



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción

“Diseño Hidráulico Para el Manejo y Suministro de
Combustibles Líquidos Alternativos Para Hornos
Cementeros en el Ecuador”

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Rodrigo Xavier Toro Bravo

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2007

AGRADECIMIENTO

A Dios, a mis Padres y hermanos, quienes siempre me supieron guiar por el camino correcto, a mis amigos por haber estado siempre a mi lado y especialmente al Ing. Julián Peña, Director de esta Tesis, por toda la ayuda prestada para la realización de la misma.

DEDICATORIA

A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

A JOSÉ JAVIER

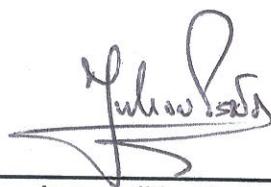
A MIS AMIGOS



TRIBUNAL DE GRADUACION



Ing. Omar Serrano V.
DELEGADO DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE



Ing. Julián Peña E.
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Mario Patiño A.
VOCAL

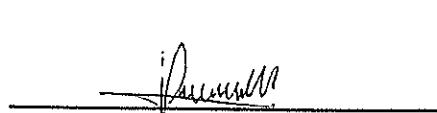


Ing. Jorge Duque R.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta
Tesis de Grado, me corresponden
exclusivamente; y el patrimonio intelectual de
la misma a la ESCUELA SUPERIOR
POLITÉCNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).



Rodrigo Xavier Toro Bravo

RESUMEN

En este proyecto se desarrollará el diseño hidráulico para suministrar combustible alternativo líquido, el cual básicamente está formado por desechos de plantas petroleras y químicas, hacia los hornos usados para la fabricación de cemento. Basándose en las demandas actuales de las grandes plantas cimenteras en el mundo y las proyecciones locales se ha llevado a cabo el diseño hidráulico requerido para este fin adaptado a los requerimientos que demanda nuestro mercado ecuatoriano. El diseño incluirá las tuberías y sus recorridos hacia los incineradores de los hornos, y las bombas que se usarán para impulsar dicho combustible, tomando en cuenta que el material a transportar posee características que lo hacen de manejo delicado.

En el capítulo 1 se presentarán los conceptos básicos que envuelven el uso de los combustibles alternativos y su gran impacto en la lucha por salvar el medio ambiente. Se buscará aplicar los procedimientos ya usados en otros

países medio-ambientalmente mas desarrollados en las industrias cementeras de nuestro país.

En el capítulo 2 se verán los requerimientos del sistema, presentándose las distintas propiedades de los fluidos a ser tratados como combustibles alternativos, cosa muy importante antes de decidir cual es el sistema de bombas a escogerse, ya que por sus características especiales, no pueden usarse todos los tipos de bombas disponibles en el mercado.

En el capítulo 3 y 4 se procederá a la parte modular de la tesis, concentrándonos en el diseño del sistema de bombeo, su sitio de implantación y la descripción de las bombas escogidas.

En el capítulo 5 se hará un análisis de factibilidad de la obra, uniendo la parte hidráulica con las demás partes del diseño básico y de detalle de la obra, que son la parte civil, la parte mecánica y la parte eléctrica, usando diagramas de Gantt para planificar ejecución de la obra.

En el capítulo 6 se procederá a dar las conclusiones y las respectivas recomendaciones que podrán obtenerse en el transcurso de la ejecución del diseño.

ÍNDICE GENERAL



POLITÉCNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA GONZALO J. YÁÑEZ
R.I.M.C.P.

Pág.

RESUMEN	II
ÍNDICE GENERAL.....	IV
ABREVIATURAS	VII
SIMBOLOGÍAS	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XII
ÍNDICE DE PLANOS.....	XIV
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1	3
1. MANEJO DE DESECHOS LÍQUIDOS COMO COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN PLANTAS CEMENTERAS	3
1.1.Uso De Los Desechos Líquidos Como Combustibles Alternativos	8
1.2.Beneficios Del Uso De Los Desechos Líquidos En Plantas Cementeras.....	22
CAPITULO 2	25

2. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA PARA LA UTILIZACIÓN DE DESECHOS LÍQUIDOS EN HORNOS CEMENTEROS.....	25
2.1. Propiedades Físicas Y Químicas Necesarias Para Uso En Hornos Cementeros	29
2.2. Tipos De Bombas Recomendados En La Manipulación De Combustibles Alternativos.....	34
2.3. Especificaciones Normativas Recomendadas.....	50
CAPITULO 3	51
3. DISEÑO HIDRÁULICO PARA LA RECEPCIÓN DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS A TANQUES RESERVORIOS.....	51
3.1. Selección Del Sitio De Implantación De La Estación De Bombeo.....	51
3.2. Requerimientos De Diseño	52
3.3. Análisis De Pérdidas Por Fricción En Tuberías Y Determinación De Diámetro De Tubería.....	56
3.4. Selección Y Descripción Del Tipo De Bomba.....	71
3.5. Diseño De La Estación De Bombeo	77
CAPITULO 4	81
4. DISEÑO HIDRÁULICO PARA LA IMPULSIÓN DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS HACIA HORNOS	81

4.1. Selección Del Sitio De Implantación De La Estación De Bombeo.....	81
4.2. Requerimientos De Diseño	82
4.3. Análisis De Pérdidas Por Fricción En Tuberías Y Determinación De Diámetro De Tubería	86
4.4. Selección Y Descripción Del Tipo De Bomba	104
4.5. Diseño De La Estación De Bombeo.....	109
CAPITULO 5	113
5. ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DE LA EJECUCIÓN DE LA OBRA.....	113
5.1. Presupuesto Referencial De La Obra	114
5.2. Programación De La Obra	126
CAPÍTULO 6	132
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	132
6.1. Conclusiones	132
6.2. Recomendaciones	134
APÉNDICES	136
BIBLIOGRAFÍA	162

ABREVIATURAS



POLITECNICO NACIONAL
 BIBLIOTECA CONGRESO DE LOS
 ECUADORESES

A.P.I	American petroleum institute
A.S.M.E	American society of mechanical engineers
ANSI	American national standards institute
As	Arsénico
ASTM	American society for testing materials
bar	Bar
Cd	Cadmio
CDT	Cabezal dinámico total
Ced	Cedula
CM	Membrana compacta
CO ₂	Dióxido de carbono
Cr	Cromo
dB	Decibelio
DMA	Dirección de medio ambiente
FPM	Pies por minuto
ft	Pie
GAL	Galón
GPM	Galón por minuto
Hg	Mercurio

HM	Membrana hidráulica
HP	Caballo de fuerza
Hz	Hercio
KCAL/KG	Kilo caloría por kilogramo
Kg./m ³	Kilogramo por metro cúbico
KW	Kilovatio
l/s	Litro por segundo
m	Metro
M. I.	Muy ilustre
m/s	Metro por segundo
m ²	Metro cuadrado
m ³	Metro cúbico
m ³ /h	Metro cúbico por hora
mg/Nm ³	Miligramo por metro cúbico neto
MJ/KG	Mega julio por kilogramo
MJ/m ³	Mega julio por metro cúbico
mm	Milímetro
mm ² /s	Milímetro cuadrado por segundo
MPa	Mega pascal
N/A	No aplica
NBR	Caucho de nitrilo
Ni	Níquel



NPSH	Cabezal neto de succión positiva
NPSH _r	Cabezal neto de succión positiva recomendado
°C	Grado centígrado
OCDE	Organización para el desarrollo y cooperación económica
OSHA	Occupational safety and health administration
Pb	Plomo
pH	Potencial hidrógeno
ppm	Parte por mil
PSI	Libra por pulgada cuadrada
psig	Libra por pulgada cuadrada manométrica
PTFE	Politetrafluoroetileno
R.O.	Registro oficial
RPM	Revolución por minuto
Sb	Antimonio
Sn	Estaño
TEFC	Totally enclosed, fan cooled
Tl	Talio
USD	Dólares americanos
Zn	Zinc

SIMBOLOGÍAS



Válvula



Válvula Solenoide



Bomba



Medidor de Flujo



Auto-tanque

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Proceso De Fabricación Del Cemento.....	5
Figura 1.2: Proceso De Fabricación Del Clinker.....	6
Figura 1.3: Tipos De Desechos Usados Como Combustibles Alternativos A Nivel Mundial	11
Figura 1.4: Ubicación Actual Del Área De Recepción De Combustibles Alternativos.	20
Figura 1.5: Ubicación Actual Del Área De Bombas.	21
Figura 2.1: Elementos Que Conforman Una Planta Para El Procesamiento De Desechos Líquidos	27
Figura 2.2: Bomba Centrifuga, Diseño Para Pozo Seco.....	35
Figura 2.3: Bomba De Tipo Cantilever.	39
Figura 2.4: Bombas De Doble Diafragma Operadas Por Aire.....	43
Figura 2.5: Bombas De Doble Diafragma Electromecánicas	44
Figura 2.6: Bombas De Doble Diafragma Hidráulicas	45
Figura 2.7: Bomba De Tornillo Excéntrico	47
Figura 2.8: Bomba De Manguera	49
Figura 3.1: Elementos De La Estación De Bombeo Para La Recepción	54
Figura 3.2: Curva Del Sistema Para La Tubería De 2 ½ "	66
Figura 3.3: Curva De Pérdidas Para La Tubería De 3".....	67
Figura 3.4: Curva De Pérdidas Para La Tubería De 4".....	68
Figura 3.5: Curva Conjunta De Los Tres Diámetros De Tubería	69
Figura 4.1: Elementos De La Estación De Bombeo Para La Impulsión	83
Figura 4.2: Curva De Pérdidas Para La Tubería De 1 ¼ ".....	97
Figura 4.3: Curva De Pérdidas Para La Tubería De 1½".....	98
Figura 4.4: Curva De Pérdidas Para La Tubería De 2".....	99
Figura 4.5: Curva De Pérdidas Para La Tubería De 2½".....	100
Figura 4.6: Curva Conjunta De Los Cuatro Diámetros De Tubería.....	101
Figura 4.7: Grafico De Selección Para Las Bombas De Membrana Compacta	105
Figura 5.1: Cronograma De La Ejecución De La Obra	127
Figura 5.2: Cronograma De La Ejecución De La Obra	128
Figura 5.3: Cronograma De La Ejecución De La Obra	129
Figura 5.4: Crónograma De La Ejecución De La Obra	130
Figura 5.5: Cronograma De La Ejecución De La Obra	131

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Patrones Recientes En El Uso De Combustibles Alternativos.....	10
Tabla 2	Tipos De Pre-Tratamientos Necesarios.....	13
Tabla 3	Elementos De Un Sistema Completo De Incineradores De Desechos Sólidos En Hornos Para Cemento.....	26
Tabla 4	Composición Química Admisible Para Alimentación De Residuos En Hornos Rotatorios De Clinker.....	26
Tabla 5	Propiedades Físicas Y Químicas Del Aceite Más Comúnmente Usado Como Combustible Alternativo.....	30
Tabla 6	Propiedades Propuestas Por La Planta Cementera.....	31
Tabla 7	Comparación De Tiempos Máximos Y Mínimos De Descarga Del Sistema De Recepción A Tanques Reservorios.....	32
Tabla 8	Sistema De Impulsión Tanques Reservorios - Hornos.....	33
Tabla 9	Características De Las Bombas Para El Sistema De Recepción	34
Tabla 10	Parámetros De Operación Considerados	37
Tabla 11	Cantidad De Accesorios Correspondientes A La Parte De Recepción A Tanques Reservorios	55
Tabla 12	Perdidas Por Fricción En Válvulas Y Accesorios Estándar.....	57
Tabla 13	Calculo De Longitud Equivalente En Accesorios	58
Tabla 14	Perdidas Por Fricción En Tubería 2½" Cedula 40.....	59
Tabla 15	Perdidas Por Fricción En Tubería 3" Cedula 40.....	62
Tabla 16	Perdidas Por Fricción En Tubería 4" Cedula 40.....	63
Tabla 17	Ánálisis De Pérdidas En Los Tres Diámetros Sugeridos.....	63
Tabla 18	Variables Finales	70
Tabla 19	Características De La Bomba De Impulsión	71
Tabla 20	Materiales De Construcción De La Bomba	74
Tabla 21	Parámetros De Operación Considerados	75
Tabla 22	Cantidad De Accesorios Correspondientes A La Parte De Recepción A Tanques Reservorios	85
Tabla 23	Pérdidas Por Fricción En Válvulas Y Accesorios Estándar.....	88
Tabla 24	Cálculo De Longitud Equivalente En Accesorios	89
Tabla 25	Perdidas Por Fricción En Tubería 1 1/4" Cedula 40.....	90
Tabla 26	Perdidas Por Fricción En Tubería 1 1/2" Cedula 40.....	93

Tabla 27	Perdidas Por Fricción En Tubería 2" Cedula 40	95
Tabla 28	Perdidas Por Fricción En Tubería 2 1/2" Cedula 40	96
Tabla 29	Análisis De Pérdidas En Los Cuatro Diámetros Sugeridos	
Tabla 30	VARIABLES FINALES	103
Tabla 31	Características De La Bomba De Impulsión	103
Tabla 32	Materiales De Construcción De La Bomba	106
Tabla 33	Presupuesto Referencial Para La Construcción De La Estación De Bombeo De Combustibles Alternativos	107
Tabla 34	Presupuesto Referencial Para La Construcción De La Infraestructura Completa Para El Bombeo De Combustibles Alternativos	115
Tabla 35	Periodo Estático De Retorno	117
Tabla 36	Resumen De Las Emisiones Medidas Por Las Chimeneas De Los Hornos Vs. Límites	119
Tabla 37	Algunas Regulaciones Ambientales Ecuatorianas	120
Tabla 38	Poder Calorífico Típico De Algunos Combustibles Y Residuos	122
		124



ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1: ISOMÉTRICO Y VISTA DE PLANTA SISTEMA HIDRAULICO
- PLANO 2: ISOMÉTRICO Y VISTA DE PLANTA SISTEMA NEUMATICO
- PLANO 3: VISTA DE PLANTA
- PLANO 4: PLANO DE BOMBA DE RECEPCIÓN
- PLANO 5: PLANO DE BOMBA DE IMPULSION

INTRODUCCIÓN

El uso de combustibles alternativos en el mundo actual ha tomado gran importancia en los últimos años. Dado el alto nivel de polución en las ciudades más industrializadas del mundo y el efecto catastrófico para con el medio ambiente producido por la incineración de productos de desecho o su disposición por otros medio, como los rellenos sanitarios, las empresas cementeras alrededor del mundo han implementado el uso de combustibles alternativos en sus plantas, para así con esto colaborar con su parte en este gran esfuerzo por disminuir la cantidad de contaminantes medio ambientales.

Al incinerar desechos industriales en los hornos cementeros, se disminuye sustancialmente las emanaciones provenientes de quemar el mismo desecho en otros procesos, tales como las incineradoras dedicadas a este trabajo. Todos los elementos provenientes de la incineración a altas temperaturas de los desechos son incorporados al Clinker, materia prima del cemento, obtenida en los hornos, logrando así que nada sea desechado a la atmósfera.

Este estudio se enfoca principalmente en la selección del sistema de bombeo para manejar estos combustibles y en el diseño de la estación de bombeo con sus respectivos accesorios. Todo será efectuado teniendo en consideración las normativas vigentes para este tipo de instalaciones industriales y especialmente a las normativas internas de la planta cementera, la cual posee ya mucha experiencia en plantas similares alrededor del mundo.

Cabe mencionar que también se hace un análisis de factibilidad del proyecto, en función de los costos generales del mismo y la programación de la obra, comparándolos con estudios de mercado previamente realizados para este sistema.



CAPITULO 1

1. MANEJO DE DESECHOS LÍQUIDOS COMO COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN PLANTAS CEMENTERAS

La filosofía de este proyecto está fundamentada dentro del ámbito del Convenio de Basilea que prohíbe desde 1994 la exportación de residuos tóxicos de los países de la Organización para el Desarrollo y Cooperación Económica (OCDE) a los demás países que no la integran y constituye una victoria ambiental que cada vez incorpora a mas países del mundo a seguir sus pasos en el control de la contaminación por estos residuos en un panorama ecológico mundial.

Para resolver las demandas de una creciente población en el mundo, todas las industrias deben llegar a ser más inteligentes acerca de cómo utilizan, reutilizan y reciclan las materias primas, energía, y desechos. La industria del cemento no es ninguna excepción. Producir el cemento toma grandes cantidades de materia prima y de combustible, y produce emisiones substanciales de dióxido de carbono.

La industria del cemento se compromete activamente con la ecología industrial, en la cual los desechos de una industria se convierten en entradas para otra. Podemos recuperar y utilizar muchos desechos industriales y otros materiales en la fabricación del cemento. Algunos se incorporan en el producto final; otros proporcionan el combustible necesario para convertir la piedra caliza en el cemento.

La producción del cemento es caracterizada por un proceso de extremadamente alta temperatura para la combustión (1450-2000 °C en la zona ardiente del horno), necesaria para el calentamiento y fundición de las materias primas. Los combustibles fósiles tradicionales de uso más general en este proceso de la combustión son carbón o gas.



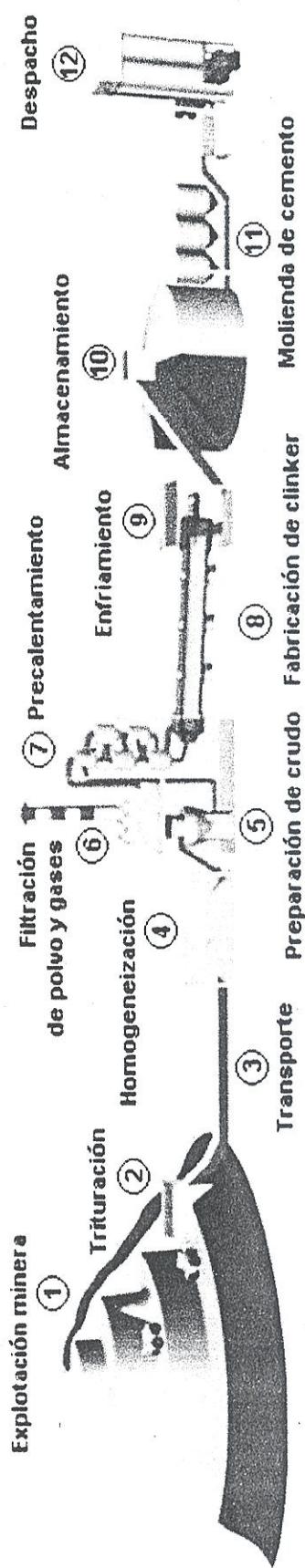


FIGURA 1.1: PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO

FUENTE: Holcim Cement Manufacturing Course



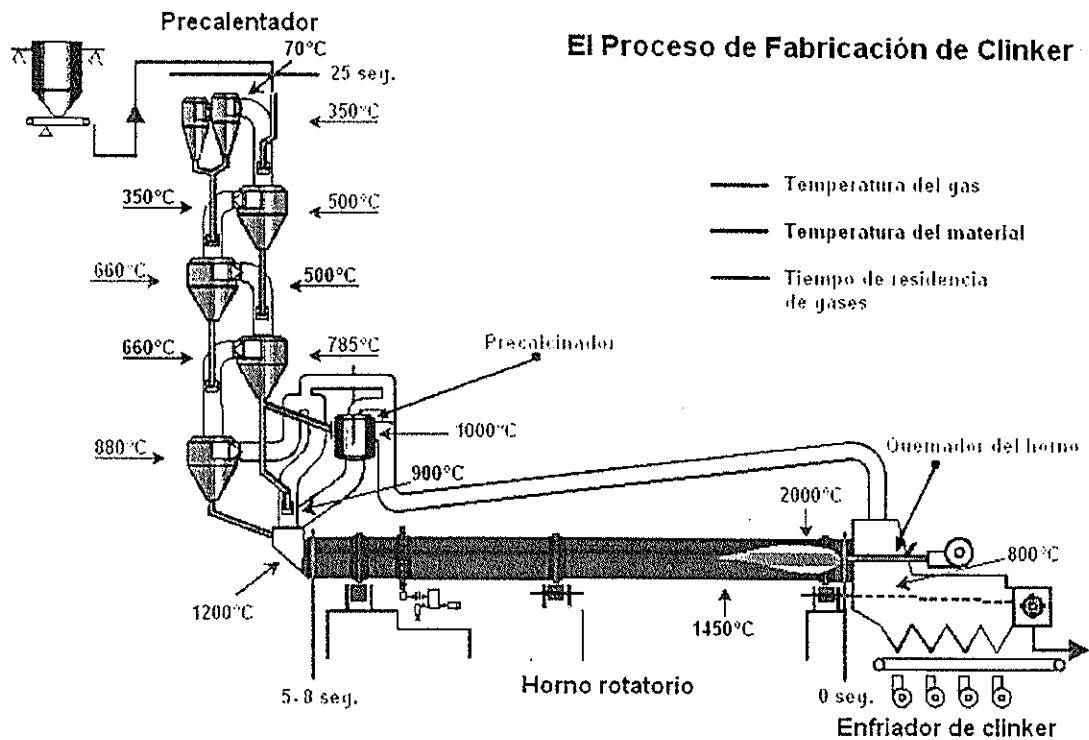


FIGURA 1.2: PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CLINKER
FUENTE: Holcim Cement Manufacturing Course

La operación de producción tiene un consumo grande de energía, y el costo de esa energía representa una parte significativa, aproximadamente un tercio de los costos de producción totales.

Basándose en datos de la Unión Europea, la producción del cemento suma aproximadamente 170 millones de toneladas por año. Con un consumo de energía media equivalente a la combustión de 120 kilogramos de carbón por tonelada de cemento, este nivel de la producción utiliza el equivalente de 20 millones de toneladas de carbón.

Este uso de los desechos representa una oportunidad de negocio importante para las empresas cementeras, porque reduce costos de combustible y emisiones del CO₂, ocupándose con seguridad de los desechos que a menudo son difíciles de disponer de cualquier otra manera.

El reciclaje de desechos por un lado como materia prima y por otro como combustibles crea una red de relaciones entre las industrias que lleva a la sociedad a una economía de cero desechos.

Hasta la fecha, la toma de decisiones en la arena medioambiental ha tendido a ser de tipo poco sistemáticas donde las necesidades de cada sector industrial, requerimientos energéticos e impacto ambiental de cada contaminante eran consideradas individualmente. Este tipo de acercamiento no permite maximizar las oportunidades para las mejoras ambientales generales, ni proporciona un marco adecuado para la optimización de los costos y de las ventajas de las opciones de la política de uso de desechos. En su lugar, este trabajo aboga por una vista holística, integrada de la actividad industrial y el ambiente. Usando este concepto más amplio, el actual informe explora una faceta del desarrollo sostenible: concretamente, cómo la industria del cemento ecuatoriana puede contribuir hacia la puesta en práctica de la estrategia para la



gestión de desechos substituyendo en parte los combustibles fósiles convencionales con materiales de desechos alternativos y convenientes.

1.1. Uso De Los Desechos Líquidos Como Combustibles Alternativos

La basura y los subproductos seleccionados con valor calorífico recuperable se pueden utilizar como combustibles en un horno de cemento, sustituyendo una porción de los combustibles fósiles convencionales, como el carbón, si alcanzan especificaciones rigurosas. En ocasiones pueden ser utilizados solamente después de pre-procesarse para proporcionar combustibles "hechos a la medida" para el proceso de elaboración de cemento. En otras ocasiones pueden ser utilizados tal como se entregan sin más procesos. En casi todos los casos, los componentes del combustible se mezclan antes de su uso para asegurar una mezcla homogénea con características termales casi constantes.

