIG N° 10).

La Ecuación de la Curva de Fricción del Sistema está definida de la siguiente manera: (Ecuación de Fanning).

$$h = 603.9 \frac{f \cdot Q^2 \cdot L}{D^5}$$

Donde:

h = Pérdida de carga por fricción del sistema en metros de columna líquida.

L = Longitud total de la tubería en Kms

f = Coeficiente de fricción.

D = Diámetro interno de la tubería en pulgadas.

Q = Caudal en metros cúbicos por hora.

También se define de la siguiente manera:

$$h = 0.0265 \frac{f \cdot Q^2 \cdot L}{D^5}$$

Donde:

h = Pérdida de carga por fricción del sistema en metros de columna líquida.

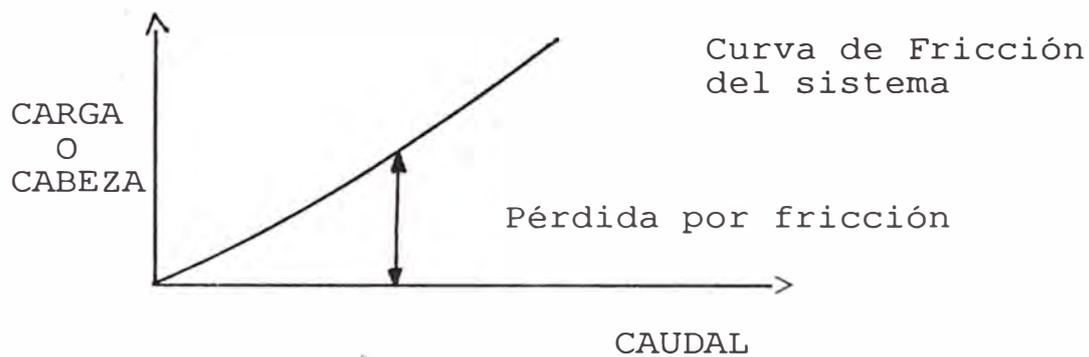
L = Longitud total de la tubería en Kms

f = Coeficiente de fricción.

D = Diámetro interno de la tubería en pulgadas.

Q = Caudal en barriles por día (BPD).

CURVA DE FRICCIÓN DEL SISTEMA:



(FIG. N° 10)

Cabe hacer notar que debido a la longitud y diámetro de la tubería, las pérdidas por accesorios para el caso del ONP son despreciables.

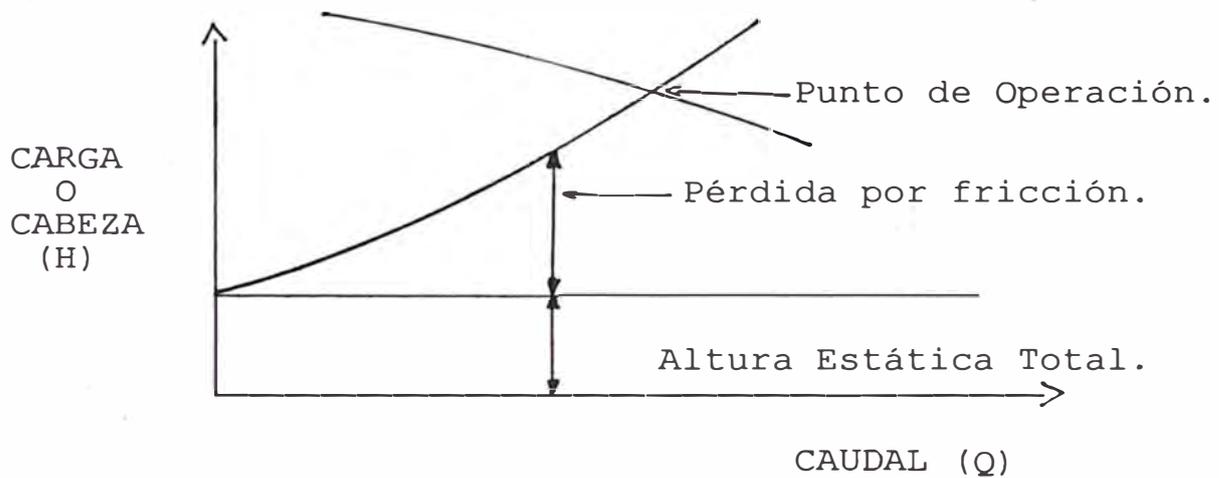
* **ALTURA ESTÁTICA TOTAL DEL SISTEMA :**

Es la diferencia en elevación entre los niveles líquidos de la succión y descarga.

Altura Estática - Alt.Estac.final- Alt.Estac.inicial

* CURVA DEL SISTEMA (H)

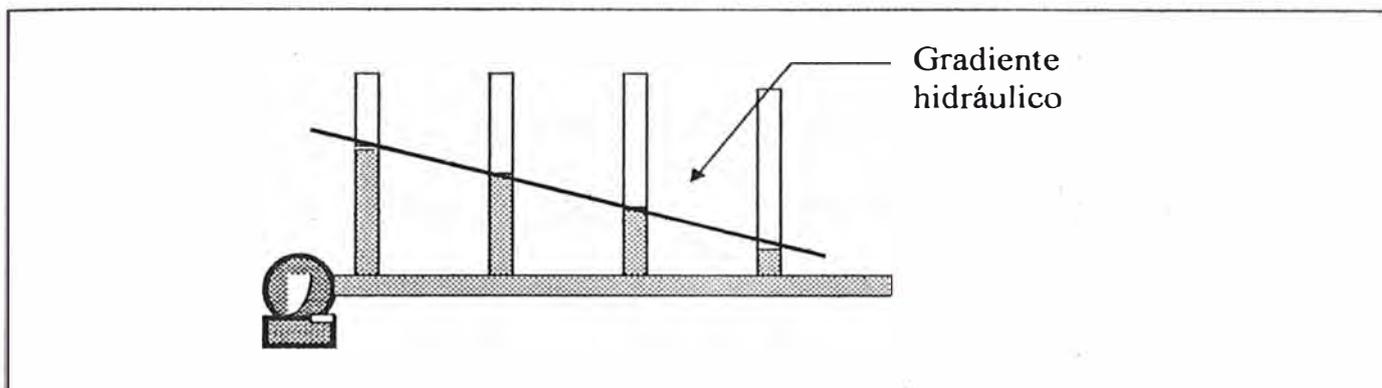
Está dada por la suma o combinación de la Curva de Fricción del Sistema y la Curva de la Altura Estática Total del Sistema (FIG. N° 11).



(FIG. N° 11)

2.4. GRADIENTE HIDRAULICO

Si se bombea un líquido a través de una tubería que tiene varias conexiones verticales transparentes ubicadas a intervalos regulares tal como se ve en la FIG.N°4, el líquido alcanzará distintas alturas disminuyendo a medida que se aleje de la bomba hacia el extremo abierto. Esta reducción continua de presión se denomina "Gradiente Hidráulico" y se debe a la pérdida de carga en la tubería.



(FIG.N° 12)

El Gradiente Hidráulico de un Oleoducto es una línea imaginaria, pero que puede representarse en un gráfico con el Perfil del Oleoducto o terreno y se utiliza para:

- Determinar ubicación y espaciado de estaciones de bombeo.
- Determinar alturas o presiones en los puntos críticos. Para evitar que haya sobrepresiones o vacíos en la tubería.

Para la determinación del Gradiente Hidráulico se utiliza la Ecuación de Pérdida de Carga por Fricción por unidad de longitud de tubería:

$$\frac{h}{L} = 0.0265 \times \frac{f \times Q^2}{D^5}$$

Donde :

Q = Caudal (BPD)

h/L = Altura/Longitud(metros/Km)

D = Diámetro (Pulgadas)

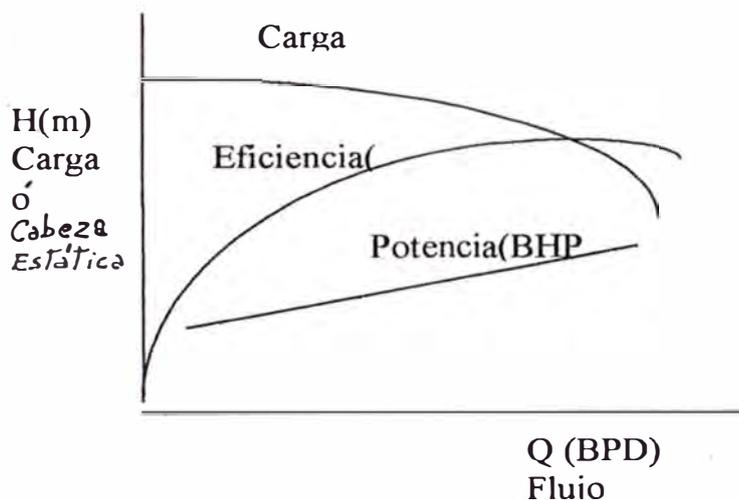
2.5. BOMBAS

En el presente, dos tipos de bombas son usados para transportar líquidos en oleoductos. Estos son bombas centrífugas y recíprocantes.

2.5.1. BOMBAS CENTRIFUGAS

Son las más usadas. Son equipos que aumentan la energía del fluido al efectuar trabajo (W) continuamente sobre él. Las bombas centrífugas, así como los ventiladores y compresores del mismo tipo, se basan en el mismo principio, es decir, producir energía cinética debido a la fuerza centrífuga y luego convertir esa energía parcialmente en presión, por la reducción de la velocidad a la salida de la bomba. Esta presión (P) es equivalente a una altura de columna de líquido ($H(m) = 10P(kg/cm^2)/p.e$) al cual se le denomina "cabeza estática".

Características de operación :



En la curva se aprecia que a medida que aumenta la carga (H), el flujo (Q) disminuye y viceversa. Se observa, también, que la Potencia aumenta con el flujo, por esta razón, cuando el flujo es nulo (válvula de descarga cerrada) el motor no se daña ; por lo tanto, es preferible arrancar una bomba centrífuga con su válvula de descarga cerrada, es decir, a baja potencia.. Por otra parte, vemos que la eficiencia pasa por un máximo, debido a esto se acostumbra a establecer la capacidad de una bomba aquella que corresponde a la máxima eficiencia.

Cuando se modifica la carga total de la bomba, ya sea por cambio de líneas, accesorios, propiedad del fluido, etc, traen las siguientes consecuencias :

- Si aumenta la carga total, el caudal disminuye y la potencia también.
- Si se reduce la carga, el caudal aumenta y la potencia se eleva.

2.5.2. BOMBAS RECIPROCANTES

Históricamente, estas bombas fueron las primeras en ser usadas. Pueden ser de tipo pistón o émbolo, bombas de acción doble o simple.

Las principales características de este tipo de bombas son: Debido a que la descarga depende sólo de la velocidad de la bomba, salvo que exista una pérdida de fluido, tendremos una presión prácticamente vertical vs. la curva de rendimiento. La potencia absorbida es así determinada por la presión, ésta a su vez es determinada por la hidráulica de la línea. La presión limitante es determinada por la potencia del motor.

- Sus eficiencias son altas: 85 a 92% para unidades de 100 HP y más. Pueden ser incluso superiores si las bombas se encuentran en buenas condiciones, y esto no es afectado por la viscosidad del producto o variaciones en la carga.
- La eficiencia volumétrica varia entre 95 a 97%, y es afectado por goteos en el equipo y válvulas, y también por la compresibilidad en el caso de hidrocarburos livianos o altas presiones de descarga.
- La presión de entrada no necesita ser demasiada alta , pero deben compensarse:
 - Para las pérdida de presión en las líneas de entrada.
 - Para las pérdida de presión en las válvulas.
 - Para la llamada "presión de aceleración" de la bomba, la cual es la presión requerida en el interior del cilindro para prevenir la separación del fluido de la superficie del pistón durante el movimiento de succión.
- El movimiento recíprocante causan intermitencia en la presión descarga, la cual puede dañar las instalaciones, a menos que se adapten mecanismos de disipación (surge bottles-cámaras de amortiguación).

Tienen altos precios.

De hecho, estas bombas son usadas excepcionalmente en oleoductos, por lo general se usan las bombas

centrífugas. Las bombas recíprocantes se emplean para transportar fluidos altamente viscosos (más de 400 cstk) o para servicio de bajos caudales y altas presiones.

2.5.3. POTENCIA DE LOS SISTEMAS DE BOMBEO

Una bomba accionada por su motor respectivo deberá vencer la diferencia de nivel entre dos puntos, más las pérdidas de carga en todo el trayecto (pérdidas por fricción a lo largo de la tubería y pérdidas locales debido a las piezas y accesorios).

En el siguiente gráfico:

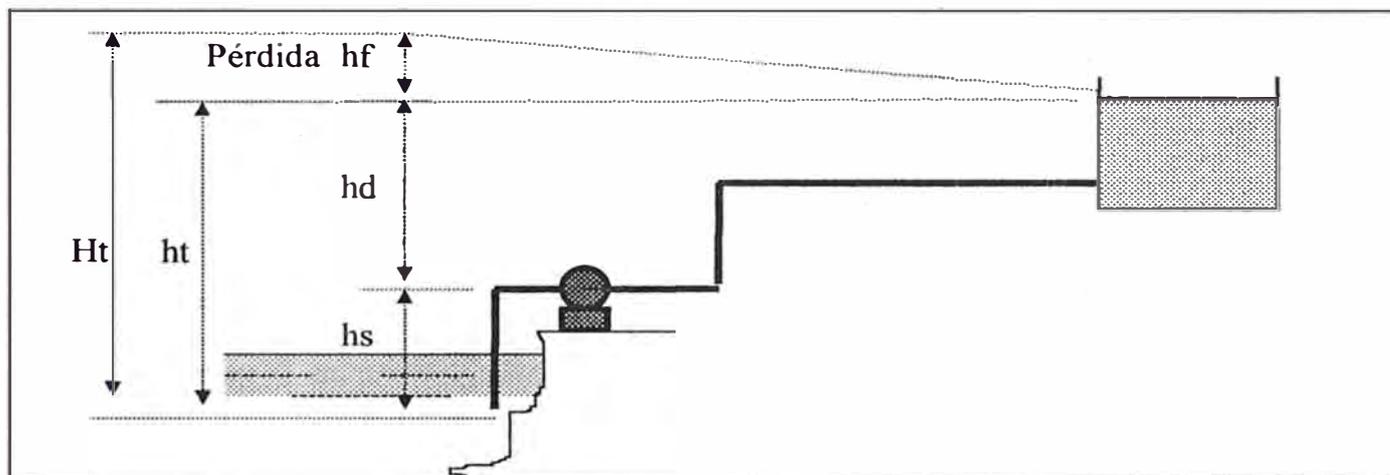


Figura (14)

$h_t = h_d + h_s$ =Altura estática total o diferencia de nivel geomé tico.

h_s =Altura estática de succión.

h_d = Altura estática de descarga

h_f = Altura por pérdida.

$H_t = h_d + h_f$ =Altura total de descarga o Cabeza total de descarga (TDH)

La Potencia de bombeo está dado por

$$P = \frac{Q(\text{gpm}) \cdot H_t(\text{pies}) \cdot S}{3960 \cdot \eta}$$

donde, hp es caballos de fuerza y η es el % de eficiencia del sistema (valor en tracción).

η = Eficiencia del sistema = η motor x η bomba.

S, gravedad específica

H: Presión Neta (en pies) = P.Descarga - P.Succión

2.5.4. CONEXION DE BOMBAS EN SERIE Y PARALELO

Instalándose dos o más bombas en SERIE, se debe considerar la suma de las cabezas totales que caracterizan a cada una de las bombas, admitiéndose el mismo caudal unitario.

Si las bombas trabajaran en PARALELO, se admite la misma cabeza total, sumándose los caudales.

2.5.5. LEYES DE AFINIDAD DE BOMBAS

Expresan las relaciones matemáticas entre las diversas variables que envuelve la performance de la bomba y se aplican para todo tipo de bomba centrífuga.

* Cuando el diámetro del impulsor permanece constante:

$$a) . \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$c) . \quad \frac{BHP_1}{BHP_2} = \frac{(N_1)^3}{(N_2)^3}$$

$$b) . \quad \frac{H_1}{H_2} = \frac{(N_1)^2}{(N_2)^2}$$

* Cuando las revoluciones del impulsor son constantes:

$$a) . \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D_1}{D_2}$$

$$c) . \quad \frac{BHP_1}{BHP_2} = \frac{(D_1)^3}{(D_2)^3}$$

$$b) . \quad \frac{H_1}{H_2} = \frac{(D_1)^2}{(D_2)^2}$$

Donde :

Q = Capacidad (GPM) .

H = Cabeza total (pies) .

BHP= Potencia (BHP) .

N = RPM del impulsor .

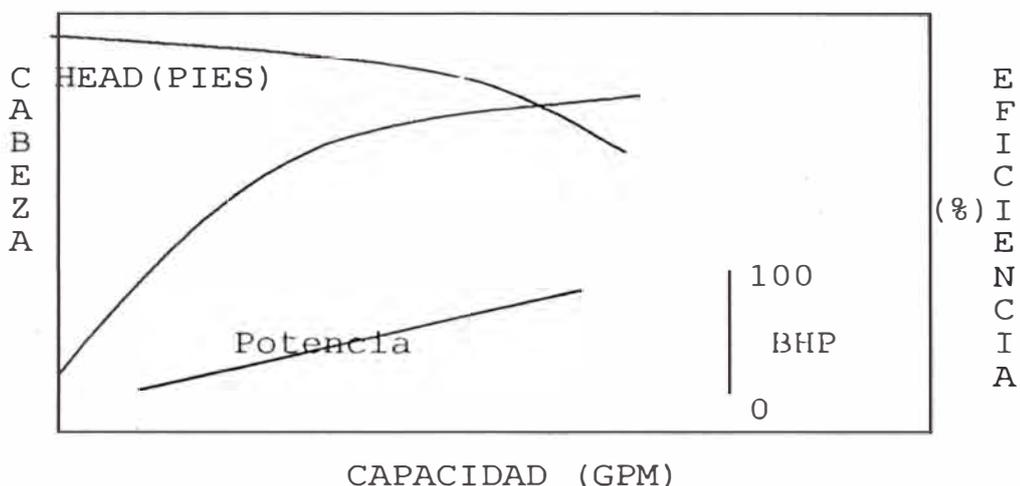
Estas Leyes son usadas para poder modificar las características de determinada bomba .

2.5.6. CURVAS CARACTERISTICAS DE LAS BOMBAS

Una bomba centrífuga que se opera a velocidad constante puede suministrar cualquier capacidad de cero a un máximo, dependiendo de la carga o cabeza, diseño y succión. La curva característica (FIG N°15) muestra la relación existente entre la cabeza de la bomba, capacidad, potencia y eficiencia para un diámetro de impulsor

específico. Esta curva se obtiene en fábrica, haciendo pruebas y usando de fluido el agua.