La substitución de estos combustibles fósiles por alternativos, derivados de desperdicios es una práctica común de la industria del cemento en muchas partes del mundo. La naturaleza del proceso de producción lo hace eminentemente conveniente para este propósito, asegurando la recuperación completa de la

energía de distintos tipos de desechos bajo condiciones apropiadas. Cualquier residuo de los desechos después se convierte en materia prima para el proceso y se incorpora en el clinker final del cemento. Algunos países la han estado utilizando por casi 30 años, y algunos gobiernos nacionales promueven activamente este acercamiento.



TABLA 1
PATRONES RECIENTES EN EL USO DE COMBUSTIBLES
ALTERNATIVOS

País o región	% Sustitución ¹
Holanda	83
Suiza	47.8
Austria	46
Noruega	35
Francia	34.1
Bélgica	30
Alemania	42
Suecia	29
Luxemburgo	25
República Checa	24
Japón	10
Estados Unidos	8
Australia	6
Reino Unido	6
Dinamarca	4
Hungría	3
Finlandia	3
Italia	2.1
España	1.3
Polonia	1
Grecia	<1%

¹ PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN TÉRMICA DE COMBUSTIBLES FÓSILES CONVENCIONALES POR COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

Alrededor del mundo, el 80% de los combustibles alternativos que se usan son aceites de desecho y basuras no peligrosas tales como neumáticos, plástico, madera, lodo de aguas residuales y otros.

Esta tesis se centrará en el manejo de los desechos líquidos, como aceites y desechos de las empresas petroleras.

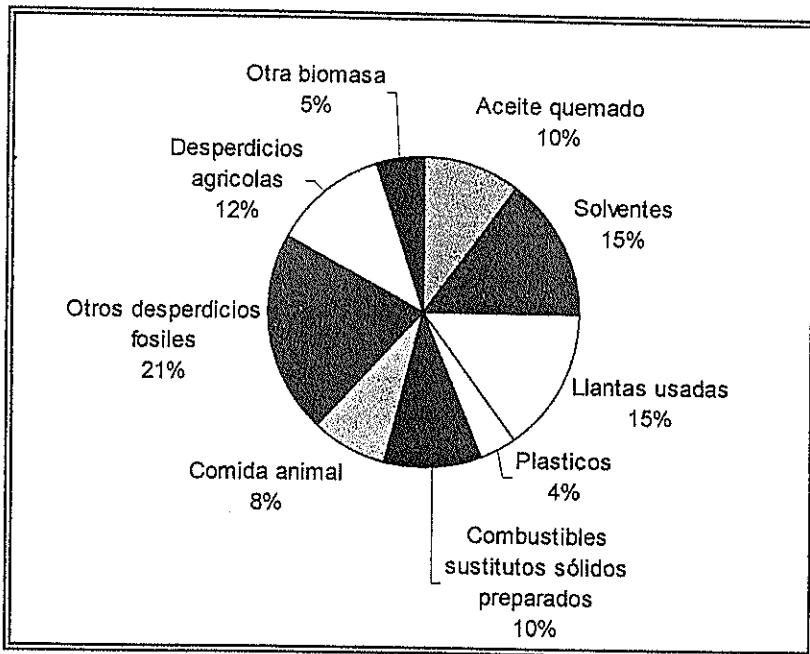


FIGURA 1.3: TIPOS DE DESECHOS USADOS COMO COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS A NIVEL MUNDIAL
FUENTE: AFR Score L2 – 12.04

La diferencia principal entre el uso de desechos como combustibles alternativos y como materia prima radica en que el primero se lleva a cabo en el proceso de combustión, dentro de los hornos de cemento, incorporándoselos a los combustibles fósiles comunes como el bunker o el carbón; mientras que el uso de los desechos como materias primas se lleva a cabo en el pre-proceso, cuando las materias primas comúnmente utilizadas son incorporadas a los precalentadores, previo a la entrada a los hornos.

Principalmente los desechos usados como combustibles alternativos son líquidos, mientras que los que se usan como materias primas son sólidos, tales como las llantas usadas.

Los residuos industriales generalmente están dispersos por las distintas zonas industriales de los países; se generan en distintas presentaciones, líquidos, sólidos y lodos; y se almacenan de distintas formas, en tanques, bidones, cajas, o al granel. Por lo tanto, para poder co-procesar eficientemente estos residuos en los hornos de cemento, frecuentemente es necesaria la ejecución de actividades de mezcla y pre-tratamiento para transformar los residuos desde su estado físico-químico original al estado de "combustibles alternativos", químicamente capaces de cumplir

estándares que garanticen la protección medioambiental, suficientemente homogéneos para poder controlar la entrada de energía al horno, y físicamente adecuados para permitir una dosificación estable y ajustable, dependiendo de las condiciones propias del proceso de fabricación de cemento.

La Tabla siguiente muestra los distintos tipos de pre-tratamiento necesarios dependiendo del tipo de residuo.

TABLA 2
TIPOS DE PRE-TRATAMIENTOS NECESARIOS.

Tipo de residuo	Industria/Proceso/Punto de origen	Clase	Operación de pre-proceso
Solventes usados	Química	P ²	Homogeneización
Aceites de perforación /fluidos	Metalúrgica	P	Homogeneización
Aceites usados	Puntos de lubricación	P	Decantación Homogeneización
Basura municipal Material de empaque: madera, papeles, cartones, plástico contaminado o no contaminado	Botaderos municipales, rellenos sanitarios Industrias varias Otros	NP ³ P NP	Clasificación Compostaje Deshidratación Trituración

² PELIGROSOS

³ NO PELIGROSOS

Tipo de residuo	Industria/Proceso/Punto de origen	Clase	Operación de pre-proceso
Residuos industriales sólidos misceláneos: láminas, plásticos, cauchos, etc.	Industrias varias	P NP	Trituración
Residuos del desmantelamiento de automóviles	Automotriz	NP	Trituración Separación de metales
Lodos con solventes o hidrocarburos	Química Petrolera	P	Impregnación con aserrín, caliza. Empaqueado Fluidificación
Lodos de plantas de tratamiento de aguas	Municipios Industrias varias	NP P	Secado
Arenas de moldes	Procesos de moldeo	P NP	
Lodos de hidróxido de aluminio	Aluminio	P	
Arenas para arenado	Pulido con chorro de arena	P	
Catalizadores usados	Química	P	
Residuos en polvo: pinturas, hollín, detergentes	Industrias varias	P	Impregnación Fluidificación
Tierras filtrantes	Química	P	Impregnación
Resinas de intercambio de iones no regenerables	Tratamiento de aguas	P	Empaqueado
Llantas usadas	Garajes y empresas	NP	Trituración o cortado

La selección y el uso de combustibles alternativos están motivados por un número de consideraciones correlacionadas, incluyendo:

- Impacto en las emisiones de CO₂
- Impacto en el costo del combustible
- Impacto en otras emisiones
- Impacto en la minería y actividades en las canteras

Las mismas que discutiremos a continuación.

MANEJO DE LAS EMISIONES DE CO₂ Y REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE

La industria del cemento está comprometida a manejar y reducir sus emisiones de CO₂. Esta industria produce el 5% de emisiones globales de CO₂. La mitad de esto como resultado del proceso químico implicado en la transformación de la piedra caliza en clinker; el 40% es un resultado de quemar el combustible. El 10% restante está partido entre el uso de la electricidad y el transporte.

Hay tres técnicas principales disponibles a la industria en la reducción de las emisiones del total neto y por tonelada de CO₂:

- Maximizar la eficiencia del proceso de fabricación y del equipo asociado para utilizar los combustibles y los materiales tan eficientemente como sea posible;
- Reducir la cantidad de combustible fósil usada en el proceso substituyéndolo por la biomasa y los desechos que habrían sido quemados de otra manera sin la recuperación de energía, y otros materiales que tienen contenido más bajo del carbón;
- Sustituir una proporción del clinker en el cemento por los materiales alternativos (que no requieren procesamiento termal), reduciendo las emisiones de CO₂ por tonelada de cemento producido.

El uso de combustibles y materias primas alternativas puede reducir significativamente las emisiones de CO₂ de una planta individual, y de la sociedad en su totalidad.

A medida de ejemplo, el uso de los desechos líquidos en hornos de cemento europeos ahorra, comparado al uso de combustibles fósiles tradicionales, lo equivalentes a 2.5 millones de toneladas de carbón por año.



REDUCCIÓN DE COSTOS DE COMBUSTIBLE Y DE LA MATERIA PRIMA

Los costos de combustible son una parte significativa de los costos de fabricación del cemento. Los combustibles hechos de desechos pueden ser menos costosos que los combustibles fósiles primarios aunque los costos variarán con el tipo de desechos y condiciones locales. Contrario a estos costos de combustible más bajos, los combustibles y materiales alternativos se deben con frecuencia pre-tratar y hacer suficientemente homogéneos como para ser utilizados en un horno de cemento. Algún equipo ambiental adicional se puede instalar también para controlar las emisiones. Medidas especiales de control y de proceso pueden ser necesarias para mantener la seguridad, calidad, y estándares ambientales.

PROVISIÓN DE LOS SERVICIOS DE GESTIÓN DE RECURSOS A LA SOCIEDAD

Muchos de las alternativas a los combustibles convencionales, materias primas, y aditivos son desperdicios y subproductos de los procesos industriales, agrícolas y otros que se manejan generalmente con botaderos, tratamientos o de incineración. La basura orgánica dispuesta en botaderos puede liberar metano

(un gas de invernadero aun más potente que el CO₂), o contaminar el agua subterránea.

Un incinerador produce CO₂ y ceniza residual (típicamente alta en metales pesados que requiere una disposición cuidadosa). La mayoría de los incineradores no recuperan energía. Un horno de cemento incorpora la ceniza inorgánica en el clinker así que no hay residuos para ser rellenados en botaderos. También, la energía producida en el horno se utiliza para alcanzar las altas temperaturas necesitadas para hacer el cemento. Usar los desechos y subproductos en la producción del cemento no sólo reduce la demanda de la industria por los combustibles fósiles vírgenes y la materia prima natural, también permite a la sociedad utilizar sus recursos más eficientemente y moverse hacia patrones de la producción y de consumo más sostenibles.

REDUCCIÓN DE LA NECESIDAD DE MINAR Y EXPLOTAR MATERIAS PRIMAS Y COMBUSTIBLES

La mayor parte de los combustibles, las materias primas y los añadidos usados tradicionalmente para hacer el cemento se minan o se extraen. La mayoría de los combustibles usados son combustibles fósiles no renovables. La extracción, procesamiento y transportación de estos materiales pueden tener un impacto

significativo y duradero en el ambiente, particularmente en el paisaje. Usar desechos como combustible o materia prima reduce la explotación de recursos naturales y la huella ambiental de tales actividades.

USO DE LOS DESECHOS LÍQUIDOS COMO COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN EL ECUADOR

En nuestro país, HOLCIM del Ecuador ha venido quemando combustibles alternativos en sus hornos desde septiembre de 2001. A partir de noviembre de 2002 se obtuvo el permiso de la Dirección de Medio Ambiente (DMA) de la M. I. Municipalidad de Guayaquil para la disposición de aceites minerales usados. Para el caso de otros residuos peligrosos, se trabaja sobre la base de permisos individuales específicos para el co-procesamiento de cantidades y tipos definidos de residuos.

En el año 2004, se co-procesaron 2469 toneladas (740000 GAL) de residuos peligrosos, principalmente residuos oleosos como aceites lubricantes, residuos de bunker y lodos de petróleo.

La planta Cerro Blanco produjo 1'569802 toneladas de clinker en 2004, con lo que los residuos co-procesados aportaron un 1.5% al requerimiento total de energía por parte de los hornos.

Se prevé un consumo de 7000 toneladas (2097000 GAL) en el año 2008, consumo promedio mínimo 3.2 ton/hora (16 GPM).

Actualmente no existe la infraestructura para poder almacenar correctamente estos combustibles, sino que son bombeados directamente desde los auto-tanques que entregan el combustible hacia los hornos de cemento y la capacidad de bombeo es limitada.

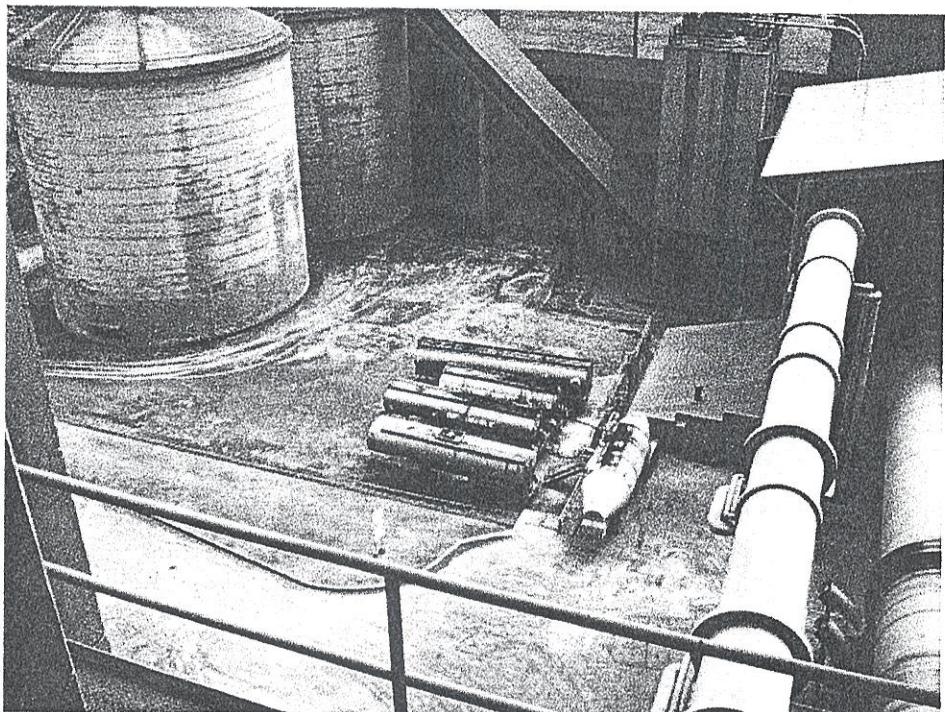


FIGURA 1.4: UBICACIÓN ACTUAL DEL ÁREA DE RECEPCIÓN DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS.



Por lo tanto, dada la necesidad de expansión de capacidad de almacenamiento y de consumo, además de ser parte de la política medioambiental de la empresa, se ha decidido llevar a cabo un estudio para la implementación de una planta para el almacenamiento y despacho de estos combustibles alternativos.

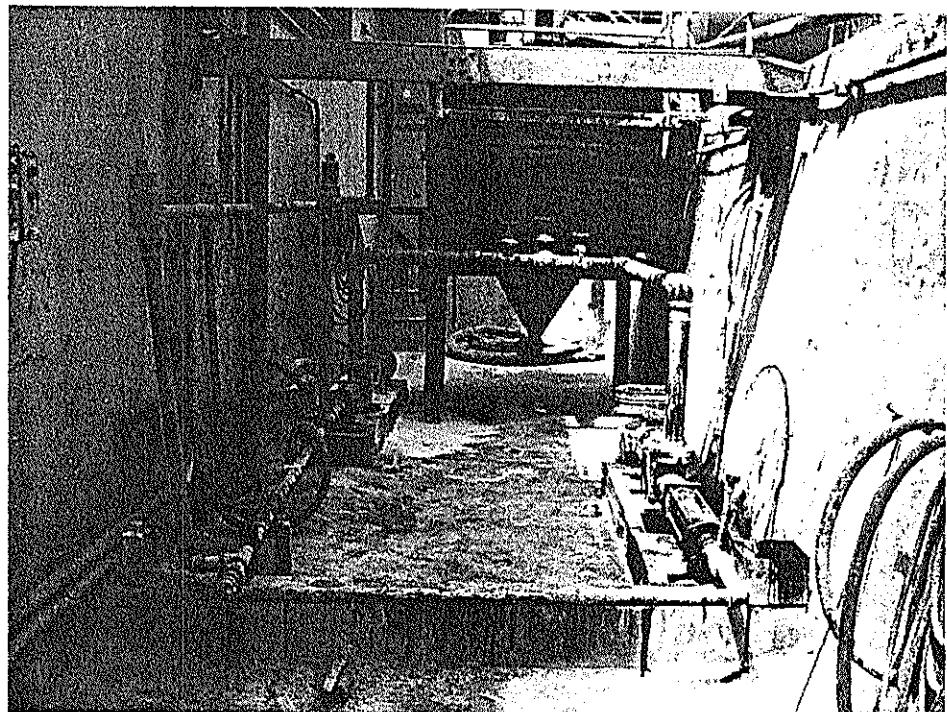


FIGURA 1.5: UBICACIÓN ACTUAL DEL ÁREA DE BOMBAS.

1.2. Beneficios Del Uso De Los Desechos Líquidos En Plantas Cementeras

Usar desechos como combustibles reduce la cantidad de combustibles fósiles tradicionales necesitados, y disminuye así las consecuencias para con el medio ambiente asociadas al hallazgo, producción, transporte y de combustión de estos combustibles. Usar subproductos y/o desechos como combustible también disminuye las demandas en los rellenos sanitarios y los incineradores locales y reduce sus consecuencias para con el medio ambiente, incluyendo la contaminación potencial del agua subterránea, la generación de metano y residuos peligrosos de ceniza.

VENTAJAS DE LOS HORNOS DE CEMENTO PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS

Al quemar los desechos en un horno de cemento y substituyendo el carbón, un recurso no renovable, los ahorros son alcanzados a través de la conservación del recurso y de emisiones asociadas con el CO₂. El horno de cemento hace también un uso más eficiente de la energía intrínseca del material de desecho.

Las ventajas que hacen de los hornos de cemento una alternativa técnica y ambientalmente adecuada para el tratamiento de residuos pueden resumirse en:

- Alta temperatura de llama (aprox. 2000°C)
- Tiempos de residencia de gases de 5-6 segundos a temperaturas sobre los 1200°C
- Exceso de oxígeno durante y luego de la combustión
- Alta turbulencia
- Fuerte inercia térmica
- Neutralización de gases ácidos, óxidos de azufre y ácido clorhídrico, por la cal activa alimentada al horno, en exceso a la estequiometría
- Fijación de trazas de metales pesados en la matriz del clinker
- No generación de sub-productos como cenizas o efluentes residuales producto de la limpieza de gases
- Disminución del uso de combustible fósil al lograr una valorización energética de los residuos

La utilización de desechos en la industria del cemento, principalmente como combustibles alternativos y también como materia prima suplementaria, es compatible con los principios

generales de la gestión de desechos y políticas internacionales en rendimiento energético y cambios climáticos.

Hay dos razones por las que el uso de tales materiales es considerado por la industria como totalmente compatible con los principios del desarrollo sostenible:

- En términos de proceso de fabricación del cemento, el uso de combustibles alternativos y las materias primas tiene el potencial de reducir emisiones al ambiente concerniente al uso de combustibles fósiles convencionales y conserva recursos no renovables.
- En términos de sistema de la gestión de desechos, los hornos de cemento ofrecen una alternativa segura a la disposición convencional de la basura en incineradores o en botaderos, otra vez dando por resultado ventajas totales reduciendo cargas ambientales y reduciendo la necesidad de la capacidad de tratamiento dedicada

La industria ha demostrado que la substitución de combustibles fósiles convencionales por los combustibles alternativos basados en desechos puede hacer una contribución importante al desarrollo sostenible con la reducción de la carga global de los gases de invernadero tales como dióxido de carbono.

CAPITULO 2

2. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA PARA LA UTILIZACIÓN DE DESECHOS LÍQUIDOS EN HORNOS CEMENTEROS

Para el manejo de desechos líquidos, la operación determinó dos procesos; el de recepción para el almacenamiento, y luego de esto, la impulsión a los hornos. El combustible será almacenado en tanques reservorios previo a alimentación a los hornos.

La estación de bombeo, requiere de un área aproximada de 70 m² y debe estar localizada adyacente a los tanques reservorios frente a la plataforma de estacionamiento de los auto tanques.

Los elementos del sistema completo, desde la recepción hasta la impulsión a los hornos, son como se indican a continuación:

TABLA 3

**ELEMENTOS DE UN SISTEMA COMPLETO DE INCINERADORES DE
DESECHOS SÓLIDOS EN HORNOS PARA CEMENTO**

Elemento	Tarea/Propósito
Recepción	
Área de Recepción	Asegura una descarga de los tanques cistema segura y ambientalmente amigable.
Filtro de Descarga	Previene el taponamiento de las bombas, tuberías y boquillas con material de mayor tamaño al permitido.
Bomba de Descarga	Asegura una descarga e impulsión a los tanques de almacenamiento eficiente.
Tuberías de Descarga	Conexión entre el tanque cisterna y los tanques de almacenamiento.
Almacenamiento	
Tanque	Mezclado y almacenamiento de los desechos líquidos. Provee una calidad constante del combustible y asegura la entrega en época de falta de suministros.
Mezclador del tanque	Asegura un mezclado eficiente del contenido del tanque para alcanzar una tanda homogénea.
Impulsión a los hornos	
Bomba de Alimentación	Alimenta el combustible liquido a una tasa requerida libre de fluctuaciones (<2%) desde los tanques de almacenamiento hasta los quemadores.
Filtro de Alimentación	Previene el taponamiento de las boquillas.
Tubería de Alimentación	Conexión de tuberías entre los tanques de almacenamiento y los quemadores.
Medidor de Flujo	Mide el flujo de aire al quemador y ajusta la bomba de alimentación de acuerdo a la necesidad.
Boquilla del quemador	Asegura una buena atomización del combustible líquido.
Suministro de Aire para Atomización	Proporciona a la boquilla suficiente aire para alcanzar una buena atomización.

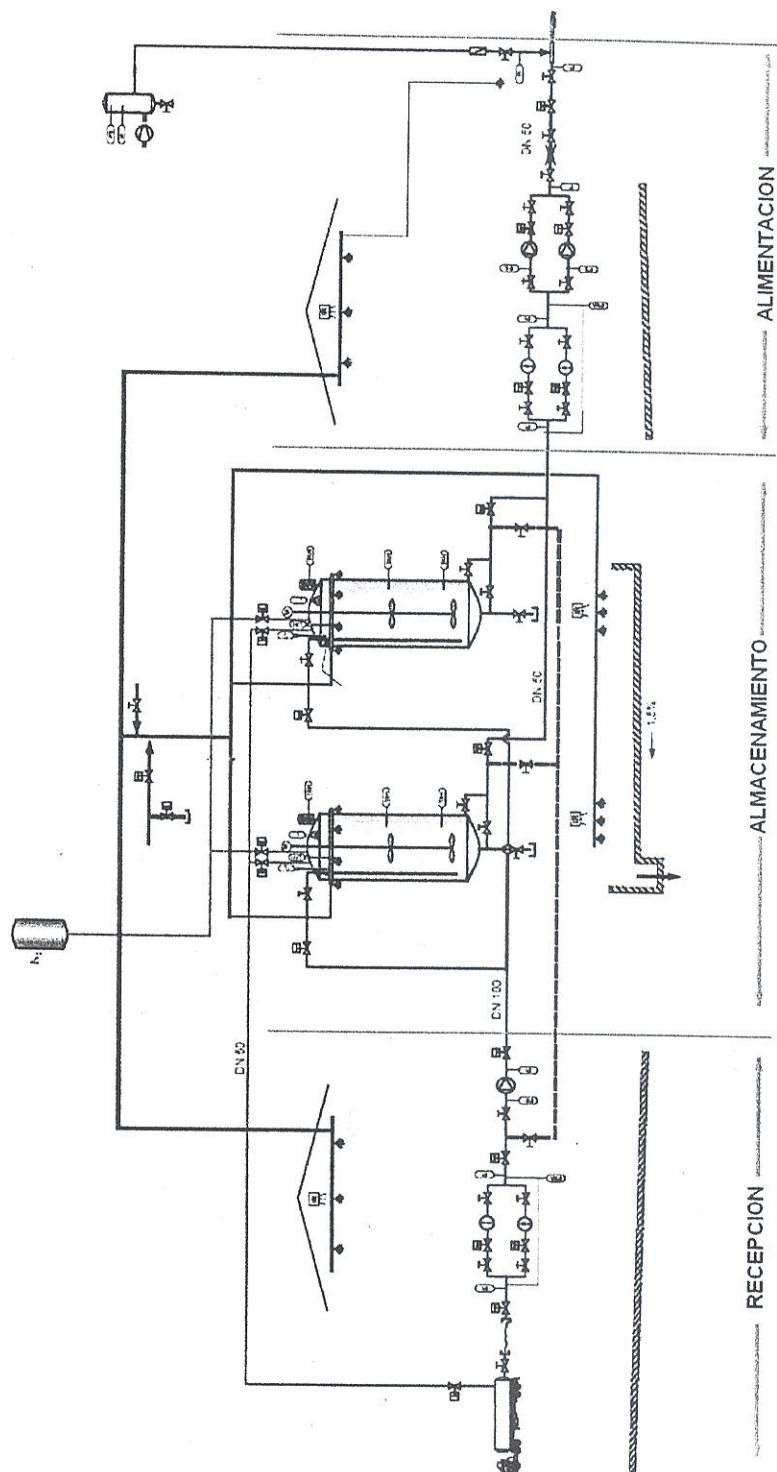


FIGURA 2.1: ELEMENTOS QUE CONFORMAN UNA PLANTA PARA EL PROCESAMIENTO DE
DESECHOS LÍQUIDOS

FUENTE: TAM - Liquid AFR Handling V1.0



Los requerimientos del sistema a implantarse se sintetizan en el párrafo siguiente:

- Tipo de fluido: Aceites, con y sin solventes y aguas contaminadas de baja viscosidad.
 - 1) Punto de inflamación mínimo 40 °C
 - 2) Sólidos en suspensión (hasta 35%)
 - 3) Tamaño máximo de partículas al ingreso 10 mm en plataforma
 - 4) Viscosidad hasta de 750 Centipoise.
 - 5) Tiempo de descarga aproximado requerido de 45 a 50 minutos por auto tanque de 10 000 GAL en plataforma de preparación, pensando en un mejor servicio al cliente.
 - 6) Almacenamiento mínimo requerido 150 m³ (2 tanques reservorios), en plataforma de preparación para impulsión/alimentación.
 - 7) Haluros en hasta 2% por peso, 4<pH<11, densidad desde 0.75 hasta 0.95 Kg./m³
 - 8) Medición másica necesaria en inyección al horno. Quemadores apropiados para sólidos abrasivos de hasta 5 mm.
 - 9) Flexibilidad para la inyección en los dos quemadores principales.

10) Equipo de almacenamiento con agitación para mantener mejor homogeneidad en plataforma así como tanque de inyección.

11) Flexibilidad en el sistema.

Partimos de la premisa de saber cuál es la demanda tanto para el almacenamiento como para la impulsión a los hornos, dependiendo para el primer caso del tiempo permitido bajo normas establecidas para la recepción del auto tanque por tamaño y dimensiones; y para el segundo caso depende estrictamente de la necesidad planteada por la empresa.

Vamos a utilizar los datos tomados de una planta de cemento real además de los requerimientos del sistema, para poder calcular las condiciones de bombeo a las que se va a someter a nuestro sistema de bombas, como altura estática y longitudes para los tramos de tubería.

Son dos tramos definidos: el de recepción a los tanques reservorios y el de impulsión a los hornos, cada tramo ha sido medido teniendo en cuenta una posición sugerida del cuarto de bombas desde la plataforma de recepción y la ubicación de los quemadores de los hornos.

2.1. Propiedades Físicas Y Químicas Necesarias Para Uso En Hornos Cementeros

Dado que la gama de productos catalogados como "combustibles alternativos" es muy amplia, para el cálculo hidráulico se usarán

las propiedades de los líquidos mas comunes, como lo son los aceites quemados, residuos de plantas petroleras y los solventes.

Existe una composición química admisible para los desechos a utilizarse como combustibles alternativos, con la finalidad de prevenir y mitigar las emisiones, la misma que se presenta en la tabla a continuación:

TABLA 4
COMPOSICIÓN QUÍMICA ADMISIBLE PARA ALIMENTACIÓN DE
RESIDUOS EN HORNOS ROTATORIOS DE CLINKER

PROPIEDAD	ESPECIFICACIÓN	
	UNIDAD	CANTIDAD
Halógenos (cloro)	%	< 1
Poder calorífico	MJ/kg	> 12.5
Pb	ppm	< 300
Cr total	ppm	< 600
As	ppm	< 200
Sn	ppm	< 200
Cd	ppm	< 300
Hg	ppm	< 10
Ni	ppm	< 200
Zn	ppm	< 10000
Tl	ppm	< 200
Sb	ppm	< 1000



A continuación se presenta una tabla con las propiedades químicas, obtenidas del estudio de un tipo de aceite quemado, el cual será el más común de los combustibles alternativos a usarse, este estudio puede usarse como referencia, pero no sin

tomar en cuenta las propiedades sugeridas por la empresa Cementera con la finalidad de mantener la flexibilidad del sistema.

TABLA 5
PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL ACEITE MÁS
COMÚNMENTE USADO COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO

PRUEBA	UNIDAD	MÉTODO ASTM	RESULTADOS
GRAVEDAD API	GRADOS	ASTM D 1298 - 99R05	15.8
DENSIDAD RELATIVA	N/A	ASTM D 1298 - 99R06	0.9606
VISCOSIDAD CINEMÁTICA @ 50 °C	CENTISTOKES	ASTM D 445 - 06	458.2
AZUFRE	% MASA	ASTM D 4294 -03	1.226
PUNTO DE INFLAMACIÓN	°C	ASTM D 93B - 02a	82
CENIZAS	% MASA	ASTM D 482 / 1492	1.137
RESIDUO DE CARBÓN CONRADSON	% MASA	ASTM D 189 / 1491	9.03
PODER CALORÍFICO BRUTO	KCAL/KG	ASTM D 4868 - 00	10234
PODER CALORÍFICO NETO	KCAL/KG	ASTM D 4868 - 00	9663
SEDIMENTOS TOTALES	% MASA	ASTM D 4870 - 04	0.055
PODER CALORÍFICO	MJ/KG	N/A	43

La viscosidad y otros parámetros físicos son propuestos por la empresa Cementera, basándose en las proyecciones establecidas y en las experiencias previas de otras empresas internacionales filiales de la misma, además de basarse en lo estipulado en el manual técnico "TAM - Liquid AFR Handling V1.0" que es la referencia para el diseño de estaciones

dedicadas al manejo de combustibles alternativos de la compañía HOLCIM.

Los datos completos de las propiedades son presentados a continuación en la siguiente tabla:

TABLA 6

PROPIEDADES PROPUESTAS POR LA PLANTA CEMENTERA

PROPIEDAD	UNIDAD	VALOR
VISCOSIDAD	CENTIPOISE	750
DENSIDAD RELATIVA	N/A	0.8
SOLVENTES	N/A	Sí
SEDIMENTOS	% MASA	5
TAMAÑO DE SÓLIDOS	mm	5
CAUDAL RECEPCIÓN	GPM	200
CAUDAL IMPULSIÓN	GPM	20

El caudal para la primera fase (recepción) ha sido establecido basándose en el tiempo de descarga máxima y mínima que debería ofrecer las bombas para cumplir con lo esperado con respecto a la atención al cliente.



TABLA 7

COMPARACIÓN DE TIEMPOS MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE
DESCARGA DEL SISTEMA DE RECEPCIÓN A TANQUES
RESERVORIOS

OPERACIÓN	CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO POR AUTO-TANQUE (GAL)	CAUDAL APROXIMADO (GPM)	TIEMPO DE DESCARGA (minutos)
MÍNIMA DESCARGA	10 000	150	66.67
MÁXIMA DESCARGA	10 000	200	50

De esta tabla podemos elegir el que será el caudal a utilizarse para los cálculos de selección de bomba, el mismo que será el de menor tiempo de descarga, 200 GPM.

El caudal de la segunda fase, es netamente un requerimiento de la planta, basado en los consumos proyectados a futuro por medio de los estudios correspondientes de mercado antes mencionados.



TABLA 8
SISTEMA DE IMPULSIÓN TANQUES RESERVORIOS -
HORNOS

OPERACIÓN	CAUDAL APROXIMADO (GPM)
MÍNIMA IMPULSIÓN	10
MÁXIMA IMPULSIÓN	20

2.2. Tipos De Bombas Recomendados En La Manipulación De Combustibles Alternativos.

Estas recomendaciones encontradas a continuación provienen del manual técnico "TAM - Liquid AFR Handling V1.0" perteneciente a la normativa para manejo de combustibles líquidos proporcionada por la empresa Cementera interesada en este estudio y sobre las cuales se procederá a efectuar el diseño y subsiguiente selección del sistema de bombeo mas idóneo para el fin propuesto. Esta será la principal normativa que regentará el proceso de diseño y selección.

PARA LA RECEPCIÓN A TANQUES RESERVORIOS

La tarea principal de las bombas es descargar el carro en un plazo razonablemente corto, por ejemplo dentro de media hora. No se requiere un flujo constante con una presión dada. La presión requerida en la mayoría de los casos está debajo de los 5 bares. Las bombas deben poder manejar medios viscosos que contengan partículas de pequeño tamaño (pocos milímetros). Debe ser químicamente resistente a los medios a transportarse. El mejor tipo de la bomba para este uso es una bomba centrífuga.

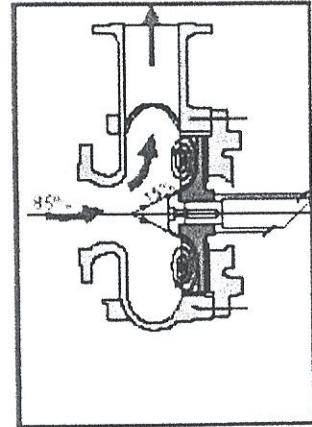
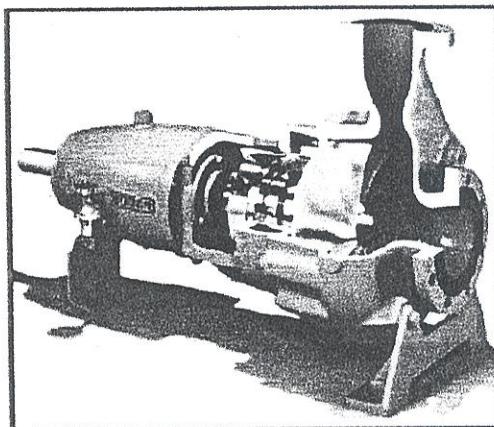


FIGURA 2.2: BOMBA CENTRIFUGA, DISEÑO PARA POZO SECO

FUENTE: TAM - Liquid AFR Handling V1.0

Para una bomba centrífuga, la presión y el caudal se interconectan, con un caudal más alto la presión decrece. Por lo tanto este tipo de la bomba no se recomienda para los usos de dosificación sino solamente para descargas.

Las bombas centrífugas con "impulsor abierto" son la primera opción debido al alto caudal, el bajo precio y la no-sensibilidad a las partículas. Las bombas centrífugas con "impulsor abierto" pueden manejar sólidos de hasta 15 milímetros, pero la viscosidad máxima tiene que ser menor a $400 \text{ mm}^2/\text{s}$ (fluído Newtoniano).

A continuación se presentan las características de las bombas recomendadas para esta aplicación, y los proveedores respectivos.



TABLA 9

**CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS PARA EL SISTEMA DE
RECEPCIÓN**

Tipo de Bomba	n/a	Centrífuga, impulsor abierto
Proveedor	n/a	Egger, Ensival-Moret
Presión	bar	2 / 7 (12)
Caudal desde/hasta	m ³ /h	30 / 100
Máximo tamaño de partícula	mm	25 / 50
Viscosidad	mm ² /s	400 (Fluido Newtoniano)
Temperatura del Líquido desde/hasta	°C	180 (dependiendo del sellado)
Caudal Variable	%	baja velocidad -> baja presión
Pulsación de Flujo	%	no
Auto-cebado	n/a	no, si (Cantilever)
Manejo seguro en seco	n/a	si (Cantilever)
Precio	USD	Egger: 12 000, aproximadamente
Vida de Servicio	h	>10 000
Ventaja	n/a	Impeler empotrado permite conducto libre
Desventaja	n/a	Presión limitada, depende del caudal
Recomendada para	n/a	Todos los tipos de desechos líquidos con viscosidades menores a 400 mm ² /s

Las bombas de diseño para pozo seco necesitan un sello adecuado según el eje. Debido a las partículas abrasivas los sellos mecánicos (carburo de tungsteno, carburo de sílice) muestran desgaste y tienen que ser cambiados de vez en cuando. Los sellos mecánicos no son de manejo seguro en seco. Si se elige un sello mecánico, se recomienda un sello mecánico doble con líquido sellante. El líquido sellante lubrica solamente el sello interno, mientras que el sello externo es lubricado por el medio. La presión del líquido sellante debe ser 2 bares sobre la presión de la bomba. En caso de salida del sello, el líquido sellante fluye dentro del medio y se dispersa. Por lo tanto el nivel en el compartimiento del líquido sellante debe ser controlado.

El sello *Hidrodinámico* no presenta desgastes, es de manejo seguro en seco y es recomendado para manejo de materiales abrasivos. El efecto de sellado ocurre solamente si la bomba esta bombeando. Si esta fuera de operación un segundo sello, estático, detrás del hidrodinámico previene la fuga.

Las bombas de tipo Cantilever no precisan de ningún sello. La bomba mismo esta diseñada para pozo húmedo, la transmisión y cojinetes están por encima de la parte sumergida y no tienen contacto con los fluidos.

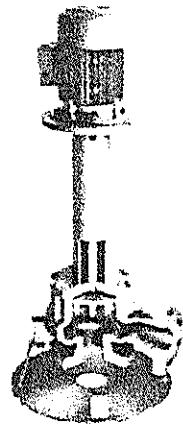


FIGURA 2.3: BOMBA DE TIPO CANTILEVER.

FUENTE: TAM - Liquid AFR Handling V1.0

El diámetro de la tubería de succión tiene que ser por lo menos un tamaño más grande que el diámetro de la brida de la bomba.

Un dispositivo de seguridad debe ser previsto para al cierre automático de la bomba en caso sobrellenado del tanque.

La bomba tendrá un dispositivo de seguridad (fuente de ignición).

Un dispositivo de seguridad para evitar el bombeo en contra de la válvula cerrada (recalentamiento del líquido en la bomba) será previsto.

La bomba y el motor deben ser a prueba de explosión.

Dos bombas deben ser instaladas en paralelo (una en espera). Si se prefiere usar un interruptor automático se deben instalar válvulas cheque o mejor aun válvulas neumáticas de compuerta para prevenir el contra flujo.



PARA LA IMPULSIÓN A HORNOS

La bomba debe poder manejar los medios viscosos que contienen partículas de pequeños tamaños (pocos milímetros). Debe ser químicamente resistente a los medios transportados.

Además, las bombas que dosifican los quemadores deben poder alcanzar una presión de más de 6 bar (87 PSI) para conseguir resultados de atomización buenos y su fluctuación deben ser baja (< 2% es recomendado).

Las bombas de desplazamiento positivo son la primera opción debido a la presión constante sobre el rango de flujo total. Las bombas se deben seleccionar para una gama del flujo por lo menos de 1:5. Las tasas de caudales comunes en muchas plantas son < 10 m³/h (44 GPM). Para la disponibilidad óptima, dos bombas se deben instalar en el paralelo (una en espera).

Para diversos medios se prefieren diversos tipos de bombas.

Distinguidas a continuación:

- Bombas para solventes.
- Bombas para Combustibles de desecho/ Emulsiones de Combustibles/ Lodos de Combustibles.
- Bombas para aguas residuales

BOMBAS PARA SOLVENTES



La primera elección son las BOMBAS DE DOBLE DIAFRAGMA

con diafragmas tipo PTFE. Las ventajas son las siguientes:

- No son sensibles a las partículas transportadas
- Disponibles en versiones protegidas contra incendios
- Resistentes a los solventes
- Funcionan con el principio de desplazamiento positivo

El tamaño mayor de partículas transportadas depende del tamaño de la bomba y de la válvula, el rango promedio esta entre 3 y 10 mm. El principio volumétrico de bombeo es muy sencillo y robusto. De acuerdo con los distribuidores de estas bombas, un amplio rango de viscosidades cinemáticas, de hasta $8\ 000\ mm^2/s$ y con un contenido de 10% de sólidos, pueden ser bombeados.

Los inconvenientes de todas las bombas de diafragma son los siguientes:

- Pulsaciones en la tasa de flujo (menor a 2% con regulador y hasta 5% sin regulador)
- Vida de servicio limitada de las membranas
- Los diafragmas PTFE son mas frágiles, por lo tanto la tasa de flujo baja a la mitad para un mismo tipo de bomba
- La presión máxima que aun es económica es de 27 bares. (391 PSI) Pasado ese valor los precios de las bombas aumentan drásticamente

La vida de servicio depende de la velocidad reciprocente y la presión de la bomba.

Perspectiva general de las bombas de membrana

Bomba de doble membrana operada con aire

Esta bomba es accionada por aire presurizado. El diseño de la bomba es muy simple y el precio es bajo. La velocidad reciprocente de la bomba es controlada por el caudal de aire presurizado. Las desventajas son el consumo muy alto de aire presurizado, la presión de bombeo limitada de 5 bares (73 PSI) y las tasas de caudal pulsantes de 5%. Los 5 bares son



alcanzables solamente con una presión neumática a la entrada de 7 bares. Con un regulador después de la bomba la pulsación es del 2%. Esta bomba se recomienda solamente para instalaciones de prueba a corto plazo pero no para soluciones a largo plazo.

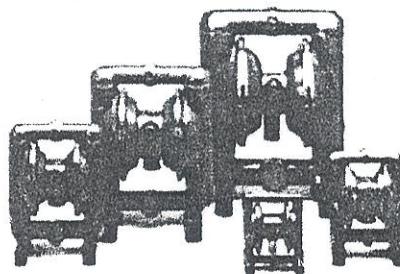


FIGURA 2.4: BOMBAS DE DOBLE DIAFRAGMA OPERADAS POR AIRE

FUENTE: TAM - Liquid AFR Handling V1.0

Bombas de doble diafragma Electromecánicas

El diseño se basa en la bomba de diafragma operada por aire, pero la parte neumática se intercambia por un mecanismo de manivela eléctrica. La biela mueve el diafragma hacia adelante y hacia atrás. El aire presurizado ya no se requiere para la operación. La velocidad reciproque de la bomba es controlada por una transmisión de velocidad variable. Debido a razones de diseño la presión máxima es limitada a 6 bares (sobre-estrés del

diafragma). Esta bomba se recomienda para las instalaciones que requieren de presiones menores a 6 bares.

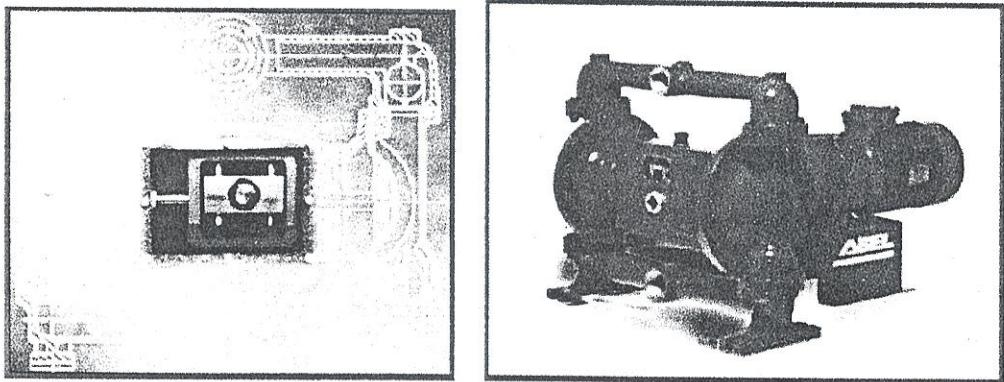


FIGURA 2.5: BOMBAS DE DOBLE DIAFRAGMA ELECTROMECÁNICAS

FUENTE: TAM - Liquid AFR Handling V1.0

Bombas de doble diafragma Hidráulicas

Los diafragmas son movidos por líquido vía lazo hidráulico (el líquido estándar es agua). El diafragma separa el material que se bombea del líquido hidráulico. Ése es el porqué de que el estrés del diafragma es menor y presiones más altas son alcanzables (hasta 100 bares). La temperatura máxima se limita a 70 °C debido al lazo hidráulico. Un regulador de baja tasa de flujo es lo estándar, las pulsaciones son del 2%. La bomba es mucho más

grande que una bomba centrífuga con caudal igual. Esta bomba se recomienda para las instalaciones que requieren presiones que exceden los 6 bares.

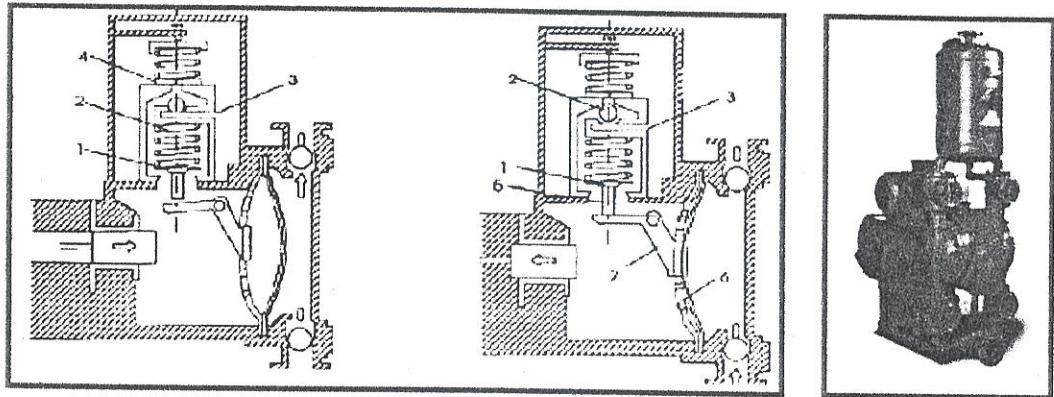


FIGURA 2.6: BOMBAS DE DOBLE DIAFRAGMA HIDRÁULICAS
FUENTE: TAM - Liquid AFR Handling V1.0

Bombas no recomendadas para el manejo de solventes:

- Bombas de Tornillo Excéntrico: El estator no es resistente a los solventes.
- Bombas de Lóbulo Rotatorio con PTFE: Los lóbulos tienen una vida de servicio baja, dado a las partículas duras o esquirlas metálicas que se encuentran en el líquido.
- Bombas de manguera: La manguera no es resistente a los solventes.