CURVA CARACTERISTICA DE UNA BOMBA



(FIG.N° 15)

CORRECCION DE CURVAS CARACTERISTICAS

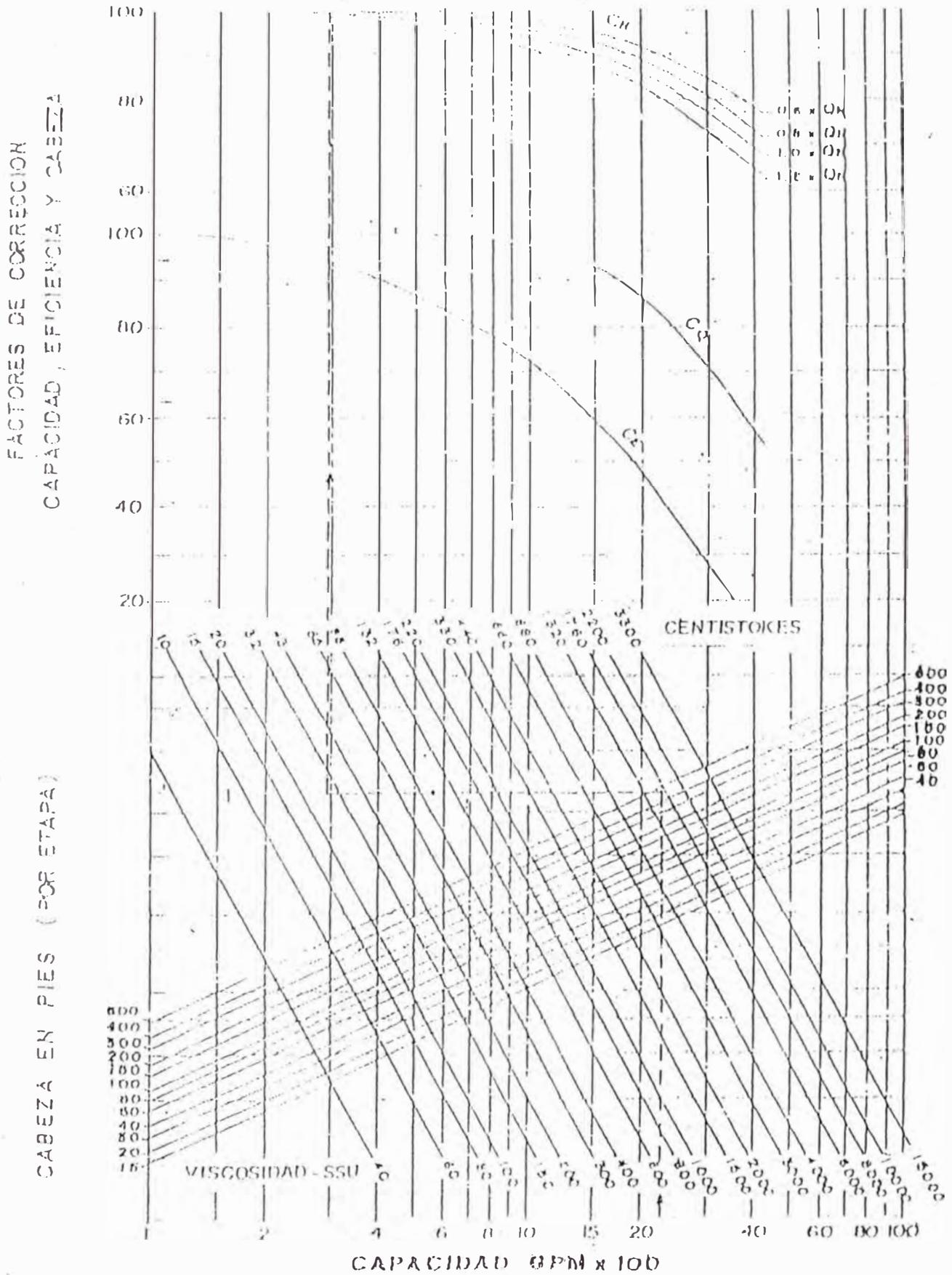
Cuando se bombean líquidos cuya viscosidad y gravedad específica, sean diferentes a las del agua, es necesario corregir las curvas características de las bombas, que originalmente están diseñadas para bombear agua.

La corrección de las curvas características sigue el siguiente procedimiento:

1. De las Curvas Características Normales de la bomba (para bombeo de agua), se determina:

- a) La capacidad nominal (Q_a) correspondiente a la máxima eficiencia. A partir de este valor se calcula $0.6 Q_a$, $0.8 Q_a$, $1.0 Q_a$ y $1.2 Q_a$.
- b) Para cada caudal $0.6 Q_a$, $0.8 Q_a$ y $1.0 Q_a$ y $1.2 Q_a$, obtenemos su respectiva cabeza o presión (H_a) y eficiencia (E_a). Si la bomba tiene N etapas, se divide la cabeza entre N para hallar la correspondiente a una sola etapa.

CARTA DE FACTORES DE CORRECCION PARA
 CURVAS CARACTERISTICAS DE BOMBAS
 CENTRIFUGAS PARA BOMBEO DE LIQUIDOS VISCOSOS



FUENTE: Estándar de Ingeniería E13-02-02.

Fig. 16

2. Recurrimos a la "Carta de Factores de Corrección para Curvas Características de bombas centrífugas para bombeo de líquidos viscosos" (FIG N°16) y localizamos el valor $1Q_a$ en la parte inferior (GPM) y subimos verticalmente hasta encontrar la cabeza H_a (1 etapa), luego seguimos horizontalmente (a la izquierda o a la derecha) hasta encontrar la recta oblicua correspondiente a la viscosidad del petróleo (en SSU o CSTKS), para una temperatura de bombeo determinada. Luego subimos verticalmente hasta encontrar las curvas de los factores de corrección para la eficiencia (C_e), capacidad (C_q) y cabeza (C_h).

Para todos los valores de eficiencia y capacidad se da un solo coeficiente de corrección C_e y C_q respectivamente. Para la cabeza o presión, se dan coeficientes de corrección C_h para cada uno de los siguientes caudales: $0.6Q_a$, $0.8 Q_a$, $1.0 Q_a$ y $1.2 Q_a$.

3. Se determinan los valores capacidad (Q_p), cabeza (H_p) y eficiencia (E_p) corregidos para el petróleo que se está bombeando. Se multiplica cada uno de los valores de

capacidad Q_a , cabeza (H_a) y eficiencia (E_a) por los factores de corrección correspondientes encontrados en el punto anterior.

$$Q_p = C_q \times Q_a.$$

$$H_p = C_h \times H_a.$$

$$E_p = C_e \times E_a.$$

4. Se calcula la potencia requerida para bombear petróleo (BHPp) para cada una de las cuatro nuevas capacidades Q_p , utilizando los valores encontrados en el punto anterior y la siguiente fórmula:

$$BHPp = \frac{Q_p \times H_p \times s}{k \times E_p}.$$

Donde k es una constante que depende de las unidades empleadas.

s = Gravedad Específica del petróleo.

5. Se tabula y gráfica los valores corregidos de la cabeza H_p , potencia BHPp y eficiencia E_p contra los valores corregidos de capacidad (Q_p).

La curva corregida de potencia debe ser aproximadamente paralela a la curva correspondiente para el agua.

SIMBOLOGIA USADA

- Qa : Capacidad en GPM cuando se bombea agua.
- Qp Capacidad en GPM cuando se bombea petróleo.
- Ha Cabeza en pies cuando se bombea agua.
- Hp Cabeza en pies cuando se bombea petróleo.
- Ea Eficiencia en % cuando se bombea agua.
- Ep Eficiencia en % cuando se bombea petróleo
- BHPp :Potencia requerida cuando bombea petróleo
- S Gravedad Específica del petróleo.
- Up Viscosidad del petróleo a la temperatura de bombeo.
- Cq Factor de corrección para el caudal de bombeo.
- Ch Factor de corrección para la cabeza.
- Ce Factor de corrección para la eficiencia.
- 1Qa Capacidad cuando se bombea agua, correspondiente a la máxima eficiencia.

2.6. PRESION MAXIMA ADMISIBLE EN UNA TUBERIA

La Presión máxima que puede soportar una tubería está dada por la fórmula siguiente:

$$P = \frac{200 \times S \times t}{D}$$

Donde :

P = Presión máxima admisible (Kg/cm²).

S = Esfuerzo admisible (Kg/cm²)=Límite Fluencia x 0.72.

t = Espesor de la pared del tubo (pulg)

D = Diámetro exterior del tubo (pulg)

Límite de Fluencia de la tubería: 36.60 (Kg/cm²)

Para el cálculo de la Presión máxima admisible se considera la disminución del espesor de la tubería. Para el caso de la tubería del ONP, se considera una tasa de disminución del espesor por corrosión igual a 0.5 MPY (milésimas de pulgada por año).

2.7. CONSUMO DE COMBUSTIBLE

El consumo de combustible de una turbina está en función a la potencia desarrollada por ésta. Una mayor potencia implica un menor consumo específico.

Existen Gráficas en las que se relaciona el Consumo Específico de combustible (Lb/HP-Hr) y la Potencia (HP) de la turbina. (ANEXO 2)

Consumo de la turbina = C_e (Lb/HP-Hr) x Pot. (HP) = Lb/Hr.

Para convertir el consumo Lb/Hr en Galones por hora (GPH) se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Consumo (GPH)} = \frac{\text{Lb/Hr}}{500 \times s} \times 60$$

s = Gravedad Específica del Diesel.

Para Diesel, $s = 0.8576$ (API = 33.5°)

En la práctica el consumo de combustible se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Consumo (GPH)} = \frac{C_e (\text{Lb/HP-Hr}) \times \text{Potencia (HP)}}{7.25}$$

CAPITULO III

DESCRIPCION DE LA SITUACION ACTUAL

3.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

El Oleoducto Nor Peruano fue construido en el año 1,976 por encargo de la Empresa Petróleos del Perú S.A., para transportar el petróleo crudo extraído en la Selva Norte del Perú, hacia la Costa y distribuirlo a los centros de consumo nacional (Refinerías de la Costa) o para exportación.

El Tramo principal del Oleoducto Nor Peruano (Tramos I y II) entró en operación en el año 1,977, mientras que el Ramal Norte lo hizo en 1,978.

El Oleoducto Nor Peruano fue diseñado para alcanzar caudales de bombeo de hasta 210,525 BPD en el Tramo II, 73,699 BPD en el Tramo I y 105,000 BPD en el Tramo Ramal Norte.

El Tramo II inició sus operaciones bombeando caudales de 105 MBD en forma continua de acuerdo a la disponibilidad de crudo en las Estaciones recolectoras.

En 1,983 ante el decaimiento de la producción, se convino operar el Oleoducto en forma intermitente a caudales de 160 MBD, alcanzando una mejor productividad

que bombear a bajos caudales (rates) y en forma continua.

En 1,994 dada la baja calidad del crudo (baja del API y aumento de viscosidad) y decaimiento de la producción de los campos del Lote 1-AB, se optó por bombear caudales de 150 MBD en períodos regulares de cinco días de bombeo por tres de parada o hasta completar la carga semanal que requiere Refinería La Pampilla, Refinería Talara o crudo de exportación.

En el Tramo II no se ha efectuado un Estudio de Optimización, que considere a la vez varias alternativas, sólo se han realizado pruebas aisladas, de acuerdo a las condiciones operativas y variaciones de la calidad del crudo bombeado.

Por este motivo se decide analizar la optimización del consumo de combustible en el Tramo II demostrando con un fundamento teórico y luego práctico la manera más eficiente de operar el sistema.

3.2. SITUACION ACTUAL DEL BOMBEO DE CRUDO EN EL TRAMO II

El Tramo II del Oleoducto Nor Peruano bombea crudos que van desde 19.1° API (crudo OXY) hasta 23° API (crudo

PLUSPETROL), con viscosidades que fluctúan entre 150 y 250 centistokes.

Generalmente el bombeo se realiza en batería, (2 tanques a la vez) mezclando los crudos recibidos de las Estaciones 1 y Andoas, obteniendo viscosidades promedios de 200 Cstks y 20.5°API.

Actualmente el bombeo se realiza trabajando una turbobomba en Estación 5, alcanzando rates de bombeo de 150 MBD. En las demás Estaciones trabaja una turbobomba, a excepción de la Estación 9 que trabaja con tres turbobombas para poder elevar el crudo hasta los 2,380 msnm (Paso Porculla), y luego llegue por gravedad hacia la Costa.

La actual configuración de bombeo del Tramo II para un caudal de 150 MBD obtiene una productividad de 3.79 Bls. bombeados por galón de combustible consumido por sus unidades de bombeo de todo el Tramo.

Esta productividad puede incrementarse si se realizan mejoras en la disposición o configuración de las unidades de bombeo, variando los parámetros o mejorando la calidad del crudo bombeado realizando las mezclas adecuadas de tal forma que reduzca su viscosidad.

Toda mejora de trabajo en el bombeo del Oleoducto, implica principalmente el ahorro de combustible y horas trabajadas por las máquinas en mejores condiciones de operación.

3.3. DETERMINACION DE LA PROBLEMÁTICA

Al inicio de las operaciones, se bombeaba 105 MBD en forma continua y con una baja eficiencia, luego en el año 1,983 en que se cambió el bombeo de forma continua a intermitente (160 MBD) se mejoró la productividad en el bombeo; a partir de 1,993 debido al incremento en la viscosidad del crudo se varió a 150 MBD manteniendo los mismos parámetros de operación.

Hoy en día se necesita atender en Bayóvar un promedio de 80.0 MBD; lo que equivale a un bombeo de 28,800 MB por año; para transportar este volumen por el Tramo II y considerando una productividad actual de 3.78 Bls/Gl, se necesitan aproximadamente 7'620,000 Galones de combustible Diesel.

Por consiguiente buscar una alternativa para disminuir este gasto es el propósito del estudio que se lleva a cabo.

3.4. ALTERNATIVAS DE SOLUCION

Para el desarrollo del presente estudio se han planteado cuatro alternativas de bombeo que serán analizadas teóricamente aplicando los principios de "flujo de fluidos", y llevada a la práctica efectuando los ensayos respectivos, para comparar y verificar resultados.

Estas alternativas de bombeo son: (TB = turbobomba)

Alt. 1). 1 TB en Estación 5 y 2 TB en Estación 9

Alt. 2). 1 TB en Estación 5 y 3 TB en Estación 9

Alt. 3). 2 TB en Estación 5 y 3 TB en Estación 9

Alt. 4). 2 TB en Estación 5 y 4 TB en Estación 9

En las Estaciones 6, 7 y 8 se trabaja con 1 turbobomba.

Las alternativas planteadas, se refieren a la disposición de las unidades necesarias para el bombeo en las estaciones del Tramo II.

La variación del número de turbobombas operadas en las estaciones 5 y 9, se deben fundamentalmente a lo siguiente:

- La Estación 5, es la Estación inicial del Tramo II y determina el caudal de bombeo. La variación del número

de turbobombas que trabajan en esta Estación implica una variación en la capacidad de bombeo del Tramo II.

- La Estación 9, es la última Estación de rebombeo del Tramo II y la que ofrece restricciones al caudal de bombeo, de acuerdo al número de turbobombas con que se trabaje en esta Estación, debiendo generar la potencia necesaria para elevar el fluido a 2380 msnm (Paso de Porculla) y luego llegue por gravedad al Terminal de Bayóvar.

La alta presión que debe desarrollar, restringe el caudal que puede bombear cada turbobomba, siendo necesarias para trabajar 2, 3 ó 4 unidades, de acuerdo al caudal que se quiere obtener.

Otro de los factores que limita la capacidad disponible de la potencia de las turbobombas en la Estación 9 es la altura topográfica (1,162 msnm), en la que se encuentra ubicada.

Las Estaciones intermedias 6, 7 y 8 no son limitantes en el caudal de bombeo por tener que elevar el fluido a menores alturas que la Estación 9 y por consiguiente tener sus unidades mayores potencias disponibles.

CAPITULO IV

ANALISIS TECNICO DE ALTERNATIVAS

4.1. PARAMETROS DE OPERACION PARA EVALUACION DE ALTERNATIVAS

Los parámetros principales de operación considerados para la evaluación técnica de las alternativas son:

a) Presiones del Sistema

-Presiones de Succión

La presión de succión es la fuerza por unidad de área que ejerce el fluido en el lado de la succión de la turbobomba o en el lado de la llegada del fluido a la estación posterior. Puede expresarse en Kg/cm^2 , PSI (lb/pulg^2) o en unidades de longitud de la columna del fluido ya sea en metros o pies.

Las presiones de succión con las que se efectuarán los cálculos teóricos y la ejecución de los ensayos, se fijan a niveles altos (en comparación con las usadas para 150 MBD), pero muy por debajo de las presiones máximas admisibles de la tubería. Estas presiones son:

PRESIONES DE SUCCION (KG/CM²)

Alter	ESTACIONES				
	5	6	7	8	9
1	5.0	26.2	21.5	12.5	10.0
2	6.0	26.2	21.5	12.5	10.8
3	6.4	30.0	29.0	18.0	18.0
4	6.4	29.0	29.0	18.0	18.0

Incrementándose las presiones de succión en las estaciones, se reduce la presión neta o cabeza de las bombas, necesitando éstas trabajar con menos RPM y menor potencia, consumiendo por lo tanto, menor cantidad de combustible.

- Presiones de Descarga

Las presiones de descarga son las que desarrollan las unidades de bombeo de una Estación, de tal forma que el fluido llegue a la siguiente Estación con la presión requerida.

Las presiones de descarga están en función a la presión de succión (llegada) de la Estación siguiente o del punto más alto al que tiene que bombearse el fluido.

- Presiones de Alivio

Las presiones de alivio se fijan para evitar sobrepresiones en el sistema y aliviar la tubería cuando las presiones de trabajo superen las convenidas

para los ensayos. Estan fijadas a 1.5 Kg/cm^2 por encima de la presiones máximas de succión.

b) Características del Crudo

El bombeo en el Tramo II, generalmente se efectúa en batería mezclando crudo OXY con PLUSPETROL, para reducir la viscosidad del crudo OXY que es muy alta.

La segregación de crudo, se efectúa sólo cuando Refinería La Pampilla solicita un lote para alguna evaluación o cuando se envía carga a la Refinería El Milagro (Estación 7).

El crudo mezcla que se bombea a través del tramo II tiene una proporción de 75% de crudo OXY y 25% de crudo PLUSPETROL.

Se ha considerado para el presente estudio, un crudo mezcla con las características siguientes:

- API a 60°F = 20.5

Gravedad Específica 0.923

- VISCOSIDAD :

a 100°F = 115.80 Cstks

a 122°F = 62.90 Cstks

a 82°F = 189.07 Cstks

c) Temperatura de Línea

Se considera como temperatura de línea, la temperatura del ambiente al que está expuesta la tubería.

Para el Tramo II (Estación 5-Bayóvar), se considera una temperatura de línea de 28°C (82.4 °F).

d) Caudal de Bombeo

El caudal es el volumen del fluido bombeado por unidad de tiempo. Para cada alternativa a evaluar se considera un rango de valores de caudal.

- **Alternativa 1:** 1 TB en Estación 5 y 2 TB en Estación 9

Con una turbobomba en Estación 5, considerando que no haya limitaciones de caudal en las demás Estaciones, el máximo que se puede bombear es de 160,457 barriles por día (BPD), con un crudo de las características señaladas anteriormente (ver ANEXO 3).

Sin embargo trabajando con 2 turbobombas en Estación 9 se limita este caudal debido a que la potencia desarrollada por ambas unidades llega a su máxima capacidad. Por esta razón, el caudal máximo es el que puede bombear Estación 9 con 2 turbobombas

Este caudal máximo, es de 135,038 BPD (ver ANEXO 4).

- **Alternativa 2:** 1 TB en Estación 5 y 3 TB en Estación 9

Trabajando con 3 turbobombas en Estación 9, no hay limitaciones de caudal en el sistema, debido a que las tres unidades pueden bombear todo el caudal que bombea Estación 5 con una turbobomba en su máxima capacidad. Por lo tanto, el caudal máximo de bombeo en el Tramo II, para esta alternativa, lo da Estación 5 y es de 160,457 BPD.

- **Alternativa 3:** 2 TB en Estación 5 y 3 TB en Estación 9

Trabajando con 3 turbobombas en Estación 9, no puede bombearse todo el caudal que bombea Estación 5 con dos turbobombas en su máxima capacidad. Por lo tanto, el caudal máximo de bombeo en el Tramo II, para esta alternativa, está dado por el máximo caudal que puede bombear Estación 9 con tres turbobombas. Este caudal es de 204,789 BPD (ver ANEXO 4).

- **Alternativa 4:** 2 TB en Estación 5 y 4 TB en Estación 9

Trabajando con 4 turbobombas en Estación 9, no hay restricciones de caudal en esta Estación, pudiéndose bombear todo el caudal que bombea Estación 5 con 2 turbobombas hasta su máxima capacidad. Este caudal máximo es el que bombea Estación 5 con dos turbobombas en su máxima capacidad. Este caudal máximo es de 211,714 MBD operando las 2 turbobombas a 3,050 RPM (ver ANEXO 3).

e) Características de la tubería y alturas de estaciones:

La tubería es uno de los elementos más importantes que constituyen el ONP. Sus características principales son el diámetro, longitud y espesor. Se considera también las diferencias de cotas (alturas) entre un punto inicial y el punto más alto que logra alcanzar antes o al llegar a la siguiente Estación de rebombeo o almacenamiento.

- Diámetro de la tubería:

El diámetro nominal de la tubería en el Tramo II es de 36 pulgadas. Para efectos de cálculo se utiliza el diámetro interno que es 34.98 pulgadas.

- Longitud de tubería:

Para el cálculo de pérdidas por fricción que influyen en las presiones de descarga, se considera la longitud de la tubería que es necesario que recorra el fluido hasta el punto más alto en el sub-tramo, que puede ser un punto intermedio entre dos Estaciones o la Estación final del sub-tramo.

Un sub-tramo está formado por dos Estaciones (inicial y final). En el Tramo II se consideran los siguientes:

SUBTRAMO	PUNTO MAS ALTO	DISTANCIA EST. AL PTO.MAS ALTO	INCREMENTO ALTURA (mts)
E5 - E6	C. Pupuntas	19.450 Km	618
E6 - E7	C. Montenegro	39.582 Km	515
E7 - E8	Est. 8	74.894 Km	388
E8 - E9	Est. 9	55.454 Km	346
E9 - BAY	Porculla	23.006 Km	1218

- Espesor de la tubería:

El espesor de la tubería es variable, en los lugares donde la presión de trabajo es mínima (puntos más altos, tramos de libre escurrimiento, llegadas a Estaciones), el espesor es de 0.312, pulgadas. En los puntos más bajos del tramo (cruces de ríos y quebradas) y salida de las Estaciones el espesor llega a medir hasta 0.5 pulgadas y en la salida de la Estación 9 llega hasta 0.875 pulgadas. Los espesores de tubería se toman en

cuenta para los cálculos de máximas presiones admisibles de la tubería.