- Bombas de tornillos reciprocatantes: Los tornillos tienen una vida de servicio baja, daco a las partículas duras o esquirlas metálicas que se ercuentran en el líquido.
- Bombas de engranajes internos: Tamaño de partícula máximo es de 0.2 mm.
- Bombas de diafragma compactas: Tamaño de partícula máximo es de 0.5 mm.

BOMBAS PARA COMBUSTIBLES DE DESECHO/
EMULSIONES DE COMBUSTIBLES/ LODOS DE
COMBUSTIBLES

Las BOMBAS DE TORNILLO EXCÉNTRICO con el estator de NBR son la primera opción. Ventajas de las bombas excéntricas del tornillo:

- No son sensibles a las partículas.
- Tasas de fluctuación de flujo de <1%.
- Diseñadas para un punto de inflamación de -10 °C.
- Los estatores de NBR y FPM son resistentes a combustibles.
- Usan el principio de desplazamiento positivo.
- No tienen válvulas.

- Precios favorables.
- El estator de VITON es resistente a varios solventes, pero mucho más costoso. Puesto que la resistencia del estator de VITON a toda la clase de solventes no se asegura (no resistente a solventes polares), el uso de una bomba de tornillo excéntrico no se recomienda para solventes.

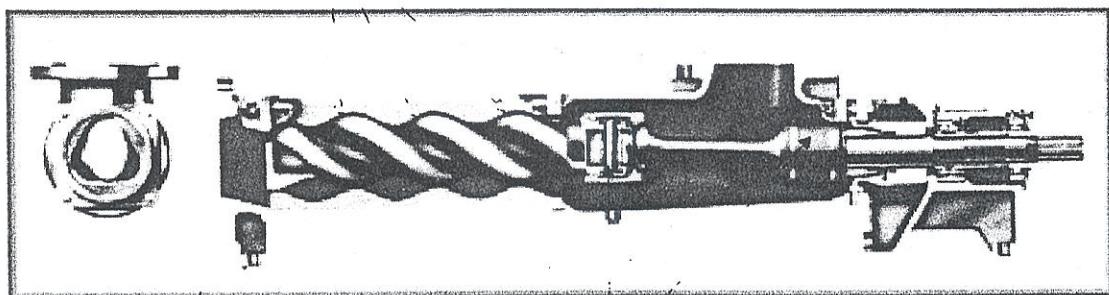


FIGURA 2.7: BOMBA DE TORNILLO EXCÉNTRICO
FUENTE: TAM - Liquid AFR Handling V1.0

El tamaño de partícula máximo depende del tamaño de la bomba, la gama típica es 3-10 milímetros. El principio de bombeo volumétrico es muy robusto. Una amplia gama de líquidos y de mezclas, con viscosidades cinemáticas de hasta $1000000 \text{ mm}^2/\text{s}$, puede ser bombeada.

El estator y el rotor son las piezas de desgaste principales de este tipo de la bomba. Para alcanzar una vida de servicio de varias miles de horas, la velocidad circunferencial del rotor debe

ser <1 m/s y la presión por etapa tiene que ser baja (se recomienda aproximadamente 3 bar por etapa). Los estatores de NBR y de FPM tienen más o menos la misma resistencia a la abrasión, pero el precio para un estator de FPM es unas 5-7 veces más alto que para un estotor de NBR. Se recomienda utilizar un estotor de NBR, a menos que la temperatura del material sea mayor a 80 °C. Las bombas excéntricas no funcionan seguras en seco, es recomendado que se instale el monitoreo adecuado y que la bomba sea puesta bajo el nivel del tanque.

Las BOMBAS DE MANGUERA con manguera de NBR son la segunda opción. Comparando con bomba excéntrica del tornillo, las bombas de manguera tienen algunas ventajas: El líquido pasa solamente por la manguera en contacto, sin sellos, diseño compacto y muy fácil de mantener.

Las desventajas son:

- Pulsación.
- Vida de servicio de la manguera acortada vida de servicio para los líquidos con las partículas
- Disminución aguda del caudal con una presión y una temperatura más alta.

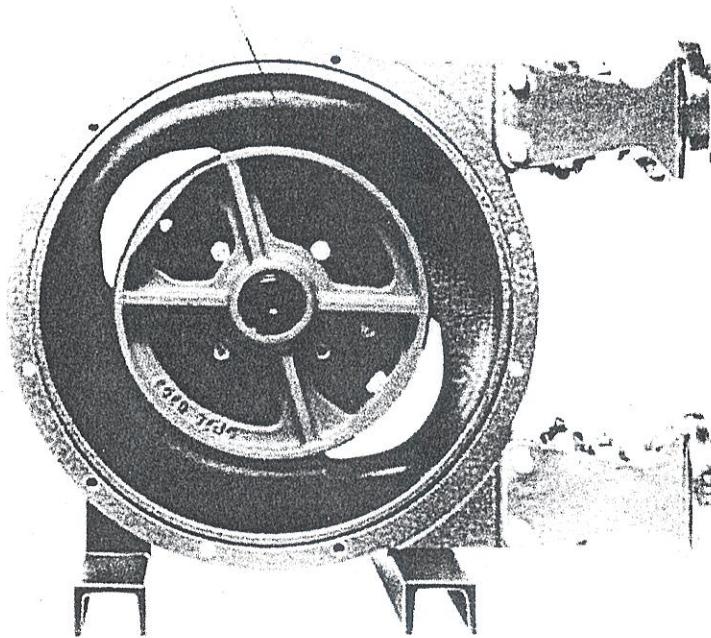


FIGURA 2.8: BOMBA DE MANGUERA
FUENTE: TAM - Liquid AFR Handling V1.0

Bombas no recomendadas:

- Bombas de tornillos reciprocatantes: Los tornillos tienen baja vida de servicio debido a las partículas duras y esquirlas metálicas.
- Bombas de engranajes: Baja vida de servicio debido a las partículas duras y esquirlas metálicas.
- Bombas de Lóbulo Rotatorio: Los lóbulos tienen una vida de servicio baja, dado a las partículas duras o esquirlas metálicas que se encuentran en el líquido.
- Bombas de diafragma compactas: Tamaño de partícula máximo es de 0.5 mm, alto precio.

- Bombas de doble diafragma: Precio alto para presiones >6 bar, baja vida de servicio para las membranas, pulsaciones en el flujo.

BOMBAS PARA AGUAS RESIDUALES

Las bombas de tornillo excéntrico con el estator de NBR son la primera opción. Las características son las mismas descritas con anterioridad.

2.3. Especificaciones Normativas Recomendadas

En lo relativo a las disposiciones, esta construcción acatará todos los códigos, leyes, normas y reglamentos de los colegios de Profesionales Civiles, Hidráulicos, Mecánicos y Eléctricos.

En cuanto a la Seguridad y Defensa contra Incendios se regirá a las disposiciones dadas por el Benemérito Cuerpo de Bomberos de Guayaquil, Control Ambiental como organismos regionales y a las disposiciones de los siguientes Institutos:

- Normas internas de la empresa cementera.
- Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos A.S.M.E.
- Asociación Internacional del Petróleo A.P.I.
- Asociación Americana Pruebas y Materiales A.S.T.M.



CAPITULO 3

3. DISEÑO HIDRÁULICO PARA LA RECEPCIÓN DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS A TANQUES RESERVORIOS

3.1. Selección Del Sitio De Implantación De La Estación De Bombeo

Para la selección de la implantación de la estación de bombeo, se deben tomar en cuenta los siguientes condicionamientos:

- a) La estación de bombeo, requiere de un área aproximada de 70 m² y debe estar localizada adyacente a los tanques reservorios frente a la plataforma de estacionamiento de los auto tanques.
- b) La estación de bombeo requiere de un fácil acceso vial de un área a que este adyacente para el estacionamiento de los auto tanques.

Por lo tanto, el área a utilizarse para este proyecto fue escogida por su posición estratégica, cercana a los hornos de cemento, en el mismo lugar donde funcionan actualmente las instalaciones improvisadas de bombeo de combustibles alternativos.

Su ubicación exacta puede observarse en los planos correspondientes en el apéndice A.

3.2. Requerimientos De Diseño

La estación para el manejo de los combustibles alternativos constara de dos tanques reservorios de 94 m³ para el almacenamiento de dichos combustibles. Cada tanque deberá ser llenado de manera independiente, teniendo en cuenta que las recomendaciones de operación obtenidas de la empresa cementera indican que un tanque deberá estar supliendo combustible a los hornos mientras el otro se deberá encontrar llenando o en espera, pero nunca deberán hacer los dos la misma tarea. Para esto se ha diseñado un sistema en paralelo para el llenado de los tanques, el mismo que es asistido con válvulas activadas eléctricamente, haciéndolo un sistema apto para trabajar bajo la normativa interna de la empresa cementera.

Se instalará un solo filtro de doble canasta con sus respectivos manómetros incluidos a la entrada del sistema de recepción, el mismo que servirá para las dos bombas instaladas en paralelo. Este tipo de filtro nos permite realizar el mantenimiento de las canastas del mismo sin tener que desconectarlo ni parar el sistema.

Se instalarán válvulas solenoides a la entrada y a la salida de las bombas, para controlar el sistema de manera automática. Así mismo se instalaran válvulas cheque a la salida de las mismas para prevenir el retorno de combustible.

Por motivos de mantenimiento, todas las bombas, filtros y otros elementos de mantenimiento intensivo deben poder ser desconectados manualmente por medio de válvulas de cierre rápido.

El diámetro de las tuberías debe ser seleccionado para trabajar con velocidades de entre 1.5 a 2.5 m/s. Velocidades bajas tienden a sedimentar los sólidos. Velocidades superiores a los 2.5 m/s resultan en altas perdidas por fricción.

El diámetro está usualmente entre las 3" y 4 ". El material debe de ser acero, con protección externa contra la corrosión.

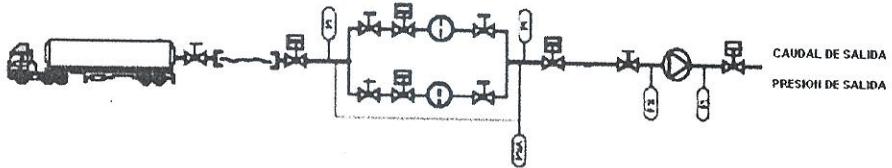


FIGURA 3.1: ELEMENTOS DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO PARA LA RECEPCIÓN

FUENTE: TAM - Liquid AFR Handling V1.0

Para determinar el diámetro de tubería y diseñar el sistema de bombeo mas idóneo a ser instalado, se han considerado los parámetros hidráulicos de CAUDAL (Gasto), CDT (Cabezal Dinámico Total), y por el tipo de fluido que en su mayoría será de derivados del petróleo, los requerimientos constructivos dados por el código API 610 para las unidades de bombeo, API 600 para los accesorios y API 605 para la tubería, igualmente la necesidad de recibir en el menor tiempo posible la mayor cantidad de auto tanques.

Además se consideraron las siguientes condiciones físicas y de operación:

- El flujo debe de ser laminar.

- Diferencia de cota entre la estación de bombeo y la entrada a los tanques reservorios, (Alt. estática: 11 m).
- Tipo de succión: Positiva.
- Longitud de tubería de succión y descarga (31 m).
- Solo uno de los dos tanques de almacenamiento deberá ser llenado a la vez.

TABLA 10
PARÁMETROS DE OPERACIÓN CONSIDERADOS

CONDICIÓN DE OPERACIÓN	CAPACIDAD ALMACENAMIENTO POR CISTERNA (GAL)	CAUDAL (GPM)	ALTURA ESTÁTICA (m)	LONGITUD TOTAL DE TUBERÍA (m)
MÁXIMA	20 000	200	11	31
MÍNIMA	20 000	150	11	31

El ingreso de combustible en la estación de Bombeo del área de recepción deberá tener succión positiva en el ojo de impulsión de las bombas, que lo obtiene al recibir el fluido de los auto tanques, los que deben estar ubicados por encima del nivel de piso de la estación de bombeo, por lo que el cálculo del cabezal neto de succión positiva (NPSH) se desprecia, lo que equivale a decir:

$$P_{INGRESO} \left(\frac{Kg}{cm^2} \right) \geq 0$$



3.3. Análisis De Pérdidas Por Fricción En Tuberías Y Determinación De Diámetro De Tubería

La línea de recepción desde la estación de bombeo debe llegar hasta la cota +11 que es la altura vertical de los tanques reservorios aproximadamente.

El cálculo de las pérdidas nos permite seleccionar el diámetro de tubería más apropiada y para establecer si es posible transportar por dicha tubería el caudal de una bomba con lo que se establecería las condiciones de operación.

Para esta parte del proyecto, se procederá a calcular las pérdidas para tres distintos diámetros de tubería, con el afán de encontrar usando el método de prueba y error, el diámetro adecuado para el uso propuesto. Los diámetros considerados fueron $2\frac{1}{2}$ ", 3" y 4"

Se tendrá en cuenta los siguientes parámetros:

- Longitud total de tubería desde la plataforma de recepción hasta la entrada superior a los tanques reservorios.
- Longitud equivalente por accesorios.
- Longitud equivalente en Válvulas y Filtros.
- Cota de altura correspondiente (altura estática).

PÉRDIDAS POR ACCESORIOS:

Las pérdidas por accesorios se calcularán teniendo en consideración la cantidad aproximada de accesorios a instalarse en el sitio usando como base el plano isométrico de la planta adjunto a este estudio, la tabla con las cantidades se presenta a continuación:

TABLA 11
CANTIDAD DE ACCESORIOS CORRESPONDIENTES A LA
PARTE DE RECEPCIÓN A TANQUES RESERVORIOS

CANTIDAD	ACCESORIO
1	Flujómetro
1	Filtro de doble canasta
1	Válvulas Check
3	Válvulas Solenoides
7	Válvulas de Cierre rápido
3	Uniones T
10	Codos

Usando la tabla "Perdidas por Fricción en Válvulas y Accesorios Estándar" mostrada a continuación, del libro "Engineering Data" de la compañía VIKING PUMPS se procede a realizar una tabla con la Longitud Equivalente de perdidas en Accesorios.



TABLA 12
PERDIDAS POR FRICCIÓN EN VÁLVULAS Y ACCESORIOS ESTÁNDAR

TIPO DE ACCESORIO	DIÁMETRO NOMINAL DE TUBERÍA											
	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"	5"	6"	8"
Válvula de Compuesta (Abierta)	0.35	0.50	0.60	0.80	1.20	1.40	1.70	2.30	2.80	3.50	4.50	5.70
Válvula de Globo (Abierta)	17.00	22.00	27.00	38.00	44.00	53.00	68.00	80.00	120.00	140.00	170.00	220.00
Válvula de Angulo (Abierta)	8.00	12.00	14.00	18.00	22.00	28.00	33.00	42.00	53.00	70.00	84.00	120.00
Codo Estándar	1.50	2.20	2.70	3.60	4.50	5.20	6.50	8.00	11.00	14.00	16.00	21.00
Codo de Medio Barrido	1.30	1.80	2.30	3.00	3.60	4.60	5.50	7.00	9.00	12.00	14.00	18.00
Codo de Barrido Largo	1.00	1.30	1.70	2.30	2.80	3.50	4.30	5.20	7.00	9.00	11.00	14.00
T _e	1.00	1.30	1.70	2.30	2.80	3.50	4.30	5.20	7.00	9.00	11.00	14.00
T _e (Flujo Angulo recto)	3.20	4.50	5.70	7.50	9.00	12.00	14.00	16.00	22.00	27.00	33.00	43.00
Retorno	3.50	5.00	6.00	8.50	10.00	13.00	15.00	18.00	24.00	30.00	37.00	50.00
												63.00



TABLA 13

CALCULO DE LONGITUD EQUIVALENTE EN ACCESORIOS

2 1/2"

CANTIDAD	ÍTEM	PERDIDAS (ft)	PERDIDAS (m)
1	Flujómetro	1.40	0.43
1	Filtro de doble canasta	33	10.06
1	Válvulas Check	1.4	0.43
3	Válvulas Solenoides	204	62.20
7	Válvulas de Cierre rápido	9.8	2.99
3	Uniones T	12.90	3.93
10	Codos	65	19.82
	TOTAL	327.50	99.85

3"

CANTIDAD	ÍTEM	PERDIDAS (ft)	PERDIDAS (m)
1	Flujómetro	1.70	0.52
1	Filtro de doble canasta	42	12.80
1	Válvulas Check	1.7	0.52
3	Válvulas Solenoides	240	73.17
7	Válvulas de Cierre rápido	11.9	3.63
3	Uniones T	15.60	4.76
10	Codos	80	24.39
	TOTAL	392.90	119.79

4"

CANTIDAD	ÍTEM	PERDIDAS (ft)	PERDIDAS (m)
1	Flujómetro	2.30	0.70
1	Filtro de doble canasta	53	16.16
1	Válvulas Check	2.3	0.70
3	Válvulas Solenoides	360	109.76
7	Válvulas de Cierre rápido	16.1	4.91
3	Uniones T	21.00	6.40
10	Codos	110	33.54
	TOTAL	564.70	172.16



Una vez obtenidas las longitudes equivalentes en accesorios para cada diámetro propuesto de tubería, se procede a calcular las pérdidas totales en todo el tramo de tubería a analizar, tomando en cuenta la altura estática presente en el sitio.

Los análisis de pérdidas se llevaron a cabo usando tablas, para poder realizar un análisis grafico de las pérdidas con respecto al caudal del sistema, dependiendo del diámetro de la tubería a utilizar.

Lo primero es calcular el porcentaje de perdidas por fricción para las tuberías, en porcentaje por metro (%m), para esto se usa la tabla "Perdidas Por Fricción en Tuberías" para tuberías de cédula 40 nuevas, encontrada en la pagina 510.13 del "Engineering Data" de la compañía VIKING PUMPS. Para este cálculo se necesita el caudal, la viscosidad del fluido y el diámetro de las tuberías.

Una vez obtenido este porcentaje, que va variando con el caudal ya que la viscosidad y el diámetro de tubería permanecen constantes, podemos proceder a calcular las perdidas. Para esto tenemos que introducir a la tabla la longitud equivalente en accesorios obtenidos de la Tabla 13 de este estudio.



Se obtienen tres valores principales:

1. Perdidas por fricción en Accesorios.
2. Altura estática (11 metros).
3. Perdidas por fricción en Tuberías.

Sumados los tres valores obtenemos las perdidas totales del sistema, en metros, para el valor de diámetro escogido.

Las tablas son presentadas a continuación:



TABLA 14
PERDIDAS POR FRICCIÓN EN TUBERÍA 2½" CEDULA 40

VELOCIDA D DEL FLUIDO (m/s)	CAUDA L (GPM)	NUMERO DE REYNOLD S	FACTOR DE FRICCIÓ N	PORCENTA JE DE PERDIDAS POR FRICCIÓN (%m)	LONGI TUD EQUIV ALENT E DE ACCES ORIOS (m)	PERDIDAS POR FRICCIÓN EN ACCESORIO S (1) (m)	ALTURA ESTÁTIC A (2) (m)	LONGITU D DE TUBERÍA (m)	PERDIDAS POR FRICCIÓN EN TUBERÍAS (3) (m)	TOTAL DE PERDIDAS (1)+(2)+(3) (m)
0					99	-	11	31	-	11.00
0.20	10	13.49	4.74	14.60	99	14.45	11	31	4.53	29.98
0.40	20	26.99	2.37	29.20	99	28.91	11	31	9.05	48.96
0.60	30	40.48	1.58	44.00	99	43.56	11	31	13.64	68.20
1.00	50	67.47	0.95	73.10	99	72.37	11	31	22.66	106.03
1.20	60	80.96	0.79	87.80	99	86.92	11	31	27.22	125.14
1.59	80	107.95	0.59	117.00	99	115.83	11	31	36.27	163.10
1.99	100	134.94	0.47	146.20	99	144.74	11	31	45.32	201.06
2.19	110	148.43	0.43	160.89	99	159.28	11	31	49.88	220.16
2.59	130	175.42	0.36	190.15	99	188.24	11	31	58.95	258.19
2.79	140	188.91	0.34	204.77	99	202.72	11	31	63.48	277.20
2.99	150	202.40	0.32	219.40	99	217.20	11	31	68.01	296.22
3.19	160	215.90	0.30	234.02	99	231.68	11	31	72.55	315.23
3.39	170	229.39	0.28	248.65	99	246.16	11	31	77.08	334.24
3.59	180	242.88	0.26	263.28	99	260.64	11	31	81.62	353.26
3.79	190	256.38	0.25	277.90	99	275.12	11	31	86.15	372.27
3.98	200	269.87	0.24	292.53	99	289.60	11	31	90.68	391.29



TABLA 15
PERDIDAS POR FRICCIÓN EN TUBERÍA 3" CEDULA 40

VELOCIDA D DEL FLUIDO (m/s)	CAUDA L (GPM)	NUMERO DE REYNOLD S	FACTOR DE FRICCIÓ N	PORCENTA JE DE PERDIDAS POR FRICCIÓN (%m)	LONGI TUD EQUIV ALENT E DE ACCES ORIOS (m)	PERDIDAS POR FRICCIÓN EN ACCESORIO S (1) (m)	ALTURA ESTÁTIC A (2) (m)	LONGITU D DE TUBERÍA (m)	PERDIDAS POR FRICCIÓN EN TUBERÍAS (3) (m)	TOTAL DE PERDIDAS (1)+(2)+(3) (m)	
0	-	-	-	-	120	-	-	11	31	-	11.00
0.14	10	9.37	6.83	6.13	120	7.36	11	31	1.90	20.26	
0.28	20	18.74	3.41	12.27	120	14.72	11	31	3.80	29.52	
0.55	40	37.48	1.71	24.50	120	29.40	11	31	7.60	48.00	
0.69	50	46.85	1.37	30.70	120	36.84	11	31	9.52	57.36	
0.83	60	56.22	1.14	36.80	120	44.16	11	31	11.41	66.57	
0.97	70	65.59	0.98	42.90	120	51.48	11	31	13.30	75.78	
1.11	80	74.96	0.85	49.10	120	58.92	11	31	15.22	85.14	
1.38	100	93.71	0.68	61.40	120	73.68	11	31	19.03	103.71	
1.52	110	103.08	0.62	67.48	120	80.98	11	31	20.92	112.89	
1.80	130	121.82	0.53	79.68	120	95.62	11	31	24.70	131.32	
1.94	140	131.19	0.49	85.81	120	102.97	11	31	26.60	140.57	
2.08	150	140.56	0.46	92.00	120	110.40	11	31	28.52	149.92	
2.21	160	149.93	0.43	98.16	120	117.79	11	31	30.43	159.22	
2.35	170	159.30	0.40	104.30	120	125.15	11	31	32.33	168.49	
2.49	180	168.67	0.38	110.40	120	132.49	11	31	34.23	177.71	
2.63	190	178.04	0.36	116.54	120	139.85	11	31	36.13	186.97	

TABLA 16
PERDIDAS POR FRICTION EN TUBERÍA 4" CEDULA 40

VELOCIDA D DEL FLUIDO (m/s)	CAUDA L (GPM)	NUMERO DE REYNOLD S	FACTOR DE FRICCIÓN	PORCENTA JE DE PERDIDAS POR FRICTION (%m)	LONGI TUD EQUIV ALENT E DE ACCES ORIOS (m)	PERDIDAS POR FRICTION EN ACCESORIO S (1) (m)	ALTURA ESTÁTIC A (2) (m)	LONGITU D DE TUBERÍA (m)	PERDIDAS POR FRICTION EN TUBERÍAS (3) (m)	TOTAL DE PERDIDAS (1)+(2)+(3) (m)
0					170	-	11	31	-	11.00
0.08	10	5.27	12.14	2.06	170	3.50	11	31	0.64	15.13
0.16	20	10.54	6.07	4.11	170	6.99	11	31	1.28	19.27
0.23	30	15.81	4.05	6.17	170	10.49	11	31	1.91	23.40
0.39	50	26.35	2.43	10.29	170	17.49	11	31	3.19	31.67
0.47	60	31.63	2.02	12.34	170	20.98	11	31	3.83	35.81
0.54	70	36.90	1.73	14.40	170	24.48	11	31	4.46	39.94
0.62	80	42.17	1.52	16.60	170	28.22	11	31	5.15	44.37
0.78	100	52.71	1.21	20.70	170	35.19	11	31	6.42	52.61
0.86	110	57.98	1.10	22.78	170	38.73	11	31	7.06	56.79
1.01	130	68.52	0.93	26.92	170	45.77	11	31	8.35	65.11
1.17	150	79.06	0.81	31.00	170	52.70	11	31	9.61	73.31
1.25	160	84.33	0.76	33.13	170	56.33	11	31	10.27	77.60
1.32	170	89.61	0.71	35.21	170	59.85	11	31	10.91	81.76
1.40	180	94.88	0.67	37.26	170	63.35	11	31	11.55	85.90
1.48	190	100.15	0.64	39.32	170	66.84	11	31	12.19	90.03
1.56	200	105.42	0.61	41.38	170	70.34	11	31	12.83	94.17

De las tablas anteriores, podemos crear curvas en una hoja de cálculo con capacidad de graficar. Estos gráficos deben reflejar una curva de Caudal versus Cabezal Dinámico Total.

Esta curva es conocida como Curva del Sistema, y representa las perdidas totales del fluido en una tubería de un diámetro determinado.

Una vez creada la curva del sistema para cada diámetro analizado, se crea una curva unificada con todos los diámetros analizados para una mejor comprensión.



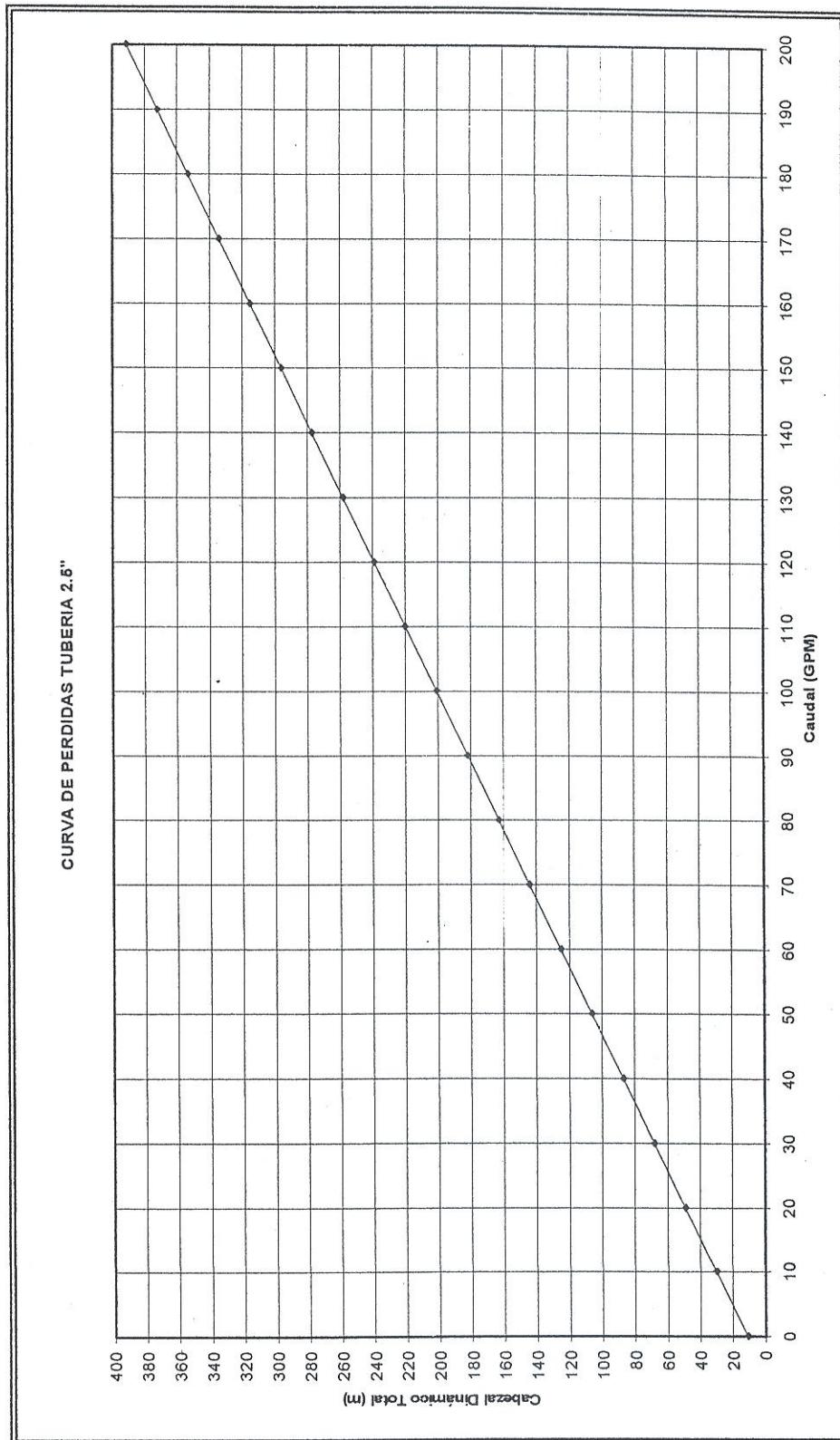


FIGURA 3.2: CURVA DEL SISTEMA PARA LA TUBERÍA DE 2 ½ "

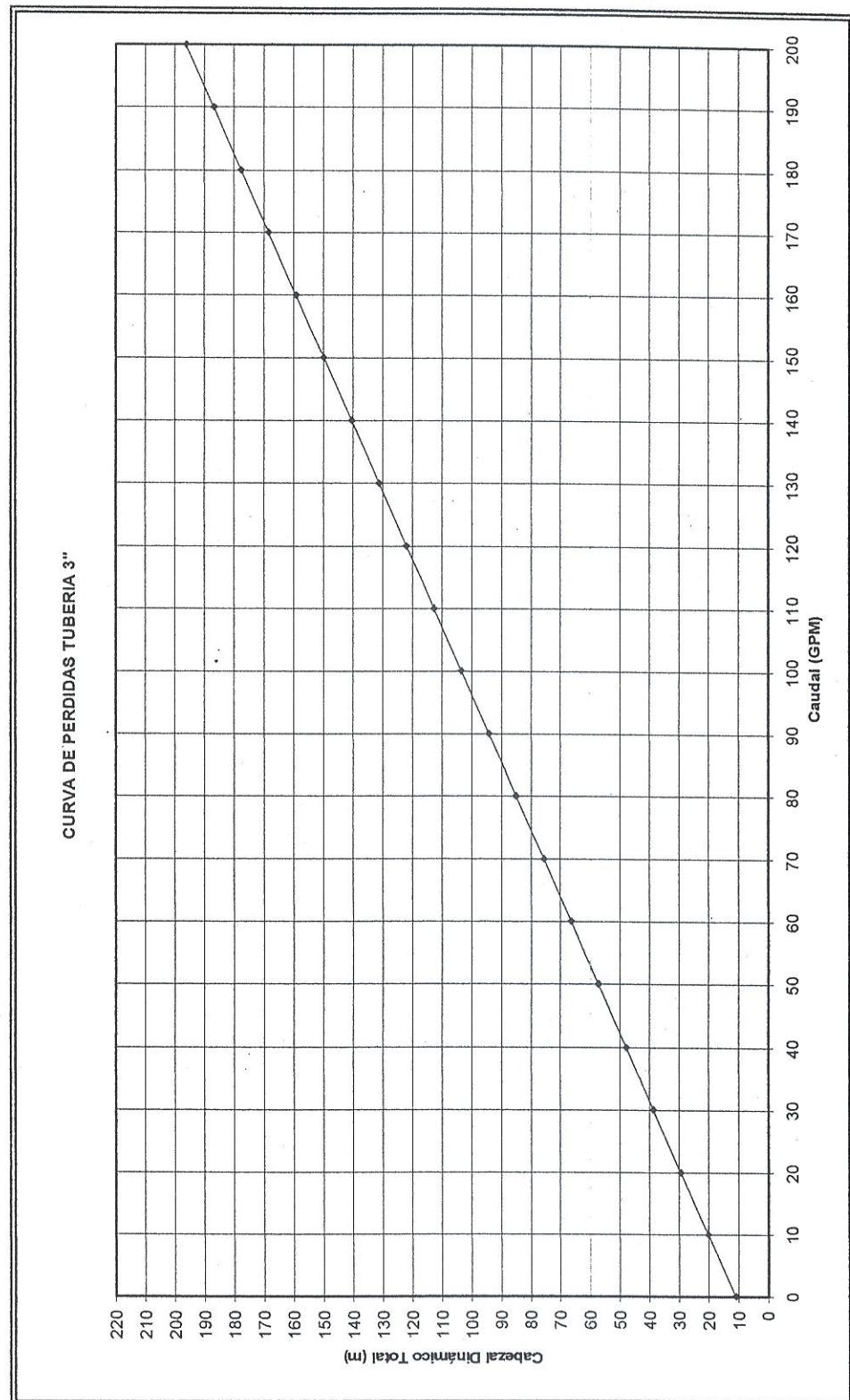


FIGURA 3.3: CURVA DE PÉRDIDAS PARA LA TUBERÍA DE 3"

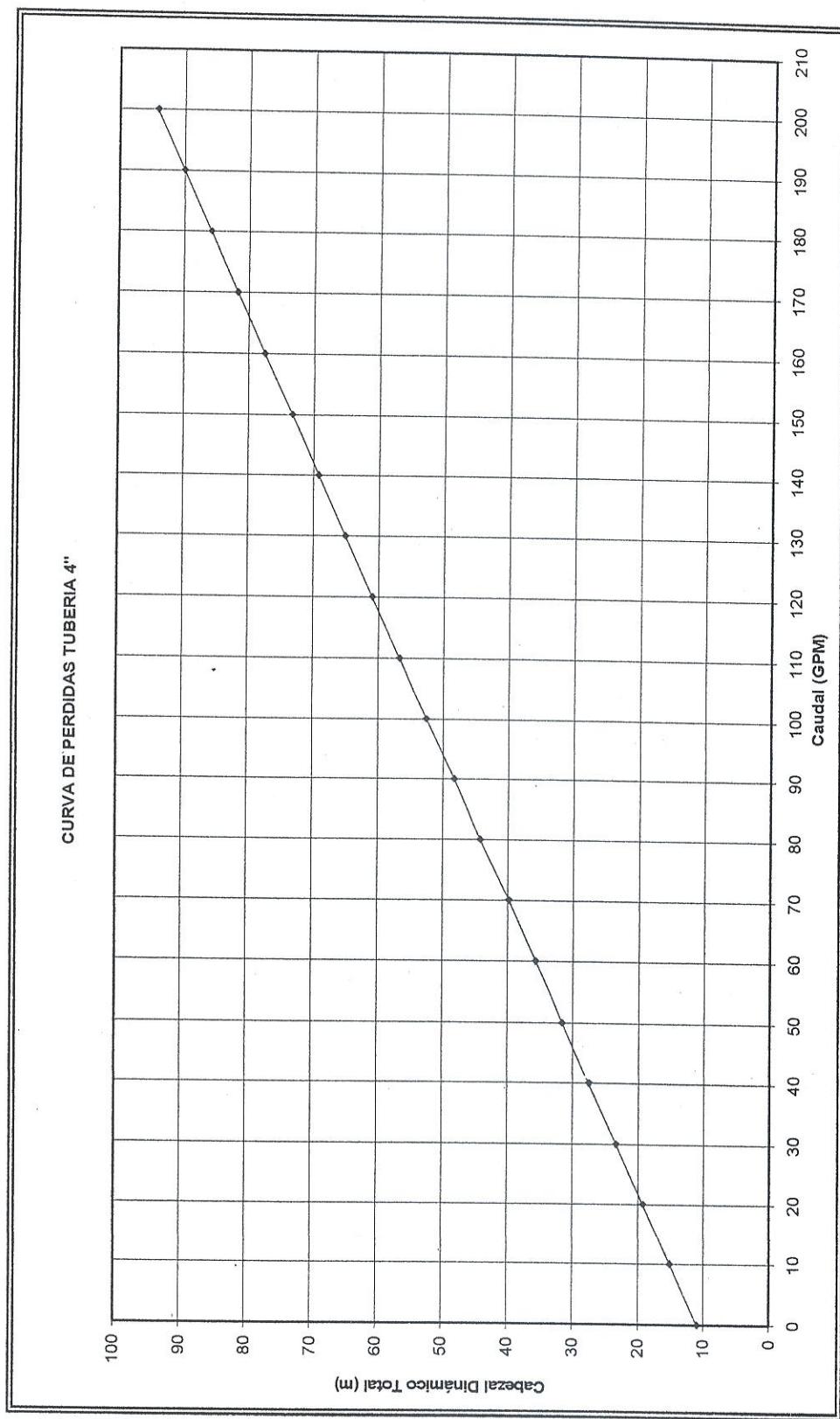


FIGURA 3.4: CURVA DE PÉRDIDAS PARA LA TUBERÍA DE 4"

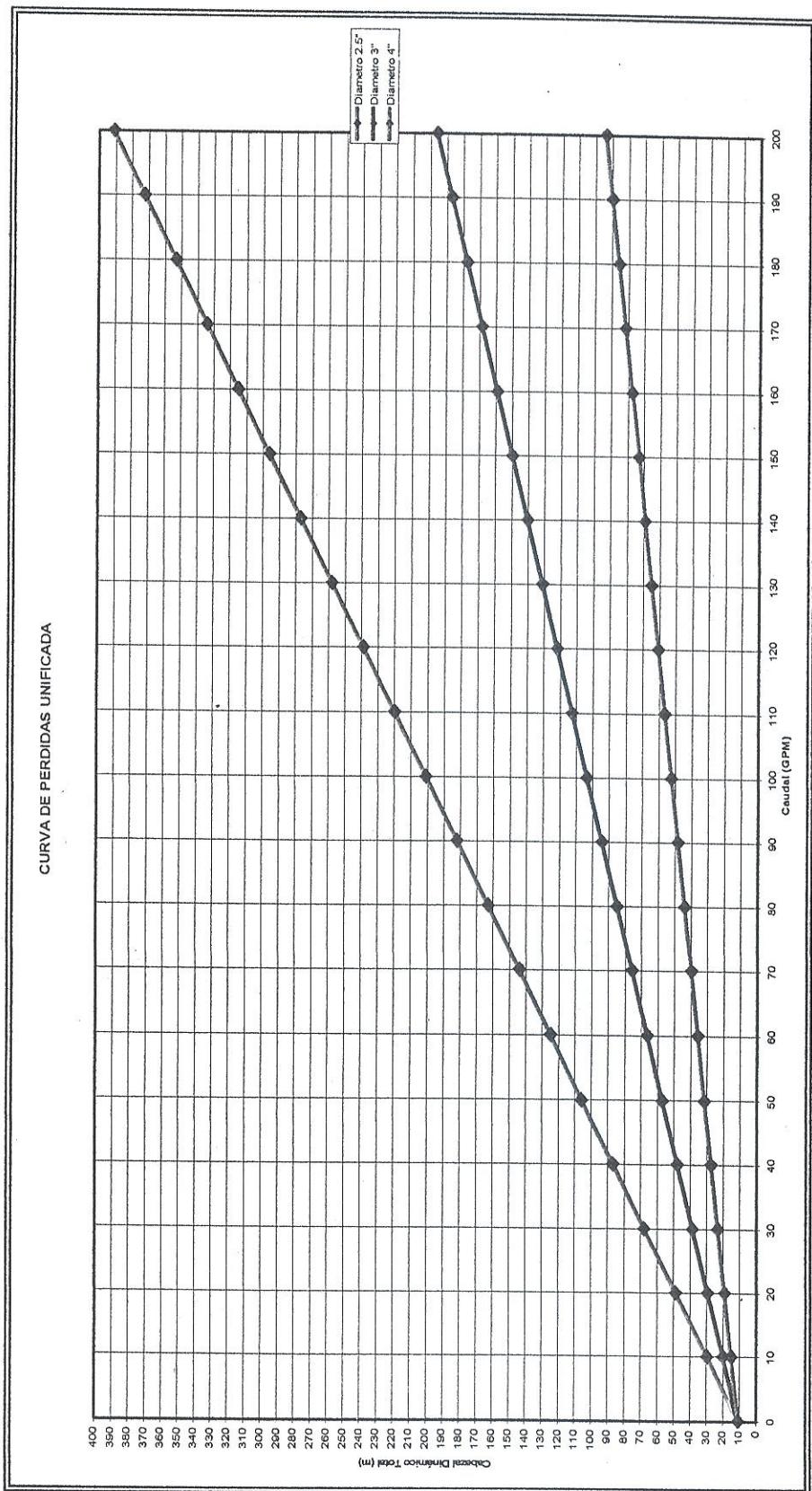


FIGURA 3.5: CURVA CONJUNTA DE LOS TRES DIÁMETROS DE TUBERÍA



De estas curvas, podemos ya determinar el diámetro más idóneo para el transporte, desde los auto-tanques hacia los tanques reservorios.

El caudal transportado por una tubería de 2½" y 3" produce una caída de presión alta, que es crítica, con lo que la vida útil de los equipos de bombeo, tuberías y accesorios disminuye considerablemente.

En el análisis de la tubería de 4" se observa un comportamiento acorde a lo que se intenta obtener, por lo que se establece que ese es el diámetro de tubería mas idóneo para operar en estos momentos, además nos permite tener mayor capacidad de transporte del fluido para cubrir cualquier demanda en el futuro.

TABLA 17

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS EN LOS TRES DIÁMETROS SUGERIDOS

DIÁMETRO TUBERÍA (in)	CAUDAL (GPM)	CABEZAL DINÁMICO TOTAL (m)	CABEZAL DINÁMICO TOTAL (PSI)
2 1/2"	200	391.29	445.40
3"	200	196.23	223.36
4"	200	94.17	107.19

De esta tabla es muy sencillo verificar que el diámetro con menor Cabezal Dinámico Total (perdidas totales) es el de 4 pulgadas, concordando con el diámetro sugerido⁴.

De estos datos obtenidos, podemos elaborar una tabla que nos indique las variables finales del sistema. Los mismos se presentan a continuación:

TABLA 18

VARIABLES FINALES

DIÁMETRO TUBERÍA (in)	CAUDAL (GPM)	CABEZAL DINÁMICO TOTAL (m)	CABEZAL DINÁMICO TOTAL (PSI)
4"	200	94.17	107.19

3.4. Selección Y Descripción Del Tipo De Bomba

La decisión de cual tipo de bomba escoger para esta etapa del proceso, se ve enteramente afectado por la presencia de solventes en el fluido, ya que esta característica lo hace difícil de manejar con bombas que usualmente se usan para este fin,

⁴ "TAM - Liquid AFR Handling V1.0" en su capítulo 3.6.1



como son las bombas centrífugas, muy comunes para alcanzar altas tasas de descarga.

Nos vemos limitados a escoger el tipo de bombas recomendado para la impulsión a los hornos, las del tipo de diafragma o membrana. Estas bombas son las indicadas para manejar fluidos con solventes.

Con esta premisa, nos decidimos por las bombas marca ABEL de procedencia Alemana.

Según la información procedente de su página WEB y por sugerencia directa del fabricante ABEL, se escoge las bombas de membrana hidráulica (HM), las mismas que pueden trabajar dentro de un rango de hasta 510 GPM (116 m³/h) y hasta 1450 PSI (10 MPa). El siguiente paso será el usar las graficas proporcionadas por la misma empresa ABEL para la selección de sus bombas, dependiendo del caudal y la presión a manejar:

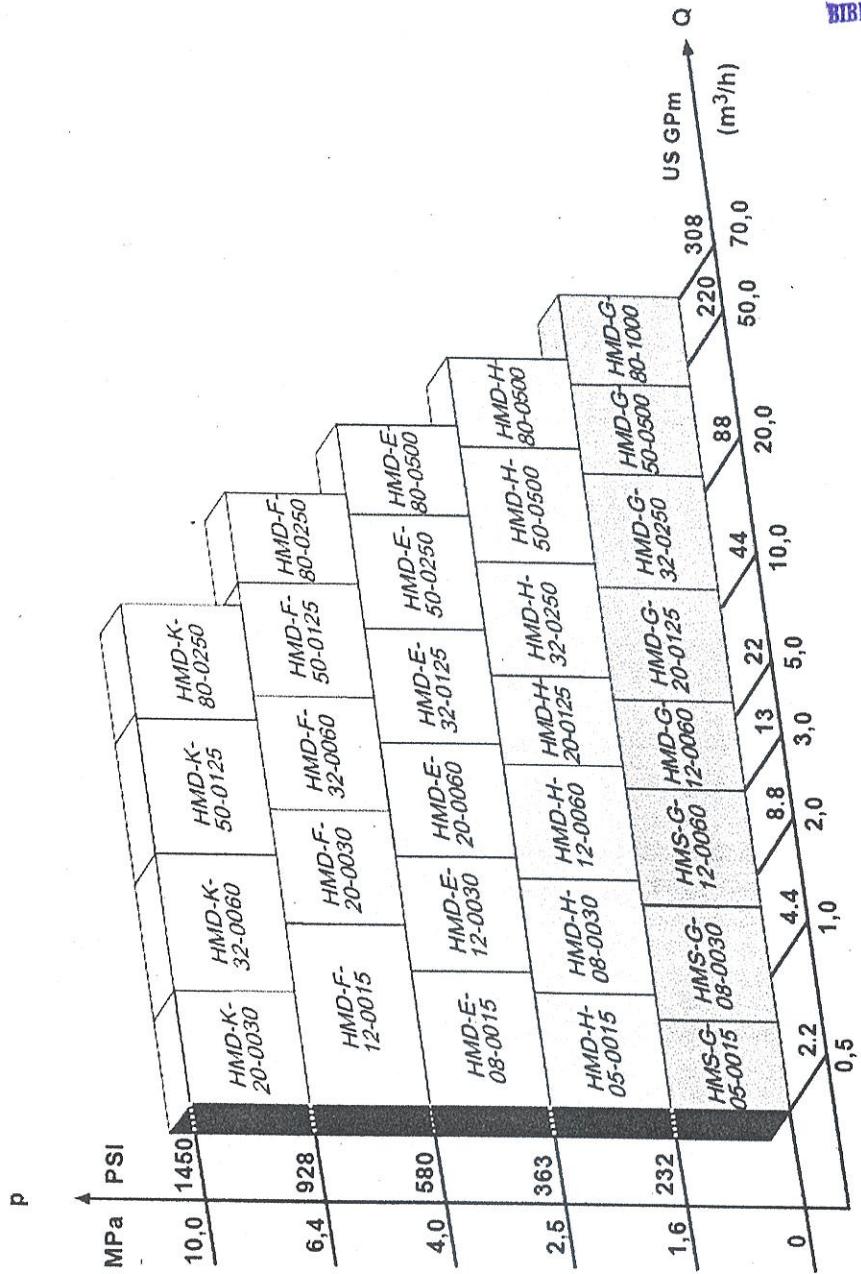


FIGURA 3.5: GRAFICO DE SELECCIÓN PARA LAS BOMBAS DE MEMBRANA HIDRÁULICA.
FUENTE: ABEL PUMPS

De la figura anterior podemos encontrar que el modelo de bomba que esta dentro de los parámetros de nuestro sistema es la bomba HMD-G-050-0500.