4.2. CALCULO DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE PARA CADA ALTERNATIVA

Para poder realizar comparaciones entre las cuatro alternativas de bombeo propuestas, es necesario obtener un parámetro de comparación que cuantifique los resultados del análisis de cada alternativa. Este parámetro está dado por el consumo de combustible de las unidades de bombeo del Tramo II por cada barril de petróleo crudo bombeado por éste. A esta relación se le denomina "Índice de consumo específico de combustible por bombeo en el Tramo II"

4.2.1 METODOLOGIA DEL CALCULO

El consumo de combustible de cada turbobomba está en función de la potencia desarrollada por ésta. Por esta razón se hace necesario calcular la potencia de cada turbobomba, considerando el caudal de bombeo, cabeza o presión neta, gravedad específica del crudo y la eficiencia de la bomba, de acuerdo al siguiente procedimiento:

a) Se calcula la potencia de cada unidad de bombeo.

Para el cálculo de la potencia utilizamos la fórmula siguiente:

$$P = \frac{Q \times H \times s}{3960 \times n}$$

Donde:

P = Potencia (HP).

Q = Caudal (GPM).

H = Cabeza o Presión neta (pies).

s = Gravedad Específica del crudo.

n Eficiencia del sistema = Ef.bomba x Ef.turbina

(Se asume que la Eficiencia de una turbina es 95%)

b) La eficiencia de la bomba se obtiene para un caudal específico, corrigiendo la curva normal de la bomba para el crudo de las características señaladas anteriormente. (Para facilidad de estos cálculos se usó un programa elaborado en computador que simplifica y obtiene de una manera más exacta la eficiencia requerida).

c) La cabeza de la bomba (H) se obtiene según la siguiente expresión:

$$H = P.\text{Descarga} - P.\text{Succión}$$

La Presión de descarga para las Estaciones 5, 6 y 9, se calcula con la siguiente expresión:

$$PDEi = (PMA - ALTEi) + (L \times GH)$$

Donde:

PDEi = Presión de descarga de Estac.inicial (mts).

PMA = Altura topográfica del punto más alto entre la Estación inicial y la siguiente Estación (msnm).

ALTEi = Altura topográfica de la Estación inicial (msnm).

L = Longitud de tubería o distancia entre la Estación inicial y el punto más alto (Km).

GH = Gradiente Hidráulica calculada para un caudal determinado (m/Km).

Para las Estaciones 7 y 8, las presiones de descarga se calcula de la siguiente manera:

$$PDEi = (ALTEf - ALTEi) + PSEf + (L \times GH)$$

Donde:

PDEi = Presión descarga Estación inicial (mts).

ALTEf = Altura topográfica de la Estación siguiente (mts).

ALTEi = Altura topográfica de la Estación inicial (msnm).

PSEf = Presión succión de la Estación de rebombeo (mts).

GH = Gradiente Hidráulica (m/Km).

L = Distancia entre Estación inicial y final (kms).

d) La Gradiente Hidráulica (GH) expresa la caída de presión del flujo por cada kilómetro de tubería recorrido. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$GH = \frac{H}{L} = \frac{0.0265 \cdot f \cdot Q^2}{D^5}$$

f = Coeficiente de fricción

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{---> Flujo Laminar.}$$

Re = Número de Reynolds.

$$Re = 92.24 \times \frac{Q}{D \cdot u}$$

Donde: Q = Caudal (BPD)

D = Diámetro interno (pulgadas)

u = Viscosidad (Cstks)

e) Una vez calculada la Potencia se busca en la "Gráfica de Consumo Específico de Turbina" (Gráfica entregada por el fabricante (ANEXO 2) del consumo específico de combustible expresado en LB/HP-HR. Para el caso del Tramo II, se utiliza la Gráfica de la Turbina TB-4000. Este Gráfico relaciona el Ce (LB/HP-Hr) y la Potencia (HP) de la turbina, considerando una temperatura (30°C) que equivale a la del crudo en la bomba.

f) Obtenido el consumo específico de potencia en Lb/HP-Hr, calculamos el consumo de combustible de la unidad para la potencia respectiva.

$$\text{CONSUMO (GPH)} = \frac{\text{POTENCIA} \times \text{Ce.}}{7.25}$$

g) El consumo de la Estación lo obtenemos sumando los consumos de todas las unidades de bombeo de la Estación.

h) Calculamos el consumo específico de bombeo de la Estación utilizando la siguiente expresión:

$$\text{Ce (GLS/BL)} = \frac{\text{CONSUMO (GPH)} \times 24}{\text{CAUDAL (BPD)}}$$

i) El índice de productividad de bombeo de la Estación es la inversa de su consumo específico:

$$\text{IP (BLS/GL)} = \frac{\text{CAUDAL (BPD)}}{\text{CONSUMO(GPH)} \times 24}$$

j) Para las Estaciones donde trabajan 2 o más turbobombas en paralelo, el caudal para el cálculo de la potencia en cada máquina, se obtiene en forma proporcional para cada bomba de acuerdo a su caudal nominal para su máxima eficiencia (para turbobombas de iguales características, el caudal se divide entre el número de ellas).

Para turbobombas en paralelo se considera una misma cabeza total en pies (presión común neta).

4.2.2 EVALUACION DE ALTERNATIVAS

A continuación se muestra el resumen de las 4 alternativas estudiadas (ver FIG N°7), para detalle de este resumen ver el ANEXO 5.

CALCULO TEORICO DE CONSUMO DE COMBUSTIBLES TRAMO II

ALTERNATIVA 1 1 UNIDAD EN ESTACION 5 Y 2 UNIDADES EN ESTACION 9

CAUDAL TOTAL		CONSUMO DE COMBUSTIBLE (GPH)						C.E.
MBD	(BPH)	EST. 5	EST. 6	EST. 7	EST. 8	EST.9	TOTAL	(GL/BL)
100	4166.67	218.63	146.59	163.72	179.37	437.76	1146.07	0.275057
105	4375.00	223.75	149.65	166.96	181.79	446.36	1168.51	0.267088
110	4583.33	229.03	152.56	170.11	183.57	458.04	1193.31	0.260329
115	4791.67	234.91	155.45	173.28	186.51	472.34	1222.49	0.255128
120	5000.00	242.34	158.11	176.27	188.69	488.76	1254.17	0.250834
125	5208.33	249.19	160.67	179.22	190.80	505.12	1285.00	0.246720
130	5416.67	256.81	163.15	182.13	192.86	519.66	1314.61	0.242697
135	5625.00	263.99	165.54	185.00	195.00	534.78	1344.31	0.238988
140	5833.33	271.44	167.97	187.99	196.94	550.26	1374.6	0.235646

ALTERNATIVA 2 1 UNIDAD EN ESTACION 5 Y 3 UNIDADES EN ESTACION 9

CAUDAL TOTAL		CONSUMO DE COMBUSTIBLE (GPH)						C.E. (GL/BL)
MBD	(BPH)	EST. 5	EST. 6	EST. 7	EST. 8	EST.9	TOTAL	
120	5000.00	239.46	158.52	176.73	182.28	589.47	1346.46	0.269292
125	5208.33	244.80	160.88	179.45	185.47	600.27	1370.87	0.263207
130	5416.67	250.55	163.56	182.61	188.00	611.04	1395.76	0.257679
135	5625.00	259.72	165.75	185.25	191.00	621.3	1423.02	0.252981
140	5833.33	266.24	168.08	188.12	194.27	632.61	1449.32	0.248455
145	6041.67	272.72	170.56	191.23	197.41	642.27	1474.19	0.244004
150	6250.00	279.43	173.00	194.35	200.69	652.44	1499.91	0.239986
155	6458.33	286.37	175.41	197.49	203.24	664.29	1526.80	0.236408
160	6666.67	292.67	177.78	200.65	205.93	678.00	1555.03	0.233255

ALTERNATIVA 3 2 UNIDADES EN ESTACION 5 Y 3 UNIDADES EN ESTACION 9

CAUDAL TOTAL		CONSUMO DE COMBUSTIBLE (GPH)						C.E. (GL/BL)
MBD	(BPH)	EST. 5	EST. 6	EST. 7	EST. 8	EST.9	TOTAL	
160	6666.67	389.26	164.23	191.44	208.02	656.31	1609.26	0.241389
165	6875.00	394.68	166.28	194.29	211.40	665.73	1632.38	0.237437
170	7083.33	400.08	168.49	196.87	214.80	676.32	1656.56	0.233867
175	7291.67	405.48	170.35	199.74	218.22	686.88	1680.67	0.230492
180	7500.00	410.90	172.71	203.10	222.13	699.33	1708.17	0.227756
185	7708.33	415.3	175.48	207.10	232.66	713.52	1744.06	0.226256
190	7916.67	420.70	181.80	211.04	235.94	727.86	1777.34	0.224506
195	8125.00	425.76	184.63	215.09	239.58	742.38	1807.44	0.222454
200	8333.33	431.16	187.37	219.23	244.47	757.05	1839.28	0.220714

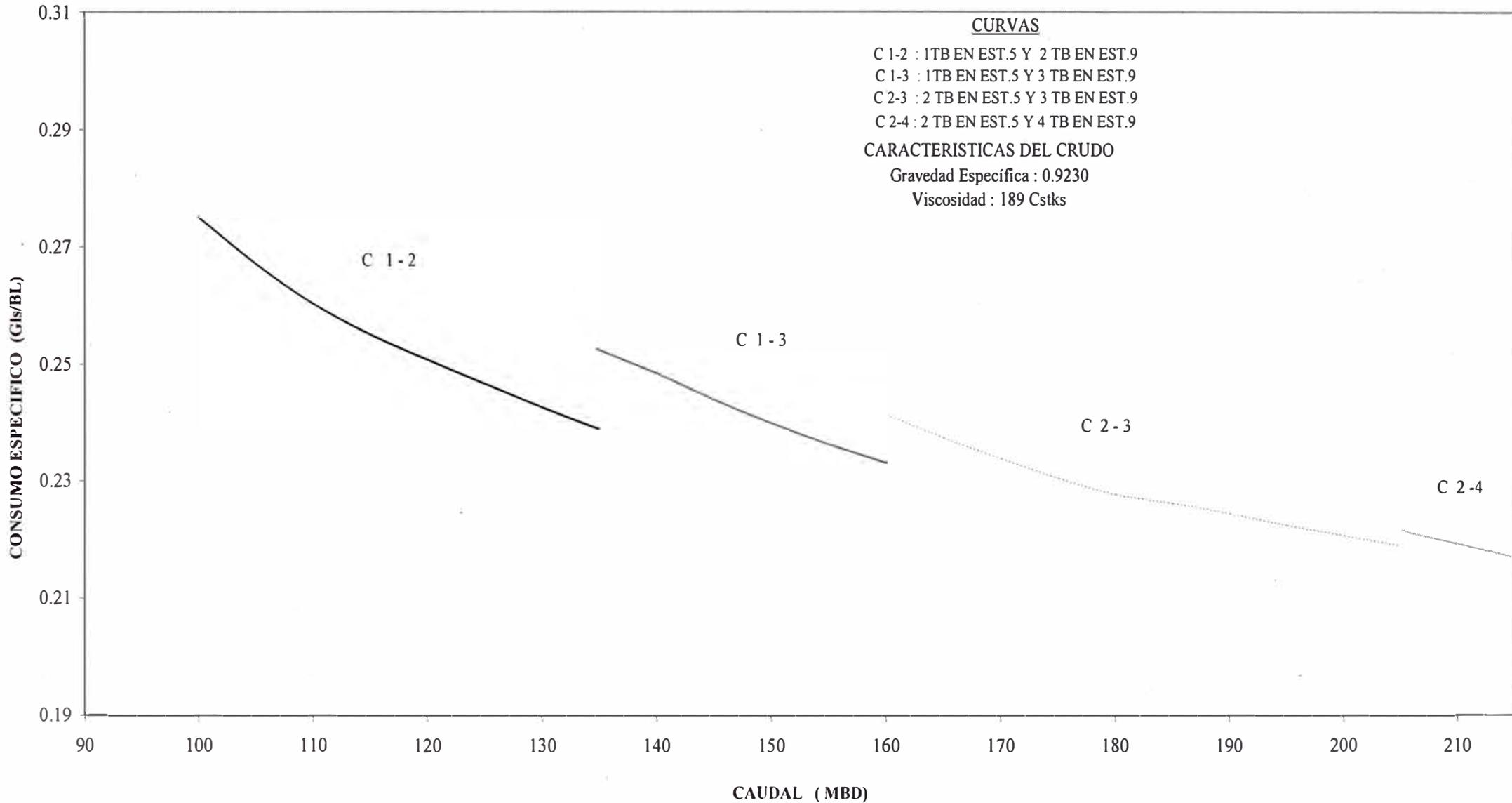
ALTERNATIVA 4 2 UNIDADES EN ESTACION 5 Y 4 UNIDADES EN ESTACION 9

CAUDAL TOTAL		CONSUMO DE COMBUSTIBLE (GPH)						C.E.
MBD	(BPH)	EST. 5	EST. 6	EST. 7	EST. 8	EST.9	TOTAL	(GL/BL)
180	7500.00	410.90	174.66	203.10	227.88	787.76	1804.3	0.240573
185	7708.33	414.98	176.6	205.89	231.32	796.28	1825.07	0.236766
190	7916.67	420.02	178.41	208.53	234.56	804.16	1845.68	0.233139
195	8125.00	425.06	180.10	211.03	237.58	808.84	1862.61	0.229244
200	8333.33	430.44	181.76	213.52	240.59	813.44	1879.75	0.22557
205	8541.67	435.46	182.86	215.20	242.55	817.28	1893.35	0.221660
210	8750.00	441.22	185.61	219.32	247.56	825.32	1919.03	0.219318
215	8958.33	446.98	188.4	223.55	252.65	832.68	1944.26	0.217034

Fuente : Elaboración Propia

CURVAS CAUDAL - CONSUMO ESPECIFICO

TRAMO II



4.3. ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

- De acuerdo a la Gráfica Consumo Específico - Caudal de bombeo se puede afirmar que es más beneficioso bombear con los siguientes caudales:

<u>ALTERNATIVA</u>	<u>CAUDALES (MBD)</u>
1	$100.0 < Q \leq 135.0$
2	$135.0 < Q \leq 160.5$
3	$160.5 < Q \leq 204.8$
4	$204.8 < Q \leq 211.7$

A medida que se bombea caudales más altos, el Oleoducto tendrá un mayor índice de utilización y un menor consumo específico de combustible, lo que incrementa la productividad de la operación.

- La Alternativa N° 4 resulta la óptima para el ONP. Sin embargo debido a las limitaciones del sistema (estado de tubería principalmente) se debe trabajar en el intervalo de 180 a 200 MBD lo que determina que se debe trabajar con la Alternativa N° 3.
- La Alternativa N°1 debe desecharse por representar mayor consumo específico de combustible para el OLE.

4.4. SELECCION DE LA ALTERNATIVA OPTIMA

De las alternativas estudiadas, se debe trabajar 2 turbobombas en Estación 5 para un bombeo entre 180 y 200 MBD; en Estación 9 se debe trabajar con 3 turbobombas mientras las condiciones lo permitan, en caso la presión de succión supere los 18 Kg/cm² se deberá arrancar la cuarta unidad (pasar a la Alternativa N° 4), la que deberá ser parada en cuanto sea posible, con el fin de no aumentar el consumo de combustible ni la presión de descarga.

La presión de descarga en Estación 9 siempre deberá estar por encima de los 112 Kg/cm², presión necesaria para vencer el Paso de Porculla y luego por caída libre llegue el petróleo crudo hasta Bayóvar.

CAPITULO V

ENSAYO DE CAMPO

5.1. BASES PARA LOS ENSAYOS

Una vez seleccionada la alternativa óptima (Alternativa N°3) para un bombeo de 190 MBD, se decidió llevar a cabo las pruebas respectivas para el menor consumo específico pero teniendo en cuenta el estado de la tubería, por lo que se determinó que se haga una primera prueba piloto de ensayo al final de un período de bombeo de 150 MBD; 2 horas antes de finalizar el bombeo (de 16.00 a 18.00 horas) se arrancó en Estación 5 la segunda turbobomba y se subió el caudal de bombeo de 150 a 190 MBD con resultados satisfactorios y que marcaban las pautas de lo que serían los Ensayos I y II del 12.10.97 y 19.10.97.

Para el estudio en mención, las principales variables que intervienen son:

- Temperatura ambiente.
- Temperatura de operación.
- Velocidad angular de la bomba (RPM).
- Presiones de succión del sistema.
- Presiones de descarga del sistema.
- Potencia de las unidades de bombeo.
- Viscosidad del crudo a bombear.
- Gravedad API del crudo.
- Caudal bombeado.

- Consumo de combustible.

El consumo específico del Oleoducto se obtiene de la suma de los consumos de combustible de todas las unidades de bombeo del Tramo II dividido entre el caudal que se bombea a través del mismo.

Para la realización de las pruebas se siguieron las siguientes pautas generales:

Se requirió tener operativas todas las unidades de bombeo de las Estaciones del Tramo II.

- Crudo disponible en los tanques de almacenamiento de la Estación 5, crudo OXY y PLUSPETROL.

- Las pruebas de bombeo se realizaron en el Tramo II, siendo las Estaciones 5, 6, 7, 8, 9 y Bayóvar las que intervinieron directamente.

Se siguieron las secuencias de arranque y procedimientos de control de presiones y fiscalización de crudo establecidos por la Unidad Planeamiento Operativo y el Manual de Procedimientos de Operaciones Oleoducto.

- Se setearon las presiones de ingreso a los tanques de alivio de acuerdo a las condiciones actuales de la tubería y las presiones de succión que se determinó para cada Estación.

Se llevó control de las condiciones de operación de las bombas: caudal, RPM, temperatura de operación, consumo combustible, presiones de succión y descarga para cada Estación.

- Se tuvo control de volúmenes bombeados tomando niveles de los tanques que estuvieron bombeando en Estación 5 cada hora.

- Se tuvo en cuenta los siguientes factores restrictivos para las pruebas: potencias de las unidades y estado de la tubería (presiones máximas que puede soportar).

5.2 AJUSTE DE CONDICIONES DE OPERACION PARA CADA ENSAYO

Los ensayos realizados para las evaluaciones del bombeo con 190 MBD fueron los siguientes:

Ensayo I: Prueba de 24 horas, entre las 15:00 horas del 12.10.97 y las 15:00 horas del 13.10.97

Ensayo II: Prueba de 60 horas entre las 15:00 horas del 19.10.97 y las 04:00 horas del 22.10.97

Las instrucciones para los ensayos fueron las siguientes:

ENSAYO I - BOMBEO A CAUDAL (Q) > 190 MBD

BOMBEO CON DOS TURBOBOMBAS EN ESTACION 5

Los siguientes puntos se deberán tener en cuenta para el próximo ensayo de bombeo con dos unidades en la Estación 5 (5GT-1 y 5GT-2 en paralelo):

- I. La prueba empezará el día Martes 12-10-97 a las 15:00 horas y durará 24 horas.
- II. La prueba consistirá en bombear con dos unidades en paralelo en la Estación 5 a 3,000 RPM como máximo cada unidad.
- III. La Unidad Planeamiento Operativo comunicará oportunamente los parámetros que deberán mantener en el desarrollo de la prueba y las Estación mantendrán los parámetros solicitados para el desarrollo de la prueba.
- IV. En caso que una Estación tenga dificultad para mantener los parámetros se coordinará con la Unidad Planeamiento Operativo.
- V. Las Estaciones del Tramo II llevarán un estricto control horario del consumo de combustible y también en forma horaria los demás parámetros habituales que normalmente lleva y los reportará a la Unidad de Planeamiento Operativo.
- VI. Adicionalmente la Estación 5 llevará un control horario del caudal de bombeo.
- VII. Bayóvar llevará un estricto control horario de los niveles de crudo que recibe.

VIII. Las presiones de succión a mantener durante la prueba serán como sigue:

Estación 6	:	29.5	KG/CM ²
7	:	25	KG/CM ²
8	:	16	KG/CM ²
9	:	16	KG/CM ²

IX. Cada Estación se encargará de variar la velocidad de la turbina para mantener estas presiones, en caso ingrese crudo al tanque de alivio cuidar que sea mínimo y llevar control de niveles y volúmenes coordinando con la Unidad Planeamiento Operativo.

X. Estación 9 tratará que las 3 unidades estén a la misma velocidad. En caso de requiera una cuarta unidad deberá coordinar con la Unidad Planeamiento Operativo.