DESCRIPCIÓN Y TIPO DE MOTOBOMBA

Motobomba de membrana horizontal de doble acción modelo HMD-G-050-0500 de marca ABEL, sin sellos, auto-preparada y capaz de trabajar en seco. Dependiendo de la presión de descarga y otras condiciones operativas, la capacidad de la bomba puede ser ajustada con una velocidad de manejo variable.

TABLA 19

CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA DE RECEPCIÓN

Configuración de la Bomba:	Doble Actuante
Brida de Succión:	6", 150 LB., ANSI RF
Brida de Descarga:	4", 300 LB., ANSI RF
Energía Requerida:	14.2 HP
Motor Requerido:	15.0 HP
Velocidad del Motor:	1800 RPM
Peso de la Bomba sin motor:	2535 Kg

TABLA 20

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE LA BOMBA

Extremo de la bomba	
Cobertura de carcaza	Hierro Nodular
Membranas Moldeadas	Santopreno
Válvula de bola:	Acero Inoxidable
Asientos de las Válvulas:	Acero Inoxidable
Sellos estáticos:	NBR
Estabilizador de succión:	Acero

Extremo de la transmisión	
Cubierta del Cilindro:	Fundición de Hierro
Revestimiento del Cilindro:	Bronce
Reservorio Hidráulico:	Fundición de Hierro
Pistón:	Acero Inoxidable
Sellos del Pistón:	NBR
Vástago del Pistón:	Acero Inoxidable
Sellos del Vástago del Pistón:	Embalaje suave
Fluido Hidráulico:	Aceite hidráulico
Caja de engranajes:	Fundición de Hierro Gris
Componentes internos de la caja de engranajes:	Hierro Nodular



Dos interruptores de nivel están localizados en el reservorio hidráulico permanentemente monitoreando el nivel de fluido hidráulico. Se dan advertencias si el fluido hidráulico es o muy bajo o muy alto, indicando defectos de membranas.

Cada cubierta de la bomba esta equipada de una tela reforzada, en forma de cuenco que asegura la separación completa del líquido hidráulico del medio que se bombeará. La bomba esta equipada con una conexión central para la línea de descarga. El humidificador de pulsación esta diseñado para pulsaciones residuales de +/- 5 %.

Las válvulas del producto son tipo válvulas de la bola. Las válvulas del lado de la succión están conectadas uno al otro por un múltiple de succión. La bomba esta equipada con un estabilizador de succión que elimina pérdidas de aceleración en la bomba y mejora el NPSHr.

La conexión entre el motor y la bomba es a través de una correa de impulsión tipo V. La correa de impulsión tipo V esta encerrada por un protector que cumple los estándares OSHA.

Accionada en forma directa por medio de acople flexible por un motor eléctrico trifásico de 15 HP a 1800 RPM 230/460 V, 60 Hz

tipo TEFC a prueba de explosión. La unidad va montada sobre base común construida en viga de acero con sistema antivibratorio.

3.5. Diseño De La Estación De Bombeo

La estación de bombeo constará de una bomba ABEL, modelo HMD-G-050-0500 para las operaciones de descarga diarias y una bomba idéntica en espera (stand-by). Dichas bombas, dos en total, estarán conectadas en paralelo y solo una de ellas trabajará a la vez. Con esta medida se garantiza que siempre se va a tener la capacidad de llenar los tanques, inclusive si la bomba principal deja de funcionar o entra en mantenimiento.

ACCESORIOS MECÁNICOS

Como se mencionaba anteriormente en este capítulo, la estación de recepción constará de un filtro de doble canasta, con malla de tamaño de rejilla No 4, permitiendo que sean descartadas todas las partículas mayores a 5 mm, que es el tamaño máximo de partículas que aceptan las bombas.

Se instalarán un número de 7 válvulas de cierre rápido tal y como se detalla a continuación:

- 1 válvula a la entrada del sistema, justo después de la salida de los tanqueros.
- 1 válvula antes del filtro.
- 1 válvula después del filtro.
- 1 válvula antes de la succión de cada bomba. Totalizan 2 válvulas.
- 1 válvula después de la descarga de cada bomba. Totalizan 2 válvulas.

Se instalarán un número de 2 válvulas cheque tal y como se detalla a continuación:

- 1 válvula después de la descarga de cada bomba. Totalizan 2 válvulas.

INSTRUMENTOS ELÉCTRICOS Y SENSORES.

Las válvulas solenoides y los interruptores de flujo deberán instalarse en la entrada de las bombas de recepción y a la entrada del filtro totalizando un número de 3 válvulas y 3 interruptores. Deberán estar diseñados para actuar ante la presencia o ausencia de fluido en la tubería. El flujo nominal de combustible alternativo que atravesará esta parte del proceso será de 200 GPM; el interruptor de flujo deberá enviar una señal

de cierre al momento de iniciar la descarga desde el tanquero y deberá desactivarse ante la ausencia de fluido, debiendo ser calibrado para que no opere antes de que el camión tanque termine de vaciarse.

Un interruptor de presión diferencial deberá ser instalado en el filtro, y se empleará para determinar una obstrucción del paso de fluido a través del mismo, en función de la diferencia de presión que se presentaría en este caso entre la entrada y salida del filtro. La cubierta debe ser metálica y a prueba de explosión. Las partes expuestas al proceso deben ser de acero inoxidable 316. La presión diferencial especificada para la operación de este instrumento debe ser 0.3 bar, entre la entrada y salida del filtro.

Un sensor de nivel máximo debe ser instalado en el domo de cada tanque, mediante bridas cuyo diámetro dependerá del equipo seleccionado. Su principio de funcionamiento debe ser por vibración, pues este es el mejor principio de detección de nivel máximo para aplicaciones de combustibles alternativos. Este sensor debe estar provisto de una extensión de 800 mm para permitir el contacto entre la parte activa del instrumento y el fluido almacenado en el tanque. Su cubierta puede ser metálica o de material sintético, dependiendo de la certificación del



fabricante, pero dicha cubierta debe ser diseñada a prueba de explosión.

Un medidor de Flujo estará ubicado en el área de descarga de los tanqueros y servirá para controlar la cantidad de flujo de combustible. Serán del tipo coriolis, con principio de medición de masa de fluido. La cubierta debe ser diseñada a prueba de explosión. Se recomienda que las unidades de medición de la escala sean galones por minuto (GPM).

CAPITULO 4

4. DISEÑO HIDRÁULICO PARA LA IMPULSIÓN DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS HACIA HORNOS

En este capítulo se continuará la fase de selección de las bombas, en esta ocasión las que sacaran el combustible de los tanques reservorios y los impulsaran hacia los hornos para ser quemados.

El sistema de bombeo debe poder suministrar el caudal y la presión necesarios para su ingreso a la boquilla de inyección dentro de los hornos.

4.1. Selección Del Sitio De Implantación De La Estación De Bombeo

Para la selección de la implantación de la estación de bombeo, se deben tomar en cuenta los siguientes condicionamientos:

- a) La estación de bombeo, requiere de un área aproximada de 70 m^2 y debe estar localizada lo mas cerca posible de los tanques reservorios, así mismo de los hornos.

Por lo tanto, el área a utilizarse para este proyecto fue escogida por su posición estratégica, cercana a los hornos de cemento, en el mismo lugar donde funcionan actualmente las instalaciones improvisadas de bombeo de combustibles alternativos.

Su ubicación exacta puede observarse en los planos correspondientes en el apéndice A

4.2. Requerimientos De Diseño

Como se mencionó en el capítulo anterior, existen dos tanques de 94 m³, de los cuales uno se encontrará entregando combustible y el otro siempre o en espera o siendo llenado, por lo que un sistema de bombeo en paralelo es necesario. Con esto se garantiza poder descargar desde cualquiera de los dos tanques cuando sea requerido.

Se necesita del aporte de una bomba para cada horno con su respectivo sistema de respaldo.

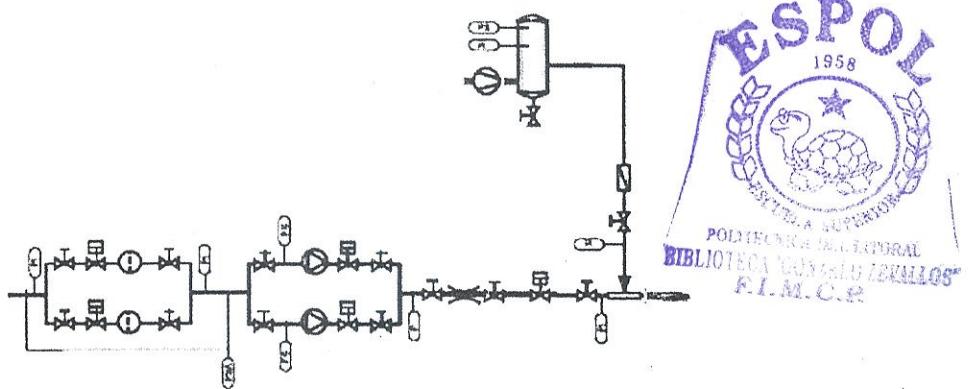


FIGURA 4.1: ELEMENTOS DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO PARA LA IMPULSIÓN

FUENTE: TAM - Liquid AFR Handling V1.0

Cada bomba debe estar equipada con un regulador de flujo variable para ajustar el caudal. La regulación del flujo usando válvulas dosificadoras no es recomendable debido al riesgo de bloqueo de las válvulas y abrasión de las mismas en caso de manejo de contenido con sólidos

Se instalará un solo filtro de doble canasta con sus respectivos manómetros incluidos a la entrada del sistema de impulsión, el mismo que servirá para las bombas instaladas en paralelo. Este tipo de filtro nos permite realizar el mantenimiento de las canastas del mismo sin tener que desconectarlo ni parar el sistema.

Se instalarán válvulas solenoides a la entrada y a la salida de las bombas, para controlar el sistema de manera automática. Así

mismo se instalaran válvulas cheque a la salida de las mismas para prevenir el retorno de combustible.

Por motivos de mantenimiento, todas las bombas, filtros y otros elementos de mantenimiento intensivo deben poder ser desconectados manualmente por medio de válvulas de cierre rápido.

La presión de atomización requerida depende del diseño del atomizador. Básicamente entre 3 y 5 bares son requeridos.

El diámetro de las tuberías debe ser seleccionado para trabajar con velocidades de entre 1.5 a 2.5 m/s. Velocidades bajas tienden a sedimentar los sólidos. Velocidades superiores a los 2.5 m/s resultan en altas perdidas por fricción. Para líquidos muy viscosos, es factible usar velocidades de como mínimo 0.6 m/s, debido a que el asentamiento es menos fuerte.

Para determinar el diámetro de tubería y diseñar el sistema de bombeo mas idóneo a ser instalado, se han considerado los parámetros hidráulicos de CAUDAL (Gasto), CDT (Cabezal Dinámico Total), y por el tipo de fluido que en su mayoría será de derivados del petróleo, los requerimientos constructivos dados



por el código API 610 para las unidades de bombeo, API 600 para los accesorios y API 605 para la tubería.

Además se consideró las siguientes condiciones físicas y de operación:

- El flujo debe de ser laminar.
- Diferencia de cota entre la estación de bombeo y la entrada a los hornos (Alt. estática: 20 m).
- Tipo de succión: Positiva.
- Longitud de tubería de succión y descarga (145 m).
- Solo uno de los dos tanques de almacenamiento deberá ser descargado a la vez.

TABLA 21
PARÁMETROS DE OPERACIÓN CONSIDERADOS

CONDICIÓN DE OPERACIÓN	CAUDAL (GPM)	ALTURA ESTÁTICA (m)	LONGITUD TOTAL DE TUBERÍA (m)	PRESIÓN DE ATOMIZACIÓN DE ATOMIZACIÓN BOQUILLA DE HORNO (PSI)
MÁXIMA	20	20	145	50
MÍNIMA	10	20	145	50

El ingreso de combustible en la estación de Bombeo del área de impulsión deberá tener succión positiva en el ojo de impulsión de las bombas, que lo obtiene al recibir el fluido de los tanques, los que deben estar ubicados por encima del nivel de piso de la estación de bombeo, por lo que el cálculo del cabezal neto de succión positiva (NPSH) se desprecia, lo que equivale a decir:

$$P_{INGRESO} \left(\text{Kg/cm}^2 \right) \geq 0$$

En caso de grandes alturas de succión ($> 2 \text{ m}$) o frecuente taponamiento de filtros, es recomendado instalar un sensor de baja presión antes de la bomba para monitorear la cavitación.

4.3. Análisis De Pérdidas Por Fricción En Tuberías Y Determinación De Diámetro De Tubería

La línea de recepción desde la estación de bombeo debe llegar hasta la cota +20 que es la altura calculada entre la estación de bombeo y las lanzas de inyección de combustible de los hornos.

El cálculo de las pérdidas nos permite seleccionar el diámetro de tubería más apropiada y para establecer si es posible transportar por dicha tubería el caudal de una bomba con lo que se establecería las condiciones de operación.



Para esta parte del proyecto, se procederá a calcular las pérdidas para cuatro distintos diámetros de tubería, con el afán de encontrar usando el método de prueba y error, el diámetro adecuado para el uso propuesto. Los diámetros considerados fueron $1\frac{1}{4}$ ", $1\frac{1}{2}$ ", 2" y $2\frac{1}{2}$ "

Se tendrá en cuenta los siguientes parámetros:

- Longitud total de tubería desde el cuarto de bombas hasta las lanzas de inyección de combustible de los hornos.
- Longitud equivalente por accesorios.
- Longitud equivalente en Válvulas y Filtros.
- Cota de altura correspondiente (altura estática).

PÉRDIDAS POR ACCESORIOS:

Las pérdidas por accesorios se calcularán teniendo en consideración la cantidad aproximada de accesorios a instalarse en el sitio usando como base el plano isométrico de la planta adjunto a este estudio, la tabla con las cantidades se presenta a continuación:



TABLA 22
CANTIDAD DE ACCESORIOS CORRESPONDIENTES A LA
PARTE DE RECEPCIÓN A TANQUES RESERVORIOS.

CANTIDAD	ACCESORIO
1	Filtro de doble canasta
3	Válvulas Check
3	Válvulas Solenoides
5	Válvulas de Cierre rápido
9	Uniones T
25	Codos

Usando la tabla "Perdidas por Fricción en Válvulas y Accesorios Estándar" mostrada a continuación, del libro "Engineering Data" de la compañía VIKING PUMPS se procede a realizar una tabla con la Longitud Equivalente de perdidas en Accesorios.

TABLA 23

PÉRDIDAS POR FRICCIÓN EN VÁLVULAS Y ACCESORIOS ESTÁNDAR



TABLA 24

CÁLCULO DE LONGITUD EQUIVALENTE EN ACCESORIOS

1¼"			
CANTIDAD	ÍTEM	PERDIDAS (ft)	PERDIDAS (m)
1	Filtro de doble canasta	18	5.49
3	Válvulas Check	2.4	0.73
3	Válvulas Solenoides	114	34.76
5	Válvulas de Cierre rápido	4	1.22
9	Uniones T	20.70	6.31
25	Codos	90	27.44
TOTAL		249.10	75.95

1½"			
CANTIDAD	ÍTEM	PERDIDAS (ft)	PERDIDAS (m)
1	Filtro de doble canasta	22	6.71
3	Válvulas Check	3.6	1.10
3	Válvulas Solenoides	132	40.24
5	Válvulas de Cierre rápido	6	1.83
9	Uniones T	25.20	7.68
25	Codos	112.5	34.30
TOTAL		301.30	91.86

2"			
CANTIDAD	ÍTEM	PERDIDAS (ft)	PERDIDAS (m)
1	Filtro de doble canasta	28	8.54
3	Válvulas Check	3.6	1.10
3	Válvulas Solenoides	159	48.48
5	Válvulas de Cierre rápido	6	1.83
9	Uniones T	31.50	9.60
25	Codos	130	39.63
TOTAL		358.10	109.18

2½"			
CANTIDAD	ÍTEM	PERDIDAS (ft)	PERDIDAS (m)
1	Filtro de doble canasta	33	10.06
3	Válvulas Check	4.2	1.28
3	Válvulas Solenoides	204	62.20
5	Válvulas de Cierre rápido	7	2.13
9	Uniones T	38.70	11.80
25	Codos	162.5	49.54
TOTAL		449.40	137.01



Una vez obtenidas las longitudes equivalentes en accesorios para cada diámetro propuesto de tubería, se procede a calcular las pérdidas totales en todo el tramo de tubería a analizar, tomando en cuenta la altura estática presente en el sitio.

Los análisis de pérdidas se llevaron a cabo usando tablas, para poder realizar un análisis grafico de las pérdidas con respecto al caudal del sistema, dependiendo del diámetro de la tubería a utilizar.

Lo primero es calcular el porcentaje de perdidas por fricción para las tuberías, en porcentaje por metro (%m), para esto se usa la tabla "Perdidas Por Fricción en Tuberías" para tuberías de cédula 40 nuevas, encontrada en la pagina 510.13 del "Engineering Data" de la compañía VIKING PUMPS. Para este cálculo se necesita el caudal, la viscosidad del fluido y el diámetro de las tuberías.

Una vez obtenido este porcentaje, que va variando con el caudal ya que la viscosidad y el diámetro de tubería permanecen constantes, podemos proceder a calcular las perdidas. Para esto utilizamos la tabla de longitud equivalente en accesorios.



Se obtienen tres valores principales:

1. Perdidas por fricción en Accesorios.
2. Altura estática (11 metros).
3. Perdidas por fricción en Tuberías.

Sumados los tres valores obtenemos las perdidas totales del sistema, en metros, para el valor de diámetro escogido.

Una vez obtenidas las tablas de perdidas, se procede a elaborar las curvas del sistema para un mayor análisis.

A continuación se procede a realizar una curva conjunta con los cuatro diámetros de tuberías analizados, para tener una mejor perspectiva de cual será el mejor diámetro para transportar nuestro líquido

Las tablas y las figuras obtenidas son presentadas a continuación:

TABLA 25
PERDIDAS POR FRICTION EN TUBERÍA 1 1/4" CEDULA 40

VELOCIDA D DEL FLUIDO (m/s)	CAUDAL (GPM)	NUMERO DE REYNOLDS	FACTOR DE FRICTION	PORCENTAJE DE PERDIDAS POR FRICTION	LONGITUD EQUIVALENT E DE ACCESORIOS (m)	PERDIDAS POR FRICTION EN ACCESORIOS (1) (m)	ALTURA ESTÁTICA (2) (m)	LONGITUD DE TUBERÍA (m)	PERDIDAS POR FRICTION EN TUBERÍAS (3) (m)	TOTAL DE PERDIDAS (1)+(2)+(3) (m)
0	0	13.49	4.74	120.87	75.95	-	20	145	-	20.00
0.40	5	26.99	2.37	241.75	75.95	91.80	20	145	175.27	287.07
0.80	10	40.48	1.58	362.62	75.95	183.60	20	145	350.54	554.13
1.20	15	53.98	1.19	483.50	75.95	275.40	20	145	525.81	821.20
1.59	20					367.19	20	145	701.07	1088.27

TABLA 26
PERDIDAS POR FRICCIÓN EN TUBERÍA 1 1/2" CEDULA 40

VELOCIDA D DEL FLUIDO (m/s)	CAUDAL (GPM)	NUMERO DE REYNOLDS	FACTOR DE FRICCIÓN	PORCENTAJE DE PERDIDAS POR FRICCIÓN (%m)	LONGITUD EQUIVALENTE DE ACCESORIOS (m)	PERDIDAS POR FRICCIÓN EN ACCESORIOS (1) (m)	ALTURA ESTÁTICA (2) (m)	LONGITUD DE TUBERÍA (m)	PERDIDAS POR FRICCIÓN EN TUBERÍAS (3) (m)	TOTAL DE PERDIDAS (1)+(2)+(3) (m)
0					91.86	-	20	145	-	20.00
0.28	5	11.24	5.69	58.29	91.86	53.55	20	145	84.52	158.07
0.55	10	22.49	2.85	116.58	91.86	107.09	20	145	169.04	296.13
0.83	15	33.73	1.90	174.87	91.86	160.64	20	145	253.56	434.20
1.11	20	44.98	1.42	233.16	91.86	214.18	20	145	338.08	572.26



TABLA 27
PERDIDAS POR FRICCIÓN EN TUBERÍA 2" CEDULA 40

VELOCIDA D DEL FLUIDO (m/s)	CAUDAL (GPM)	NÚMERO DE REYNOLDS	FACTOR DE FRICCIÓN	PORCENTAJE DE PERDIDAS POR FRICCIÓN (%/m)	LONGITUD EQUIVALENTE DE ACCESORIOS (m)	PERDIDAS POR FRICCIÓN EN ACCESORIOS (1) (m)	ALTURA ESTÁTICA (2) (m)	LONGITUD DE TUBERÍA (m)	PERDIDAS POR FRICCIÓN EN TUBERÍAS (3) (m)	TOTAL DE PERDIDAS (1)+(2)+(3) (m)
0	-	-	-	-	109.18	-	20	145	-	20.00
0.16	5	8.43	7.59	18.44	109.18	20.13	20	145	26.74	66.87
0.31	10	16.87	3.79	36.88	109.18	40.27	20	145	53.48	113.75
0.47	15	25.30	2.53	55.33	109.18	60.40	20	145	80.22	160.62
0.62	20	33.73	1.90	73.77	109.18	80.54	20	145	106.96	207.50

TABLA 28
PERDIDAS POR FRICCIÓN EN TUBERÍA 2 1/2" CEDULA 40

VELOCIDA D DEL FLUIDO (m/s)	CAUDAL (GPM)	NUMERO DE REYNOLDS	FACTOR DE FRICCIÓN	PORCENTAJE DE PERDIDAS POR FRICCIÓN (%m)	LONGITUD EQUIVALENTE DE ACCESORIOS (m)	PERDIDAS POR FRICCIÓN EN ACCESORIOS (1) (m)	ALTURA ESTÁTICA (2) (m)	LONGITUD DE TUBERÍA (m)	PERDIDAS POR FRICCIÓN EN TUBERÍAS (3) (m)	TOTAL DE PERDIDAS (1)+(2)+(3) (m)
0	-	-	-	-	137.01	-	20	145	-	20.00
0.10	5	6.75	9.49	7.55	137.01	10.35	20	145	10.95	41.30
0.20	10	13.49	4.74	15.11	137.01	20.70	20	145	21.91	62.61
0.30	15	20.24	3.16	22.66	137.01	31.05	20	145	32.86	83.91
0.40	20	26.99	2.37	30.22	137.01	41.40	20	145	43.82	105.22



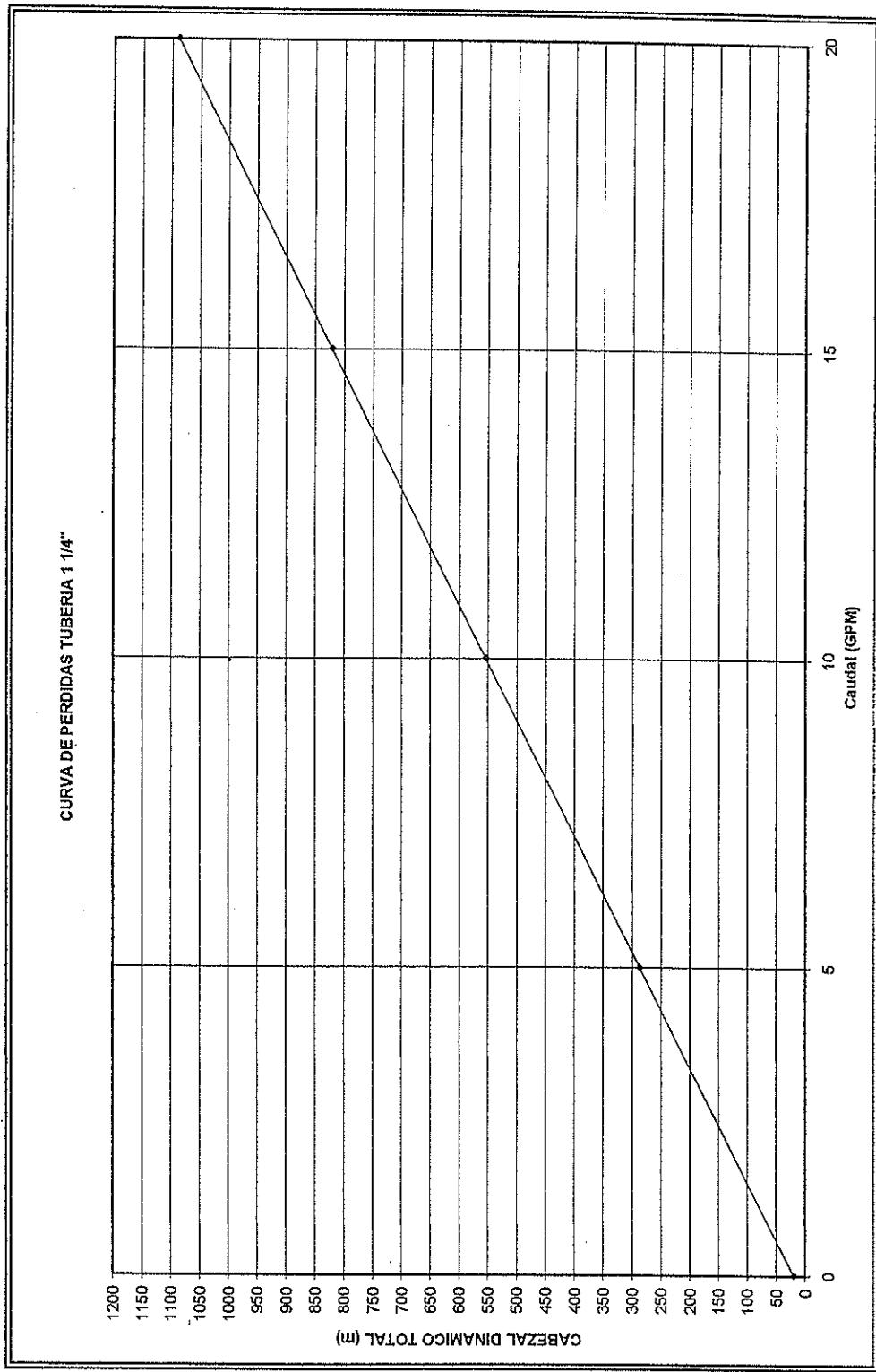


FIGURA 4.2: CURVA DE PÉRDIDAS PARA LA TUBERÍA DE 1 1/4"

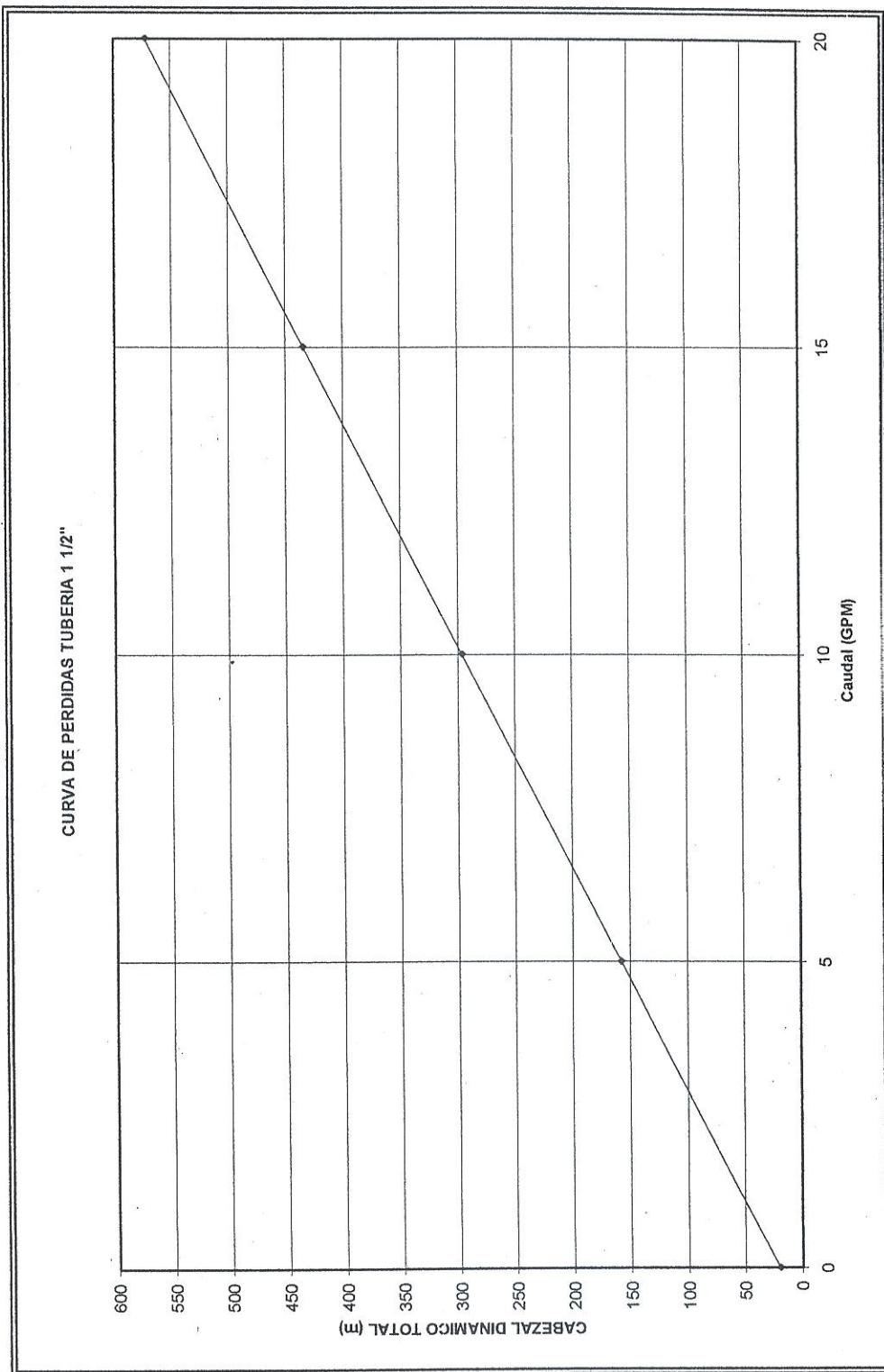


FIGURA 4.3; CURVA DE PÉRDIDAS PARA LA TUBERÍA DE 1 1/2"



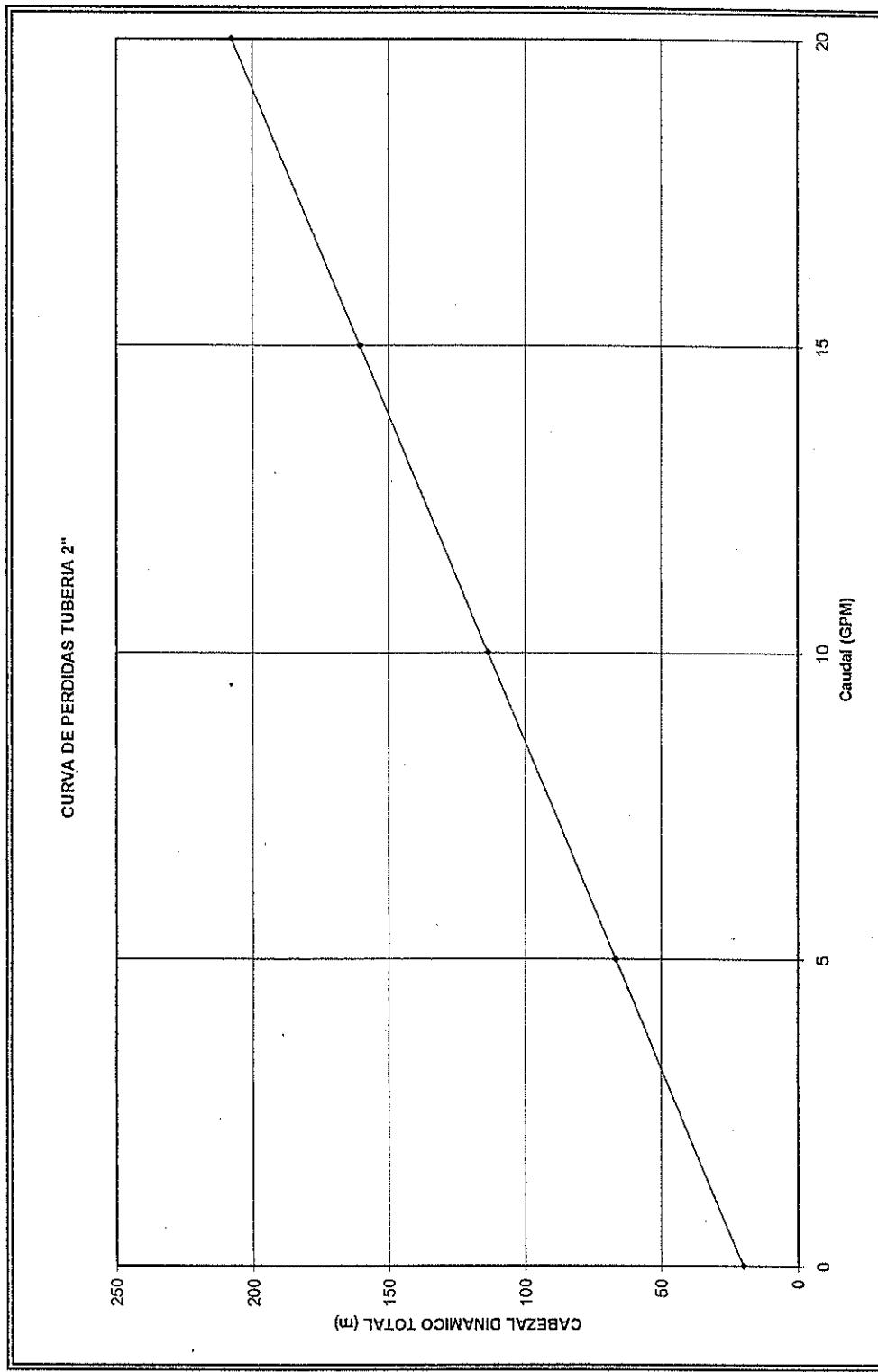


FIGURA 4.4: CURVA DE PÉRDIDAS PARA LA TUBERÍA DE 2"

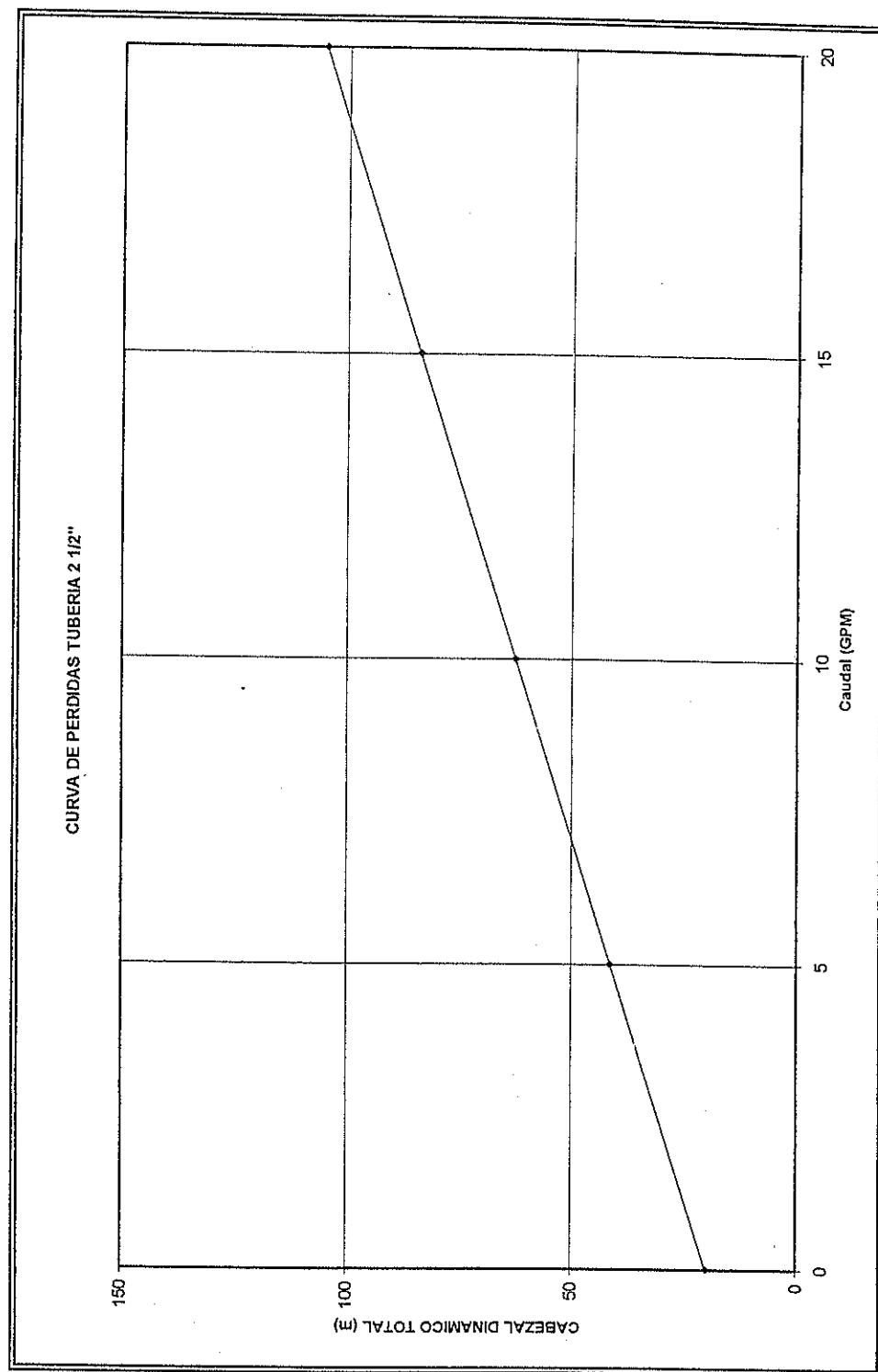


FIGURA 4.5: CURVA DE PÉRDIDAS PARA LA TUBERÍA DE 2½"

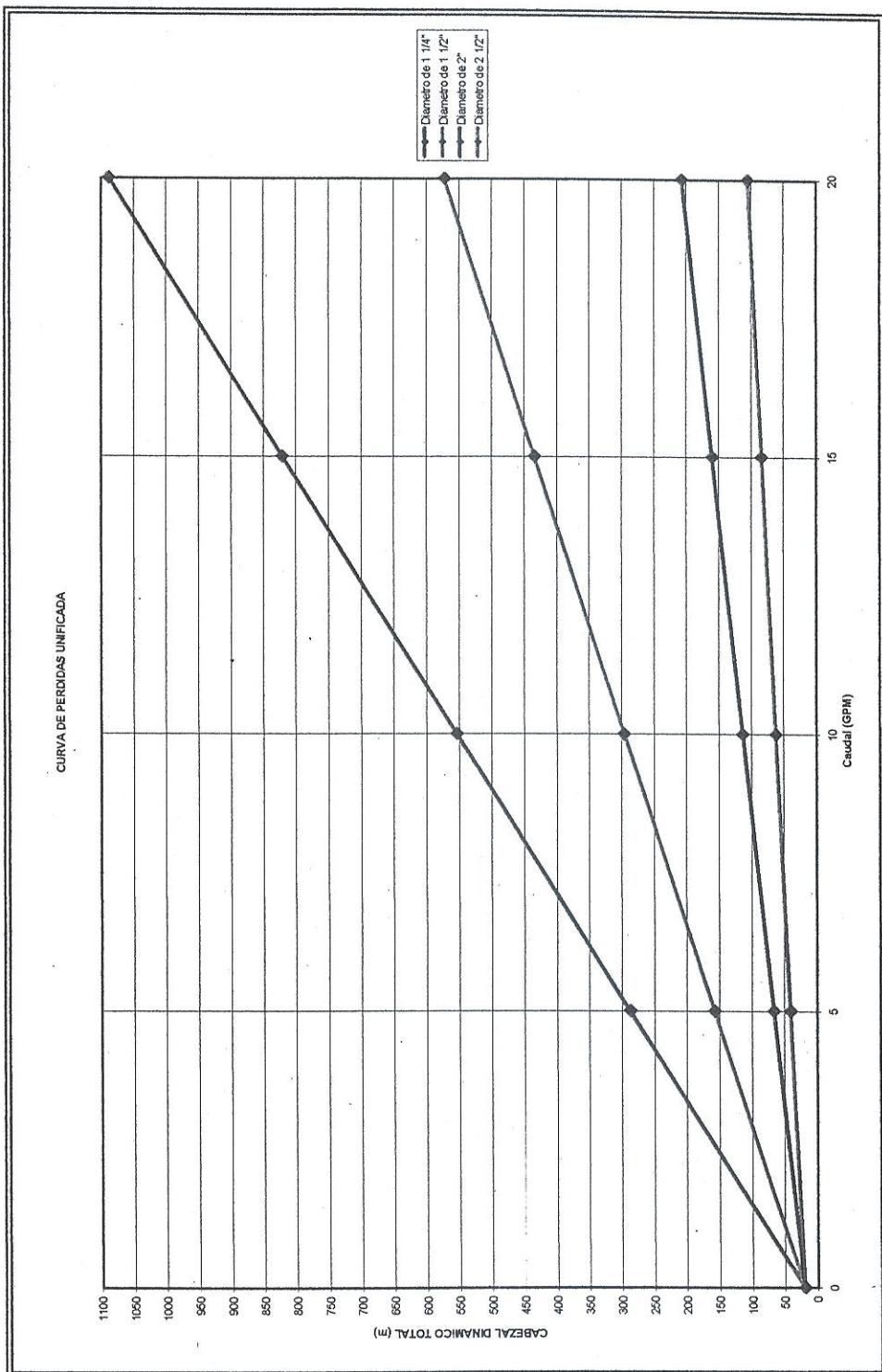


FIGURA 4.6: CURVA CONJUNTA DE LOS CUATRO DIÁMETROS DE TUBERÍA

De estas curvas, podemos ya determinar el diámetro más idóneo para el transporte, desde los tanques hacia los quemadores de los hornos.

El caudal transportado por las tuberías de $1\frac{1}{4}$ " y $1\frac{1}{2}$ " produce una caída de presión alta, que es crítica, con lo que la vida útil de los equipos de bombeo, tuberías y accesorios disminuye considerablemente.

Para el caso de la tubería de $2\frac{1}{2}$ " se observa que la caída de presión es baja comparada con los otros diámetros sujetos a estudio, pero la velocidad promedio en el interior de las tuberías es muy baja, para el caso de un caudal de 10 GPM es de apenas 0.20 m/s, por lo que pueden producirse taponamientos debido a la sedimentación de los sólidos presentes en el fluido.

En el análisis de la tubería de 2" se observa un comportamiento acorde a lo que se intenta obtener, con unas perdidas por fricción aceptables y una velocidad media del fluido de 0.62 m/s, por lo que se establece que ese es el diámetro de tubería mas idóneo para operar en estos momentos, además nos permite tener mayor capacidad de transporte del fluido para cubrir cualquier demanda en el futuro.



TABLA 29

ANÁLISIS DE PÉRDIDAS EN LOS CUATRO DIÁMETROS SUGERIDOS

DIÁMETRO TUBERÍA (in)	CAUDAL (GPM)	CABEZAL DINÁMICO (m)	PRESIÓN DE ATOMIZACIÓN (m)	CABEZAL DINÁMICO TOTAL (m)	CABEZAL DINÁMICO TOTAL (PSI)
1½"	20	1088.27	43.93	1132.20	1288.73
1½"	20	572.26	43.93	616.19	701.39
2"	20	207.50	43.93	251.43	286.19
2½"	20	105.22	43.93	149.15	169.77

De estos datos obtenidos, podemos elaborar una tabla que nos indique las variables finales del sistema. Los mismos se presentan a continuación:

TABLA 30
VARIABLES FINALES

DIÁMETRO TUBERÍA (in)	CAUDAL (GPM)	CABEZAL DINÁMICO (m)	PRESIÓN DE ATOMIZACIÓN (m)	CABEZAL DINÁMICO TOTAL (m)	CABEZAL DINÁMICO TOTAL (PSI)
2"	20	207.5	43.93	251.43	286.19

4.4. Selección Y Descripción Del Tipo De Bomba

La decisión de cual tipo de bomba escoger para esta etapa del proceso, se ve enteramente afectado por la presencia de solventes en el fluido, ya que esta característica lo hace difícil de manejar con bombas que usualmente se usan para este fin, como son las bombas de tornillo excéntrico.

Tal y como esta estipulado en el documento "TAM - Liquid AFR Handling V1.0" de la compañía HOLCIM, se procede a seleccionar bombas de membrana hidráulica, que son las que mejor manejan solventes con sólidos en suspensión.

Con esta premisa, nos decidimos por las bombas marca ABEL de procedencia Alemana.