NOTA IMPORTANTE

Alguna variación brusca o condición rara en el sistema, avisar de inmediato a la Unidad Planeamiento Operativo para tomar la acción correctiva oportuna.

ENSAYO II - BOMBEO A 190 MBD

BOMBEO CON DOS TURBOBOMBAS EN ESTACION 5

INSTRUCCIONES:

I. Las Estaciones involucradas deberán setear sus sistemas de alivio a las siguientes presiones:

Estación	<u>Presión Fija</u>	<u>Contrapresión</u>
6	31 Kg/cm ²	34 Kg/cm ²
7	30 Kg/cm ²	33 Kg/cm ²
8	19 Kg/cm ²	22 Kg/cm ²
9	19 Kg/cm ²	22 Kg/cm ²

II. El reinicio de bombeo del Tramo II está programado para después de las 15.00 Hrs. del 18 de Octubre a un caudal mínimo de 150 MBD, a fin de alcanzar las condiciones adecuadas para inyectar y bajar los niveles de los tanques de alivio en estaciones 7, 8 y 9 por debajo de los 2 mts Posteriormente previa coordinación con la Unidad Planeamiento Operativo, Estación 5 incrementará su caudal a 190 MBD con la segunda turbobomba.

III. Las estaciones del tramo II llevarán un estricto control horario del consumo de combustible y demás parámetros que normalmente se llevan y reportan a la Unidad de Planeamiento Operativo.

IV. Es responsabilidad de cada Estación operar con el mínimo de consumo específico de combustible para las condiciones indicadas líneas abajo:

Est.	Presión Para Inyectar	P.Succión 150 MBD	P.Succión 190 MBD
6	24 Kg/cm ²	29 Kg/cm ²	30 Kg/cm ²
7	14 Kg/cm ²	25 Kg/cm ²	29 Kg/cm ²
8	10 Kg/cm ²	15 Kg/cm ²	18 Kg/cm ²
9	10 Kg/cm ²	15 Kg/cm ²	18 Kg/cm ²

V. Cada Estación se encargará de operar sus unidades en las condiciones necesarias para mantener las presiones indicadas en el punto anterior.

VI. Estación 9 deberá trabajar con 3 unidades y arrancará una cuarta unidad en caso necesario, previa coordinación con la Unidad Planeamiento Operativo.

VII. Bayóvar llevará un estricto control horario de los niveles y volúmenes recibidos y los reportará a la Unidad de Planeamiento Operativo, estableciendo una comparación con los volúmenes bombeados por Estación 5.

NOTA IMPORTANTE

Alguna variación brusca o condición inadecuada en el sistema se deberá dar aviso de inmediato a la Unidad Planeamiento Operativo con el fin de tomar acción correctiva oportuna en todo el sistema.

Presiones de Descarga Máxima

Estación 5	60.0	Kg/cm ²
6	54.0	Kg/cm ²
7	56.5	Kg/cm ²
8	53.0	Kg/cm ²
9	118.0	Kg/cm ²

5.3 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS CON BOMBEO DE 190 MBD

Las principales ocurrencias y condiciones de operación así como consumos de combustibles durante los dos ensayos se detallan a continuación:

Ensayo I: (Principales ocurrencias)

Se inició a las 15:00 horas del 12 de Octubre y finalizó a las 15:00 horas del 13 de Octubre de 1,997.

El inicio del ensayo empieza luego de un bombeo continuo de 3 días a 150 MBD; los datos más importantes extraídos de la bitácora del Supervisor de la Unidad Planeamiento Operativo son:

12 de Octubre

- 15:15 Estación 5 arranca la segunda turbobomba 5GT-1 a 2950 RPM
- 15:22 Se indica a Estación 5 poner las 2 unidades a 3,000 RPM
- 16:22 Estación 7 cambia de unidad, bajo carga la 7GT-1, parada programada de la 7 GT-2
- 16:40 Estación 9 tiene sus 3 unidades al máximo, sin embargo no logra bajar la presión de succión de 18.5 Kg/cm²; se le indica que arranque la cuarta unidad.
- 16:55 Estación 9: bajo carga la 9 GT-4 para aliviar la presión de succión
- 20:15 Debido a que las condiciones lo permiten, se parará la 9GT-4
- 20:35 Estación 9: parada programada de la 9GT-4, se trabaja con 3 unidades aprovechando la baja temperatura ambiente
- 23:30 Estaciones 7 y 8 comunican que la presión de succión continua subiendo y que ya estaría ingresando crudo a sus tanques de alivio

23:35 Se ordena a Estación 5 que baje a 2,950 RPM sus 2 unidades

13 de Octubre

06:25 Se ordena a Estación 5 poner sus unidades a 3,000 RPM ya que en las Estaciones 6, 7, 8 y 9 lo permiten las presiones de succión

08:00 Se coordina con Estación 5 para que el bombeo no sea controlado por RPM sino por caudal de 190 MB

09:20 Estación 9 reporta 12.6 Kg/cm² de presión de succión, se le indica que debe trabajar cerca a los 16 Kg/cm²

11:00 Estación 9 reporta 18.5 Kg/cm² de presión de succión, se le indica que debe arrancar la cuarta unidad

11:15 Estación 9: 9GT-4 bajo carga a 3,100 RPM

14:30 Se indica a Estación 5 que a las 15:00 horas pare la segunda unidad por bajo inventario de crudo

15:05 Estación 5: parada programada de 5GT-1

15:22 Estación 9: parada programada de 9GT-4

15:32 Estación 5: parada programada de 5GT-2

15:45 Estación 6: parada programada de 6GT-2

16:05 Estación 7: parada programada de 7GT-2

16:05 Estación 9: parada programada de 9GT-5

16:06 Estación 8: parada programada de 8GT-2

16:08 Estación 9: parada programada de 9GT-1

16:10 Estación 9: parada programada de 9GT-2

ENSAYO I

HOJA DE CONTROL DE OPERACION

EST.		12 DE OCTUBRE									13 DE OCTUBRE			
		16	17	18	19	20	21	22	23	24	01	02	03	04
5	P.SUCCION	6.3	7.1	6.8	6.7	6.4	6.7	6.5	6.4	6.7	6.7	6.8	6.8	6.8
	P.DESCARGA	59.0	59.0	59.0	59.0	57.5	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0	57.5	57.5
	RPM 1	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	2990	2950	2950	2950	2950	2950
	TEMP.OPER.	433	438	438	438	435	432	440	440	437	438	435	434	431
	RPM 2	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	2950	2950	2950	2950	2950
	TEMP.OPER.	432	433	435	435	430	432	431	432	430	432	430	430	428
	CAUDAL (MB)	180.5	180.5	180.5	180.5	192.5	202.2	202.2	202.2	190.2	190.2	190.2	188.6	179.6
	COMBUST. 1	220	220	231	222	225	240	231	237	234	224	233	226	236
COMBUST. 2	200	200	209	208	200	207	221	215	212	203	211	206	205	
6	P.SUCCION	29.9	29.2	29.8	30.0	30.0	30.5	31.0	31.0	31.0	30.2	30.0	30.0	30.0
	P.DESCARGA	54.0	54.0	54.0	43.9	53.8	54.0	54.0	54.0	54.0	54.0	54.0	54.0	54.0
	RPM 1	2850	2900	2900	2900	2900	2900	2950	2950	2950	2950	2950	2950	2950
	TEMP.OPER.	459	460	459	458	450	460	460	460	460	460	460	460	460
	COMBUST.	192	200	248	230	227	227	228	230	240	226	229	230	235
7	P.SUCCION	25.9	25.0	24.5	26.5	28.6	28.5	28.5	29.5	30.0	30.0	30.0	31.0	29.5
	P.DESCARGA	54.0	52.0	53.0	50.0	57.0	57.0	57.0	57.5	59.5	59.5	59.5	59.5	59.0
	RPM 1	2900	3050	2950	2950	2950	2950	2950	2950	3000	3000	3000	3000	3000
	TEMP.OPER.	460	430	419	418	419	418	416	418	420	420	420	420	419
	COMBUST.	247	238	244	181	230	219	228	217	214	239	228	217	225
8	P.SUCCION	16.6	17.7	14.6	18.0	18.2	18.6	18.5	19.0	20.0	21.0	21.0	20.0	19.7
	P.DESCARGA	51.5	24.0	48.0	52.0	52.5	54.0	54.0	54.0	55.0	56.0	56.0	55.5	55.0
	RPM 1	3200	3300	3200	3200	3200	3230	3230	3230	3250	3300	3300	3300	3300
	TEMP.OPER.	416	430	420	420	420	420	420	420	420	421	420	420	419
	COMBUST.	225	236	230	232	228	245	225	230	230	243	243	240	240
9	P.SUCCION	15.0	16.0	14.2	15.8	16.0	17.3	17.3	17.0	18.4	19.3	19.2	18.9	18.4
	P.DESCARGA	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	118.0	118.0	118.0	118.0	118.0	118.0	118.0
	RPM 1	3150	3200	3050	3050	3100	3250	3250	3250	3300	3300	3300	3300	3300
	TEMP.OPER.	452	458	448	438	443	465	465	462	467	468	469	468	468
	RPM 2	3150	3200	3050	3050	3050	3150	3150	3200	3200	3200	3200	3200	3200
	TEMP.OPER.	468	470	462	450	449	462	462	468	468	469	468	470	470
	RPM 3	3200	3200	3050	3050	3050	3400	3400	3400	3480	3480	3480	3480	3480
	TEMP.OPER.	435	432	420	415	450	450	450	449	457	457	457	458	458
	RPM 4			3050	3050	3100								
	TEMP.OPER.			452	450	418								
	COMBUST. 1	205	253	234	212	224	238	257	255	257	285	217	293	197
	COMBUST. 2	231	242	242	223	230	236	246	252	244	269	251	262	285
COMBUST. 3	221	260	234	229	225	246	276	277	264	332	282	308	322	
COMBUST. 4			243	220	227	121								

ENSAYO I

HOJA DE CONTROL DE OPERACION

EST.		13 DE OCTUBRE											TOTAL COMB.	
		05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15		16
5	P.SUCCION	6.8	6.8	7.2	6.4	6.4	6.4	6.5	6.4	6.4	6.4	6.4		
	P.DESCARGA	57.5	57.5	59.5	59.5	59.5	59.5	59.5	59.5	59.5	59.5	59.5		
	RPM 1	2900	2950	3000	3000	3050	3050	3080	3080	3050	3050	3050		
	TEMP.OPER.	430	430	432	433	439	441	450	450	448	448	448		
	RPM 2	2950	2950	2950	2950	3050	3050	3050	3050	3050	3050	3050		
	TEMP.OPER.	427	427	422	422	424	430	438	438	437	435	435		
	CAUDAL (M3)	173.6	172.2	172.2	178.4	190.3	190.3	208.6	208.7	206.8	208.7	211.3		
	COMBUST. 1	238	200	200	196	227	225	258	247	200	242	243		5,505
	COMBUST. 2	207	200	196	190	225	200	232	220	206	233	201		5,007
6	P.SUCCION	28.5	27.2	27.5	28.3	29.0	30.0	30.9	30.6	30.1	30.0	30.1		
	P.DESCARGA	54.0	53.9	53.8	53.8	54.0	54.0	54.0	54.0	53.9	53.9	53.9		
	RPM 1	2950	2950	2950	2950	2950	2950	2950	3000	3000	3000	3000		
	TEMP.OPER.	460	460	460	458	460	461	460	462	462	462	462		
	COMBUST.	223	230	230	219	232	230	231	237	240	239	240		5,493
7	P.SUCCION	28.0	24.7	22.5	22.2	22.5	26.0	27.5	27.0	26.7	26.3	26.3		
	P.DESCARGA	58.0	55.0	53.0	50.5	51.0	55.0	59.8	57.0	56.5	56.5	56.5		
	RPM 1	3000	3000	3000	2900	2900	2900	3050	3050	3050	3050	3050		
	TEMP.OPER.	419	418	418	410	411	412	429	430	433	430	430		
	COMBUST.	228	223	213	212	209	224	201	248	252	226	268		5,431
8	P.SUCCION	18.7	16.6	13.4	11.7	12.2	16.2	18.8	16.8	16.4	16.0	16.0	13.0	
	P.DESCARGA	54.0	52.5	49.0	48.0	48.0	52.5	56.5	63.0	63.0	52.5	52.5	42.5	
	RPM 1	3300	3300	3300	3300	3300	3300	3400	3400	3400	3400	3380	3400	
	TEMP.OPER.	419	417	414	415	417	419	421	439	439	440	438	430	
	COMBUST.	240	237	235	231	247	223	237	248	279	279	252		5,755
9	P.SUCCION	17.9	15.6	13.2	12.8	12.6	17.0	18.5	16.2	15.8	15.5	15.7	12.0	
	P.DESCARGA	118.0	118.0	118.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	117.0	116.0	
	RPM 1	3300	3300	3300	3300	3300	3300	3300	3250	3250	3250	3250	3250	
	TEMP.OPER.	468	468	468	462	465	465	465	463	468	465	465	465	
	RPM 2	3200	3200	3200	3200	3200	3200	3200	3150	3150	3150	3150	3150	
	TEMP.OPER.	470	470	470	463	465	466	468	472	465	464	464	464	
	RPM 3	3480	3480	3450	3400	3400	3450	3400	3300	3300	3300	3250	3250	
	TEMP.OPER.	456	456	456	449	451	460	450	445	448	447	440	440	
	RPM 4								3100	3100	3100	3100		
	TEMP.OPER.								455	458	455	455		
	COMBUST. 1	271	313	226	301	261	257	263	256	253	255	255		6,038
	COMBUST. 2	224	256	226	285	253	247	256	246	244	245	245		5,940
	COMBUST. 3	256	308	273	300	279	268	297	266	260	261	261		6,505
COMBUST. 4								166	231	231	105		1,541	

Fuente : Archivo Control de Operaciones
 Unidad Planeamiento Operativo

Ensayo II: (Principales ocurrencias)

Se inició a las 15:00 horas del 19 de Octubre y finalizó a las 04:00 horas del 22 de Octubre de 1,997.

El inicio del Ensayo, al igual que el Ensayo I, se da a continuación de un bombeo continuo de 2 días a 150 MBD; los datos más importantes extraídos de la bitácora del Supervisor de la Unidad Planeamiento Operativo son:

19 de Octubre

- 15:10 Estación 5 arranca la segunda tu bobomba 5GT-1 a 3020 RPM, se avisa a las demás estaciones.
- 15:22 Se indica a las estaciones que cuando sientan la reacción deben mantener las succiones que se les ha indicado.
- 23:30 Estación 6 baja 50 RPM para ajustarse a los 29 Kg/cm² requeridos.
- 23:40 Estación 9 baja 50 RPM en cada unidad para ponerse en los 18 Kg/cm².

20 de Octubre

- 01:30 Estación 9 aumentó 30 RPM a cada unidad para lograr la presión recomendada.
- 04:05 Estación 9 aumentó 50 RPM a cada unidad para bajar la presión de succión.
- 13:15 Estación 8 reporta llegada de raspatubo.
- 15:15 Salió raspatubo de Estación 8 a Estación 9.
- 22:35 Baja 50 RPM a cada unidad para subir presión de succión.

21 de Octubre

- 00:10 Se le recuerda a Estación 8 y 9 que se deben ajustar a las presiones requeridas.
- 01:58 Estación 9 reporta tener 20 Kg/cm², se le ordena subir RPM a fin de que no ingrese crudo al tanque de alivio.
- 02:09 Estación 6 informa que se disparó la 6 GT-1 al quemarse fusible del chasis 6.
- 02:09 Se ordena a Estación 5 parar una unidad.
- 02:13 Parada programada de la 5GT-2.
- 02:15 Se indica a Estación 9 poner en recirculación 1 unidad.

- 02:32 Bajo carga la 6GT-2.
02:40 Nivel de tanque de alivio en Estación 6 subió de 2.08 a 3.10 metros, ingresó 1,308 barriles.
03:13 Estación 8 reporta llegada de segundo raspatubo.
03:15 Estación 5 informa tener problemas con el arranque de la 5GT-1 por alta temperatura de operación, se le indica poner al máximo la 5GT-2.
03:16 Se indica a estaciones 6,7,8 y 9 trabajar con los parámetros de bombeo de 150 MBD (29, 25, 15 y 15 Kg/cm² respectivamente) hasta que arranque la segunda unidad en Estación 5.
03:59 Bajo carga la 5GT-1 a 2,950 RPM.
04:02 Se indica a las Estaciones 6, 7, 8 y 9 que conforme sientan la reacción de la segunda unidad de Estación 5 vuelvan a las succiones de 190 MBD (30, 29, 18 y 18 Kg/cm² respectivamente)
05:30 Salió raspatubo de Estación 8 a Estación 9.
16:00 Las presiones de succión de las estaciones se mantienen constante, la única que tiene ligera variación es la Estación 9 que podría ser por la llegada de un raspatubo programada para las 18:00 horas.
18:43 Estación 9 reporta llegada de raspatubos de Estación 8.

22 de Octubre

- 00:15 Estación 6 sube 50 RPM para descompresionar la tubería.
03:30 Estación 9 reporta que se disparó la 9GT-1 por falla de energía.
03:31 Se ordena a Estación 5 continuar con 2 unidades pero ponerse al mínimo de RPM.
03:34 Estación 5 bajó a 2,900 RPM cada unidad.
03:45 Estación 9: 9GT-3 bajo carga.
03:47 Estación 5 sube RPM para ponerse a 190 MBD.
04:10 Estación 5: parada programada de la 5GT-2 de acuerdo a lo programado, 5GT-1 queda al máximo con 3,300 RPM.

ENSAYO 11

HOJA DE CONTROL DE OPERACION

EST.		21 DE OCTUBRE					22 DE OCTUBRE					TOTAL COMB.	
		20	21	22	23	24	01	02	03	04	05		00
5	P. SUCCION	6.9	6.3	6.2	6.0	6.1	6.5	6.0	6.0				
	P. DESCARGA	59.2	59.2	59.0	58.6	58.2	58.0	58.0	58.0				
	RPM 1	3030	3030	3020	3020	3020	3020	3020	2950				
	TEMP. OPER.	441	441	441	441	441	441	432	440				
	RPM 2	3030	3030	3040	3040	3020	3020	3020	3020				
	TEMP. OPER.	435	436	434	435	432	432	430	430				
	CAUDAL (MB)	190.2	190.2	190.2	190.2	190.2	190.2	190.2	190.2				
	COMBUST. 1	227	246	230	217	231	238	230	231				13,339
COMBUST. 2	211	217	228	198	209	219	211	213				12,744	
6	P. SUCCION	30.9	30.5	30.2	30.1	30.8	30.3	30.3	30.3				
	P. DESCARGA	54.7	54.7	54.6	54.8	54.9	55.0	55.0	55.0				
	RPM 1	2950	2950	2950	2950	2970	3000	3000	3000				
	TEMP. OPER.	456	456	454	454	456	457	457	455				
	COMBUST.	230	233	236	220	241	242	240	241				13,577
7	P. SUCCION	29.0	29.0	29.1	29.0	28.7	29.1	29.1	29.1				
	P. DESCARGA	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0	57.5	57.0	57.0				
	RPM 1	2950	2950	2950	2950	2950	2950	2950	2950				
	TEMP. OPER.	425	424	424	420	419	419	419	416				
	COMBUST.	262	230	201	220	219	223	237	191				12,906
8	P. SUCCION	18.2	18.3	18.1	18.0	18.0	18.3	18.1	18.0				
	P. DESCARGA	54.0	54.5	55.0	54.0	54.0	55.0	55.0	55.0				
	RPM 1	3300	3350	3380	3350	3350	3350	3350	3350				
	TEMP. OPER.	430	424	430	429	429	429	429	429				
	COMBUST.	258	220	201	243	278	240	235	270				14,525
9	P. SUCCION	18.1	18.0	18.0	17.8	17.8	18.3	18.0	18.0				
	P. DESCARGA	115.0	115.0	115.0	115.0	115.0	115.0	116.0	116.0				
	RPM 1	3250	3250	3250	3250	3250	3250	3300	3300				
	TEMP. OPER.	469	465	465	463	461	459	465	466				
	RPM 2	3250	3250	3250	3300	3300	3300	3300	3300				
	TEMP. OPER.	458	458	458	462	459	458	457	455				
	RPM 3	3250	3250	3250	3300	3300	3300	3300	3300				
	TEMP. OPER.	440	440	440	442	440	439	438	433				
	RPM 4												
	TEMP. OPER.												
COMBUST. 1	241	245	239	254	334	250	222	231				15,105	
COMBUST. 2	259	252	246	262	322	251	275	232				15,298	
COMBUST. 3	252	248	245	242	258	264	267	216				15,231	
COMBUST. 4													

Fuente : Archivo Control de Operaciones.
Unidad Planeamiento Operativo.

5.4 ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

De los cuadros anteriores se puede obtener la siguiente información:

A) . ENSAYO I:

Tiempo: 24 Horas

Caudal promedio: 8,513 BPH = 204,322 BPD

ESTACION	CONSUMO DE COMBUSTIBLE (Gls)	VOLUMEN BOMBEADO (Bls)	CONSUMO ESPECIFICO (Gl/Bls)
5	10,512	204,322	0.051448
6	5,493		0.026884
7	5,431		0.026851
8	5,755		0.028166
9	20,027		0.098017
TOTAL	47,218	204,322	0.231096

INDICE DE PRODUCTIVIDAD DEL ENSAYO I:

$$\frac{\text{VOLUMEN BOMBEADO}}{\text{CONSUMO DE COMBUSTIBLE}} = \frac{204,322 \text{ Bls}}{47,218 \text{ Gl}} = 4.33 \text{ Bls/Gl.}$$

B) . ENSAYO II:

Tiempo: 60 Horas

Caudal promedio: 7,916 BPH = 189,990 BPD

ESTACION	CONSUMO DE COMBUSTIBLE (Gls)	VOLUMEN BOMBEADO (Bls)	CONSUMO ESPECIFICO (GI/Bls)
5	26,083	474,976	0.054914
6	13,572		0.028574
7	12,906		0.027172
8	14,525		0.030580
9	45,636		0.096081
TOTAL	112,722	474,976	0.237321

INDICE DE PRODUCTIVIDAD DEL ENSAYO II:

$$\frac{\text{VOLUMEN BOMBEADO}}{\text{CONSUMO DE COMBUSTIBLE}} = \frac{474,976 \text{ Bls}}{112,722 \text{ GI}} = 4.21 \text{ Bls/GI.}$$

El Ensayo II, se constituye en el más representativo, por el número de horas (mayor duración) y por la estacionalidad de su caudal de bombeo (promedio 189,990 BPD). Por esta razón se consideran estos resultados para efectos del análisis económico y comparación con los obtenidos teóricamente.

COMPARACION ENTRE LO TEORICO Y REAL PARA UN CAUDAL DE
190 MBD (Ensayo II):

ESTACION	CONSUMO TEORICO (GPH)	CONSUMO REAL PROM. (GPH)
5	420.70	434.72
6	181.80	226.20
7	211.04	215.10
8	235.94	242.10
9	727.86	760.60
TOTAL	1,777.34	1,878.72
PRODUCTIVIDAD DEL TRAMO II	4,454	4,214

$$\text{Variación} = \frac{\text{Prod. Teórica} - \text{Prod. Real}}{\text{Prod.. Teórica}} \times 100$$

$$\text{Variación} = \frac{4.454 - 4.214}{4.454} \times 100 = 5.39 \%$$

CAPITULO VI

ANALISIS ECONOMICO

6.1 EVALUACION ECONOMICA

	BOMBEO 150 MBD (Actual)	BOMBEO 190MBD (Propuesto)
Productividad (BIs/GI)	3.78	4.21
Consumo Específico (GI/BIs)	0.2646	0.2373
Bombeo Mensual (MBIs)	2,400	2,400
Días de bombeo/mes	16.0	12.6
Consumo Mensual de Combustible (GI)	635,040	569,520
Ahorro Mensual de Combustible (GI)		65,520
Ahorro Anual de Combustible (GI)		786,240

Considerando el costo del Diesel a un valor de 1.05 US\$/GI el ahorro total sería de 825,552 US\$/año.

**CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES**

CONCLUSIONES:

- 1.- En forma integral, se ha demostrado que es más económico para la operación bombear a altos caudales en el Tramo II, proyectando con un bombeo de 190 MBD un ahorro anual de 825,552 US\$.
- 2.- Los resultados de las pruebas de campo, confirman los cálculos hidráulicos con una diferencia de 5.39 %.
- 3.- Las potencias utilizadas de las unidades de bombeo están muy por debajo de la potencia nominal disponible de cada máquina corregida, según la ubicación topográfica de la Estación y temperatura ambiente de la zona.
- 4.- En cuanto a las horas de funcionamiento de las unidades, éstas se reducen en aproximadamente 21% por lo que los mantenimientos preventivos se desfasarían en similar porcentaje.
- 5.- Con un mayor caudal de bombeo el flujo tiende a convertirse en turbulento, evitando la decantación y acumulación de agua en las partes bajas, lo que disminuiría el proceso corrosivo de la tubería.

RECOMENDACIONES:

1.- Bombear a caudales cercanos a 190 MBD y las condiciones de succión calculadas en el presente estudio:

Estación 6	:	30 Kg/cm ²
7	:	29 Kg/cm ²
8	:	18 Kg/cm ²
9	:	18 Kg/cm ²

2.- Se deberá realizar un estudio respecto a los efectos y control de corrosión al bombear a altos caudales como 190 MBD.

3.- Las Estaciones deberán poner operativos los controles automáticos FOXBORO instalados en el panel principal de cada Estación para fijar condiciones de bombeo.

4.- Estación 5 deberá poner operativa la turbobomba 5GT-3 para aumentar la disponibilidad del sistema a 3 unidades instaladas, ya que con este estudio trabajan 2 unidades a la vez.

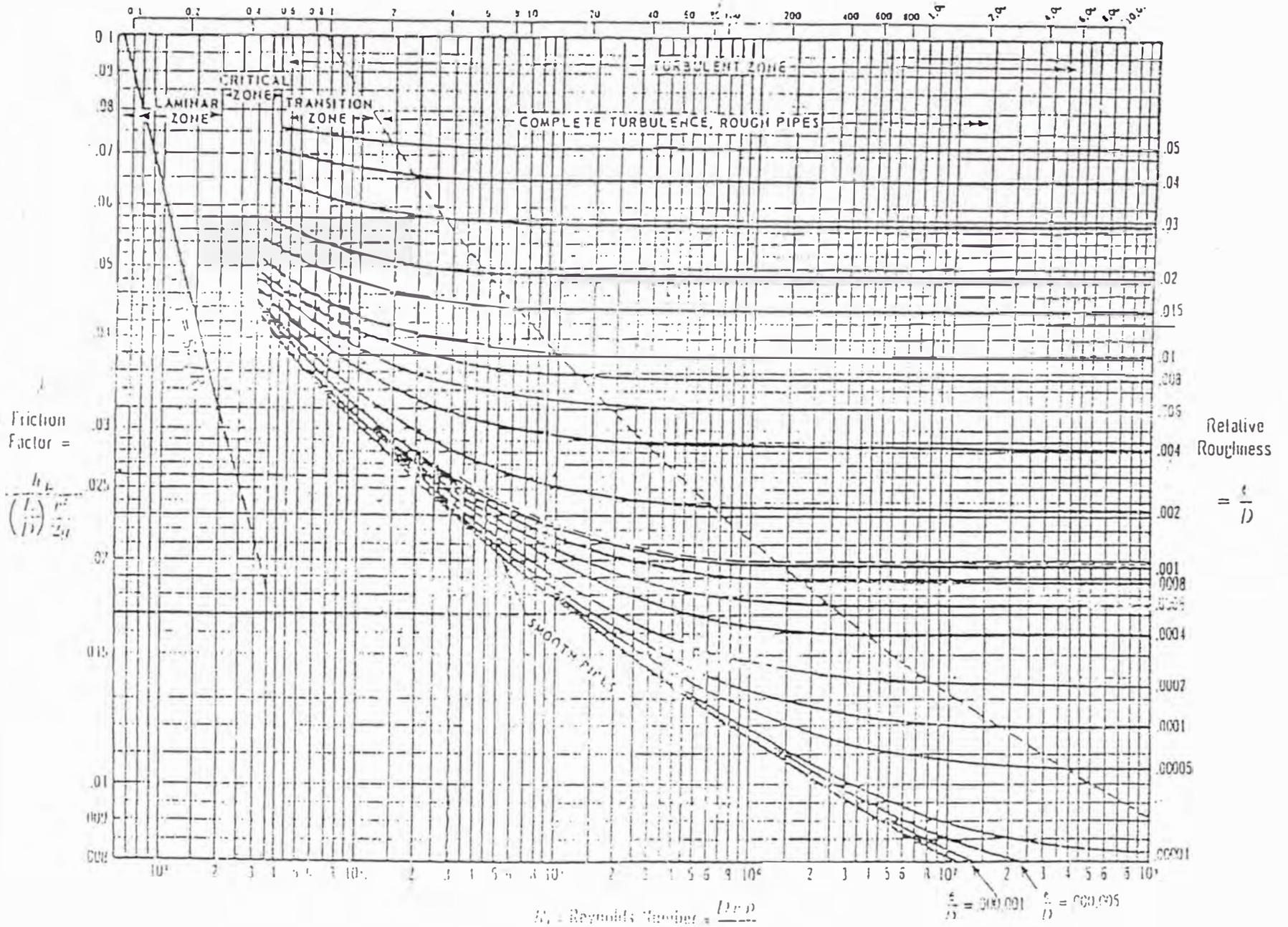
A N E X O 1

DIAGRAMA DE

MOODY

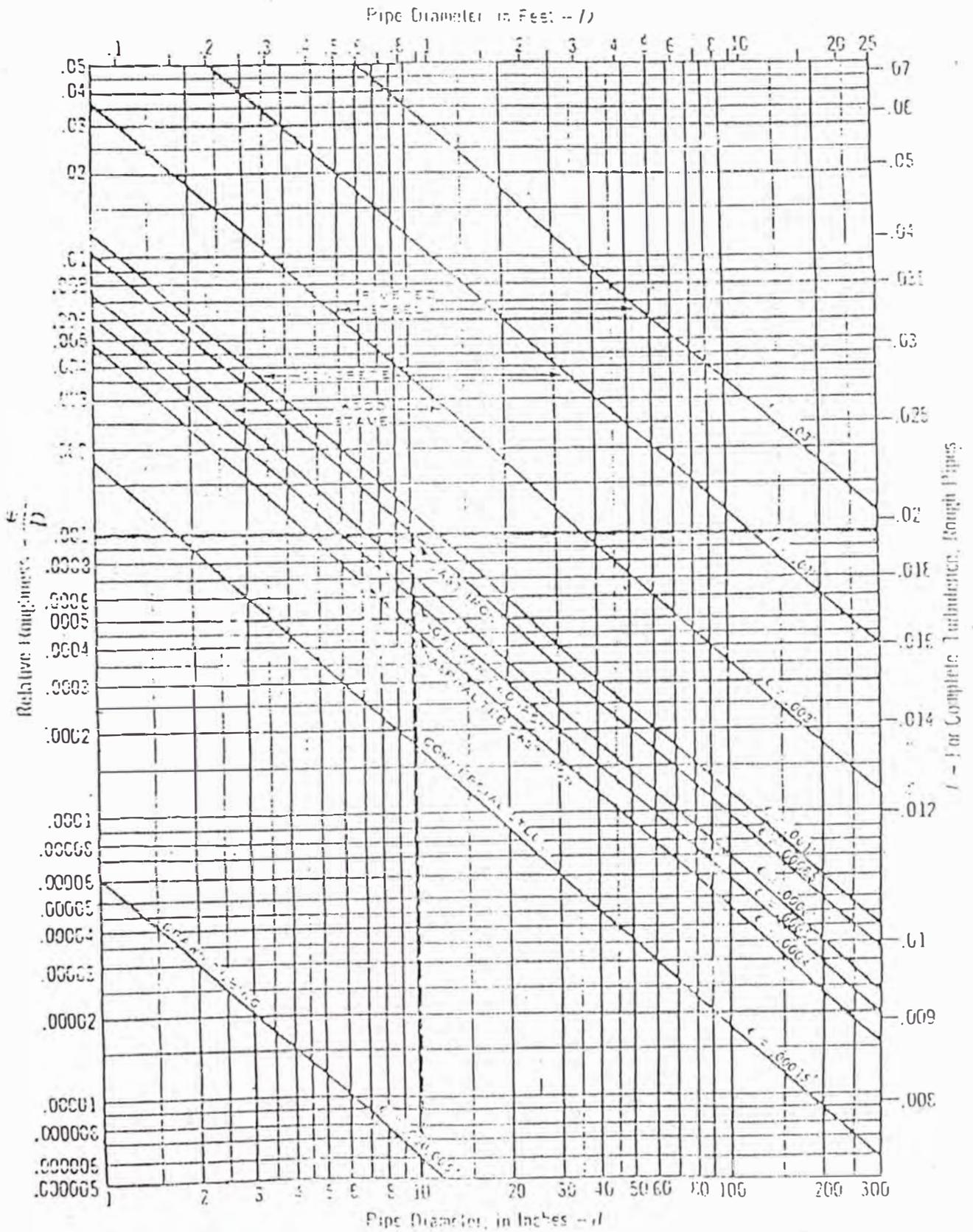
DIAGRAMA DE MOODY

Se utiliza para determinar el factor de fricción (f) de una tubería, en función de la rugosidad relativa y del número de Reynolds.



RUGOSIDAD RELATIVA VS. DIAMETRO INTERNO DE LA TUBERIA

Se utiliza para determinar la rugosidad realtiva (E/D) de diferentes tipos de tubería.

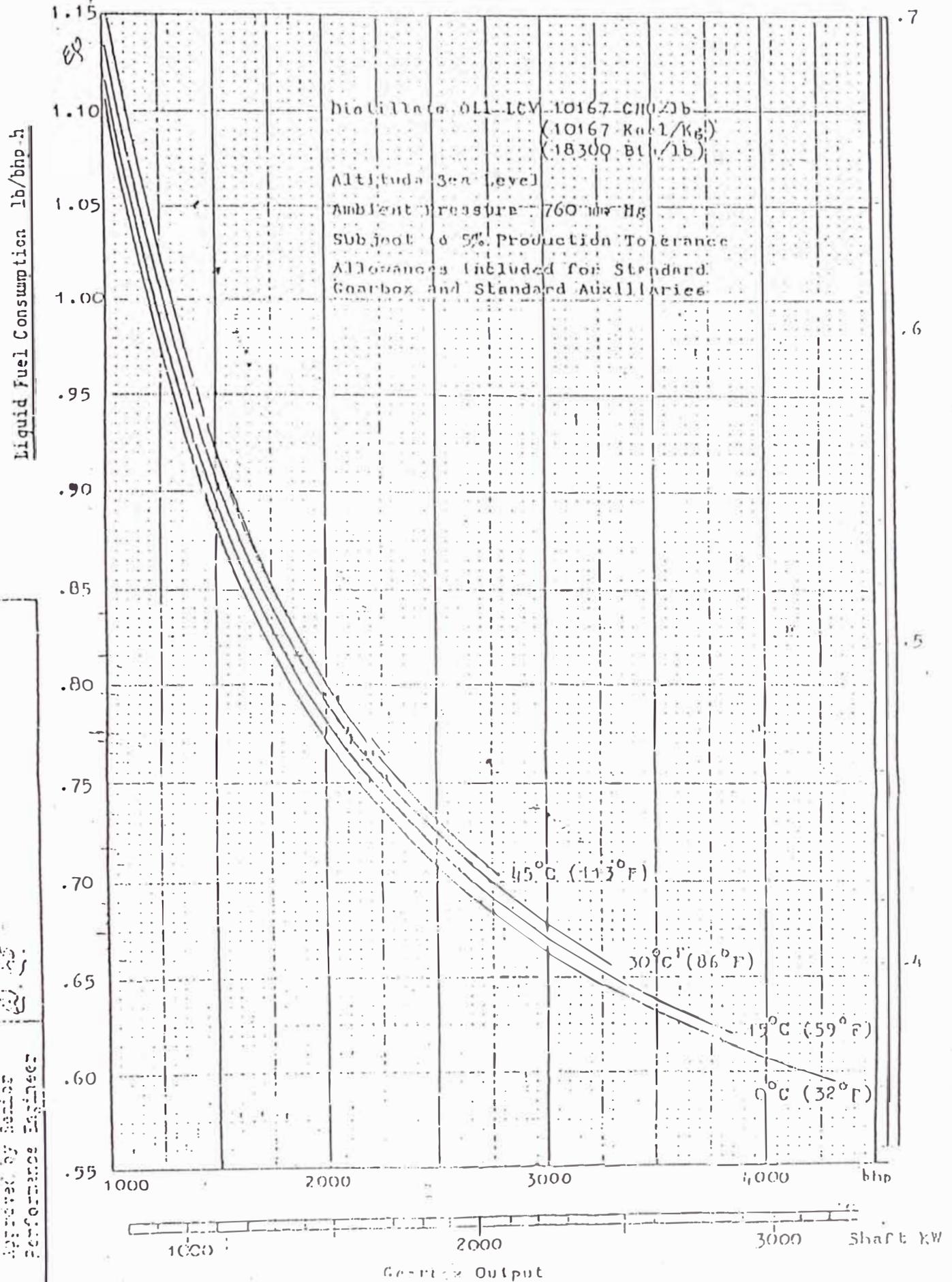


A N E X O 2

CONSUMO ESPECIFICO DE COMBUSTIBLE

EN TURBOBOMBAS

FIG. 4.8



Approved by Senior Performance Engineer

Liquid Fuel Consumption Worksheet 4.8.H

A N E X O 3

DETERMINACION DE CAUDALES MAXIMOS DE BOMBEO EN ESTACION 5

DETERMINACION DE CAUDALES MAXIMOS DE BOMBEO EN ESTACION 5

A) PARA UNA TURBOBOMBA

B) PARA DOS TURBOBOMBAS

DATOS:

- Estación inicial : Estación 5 (KM = 306+130)
- Punto más alto : C.Pupuntas (KM = 325+580)
- Longitud tubería (E5-Pupunta) : 19.45 Km
- Diámetro de tubería : 36 pulg.
- Rugosidad : 0.1 mm.
- Estándar de tubería : ANSI 20 (NORMA)
- Alturas:
 - * Estación 5 : 282 msnm
 - * C.Pupuntas : 900 msnm

BOOSTER:

- Presión de succión : 1.0 Kg/cm²
- Presión de descarga : 7.7 Kg/cm²

TURBOBOMBAS EN ESTACION 5:

- 1 TB RPM máximo : 3400
- 2 TB RPM : VARIABLE

CURVA DE OPERACION NORMAL (PARA 5GT1 Y 5GT2)

RPM de diseño : 3,140

Etapas : 3

CAUDAL (GPM)	PRESION (PIES) 1 ETAPA	EFICIENCIA (%)
2100	732.4	74.0
2800	699.6	80.9
3500	648.6	83.2
4200	569.7	80.9

Ambas unidades 5 GT-1 y 5 GT-2 tienen la misma curva de operación normal.

MEZCLA CRUDO:

- API a 60°F : 20.5

- Viscosidades:

* A 100°F : 115.80 Cstks.

* A 122°F : 62.90 Cstks.

* A 82.4°F : 189.07 Cstks.

A) . CALCULO PARA 1 TURBOBOMBAMETODOLOGIA DE CALCULO

1. Para Estación 5 se determina el punto inicial de bombeo y el punto mas alto en su trayectoria hacia Estación 6.

2. Para la turbobomba de la Estación inicial de bombeo, se le obtiene la Curva Característica Normal (para agua) y se corrige para petróleo crudo con las características actuales, y de acuerdo a las RPM de la máquina (máximas).

Para corregir la Curva Normal por viscosidad y RPM, se utiliza la "Carta de Factores de Corrección de Curvas Características" y las "Leyes de Afinidad de Bombas".

3. A la curva corregida de la turbobomba de cada Estación inicial se le suma la carga (presión) de las bombas booster (suma en serie booster-turbobomba).

Las presiones de las bombas booster se consideran constantes para diversos caudales bombeados.

4. Se calcula la CURVA DEL SISTEMA para cada Tramo.

La Curva del Sistema está dada por la fórmula siguiente:

$$h = 603.9 \frac{f \cdot Q^2 \cdot L}{D^5}$$

Donde:

h = Pérdida de carga por fricción del sistema en columna de crudo (pies)

Q = Caudal de bombeo (m³/hr)

L = Longitud de la tubería hasta el punto más alto en el Tramo (Kms)

D = Diámetro interno de la tubería (pulg)

f = Factor de fricción

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{---> Régimen Laminar}$$

$$f = \frac{0.3305}{Re^{0.252}} \quad \text{--> Régimen Turbulento}$$

$$Re = 13,918 \times \frac{Q}{D \times u}$$

Re : Número de Reynolds (adimensional)

u : Viscosidad a temperatura de bombeo (cstks)

5. Se grafican ambas curvas; Curva Característica corregida Turbobomba + boosters, y la Curva del Sistema.

El punto donde se interceptan ambas curvas, es el caudal máximo que se puede bombear en el Tramo, para un determinado tipo de crudo y a las RPM indicadas.

CALCULOS HIDRAULICOS

1). CURVA DE BOMBA CORREGIDA POR VISCOSIDAD Y RPM:

RPM de corrección = 3,400

CAUDAL (GPM)	PRESION (PIES)		EFICIENCIA (%)
	1 ETAPA	3 ETAPAS	
2273.9	846.9	2540.7	60.4
3031.8	801.8	2405.4	66.0
3789.8	737.0	2211.0	67.9
4547.8	632.9	1898.7	66.0

2) . SUMA EN SERIE TURBOBOMBA + BOOSTERS:

Presión booster: 238.1 pies

CAUDAL (GPM)	PRESION (PIES)
2,273.9	2,778.8
3,031.8	2,643.5
3,789.8	2,449.1
4,547.8	2,136.8

3) . CURVA DEL SISTEMA:

Diámetro tubería: 36 pulg

Altura estática : 618 mts

Longitud : 19,450 mts

CAUDAL (GPM)	CARGA TOTAL (PIES)
3,400	2,044.29
3,450	2,044.54
3,500	2,044.80
3,600	2,045.30
4,600	2,065.88
4,700	2,067.16
4,800	2,068.45

4) . CAUDAL MAXIMO

Interceptando la curva corregida de la turbobomba + booster con la curva del sistema, obtenemos los siguientes valores:

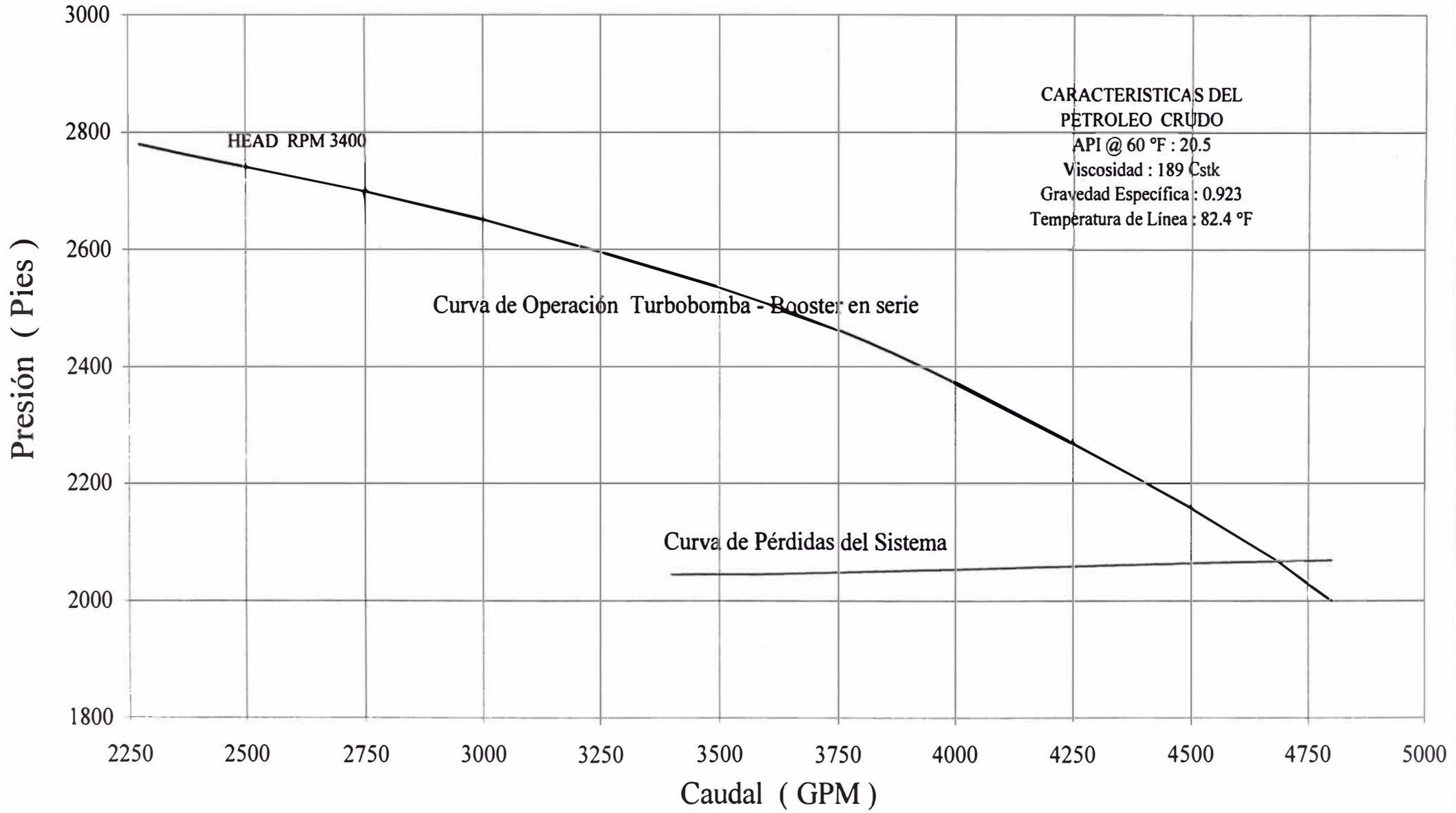
Caudal máximo = 4,680 GPM = 160,457 BPD.

Cabeza caudal máx = 2,060 pies = 628 m

RPM = 3,400

Punto de Operación Máximo - Tramo II ONP

1 Turbobomba + Booster



B) . CALCULO PARA 2 TURBOBOMBAS**METODOLOGIA DE CALCULO**

1. Para ambas turbobombas de la Estación 5, se le obtiene la Curva Característica Normal (para agua) y se corrige para petróleo crudo con las características actuales, y de acuerdo a las RPM de la máquina.
2. En la Estación 5 se consideran que trabajan 2 turbobombas simultáneamente en paralelo con dos booster que están en paralelo entre sí y en serie con las turbobombas.
3. Para sumar las Curvas Características de 2 bombas en paralelo, se suman los caudales manteniendo la mismas presiones totales.
4. Para sumar las Curvas Características de 2 bombas en serie, se suman las presiones totales de ambas bombas, manteniendo los mismos caudales.
5. Las presiones de las bombas booster se consideran constantes para diversos caudales bombeados.

6. Se calcula la CURVA DEL SISTEMA utilizando como parámetros el diámetro de la tubería, longitud, calidad del fluido, alturas topográficas, etc.
7. Se gráficas ambas Curvas: Curva Característica corregida Turbobombas + boosters, y la Curva del Sistema.
8. El punto donde se interceptan ambas curvas, da el caudal máximo que se puede bombear en el Tramo.

CALCULOS HIDRAULICOS

2. CALCULO PARA 3,000 RPM

A). CURVA CORREGIDA POR VISCOSIDAD Y RPM:

RPM de corrección = 3,000

Viscosidad = 189.07 Cstks.

CAUDAL (GPM)	PRESION (PIES) 3 ETAPAS	EFICIENCIA %
2006.38	1978.05	60.4
2675.12	1872.71	66.0
3343.95	1721.36	67.9
4012.76	1478.22	66.0

B) . SUMA DE TURBOBOMBAS 5GT-1 Y 5GT-2 EN PARALELO:

CAUDAL (GPM)	PRESION (PIES)
4,012.76	1,978.05
5,350.24	1,872.71
6,687.90	1,721.36
8,025.52	1,478.22

C) . SUMA EN SERIE 2 TURBOBOMBAS + BOOSTER:

Presión booster: 238.1 pies

CAUDAL (GPM)	PRESION (PIES)
4,012.76	2,216.15
5,350.24	2,110.81
6,687.90	1,959.46
8,025.52	1,716.32

3. CALCULO PARA RPM = 3,050

A) . CURVA CORREGIDA POR VISCOSIDAD Y RPM:

Viscosidad = 189.07 Cstks

CAUDAL (GPM)	PRESION (PIES) 3 ETAPAS	EFICIENCIA %
2039.82	2,044.53	60.4
2719.71	1,935.65	66.0
3399.68	1,779.21	67.9
4079.64	1,527.90	66.0

B) . SUMA DE TURBOBOMBAS 5GT-1 Y 5GT-2 EN PARALELO:

CAUDAL (GPM)	PRESION (PIES)
4,079.64	2,044.53
5,439.42	1,935.65
6,799.36	1,779.21
8,159.28	1,527.90

C) . SUMA EN SERIE 2 TURBOBOMBAS + BOOSTER:

Presión booster: 238.1 pies

CAUDAL (GPM)	PRESION (PIES)
4,079.64	2,282.63
5,439.42	2,173.75
6,799.36	2,017.31
8,159.28	1,766.00

4. CALCULO PARA RPM = 3,100

A) . CURVA CORREGIDA POR VISCOSIDAD Y RPM:

CAUDAL (GPM)	PRESION (PIES) 3 ETAPAS	EFICIENCIA (%)
2073.26	2,112.12	60.4
2764.29	1,999.64	66.0
3455.41	1,838.03	67.9
4146.52	1,578.41	66.0

B) . SUMA DE TURBOBOMBAS 5GT-1 Y 5GT-2 EN PARALELO:

CAUDAL (GPM)	PRESION (PIES)
4,146.52	2,112.12
5,528.58	1,999.64
6,910.82	1,838.03
8,293.04	1,578.41

C) . SUMA EN SERIE 2 TURBOBOMBAS + BOOSTER:

Presión booster: 238.1 pies

CAUDAL (GPM)	PRESION (PIES)
4,146.52	2,350.22
5,528.58	2,237.74
6,910.82	2,076.13
8,293.04	1,816.51

5. CALCULO PARA RPM = 3,200

A) . CURVA CORREGIDA POR VISCOSIDAD Y RPM:

RPM de corrección = 3,200

Viscosidad = 189.07 Cstks

CAUDAL (GPM)	PRESION 3 ETAPAS	EFICIENCIA (%)
2140.14	2,250.58	60.4
2853.46	2,130.73	66.0
3566.87	1,958.53	67.9
4280.28	1,681.89	66.0

B) . SUMA DE TURBOBOMBAS 5GT-1 Y 5GT-2 EN PARALELO:

CAUDAL (GPM)	PRESION (PIES)
4,280.28	2,250.58
5,706.92	2,130.73
7,133.74	1,958.53
8,560.56	1,681.89

C) . SUMA EN SERIE 2 TURBOBOMBAS + BOOSTER:

Presión booster: 238.1 pies

CAUDAL (GPM)	PRESION (PIES)
4,280.28	2,488.68
5,706.92	2,368.83
7,133.74	2,196.63
8,560.56	1,919.99

6. CALCULO DE LA CURVA DEL SISTEMA

$$D = 34.98 \text{ pulg}$$

$$u = 189.07 \text{ Cstks}$$

$$L = 19.45 \text{ Km}$$

- Número de Reynolds (Re)

$$Re = 13,918 \frac{Q}{D \cdot u} = 13,918 \times \frac{Q}{34.98 \times 189.07}$$

$$Re = 2.10443 Q.$$

- Factor de Fricción (f):

$$f = \frac{0.3305}{Re^{0.252}} = \frac{0.3305}{(2.10443 Q)^{0.252}} = 0.273994 Q^{-0.252}$$

- Pérdidas por fricción (H):

$$H = \frac{603.9 \times f \cdot Q^2 \cdot L}{D^5}$$

$$H = \frac{603.9 \times 0.273994 Q^{-0.252} \times Q^2 \times 19.45}{(34.98)^5}$$

$$H = 6.1449 \times 10^{-5} Q^{1.748} \text{ m.}$$

- Pérdida de carga por altura (Altura estát.total):

$$\text{Diferencia de H} = (900 - 282)\text{mt} = 618 \text{ mt}$$

- CURVA DE FRICCIÓN DEL SISTEMA

$$HT = 618 + 6.1449 \times 10^{-5} Q^{1.748} \text{ m}$$

$$Q = \text{m}^3/\text{hr}$$

CAPACIDAD (Q)			CARGA TOTAL (H)	
MBPD	M ³ /H	GPM	METROS	PIES
100	662.153	2916.67	623.24	2044.24
150	993.230	4375.00	628.65	2061.97
170	1125.661	4958.33	631.25	2070.51
200	1324.306	5833.33	635.61	2084.80
250	1655.383	7291.67	644.01	2112.35
270	1787.814	7875.00	647.76	2124.64
300	1986.460	8750.00	653.77	2144.38

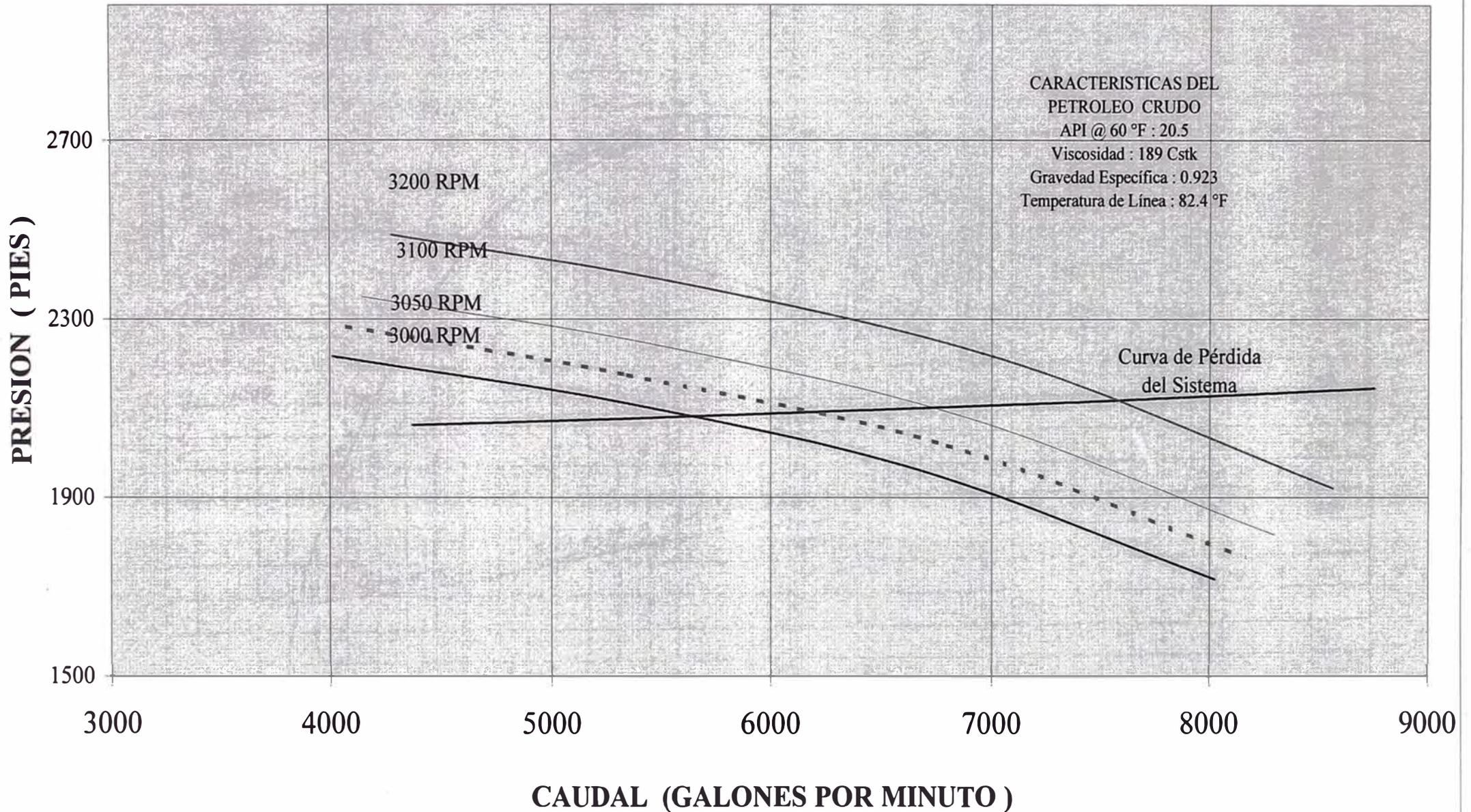
7. RESULTADOS:

De las curvas corregidas, tenemos los siguientes resultados:

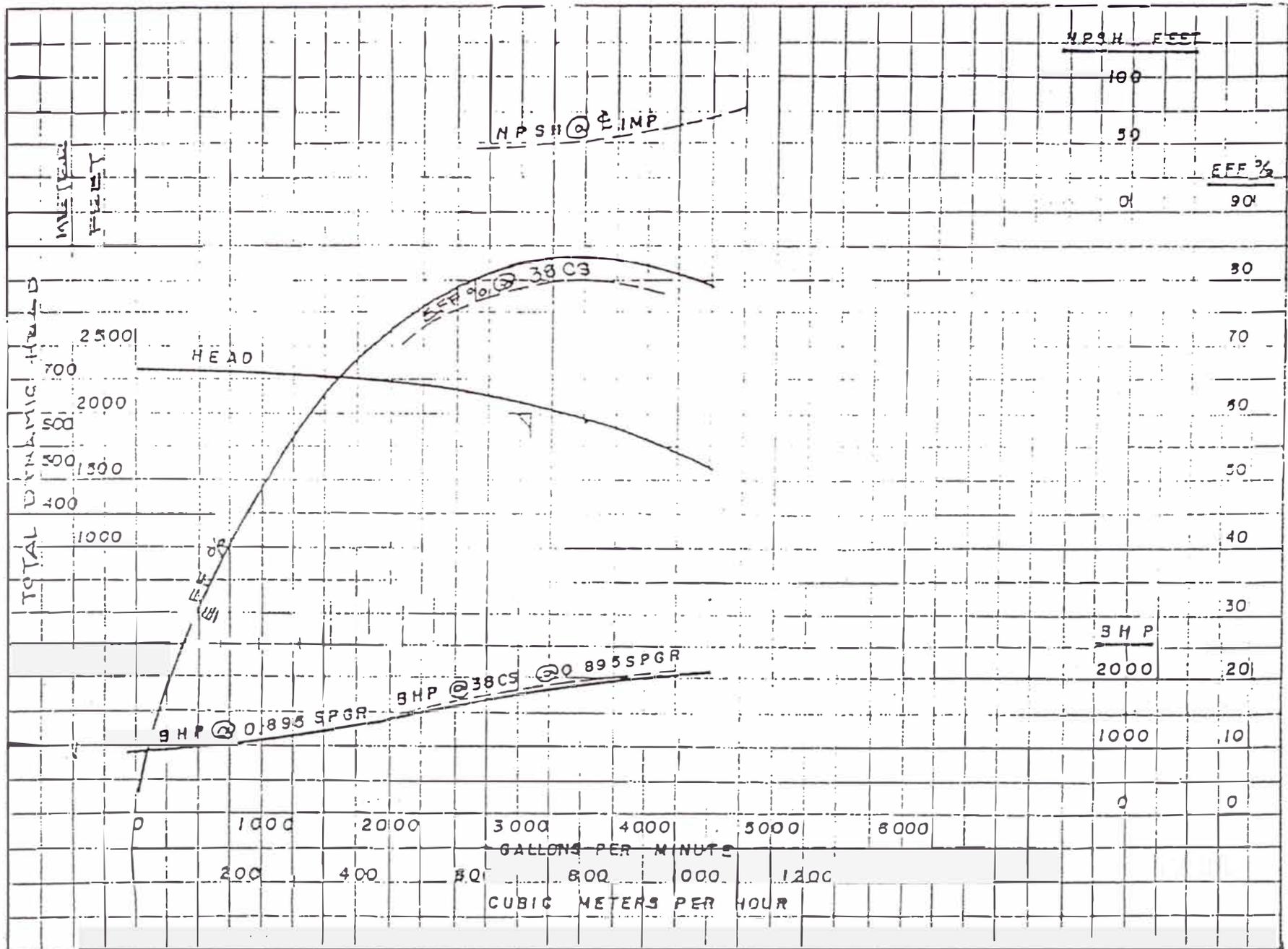
RPM	PUNTOS DE OPERACIÓN (MAXIMOS)			
	CAUDALES		CABEZAS	
	(GPM)	(BPD)	(PIES)	(Kg/cm ²)
3000	5650	193714.3	2080	58.53
3050	6175	211714.3	2090	58.81
3100	6725	230571.4	2100	59.66
3200	7600	260571.4	2120	59.66

Punto de Operación Máximo - Tramo II ONP

2 Turbobombas + Booster



CURVAS DE TURBOBOMBAS EN ESTACION 5



FUENTE: Manual de Operación de Turbinas en el ONP.

CONCLUSIONES

La capacidad máxima de bombeo del Tramo II operando con 1 turbobomba a 3,400 RPM y considerando el crudo mezcla es de 160.457 MBD.

- Operando 2 turbobombas en Estación 5, es de 193.714 MBD para 3,000 RPM, 211.714 MBD para 3,050 RPM y 230.571 MBD cuando las unidades trabajen a 3,100 RPM.

- La variación de velocidad de las unidades de bombeo de Estación 5 dependerán de las condiciones operativas de las demás Estaciones (Presiones de succión, alivios, etc.)

A N E X O 4

CALCULO DE CAUDAL MAXIMO

DE BOMBEO EN ESTACION 9

CON 2 y 3 TURBOBOMBAS

CALCULO DE CAUDAL MAXIMO DE BOMBEO EN ESTACION 9 CON 2 y 3 TURBOBOMBAS

A) . CALCULO PARA 2 TURBOBOMBAS

Nº de Unidades = 2

Máxima Potencia disponible de 1 turbobomba = 2,800 HP

Presiones: $h(\text{mt}) = (\Delta P (\text{Kg/cm}^2) * 10) / \rho (\text{gr/cc})$

- Succión = 10 Kg/cm²

$\Delta P = P_{\text{succión}} - P_{\text{descarga}}$

- Descarga = 116 Kg/cm²

- Presión Neta $= \frac{(116-10) \text{Kg/cm}^2 * 10}{0.923} = 1,148\text{m} = 3,766.8 \text{ pies}$

- Eficiencia de la Bomba:

para 3,766.8 pies $e = 0.64$

- Eficiencia del Sistema (n):

= Ef. turbina x Ef. bomba = 0.95 x 0.65 = 0.6175

- Gravedad Específica (s): 0.923

$$\text{Potencia (HP)} = \frac{Q \times H \times s}{3960 \times n}$$

donde:

P = Potencia (HP)

Q = Caudal (GPM)

s = Gravedad Específica

H = Cabeza o Presión Neta (pies)

n = Eficiencia del sistema

Entonces:

$$Q = \frac{3960 \times n \times P}{H \times s} = \frac{3960 \times 0.6175 \times 2800}{3766.8 \times 0.923} =$$

Q = 1,969.3 GPM (para 1 turbobomba)

Luego:

Para 2 turbobombas: $Q_{\text{máx}}: 1,939.3 \times 2 = 3,939.6 \text{ GPM}$

$Q_{\text{máx}}: 135,038 \text{ BPD}$

B) . CALCULO PARA 3 TURBOBOMBAS

N° de Unidades = 3

Máxima Potencia disponible de 1 turbobomba = 2,800 HP

Presiones:

- Succión = 18 Kg/cm²

- Descarga = 118 Kg/cm²

- Presión Neta = $\frac{100\text{Kg/cm}^2 \times 10}{0.923} = 1,083.4\text{m} = 3,553.6 \text{ pies}$

- Eficiencia de la Bomba:

para H = 3,553.6 pies e = 0.62

- Eficiencia del Sistema (n):

= Ef. turbina x Ef. bomba = 0.95 x 0.62 = 0.589

- Gravedad Específica (s): 0.923

Entonces:

$$Q = \frac{3960 \times n \times P}{H \times s} = \frac{3960 \times 0.589 \times 2800}{3553.6 \times 0.923} =$$

$$Q = 1,991 \text{ GPM (para 1 turbobomba)}$$

Luego:

Para 3 turbobombas: $Q_{\text{máx}}: 1,991 \times 3 = 5,973 \text{ GPM}$

$Q_{\text{máx}}: 204,789 \text{ BPD}$

A N E X O 5

**CONSUMO DE COMBUSTIBLE
EN LAS UNIDADES DE BOMBEO
PARA LAS DIFERENTES
ALTERNATIVAS**

**CONSUMOS DE COMBUSTIBLES DE UNIDADES DE BOMBEO
TRAMO II
1 UNIDAD EN ESTACION 5 Y 2 UNIDADES EN ESTACION 9**

ESTACION 5

N° Unidades = 1
P. SUCCION = 5 Kg/cm²
Grav. Especif. = 0.923
Viscosidad = 189.07 cstks.
Diámetro Int. = 34.98 pulg.

CAUDAL TOTAL		PRESIONES (Kg/cm ²)		E. BOMBA (%)	EF. SIST. (%)	POT. (HP)	Ce LB/HP-H	CONSUMO (GPH)
MBD	(GPM)	P. DESC.	P. NETA					
100	2916,67	57,46	52,46	0,664	0,6308	2009,03	0,7890	218,63
105	3062,50	57,48	52,48	0,670	0,6365	2091,43	0,7756	223,75
110	3208,33	57,50	52,5	0,675	0,6413	2175,65	0,7632	229,03
115	3354,17	57,52	52,52	0,677	0,6432	2268,73	0,7507	234,91
120	3500,00	57,54	52,54	0,672	0,6384	2385,93	0,7364	242,34
125	3645,83	57,56	52,56	0,670	0,6365	2493,75	0,7245	249,19
130	3791,67	57,58	52,58	0,665	0,6318	2614,03	0,7123	256,81
135	3937,50	57,60	52,60	0,662	0,6289	2727,96	0,7016	263,99
140	4083,33	57,62	52,62	0,658	0,6251	2847,32	0,6912	271,44

ESTACION 6

N° Unidades = 1
P. SUCCION = 26.2 Kg/cm²
Grav. Especif. = 0.923
Viscosidad = 189.07 cstks.
Diámetro Int. = 34.98 pulg.

CAUDAL TOTAL		PRESIONES (Kg/cm ²)		E. BOMBA (%)	EF. SIST. (%)	POT. (HP)	Ce LB/HP-H	CONSUMO (GPH)
MBD	(GPM)	P. DESC.	P. NETA					
100	2916,67	48,38	22,18	0,661	0,6280	853,42	1,2453	146,29
105	3062,50	48,43	22,23	0,665	0,6318	892,41	1,2158	149,65
110	3208,33	48,47	22,27	0,669	0,6356	931,09	1,1880	152,56
115	3354,17	48,51	22,31	0,672	0,6384	970,91	1,1608	155,45
120	3500,00	48,55	22,35	0,676	0,6422	1009,05	1,1360	158,11
125	3645,83	48,60	22,40	0,680	0,6460	1046,89	1,1127	160,67
130	3791,67	48,64	22,44	0,684	0,6498	1084,45	1,0907	163,15
135	3937,50	48,68	22,48	0,688	0,6536	1121,73	1,0699	165,54
140	4083,33	48,72	22,52	0,691	0,6565	1160,41	1,0495	167,97

ESTACION 7

N° Unidades = 1

P. SUCCION = 21.5 Kg/cm²

Grav. Especif. = 0.923

Viscosidad = 189.07 cstks.

Diámetro Int. = 34.98 pulg.

CAUDAL TOTAL		PRESIONES (Kg/cm ²)		E. BOMBA (%)	EF. SIST. (%)	POT. (HP)	Ce LB/HP-H	CONSUMO (GPH)
MBD	(GPM)	P. DESC.	P. NETA					
100	2916,67	49,92	28,42	0,661	0,6280	1093,27	1,0857	163,72
105	3062,50	50,00	28,5	0,665	0,6318	1144,25	1,0579	166,96
110	3208,33	50,08	28,58	0,669	0,6356	1194,92	1,0321	170,11
115	3354,17	50,16	28,66	0,672	0,6384	1247,15	1,0073	173,28
120	3500,00	50,24	28,74	0,676	0,6422	1297,3	0,9851	176,27
125	3645,83	50,32	28,82	0,680	0,6460	1347,16	0,9645	179,22
130	3791,67	50,40	28,90	0,684	0,6498	1396,73	0,9454	182,13
135	3937,50	50,48	28,98	0,688	0,6536	1446,02	0,9276	185,00
140	4083,33	50,56	29,06	0,691	0,6565	1497,20	0,9103	187,99

ESTACION 8

N° Unidades = 1

P. SUCCION = 12.5 Kg/cm²

Grav. Especif. = 0.923

Viscosidad = 189.07 cstks.

Diámetro Int. = 34.98 pulg.

CAUDAL TOTAL		PRESIONES (Kg/cm ²)		E. BOMBA (%)	EF. SIST. (%)	POT. (HP)	Ce LB/HP-H	CONSUMO (GPH)
MBD	(GPM)	P. DESC.	P. NETA					
100	2916,67	43,12	30,62	0,577	0,5482	1346,68	0,9635	179,37
105	3062,50	43,18	30,68	0,589	0,5596	1390,99	0,9475	181,79
110	3208,33	43,24	30,74	0,605	0,5748	1421,43	0,9363	183,57
115	3354,17	43,30	30,80	0,612	0,5814	1471,89	0,9187	186,51
120	3500,00	43,36	30,86	0,624	0,5928	1509,25	0,9064	188,69
125	3645,83	43,42	30,92	0,636	0,6042	1545,44	0,8951	190,80
130	3791,67	43,48	30,98	0,648	0,6156	1580,53	0,8846	192,86
135	3937,50	43,54	31,04	0,659	0,6261	1617,02	0,8743	195,00
140	4083,33	43,60	31,10	0,671	0,6375	1650,07	0,8653	196,94

ESTACION 9

N° Unidades = 2

P. SUCCION = 10.0 Kg/cm²

Grav. Especif. = 0.923

Viscosidad = 189.07 cstks.

Diámetro Int. = 34.98 pulg.

CAUDAL TOTAL		PRESIONES (Kg/cm ²)		Q. UNIT (GPM)	E. BOMBA (%)	EF. SIST. (%)	POT. (HP)	Ce LB/HP-H	CONSUMO (GPH)	
MBD	(GPM)	P. DESC.	P. NETA						UNIDAD	ESTACION
100	2916,67	112,91	102,91	1458,33	0,650	0,6175	2013,14	0,78828	218,88	437,76
105	3062,50	112,94	102,94	1531,25	0,660	0,6270	2082,27	0,77707	223,18	446,36
110	3208,33	112,96	102,96	1604,17	0,662	0,6289	2175,36	0,76326	229,02	458,04
115	3354,17	112,99	102,99	1677,08	0,658	0,6251	2288,61	0,74814	236,17	472,34
120	3500,00	113,01	103,01	1750,00	0,650	0,6175	2418,09	0,73272	244,38	488,76
125	3645,83	113,04	103,04	1822,92	0,643	0,6109	2546,87	0,71895	252,58	505,12
130	3791,67	113,06	103,06	1895,83	0,640	0,6080	2661,80	0,70771	259,83	519,66
135	3937,50	113,09	103,09	1968,75	0,636	0,6042	2782,23	0,69677	267,39	534,78
140	4083,33	113,11	103,11	2041,67	0,631	0,5998	2906,99	0,68618	275,13	550,26

RESUMEN 1

ALTERNATIVA 1 1 TURBOBOMBA EN ESTACION 5 Y 2 TURBOBOMBAS EN ESTACION 9

CAUDAL TOTAL		CONSUMO DE COMBUSTIBLE (GPH)						C. E. (GL/BL)
MBD	(BPH)	EST. 5	EST. 6	EST. 7	EST. 8	EST. 9	TOTAL	
100	4166,67	218,63	146,59	163,72	179,37	437,76	1146,07	0,275057
105	4375,00	223,75	149,65	166,96	181,79	446,36	1168,51	0,267088
110	4583,33	229,03	152,56	170,11	183,57	458,04	1193,31	0,260359
115	4791,67	234,91	155,45	173,28	186,51	472,34	1222,49	0,255128
120	5000,00	242,34	158,11	176,27	188,69	488,76	1254,17	0,250834
125	5208,33	249,19	160,67	179,22	190,80	505,12	1285,00	0,246720
130	5416,67	256,81	163,15	182,13	192,86	519,66	1314,61	0,242697
135	5625,00	263,99	165,54	185,00	195,00	534,78	1344,31	0,238988
140	5833,33	271,44	167,97	187,99	196,94	550,26	1374,60	0,235646

**CONSUMOS DE COMBUSTIBLES DE UNIDADES DE BOMBEO
TRAMO II
1 UNIDAD EN ESTACION 5 Y 3 UNIDADES EN ESTACION 9**

ESTACION 5

N° Unidades = 1
P. SUCCION = 6 Kg/cm²
Grav. Específ. = 0.923
Viscosidad = 189.07 cstks.
Diámetro Int. = 34.98 pulg.

CAUDAL TOTAL		PRESIONES (Kg/cm ²)		E. BOMBA (%)	EF. SIST. (%)	POT. (HP)	Ce LB/HP-H	CONSUMO (GPH)
MBD	(GPM)	P. DESC.	P. NETA					
120	3500,00	57,54	51,54	0,672	0,6384	2340,52	0,74175	239,46
125	3645,83	57,56	51,56	0,676	0,6422	2424,59	0,73199	244,80
130	3791,67	57,58	51,58	0,678	0,6441	2515,15	0,72222	250,55
135	3937,50	57,60	51,60	0,666	0,6327	2660,03	0,70787	259,72
140	4083,33	57,62	51,62	0,665	0,6318	2763,81	0,69840	266,24
145	4229,17	57,65	51,62	0,664	0,6308	2867,99	0,68942	272,72
150	4375,00	57,67	51,67	0,662	0,6289	2977,05	0,68050	279,43
155	4520,83	57,69	51,69	0,659	0,6261	3091,53	0,67157	286,37
160	4666,67	57,71	51,71	0,658	0,6251	3197,40	0,66362	292,67

ESTACION 6

N° Unidades = 1
P. SUCCION = 26.2 Kg/cm²
Grav. Específ. = 0.923
Viscosidad = 189.07 cstks.
Diámetro Int. = 34.98 pulg.

CAUDAL TOTAL		PRESIONES (Kg/cm ²)		E. BOMBA (%)	EF. SIST. (%)	POT. (HP)	Ce LB/HP-H	CONSUMO (GPH)
MBD	(GPM)	P. DESC.	P. NETA					
120	3500,00	48,55	22,35	0,672	0,6384	1015,05	1,13224	158,52
125	3645,83	48,60	22,40	0,678	0,6441	1049,98	1,11085	160,88
130	3791,67	48,64	22,44	0,680	0,6460	1090,83	1,08707	163,56
135	3937,50	48,68	22,48	0,686	0,6517	1125,00	1,06816	165,75
140	4083,33	48,72	22,52	0,690	0,6555	1162,09	1,04860	168,08
145	4229,17	48,77	22,57	0,692	0,6574	1202,38	1,02845	170,56
150	4375,00	48,81	22,61	0,694	0,6593	1242,59	1,00941	173,00
155	4520,83	48,85	22,65	0,696	0,6612	1282,72	0,99141	175,41
160	4666,67	48,89	22,69	0,698	0,6631	1322,78	0,97441	177,78

ESTACION 7

N° Unidades = 1

P. SUCCION = 21.5 Kg/cm²

Grav. Especif. = 0.923

Viscosidad = 189.07 cstks.

Diámetro Int. = 34.98 pulg.

CAUDAL TOTAL		PRESIONES (Kg/cm ²)		E. BOMBA (%)	EF. SIST. (%)	POT. (HP)	Ce LB/HP-H	CONSUMO (GPH)
MBD	(GPM)	P. DESC.	P. NETA					
120	3500,00	50,24	28,74	0,672	0,6384	1305,02	0,98183	176,73
125	3645,83	50,32	28,82	0,678	0,6441	1351,13	0,96293	179,45
130	3791,67	50,40	28,90	0,680	0,6460	1404,94	0,94232	182,61
135	3937,50	50,48	28,98	0,686	0,6517	1450,24	0,92610	185,25
140	4083,33	50,56	29,06	0,690	0,6555	1499,37	0,90961	188,12
145	4229,17	50,64	29,14	0,692	0,6574	1552,71	0,89290	191,23
150	4375,00	50,72	29,22	0,694	0,6593	1606,03	0,87735	194,35
155	4520,83	50,89	29,30	0,696	0,6612	1659,34	0,86288	197,49
160	4666,67	50,88	29,38	0,698	0,6631	1712,64	0,84939	200,65

ESTACION 8

N° Unidades = 1

P. SUCCION = 12.5 Kg/cm²

Grav. Especif. = 0.923

Viscosidad = 189.07 cstks.

Diámetro Int. = 34.98 pulg.

CAUDAL TOTAL		PRESIONES (Kg/cm ²)		E. BOMBA (%)	EF. SIST. (%)	POT. (HP)	Ce LB/HP-H	CONSUMO (GPH)
MBD	(GPM)	P. DESC.	P. NETA					
120	3500,00	43,36	30,86	0,673	0,6394	1399,37	0,94438	182,28
125	3645,83	43,42	30,92	0,676	0,6422	1454,00	0,92480	185,47
130	3791,67	43,48	30,98	0,684	0,6498	1497,34	0,91027	188,00
135	3937,50	43,54	31,04	0,688	0,6536	1548,86	0,89406	191,00
140	4083,33	43,60	31,10	0,690	0,6555	1604,63	0,87775	194,27
145	4229,17	43,66	31,16	0,693	0,6584	1657,91	0,86325	197,41
150	4375,00	43,72	31,22	0,695	0,6603	1713,41	0,84920	200,69
155	4520,83	43,78	31,28	0,702	0,6669	1756,20	0,83904	203,24
160	4666,67	43,84	31,34	0,708	0,6726	1800,90	0,82901	205,93

ESTACION 9

N° Unidades = 3

P. SUCCION = 10.0 Kg/cm²

Grav. Especif. = 0.923

Viscosidad = 189.07 cstks.

Diámetro Int. = 34.98 pulg.

CAUDAL TOTAL		PRESIONES (Kg/cm ²)		Q. UNIT (GPM)	E. BOMBA (%)	EF. SIST. (%)	POT. (HP)	Ce LB/HP-H	CONSUMO (GPH)	
MBD	(GPM)	P. DESC.	P. NETA						UNIDAD	ESTACION
120	3500,00	113,01	103,01	1166,67	0,638	0,6061	1642,38	0,86737	196,49	589,47
125	3645,83	113,04	103,04	1215,28	0,641	0,6090	1703,21	0,85171	200,09	600,27
130	3791,67	113,06	103,06	1263,89	0,644	0,6118	1763,51	0,83736	203,68	611,04
135	3937,50	113,09	103,09	1312,50	0,648	0,6156	1820,47	0,82479	207,10	621,30
140	4083,33	113,11	103,11	1361,11	0,650	0,6175	1882,54	0,81208	210,87	632,61
145	4229,17	113,14	103,14	1409,72	0,655	0,6223	1935,35	0,80201	214,09	642,27
150	4375,00	113,16	103,16	1458,33	0,659	0,6261	1990,41	0,79216	217,48	652,44
155	4520,83	113,19	103,19	1506,94	0,660	0,6270	2054,13	0,78153	221,43	664,29
160	4666,67	113,21	103,21	1555,56	0,658	0,6251	2127,34	0,77021	226,00	678,00

RESUMEN 2

ALTERNATIVA 2 1 TURBOBOMBA EN ESTACION 5 Y 3 TURBOBOMBAS EN ESTACION 9

CAUDAL TOTAL		CONSUMO DE COMBUSTIBLE (GPH)						C. E. (GL/BL)
MBD	(BPH)	EST. 5	EST. 6	EST. 7	EST. 8	EST. 9	TOTAL	
120	5000,00	239,46	158,52	176,73	182,28	589,47	1346,46	0,269292
125	5208,33	244,80	160,88	179,45	185,47	600,27	1370,87	0,263207
130	5416,67	250,55	163,56	182,61	188,00	611,04	1395,76	0,257679
135	5625,00	259,72	165,75	185,25	191,00	621,30	1423,02	0,252981
140	5833,33	266,24	168,08	188,12	194,27	632,61	1449,32	0,248455
145	6041,67	272,72	170,56	191,23	197,41	642,27	1474,19	0,244004
150	6250,00	279,43	173,00	194,35	200,69	652,44	1499,91	0,239986
155	6458,33	286,37	175,41	197,49	203,24	664,29	1526,80	0,236408
160	6666,67	292,67	177,78	200,65	205,93	678,00	1555,03	0,233255

**CONSUMOS DE COMBUSTIBLES DE UNIDADES DE BOMBEO
TRAMO II
2 UNIDADES EN ESTACION 5 Y 3 UNIDADES EN ESTACION 9**

ESTACION 5

N° Unidades = 2

P. SUCCION = 6.4 Kg/cm²

Grav. Especif. = 0.923

Viscosidad = 189.07 cstks.

Diámetro Int. = 34.98 pulg.

CAUDAL TOTAL MBD	PRESIONES (Kg/cm ²) (GPM)	PRESIONES (Kg/cm ²)		Q. UNIT (GPM)	E. BOMBA (%)	EF. SIST. (%)	POT. (HP)	Ce LB/HP-H	CONSUMO (GPH)	
		P. DESC.	P. NETA						UNIDAD	ESTACION
160	4666,67	57,71	51,31	2333,33	0,648	0,6156	1610,81	0,876013	194,63	389,26
165	4812,50	57,73	51,33	2406,25	0,650	0,6175	1656,71	0,863569	197,34	394,68
170	4958,33	57,75	51,35	2479,17	0,652	0,6194	1702,37	0,851915	200,04	400,08
175	5104,17	57,77	51,37	2552,08	0,654	0,6213	1747,79	0,840993	202,74	405,48
180	5250,00	57,79	51,39	2625,00	0,656	0,6232	1792,97	0,830745	205,45	410,90
185	5395,83	57,81	51,41	2697,92	0,661	0,6280	1829,58	0,822863	207,65	415,30
190	5541,67	57,83	51,43	2770,83	0,663	0,6299	1874,12	0,813749	210,35	420,70
195	5687,50	57,85	51,45	2843,75	0,666	0,6327	1915,55	0,805709	212,88	425,76
200	5833,33	57,88	51,48	2916,67	0,668	0,6346	1959,58	0,797595	215,58	431,16

ESTACION 6

N° Unidades = 1

P. SUCCION = 30 Kg/cm²

Grav. Especif. = 0.923

Viscosidad = 189.07 cstks.

Diámetro Int. = 34.98 pulg.

CAUDAL TOTAL MBD	PRESIONES (Kg/cm ²) (GPM)	PRESIONES (Kg/cm ²)		E. BOMBA (%)	EF. SIST. (%)	POT. (HP)	Ce LB/HP-H	CONSUMO (GPH)
		P. DESC.	P. NETA					
160	4666,67	48,89	18,89	0,698	0,6631	1101,27	1,08120	164,23
165	4812,50	48,93	18,93	0,701	0,6660	1133,36	1,06367	166,28
170	4958,33	48,98	18,98	0,702	0,6669	1168,66	1,04524	168,49
175	5104,17	49,02	19,02	0,706	0,6707	1198,89	1,03015	170,35
180	5250,00	49,06	19,06	0,705	0,6698	1237,65	1,01169	172,71
185	5395,83	49,10	19,10	0,700	0,6650	1283,96	0,99087	175,48
190	5541,67	49,15	19,15	0,665	0,6318	1391,15	0,94746	181,80
195	5687,50	49,19	19,19	0,661	0,6280	1439,58	0,92983	184,63
200	5833,33	49,23	19,23	0,658	0,6251	1486,51	0,91382	187,37

ESTACION 7

N° Unidades = 1

P. SUCCION = 29 Kg/cm²

Grav. Especif. = 0.923

Viscosidad = 189.07 cstke.

Diámetro Int. = 34.98 pulg.

CAUDAL TOTAL		PRESIONES (Kg/cm ²)		E. BOMBA (%)	EF. SIST. (%)	POT. (HP)	Ce LB/HP-H	CONSUMO (GPH)
MBD	(GPM)	P. DESC.	P. NETA					
160	4666,67	56,38	27,38	0,723	0,6800	1556,39	0,89179	191,44
165	4812,50	56,46	27,46	0,723	0,6820	1605,01	0,87764	194,29
170	4958,33	56,54	27,54	0,723	0,6860	1648,81	0,86566	196,87
175	5104,17	56,62	27,62	0,723	0,6880	1697,30	0,85318	199,74
180	5250,00	56,70	27,70	0,723	0,6869	1753,80	0,83960	203,10
185	5395,83	56,78	27,78	0,718	0,6821	1820,33	0,82482	207,10
190	5541,67	56,86	27,86	0,714	0,6783	1885,43	0,81151	211,04
195	5687,50	56,94	27,94	0,710	0,6745	1951,55	0,79904	215,09
200	5833,33	57,02	28,02	0,706	0,6707	2018,72	0,78734	219,23

ESTACION 8

N° Unidades = 1

P. SUCCION = 18 Kg/cm²

Grav. Especif. = 0.923

Viscosidad = 189.07 cstks.

Diámetro Int. = 34.98 pulg.

CAUDAL TOTAL		PRESIONES (Kg/cm ²)		E. BOMBA (%)	EF. SIST. (%)	POT. (HP)	Ce LB/HP-H	CONSUMO (GPH)
MBD	(GPM)	P. DESC.	P. NETA					
160	4666,67	51,84	33,84	0,7500	0,7125	1835,68	0,82158	208,02
165	4812,50	51,90	33,90	0,7520	0,7144	1891,32	0,81036	211,40
170	4958,33	51,96	33,96	0,7540	0,7163	1946,88	0,79989	214,80
175	5104,17	52,02	34,02	0,7560	0,7182	2002,33	0,79011	218,22
180	5250,00	52,08	34,08	0,7552	0,7174	2065,33	0,77974	222,13
185	5395,83	52,13	34,13	0,7191	0,6831	2233,15	0,75533	232,66
190	5541,67	52,19	34,19	0,7230	0,6869	2285,10	0,74859	235,94
195	5687,50	52,25	34,25	0,7251	0,6888	2342,51	0,74151	239,58
200	5833,33	52,31	34,31	0,7213	0,6852	2419,42	0,73257	244,47

ESTACION 9

N° Unidades = 3

P. SUCCION = 18.0 Kg/cm²

Grav. Especif. = 0.923

Viscosidad = 189.07 cstks.

Diámetro Int. = 34.98 pulg.

CAUDAL TOTAL		PRESIONES (Kg/cm ²)		Q. UNIT (GPM)	E. BOMBA (%)	EF. SIST. (%)	POT. (HP)	Ce LB/HP-H	CONSUMO (GPH)	
MBD	(GPM)	P. DESC.	P. NETA						UNIDAD	ESTACION
160	4666,67	113,21	95,21	1555,56	0,6420	0,6099	2011,36	0,78858	218,77	656,31
165	4812,50	113,23	95,23	1604,17	0,6460	0,6137	2061,9	0,78028	221,91	665,73
170	4958,33	113,26	95,26	1652,78	0,6480	0,6156	2118,38	0,77155	225,44	676,32
175	5104,17	113,28	95,28	1701,39	0,6500	0,6175	2174,53	0,76338	228,96	686,88
180	5250,00	113,31	95,31	1750,00	0,6491	0,6166	2240,35	0,75438	233,11	699,33
185	5395,83	113,33	95,33	1798,61	0,6458	0,6135	2314,94	0,74486	237,84	713,52
190	5541,67	113,36	95,36	1847,22	0,6425	0,6104	2390,34	0,73588	242,62	727,86
195	5687,50	113,38	95,38	1895,83	0,6392	0,6072	2466,54	0,72738	247,46	742,38
200	5833,33	113,41	95,41	1944,44	0,6359	0,6041	2543,57	0,71929	252,35	757,05

RESUMEN 3

ALTERNATIVA 3 2 TURBOBOMBAS EN ESTACION 5 Y 3 TURBOBOMBAS EN ESTACION 9

CAUDAL TOTAL		CONSUMO DE COMBUSTIBLE (GPH)						C. E. (GL/BL)
MBD	(BPH)	EST. 5	EST. 6	EST. 7	EST. 8	EST. 9	TOTAL	
160	6666,67	389,26	164,23	191,44	208,02	656,31	1609,26	0,241389
165	6875,00	394,68	166,28	194,29	211,40	665,73	1632,38	0,237437
170	7083,33	400,08	168,49	196,87	214,80	676,32	1656,56	0,233867
175	7291,67	405,48	170,35	199,74	218,22	686,86	1680,67	0,230492
180	7500,00	410,90	172,71	203,1	222,13	699,33	1708,17	0,227756
185	7708,33	415,30	175,48	207,1	232,66	713,52	1744,06	0,226256
190	7916,67	420,70	181,80	211,04	235,94	727,86	1777,34	0,224506
195	8125,00	425,76	184,63	215,09	239,58	742,38	1807,44	0,222454
200	8333,33	431,16	187,37	219,23	244,47	757,05	1839,28	0,220714

**CONSUMOS DE COMBUSTIBLES DE UNIDADES DE BOMBEO
TRAMO II
2 UNIDADES EN ESTACION 5 Y 4 UNIDADES EN ESTACION 9**

ESTACION 5

N° Unidades = 2
P. SUCCION = 6.4 Kg/cm²
Grav. Específ. = 0.923
Viscosidad = 189.07 cstks.
Diámetro Int. = 34.98 pul g.

CAUDAL TOTAL		PRESIONES (Kg/cm ²)		Q. UNIT (GPM)	E. BOMBA (%)	EF. SIST. (%)	POT. (HP)	Ce LB/HP-H	CONSUMO (GPH)	
MBD	(GPM)	P. DESC.	P. NETA						UNIDAD	ESTACION
180	5250,00	57,79	51,39	2625,00	0,656	0,6232	1792,97	0,83075	205,45	410,90
185	5395,83	57,81	51,41	2697,92	0,662	0,6289	1826,82	0,82344	207,49	414,98
190	5541,67	57,83	51,43	2770,83	0,665	0,6318	1868,48	0,81488	210,01	420,02
195	5687,50	57,85	51,45	2843,75	0,668	0,6346	1909,81	0,80680	212,53	425,06
200	5833,33	57,88	51,48	2916,67	0,670	0,6365	1953,73	0,79865	215,22	430,44
205	5979,17	57,90	51,50	2989,58	0,673	0,6394	1994,45	0,79146	217,73	435,46
210	6125,00	57,92	51,52	3062,50	0,674	0,6403	2040,89	0,78367	220,61	441,22
215	6270,83	57,94	51,54	3135,42	0,675	0,6413	2087,23	0,77630	223,49	446,98

ESTACION 6

N° Unidades = 1
P. SUCCION = 29 Kg/cm²
Grav. Específ. = 0.923
Viscosidad = 189.07 cstks.
Diámetro Int. = 34.98 pul g.

CAUDAL TOTAL		PRESIONES (Kg/cm ²)		E. BOMBA (%)	EF. SIST. (%)	POT. (HP)	Ce LB/HP-H	CONSUMO (GPH)
MBD	(GPM)	P. DESC.	P. NETA					
180	5250,00	49,06	20,06	0,723	0,6869	1270,14	0,99695	174,66
185	5395,83	49,10	20,10	0,726	0,6897	1302,78	0,98278	176,60
190	5541,67	49,15	20,15	0,730	0,6935	1333,47	0,97003	178,41
195	5687,50	49,19	20,19	0,735	0,6983	1362,11	0,95860	180,10
200	5833,33	49,23	20,23	0,740	0,7030	1390,52	0,94769	181,76
205	5979,17	49,27	20,27	0,750	0,7125	1409,23	0,94074	182,86
210	6125,00	49,23	20,32	0,745	0,7018	1456,33	0,92400	185,61
215	6270,83	49,36	20,36	0,740	0,7030	1504,21	0,90804	188,40

ESTACION 7

N° Unidades = 1

P. SUCCION = 29 Kg/cm²

Grav. Especif. = 0.923

Viscosidad = 189.07 cstks.

Diámetro Int. = 34.98 pulg.

CAUDAL TOTAL		PRESIONES (Kg/cm ²)		E. BOMBA (%)	EF. SIST. (%)	POT. (HP)	Ce LB/HP-H	CONSUMO (GPH)
MBD	(GPM)	P. DESC.	P. NETA					
180	5250,00	56,70	27,70	0,723	0,6869	1753,80	0,83960	203,10
185	5395,83	56,78	27,78	0,726	0,6897	1800,27	0,82914	205,89
190	5541,67	56,86	27,86	0,730	0,6935	1844,11	0,81983	208,53
195	5687,50	56,94	27,94	0,735	0,6983	1885,17	0,81156	211,03
200	5833,33	57,02	28,02	0,740	0,7030	1925,96	0,80375	213,52
205	5979,17	57,10	28,10	0,750	0,7125	1953,37	0,79871	215,20
210	6125,00	57,18	28,18	0,745	0,7078	2020,20	0,78709	219,32
215	6270,83	57,26	28,26	0,740	0,7030	2088,20	0,77615	223,55

ESTACION 8

N° Unidades = 1

P. SUCCION = 18 Kg/cm²

Grav. Especif. = 0.923

Viscosidad = 189.07 cstks.

Diámetro Int. = 34.98 pulg.

CAUDAL TOTAL		PRESIONES (Kg/cm ²)		E. BOMBA (%)	EF. SIST. (%)	POT. (HP)	Ce LB/HP-H	CONSUMO (GPH)
MBD	(GPM)	P. DESC.	P. NETA					
180	5250,00	52,08	34,08	0,7230	0,6869	2157,31	0,76583	227,88
185	5395,83	52,13	34,13	0,7260	0,6897	2211,92	0,75819	231,32
190	5541,67	52,19	34,19	0,7300	0,6935	2263,19	0,75139	234,56
195	5687,50	52,25	34,25	0,7350	0,6983	2310,96	0,74535	237,58
200	5833,33	52,31	34,31	0,7400	0,7030	2358,28	0,73963	240,59
205	5979,17	52,37	34,37	0,7500	0,7125	2389,14	0,73602	242,55
210	6125,00	52,43	34,43	0,7450	0,7078	2468,09	0,72721	247,56
215	6270,83	52,49	34,49	0,7400	0,7030	2548,32	0,71880	252,65

ESTACION 9

N° Unidades = 4

P. SUCCION = 18.0 Kg/cm²

Grav. Especif. = 0.923

Viscosidad = 189.07 cstks.

Diámetro Int. = 34.98 pulg.

CAUDAL TOTAL MBD	PRESIONES (Kg/cm ²) (GPM)	PRESIONES (Kg/cm ²)		Q. UNIT (GPM)	E. BOMBA (%)	EF. SIST. (%)	POT. (HP)	Ce LB/HP-H	CONSUMO (GPH)	
		P. DESC.	P. NETA						UNIDAD	ESTACION
180	5250,00	113,31	95,31	1312,50	0,661	0,6280	1650,01	0,86534	196,94	787,78
185	5395,83	113,33	95,33	1348,96	0,665	0,6318	1686,08	0,85599	199,07	796,28
190	5541,67	113,36	95,36	1385,42	0,670	0,6365	1719,17	0,84780	201,04	804,16
195	5687,50	113,38	95,38	1421,88	0,680	0,6460	1738,91	0,84308	202,21	808,84
200	5833,33	113,41	95,41	1458,33	0,690	0,6555	1758,11	0,83860	203,36	813,44
205	5979,17	113,43	95,43	1494,79	0,701	0,6660	1774,24	0,83492	204,32	817,28
210	6125,00	113,46	95,46	1531,25	0,705	0,6698	1807,67	0,82754	206,33	825,32
215	6270,83	113,48	95,48	1567,71	0,710	0,6745	1838,15	0,82107	208,17	832,68

RESUMEN 4

ALTERNATIVA 4 2 TURBOBOMBAS EN ESTACION 5 Y 4 TURBOBOMBAS EN ESTACION 9

CAUDAL TOTAL MBD	(BPH)	CONSUMO DE COMBUSTIBLE (GPH)						C. E. (GL/BL)
		EST. 5	EST. 6	EST. 7	EST. 8	EST. 9	TOTAL	
180	7500,00	410,90	174,66	203,10	227,88	787,76	1804,30	0,240573
185	7708,33	414,98	176,60	205,89	231,32	796,28	1825,07	0,236766
190	7916,67	420,02	178,41	208,53	234,56	804,16	1845,68	0,233139
195	8125,00	425,06	180,10	211,03	237,58	808,84	1862,61	0,229244
200	8333,33	430,44	181,76	213,52	240,59	813,44	1879,75	0,225570
205	8541,67	435,46	182,86	215,20	242,55	817,28	1893,35	0,221660
210	8750,00	441,22	185,61	219,32	247,56	825,32	1919,03	0,219318
215	8958,33	446,98	188,40	223,55	252,65	832,68	1944,26	0,217034

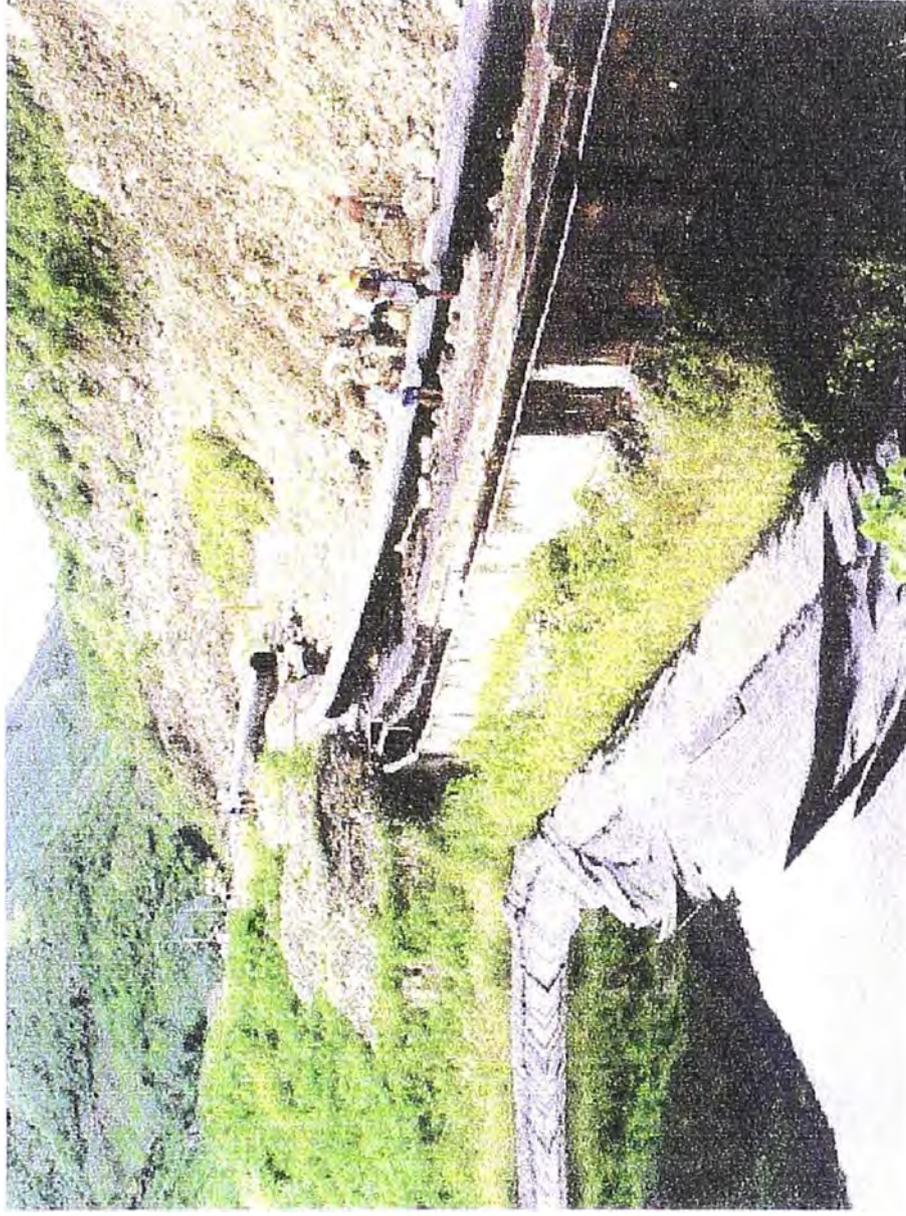
A N E X O 6

MISCELANEA

SECUENCIA FOTOGRAFICA DEL SINIESTRO,

DERRAME DE CRUDO EN EL KM.483 - ONP

OCURRIDO EL 14 DE MAYO DE 1999



Rotura de tubería causada por deslizamiento inicial (13-05-1999)



Crudo remanente en poza colapsada (14-05-1999)



Tubería colgada por asentamiento de terreno (14-05-1999)



Estado de tubería y poza colapsada (14-05-1999)



Estado de tubería colapsada (14-05-1999)



Colapso de poza de confinamiento por incremento de deslizamiento (14-05-1999)



TURBOBOMBAS EN ESTACION 5



TURBOBOMBAS EN ESTACION 5



BOMBAS REFORZADORAS (BOOSTER) EN ESTACION 5

BIBLIOGRAFIA

- (1) : Streeter, Victor L., "Mecánica de Fluidos" 8va. edición.
- (2) : Petroperú S.A., "Flujo de Fluidos". Curso interno. Operaciones Oleoducto.
- (3) : Dedios Novoa, L., "Flujo de Fluidos". Operaciones Oleoducto.
- (4) : Proaño Ortiz, Y., "Optimización de bombeo del Oleoducto Ramal Norte"
- (5) : Mena Coello, V., "Mantenimiento y Reparación de Tuberías y Tanques del Oleoducto Nor-Peruano".
- (6) : Petroperú S.A., "Estándares de Ingeniería para cálculos Hidráulicos". Operaciones Oleoducto.
- (7) : Petroperú S.A., "Manual de Operación y Puesta en Marcha del Oleoducto Nor-Peruano". Area OLE 1,984.
- (8) : Petroperú S.A., "Manual de Diseño Definitivo del Oleoducto Nor-Peruano". BECHTEL 1,974.
- (9) : Dinámica de Fluidos: Colección Schaum - 1,989.