Según la información procedente de su página WEB y por sugerencia directa del fabricante ABEL, se escoge las bombas de membrana compacta (CM), las mismas que pueden trabajar dentro de un rango de hasta 945 GPM ($215 \text{ m}^3/\text{h}$) y hasta 1450 PSI (10 MPa). El siguiente paso será el usar las graficas proporcionadas por la misma empresa ABEL para la selección de sus bombas, dependiendo del caudal y la presión a manejar:



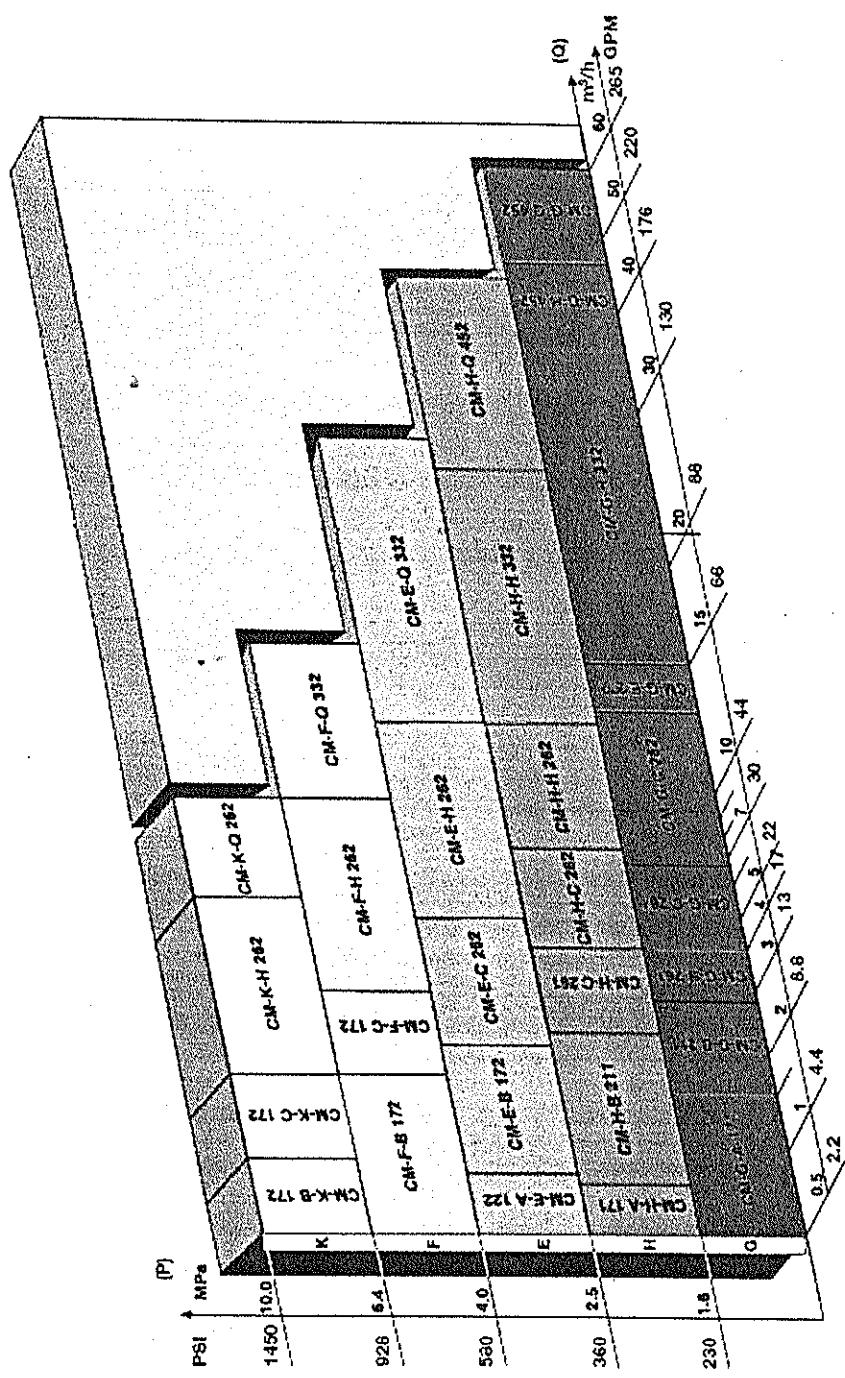


FIGURA 4.7: GRAFICO DE SELECCIÓN PARA LAS BOMBAS DE MEMBRANA COMPACTA
FUENTE: ABEL PUMPS

De la gráfica anterior podemos encontrar que el modelo de bomba que esta dentro de los parámetros de nuestro sistema es la bomba CM-H-C262.

DESCRIPCIÓN Y TIPO DE MOTOBOMBA

Motobomba de membrana compacta de doble acción modelo CM-H-C262 de marca ABEL, sin sellos, auto-preparada y capaz de trabajar en seco. Dependiendo de la presión de descarga y otras condiciones operativas, la capacidad de la bomba puede ser ajustada con una velocidad de manejo variable.

TABLA 31
CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA DE IMPULSIÓN

Configuración de la Bomba:	Doble Actuante
Brida de Succión:	3.0"
Brida de Descarga:	2.5"
Energía Requerida:	5 HP ⁵
Motor Requerido:	5 HP
Velocidad del Motor:	1800 RPM
Peso de la Bomba sin motor:	650 Kg

⁵ Tolerancias Estándar: Capacidad +/- 2.5 %, Presión de descarga +/- 4 %, Energía Requerida +/- 4 %

TABLA 32

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE LA BOMBA

Extremo de la bomba	
Cobertura de carcaza	Hierro Nodular
Membranas Moldeadas	Neopreno
Cubiertas de la válvula de bola:	Hierro Nodular
Válvula de bola:	Neopreno con alma de acero
Sellos estáticos:	Buna-N
Interruptor de pulsación de descarga:	Acero

Extremo de la transmisión:	
Cubierta del Cilindro:	Fundición de Hierro
Revestimiento del Cilindro:	Bronce
Reservorio Hidráulico:	Fundición de Hierro
Pistón:	Bronce/Acero Inoxidable
Sellos del Pistón:	Tejido reforzado con Buna-N
Vástago del Pistón:	Acero Inoxidable
Válvulas de Control:	Bronce/Acero Inoxidable
Fluido Hidráulico:	Aceite hidráulico/Agua/Emulsión
Carcasa de caja de engranajes:	Fundición de Hierro
Componentes internos de la caja de engranajes:	Hierro Nodular/Acero endurecido

La bomba esta provista de un sistema de control el cual consiste de una válvula de compensación, la cual provee de fluido hidráulico a la carcasa del cilindro desde el reservorio hidráulico, una válvula de alivio de presión la que regresa el fluido hidráulico



al reservorio desde la carcaza a una determinada y ajustable presión. El fluido hidráulico puede ser aceite o una emulsión con agua.

Cada carcaza de las bombas esta provista con dos membranas moldeadas por cada carcaza del diafragma, y un control visual de membrana el cual indica si falla la misma. El interruptor de pulsación esta diseñado para pulsaciones residuales de +/- 5 %.

La conexión entre el motor y la bomba es a través de una correa de impulsión tipo V. La correa de impulsión tipo V esta encerrada por un protector que cumple los estándares OSHA.

La conexión entre el motor y la bomba es a través de una correa de impulsión tipo V. La correa de impulsión tipo V esta encerrada por un protector que cumple los estándares OSHA.

La bomba posee una eficiencia volumétrica del 95% para agua.

Accionada en forma directa por medio de acople flexible por un motor eléctrico trifásico de 5 HP a 1800 RPM 230/460 V, 60 Hz tipo TEFC a prueba de explosión. La unidad va montada sobre base común construida en viga de acero con sistema antivibratorio.

4.5. Diseño De La Estación De Bombeo

La estación de bombeo constará de tres bombas ABEL, modelo CM-H-C262 para las operaciones de impulsión a los hornos, una para cada horno y una bomba idéntica en espera (stand-by). Dichas bombas, tres en total, estarán conectadas en paralelo y solo dos de ellas trabajarán a la vez.

ACCESORIOS MECÁNICOS

Como se mencionaba anteriormente en este capítulo, la estación de recepción constará de un filtro de doble canasta, con malla de tamaño de rejilla No 4, permitiendo que sean descartadas todas las partículas mayores a 5 mm, que es el tamaño máximo de partículas que aceptan las bombas.

Se instalarán un número de diez válvulas de cierre rápido tal y como se detalla a continuación:

- Una válvula antes del filtro.
- Una válvula después del filtro.
- Una válvula antes de la succión de cada bomba. Totalizan tres válvulas.
- Una válvula después de la descarga de cada bomba. Totalizan tres válvulas.



- Una válvula a la llegada a la lanza de inyección a los hornos. Totalizan dos válvulas.

Se instalarán un número de tres válvulas cheque tal y como se detalla a continuación:

- 1 válvula después de la descarga de cada bomba.
Totalizan tres válvulas.

COMPRESOR DE AIRE:

Se selecciono un compresor, que suplirá la demanda de aire al sistema. El modelo es el GA55-125 WORK PLACE de la marca ATLAS COPCO, rotativo de tornillo, perfil asimétrico de una sola etapa, con inyección de aceite y refrigerado por aire. Tiene pocas piezas móviles, cualidad que reduce al mínimo la rutina de servicio y sustitución de repuestos. Componentes excelentemente dispuestos, que hacen más rápido el mantenimiento, reduciendo el tiempo de paralización del equipo.

Características Técnicas Del Compresor:

- Gabinete metálico silencioso 67 dB, medido a un metro.
- Post enfriador de aire.
- Sistema electronikón para monitorización y visualización.



- Arrancador estrella triángulo
- Separador de humedad con purga automática.
- Separador de aceite garantizando menos de 2 ppm. de aceite en el aire suministrado.
- Accionamiento motor compresor por acople directo
- Filtro de aire de 2 etapas
- Presión Máxima de trabajo: 9.1 bares, 132 psig.
- Aire libre suministrado: 153 l/s.
- Motor eléctrico: 55 KW, 75 HP
- Voltaje: 220VAC.

Se ha considerado instalar 2 compresores en cascada a fin de prevenir la falta de suministro de aire en caso de falla del compresor principal del sistema.

INSTRUMENTOS ELÉCTRICOS Y SENSORES.

Las válvulas solenoides y los interruptores de flujo deberán instalarse en la salida de los tanques, en la entrada de las bombas de impulsión y a la salida de las bombas en el sistema en paralelo, totalizando un número de ocho válvulas y ocho interruptores. Deberán estar diseñados para actuar ante la presencia o ausencia de fluido en la tubería. El flujo nominal de combustible alternativo que atravesará esta parte del proceso

será de 20 GPM; el interruptor de flujo deberá enviar una señal de cierre al momento de iniciar la descarga desde el tanque y deberá desactivarse ante la ausencia de fluido.

Un interruptor de presión diferencial deberá ser instalado en el filtro, y se empleará para determinar una obstrucción del paso de fluido a través del mismo, en función de la diferencia de presión que se presentaría en este caso entre la entrada y salida del filtro. La cubierta debe ser metálica y a prueba de explosión. Las partes expuestas al proceso deben ser de acero inoxidable 316. La presión diferencial especificada para la operación de este instrumento debe ser 0.3 bar, entre la entrada y salida del filtro.



CAPITULO 5

5. ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DE LA EJECUCIÓN DE LA OBRA

Para realizar un análisis de factibilidad de la ejecución de la obra, se ha elaborado un presupuesto referencial y luego la programación de la ejecución de la misma.

El presupuesto referencial nos ayuda a visualizar el proyecto desde el punto de factibilidad económica directa, donde los precios de los materiales y los equipos, así como su montaje son comparados con la tasa interna de retorno proyectada⁶ de 48.1%.

Se presentará en detalle el componente hidráulico, objeto de esta tesis; no obstante, se presenta valores referenciales de los componentes eléctricos, civiles y mecánicos.

⁶ TESIS DE GRADO DE DENISE CAJAS, "Estudio de Factibilidad para el Co-procesamiento de las Aguas de Sentina en Plantas Cementeras".

5.1. Presupuesto Referencial De La Obra

Se ha elaborado un presupuesto referencial para la implementación de esta obra. El mismo está hecho usando cotizaciones recibidas tanto del mercado nacional como del internacional.

Utilizando los planos de diseño de la estación de bombeo encontrados en los anexos de esta tesis, se puede inventariar la cantidad de elementos que la conforman, así como los accesorios del sistema (codos, uniones T., etc.)

Las longitudes de las tuberías fueron diseñadas a partir de la ubicación de la estación de bombeo. Usando los planos de la planta cementera y los recorridos por el sitio de implantación, se pudo escoger el camino más adecuado para las tuberías de alimentación del combustible alternativo a los hornos.

En este estudio no se incluyen los presupuestos referenciales detallados para las otras actividades planificadas como la obra eléctrica y civil, por mencionar unas. Aun así, se menciona un resumen de todos los presupuestos elaborados, con el afán de realizar un análisis de factibilidad económica de todo el proyecto.

TABLA 33

PRESUPUESTO REFERENCIAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA
ESTACIÓN DE BOMBEO DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS.

ITE M	CANTID AD	UNID AD	DESCRIPCIÓN	COSTO UNITARIO ⁷ (USD)	COSTO (USD)
POR CONCEPTO DE SUMINISTRO DE MATERIALES					
Sistema de Bombeo					
A	2	u	Bomba de Membrana Hidráulica ABEL modelo HMD-50-0500	58 554.87	117 109.74
	3	u	Bomba de Membrana Compacta modelo CM-H-C262	38 003.76	114 011.28
	37	u	Abrazadera U para tubo 4"	7.11	263.07
	42	u	Abrazadera para tubo 2"	2.2	92.4
	2	u	Filtros Doble Canasta	8 522.04	17 044.08
	1	u	Ángulo AL 50x3	15.86	15.86
	1	u	Ángulo AL 75x6	56.21	56.21
	3	u	Unión T 4" Ced40	18.71	56.13
	10	u	Unión T 1 1/4" Ced40	3.55	35.5
	5	u	Unión T 2" Ced 40	5.8	29
	1	u	Reducción de 2" a 1 1/2 a 1 1/4"	3.88	3.88
	2	u	Unión T 4"-4"-2" Ced40	24.52	49.04
	13	u	Codo 90° 4" Ced 40	7.48	97.24
	40	u	Codo 90° 2" Ced 40	1.06	42.4
	15	u	Brida desliz. 150 4"	14.09	211.35
	70	u	Brida desliz. 300 2"	3	210
	75	m	Tubo de 4" Ced. 40	26.97	2 022.75
	400	m	Tubo de 2" Ced. 40	6.42	2 568.00
	3	u	Válvula Solenoide Clase 150 4"	1 079.00	3 237.00
	7	u	Válvula de cierre rápido Clase 150 4"	700	4 900.00
			Unión Flexible 4" construida en Neopreno marca armiflex		
	1	u		180	180
	2	u	Válvula Cheque Clase 150 4"	190	380
			Manómetro Digital con carátula de 2 1/2" con transductor de lógico a analógico		
	15	u		300	4 500.00
	2	u	Presostato con bombilla de Hg marca Honeywell 0-150 psi	250	500

⁷ valores referenciales a Diciembre de 2006

ITE M.	CANTID AD	UNID AD	DESCRIPCION	COSTO UNITARIO (USD)	COSTO (USD)			
POR CONCEPTO DE SUMINISTRO DE MATERIALES								
A	12	u	Válvula Solenoide Clase 300 2"	635	7 620.00			
	12	u	Válvula de cierre rápido Clase 150 2"	245	2 940.00			
	10	u	Válvula de cierre rápido Clase 300 2"	1 081.00	10 810.00			
	3	u	Válvula Cheque Clase 300 2"	94	282			
	1	u	Flujómetro Coriolis promass 80I26 DN 25 FB	13 418.57	13 418.57			
Sistema de Pinturas								
	8	Lt	Sigmacover HS Zinc Primer rb.	16.35	130.8			
	8	Lt	Sigmacover ST RAL 8001 brown	11.15	89.2			
	8	Lt	Sigma Thinner 91-92	3.54	28.32			
	SUBTOTAL A				302 933.82			
POR CONCEPTO DE INSTALACIÓN								
Preparación Superficial y Aplicación de Pintura								
B	29.35	m2	Limpieza manual grado SSPC - SP3, Área Exterior	1.5	44.03			
	88.05	m2	Aplicación de 3 capas de pintura al exterior de los tanques	1.5	132.08			
Sistema de bombeo								
B	5	u	Calificación de Soldadores	50	250			
	1	GAL	Ensayos No Destructivos (Radiografía, Inspección Visual)	2 500.00	2 500.00			
	1	GAL	Transporte de Material	200	200			
	1	GAL	Montaje de tuberías	65 800.00	65 800.00			
	30	Día	Montaje del sistema de bombeo	50	1 500.00			
	10	Día	Alquiler de Grúa	400	4 000.00			
SUBTOTAL B					74 426.10			
C	VALOR TOTAL		A+B		377 359.92			

TABLA 34

PRESUPUESTO REFERENCIAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA
 INFRAESTRUCTURA COMPLETA PARA EL BOMBEO DE
 COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

ITEM	DESCRIPCIÓN	COSTO TOTAL USD
A	Obras Civiles: Remoción de terreno, cimentación, construcción del cubeto y áreas aledañas	109963.14
B	Obras Hidráulicas: Estación de bombeo para la recepción e impulsión e instalación de las tuberías	377359.92
C	Obras Neumáticas: Instalación de compresores y tuberías para suministro de aire a los hornos	62902.16
D	Obras Mecánicas: Construcción de los tanques de Combustibles Alternativos líquidos, casetas de bombeo y estructuras de soporte	151037.32
E	Obras Eléctricas e Instrumentación: Acometida eléctrica, puesta a tierra, iluminación y control	336620.58
F	Sistema Contra Incendios: Construcción de Estación de bombeo, tanque de almacenamiento de agua, montaje de rociadores para manejo de agua y espuma, accesorios y acometida eléctrica	350866.55
G	Inertización: Instalación de infraestructura completa para suministro de N2 a tanques de líquidos y tanqueros de abastecimiento (suministrado por AGA)	19 730.00
H	TOTAL COSTOS DIRECTOS	A+B+C+D+E+F+G
I	COSTOS INDIRECTOS	20% H
J	VALOR TOTAL	H+I
K	12% IVA	
L	VALOR TOTAL DE LA PROPUESTA	1892996.67



Se procederá a analizar la factibilidad del proyecto, dentro de 5 ejes referenciales que servirán para conocer si el proyecto es viable y la subsiguiente toma de decisión, desde los siguientes puntos:

1. Económico
2. Ambiental
3. Legal
4. Energético
5. Usuario

ANÁLISIS DENTRO DEL PUNTO DE VISTA ECONÓMICO

En estudios anteriores dentro del ámbito de este proyecto⁸, se demuestra que la tasa de retorno es del 48.1% en un plazo no mayor a 5 años. En la Tabla que se presenta a continuación, se detalla el análisis realizado sobre la tasa de retorno:

⁸ TESIS DE GRADO DE DENISE CAJAS, "Estudio de Factibilidad para el Co-procesamiento de las Aguas de Sentina en Plantas Cementeras".

TABLA 35
PERIODO ESTÁTICO DE RETORNO

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inversión total del proyecto	-72										
Flujo de caja luego de impuestos		-17	7	13	30	57	99	113	110	116	144
Payback acum., con impuestos	-72	-89	-80	-68	-37	20	119	232	342	458	602
Año del payback del proyecto		0	0	0	0	1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Porción en meses		-50	120	76	27	8	-2	-13	-25	-36	-38

FUENTE: TESIS DE GRADO DE DENISE CAJAS, "Estudio de Factibilidad para el Co-procesamiento de las Aguas de Sentina en Plantas Cementeras"

Como se puede apreciar, la empresa estaría dispuesta a invertir 1 892 996.67 USD, considerando que anualmente revertirá en ingresos un valor aproximado de 378 599.34 USD. Para lograr este objetivo, la empresa tendrá que generar los recursos equivalentes aproximadamente a 5 000 Toneladas/Año de este producto.

Debido a que las proyecciones de captación del mercado de co-procesamiento de desechos líquidos indican que para el año 2008 se estarán quemando aproximadamente 7 000 toneladas, el estudio económico indica que el proyecto es rentable y luego del plazo estimado para el retorno de la inversión, convertirse en una

importante fuente de ingreso para la empresa cementera siempre que las leyes ambientales impulsen el desarrollo de este tipo de empresas.

ANÁLISIS DENTRO DEL PUNTO DE VISTA AMBIENTAL

En nuestro país se está creando una conciencia ecológica cada vez más consolidada, más aún con los últimos acontecimientos meteorológicos que afectan al mundo entero. Esto, sumado a la necesidad de deshacerse de los desperdicios de manera segura, garantiza que el proyecto tenga una gran acogida en el aspecto técnico-ambiental.

TABLA 36

RESUMEN DE LAS EMISIONES MEDIDAS POR LAS CHIMENEAS DE LOS HORNOS VS. LÍMITES

Parámetro	Unidad	Situación de Línea Base	Con el proyecto	Límite máximo
CO	mg/Nm ³	999	822	3000
NOx	mg/Nm ³	1335	1303	1800
PST	mg/Nm ³	34.45	36.91	150
SO ₂	mg/Nm ³	202	255	800
HCl	mg/Nm ³	0.754	1.384	70
Sb+As+Se+Ni+Mn	mg/Nm ³	< 0.0229	< 0.0215	0.7
Pb+Cr+Zn	mg/Nm ³	< 0.0450	< 0.0326	0.7
Hg	mg/Nm ³	0.0034	0.0028	0.07
Cd	mg/Nm ³	< 0.0005	< 0.0003	0.07

FUENTE: TESIS DE GRADO DE DENISE CAJAS, "Estudio de Factibilidad para el Co-procesamiento de las Aguas de Sentina en Plantas Cementeras"



Al analizar esta tabla se puede verificar que las emisiones de agentes contaminantes tienden en su mayoría a disminuir con el uso de aceite quemado como combustible alternativo.

El impacto de las emisiones producidas por el hecho de quemar estos desechos en los hornos de cemento esta enmarcado dentro de los límites permisibles, como se demuestra, por lo que garantiza un entorno completamente amigable con el ambiente.

ANÁLISIS DENTRO DEL PUNTO DE VISTA LEGAL

La constitución del Ecuador garantiza a su población el derecho a vivir en un medio ambiente sano, ecológicamente equilibrado y libre de contaminación.

A continuación se presenta un resumen de algunas de las leyes relacionadas con nuestro trabajo:

TABLA 37

ALGUNAS REGULACIONES AMBIENTALES ECUATORIANAS

INSTRUMENTO	DOCUMENTO
Constitución Política de la República del Ecuador	Artículo 23 Numeral (6). Artículos 86, 87, 88, 89, 90, 91. Junio 5, 1998
Ley Reformatoria al Código Penal	R.O. No. 2 - Enero 24, 2000
Ley de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental	R. O. No. 97 - Mayo 31, 1976.
Ley de Gestión Ambiental	R. O. 245 -30 Julio, 1999.
Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental	R.O. 725 – 16 Diciembre, 2002 Legislación Ambiental Secundaria Libro VI (Título I)
Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: recurso agua	R.O. 725 – 16 Diciembre, 2002 Legislación Ambiental Secundaria Libro VI (Anexo 1)
Norma de Calidad Ambiental del Recurso	R.O. 725 – 16 Diciembre, 2002
Norma de Emisiones al Aire desde Fuentes Fijas de Combustión	R.O. 725 – 16 Diciembre, 2002 Legislación Ambiental Secundaria Libro VI (Anexo 3)
Límites Máximos Permisibles de Niveles de Ruido Ambiente para Fuentes Fijas y para Vibraciones	R.O. 725 – 16 Diciembre, 2002 Legislación Ambiental Secundaria Libro VI (Anexo 5)
Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación por Desechos Peligrosos	R.O. 725 – 16 Diciembre, 2002 Legislación Ambiental Secundaria Libro VI (Título V)
Listados Nacionales de Productos Químicos Prohibidos, peligrosos y de uso severamente restringido que se utilicen en el Ecuador	R.O. 725 – 16 Diciembre, 2002 Legislación Ambiental Secundaria Libro VI (Anexo 7)
Régimen Nacional para la Gestión de Productos Químicos Peligrosos	R.O. 725 – 16 Diciembre, 2002 Legislación Ambiental Secundaria Libro VI (Título VI)
Ley de Aguas	R. O. No. 69, Mayo 30 de 1972
Reglamento de Aplicación de la Ley de Aguas	R. O. No. 233 de 26 de enero de 1973
Ley de Hidrocarburos	R. O. No. 144 de 18 de agosto de 2000.
Reglamento Sustitutivo del Reglamento Ambiental para las Operaciones Hidrocarburíferas en el Ecuador	R. O. No. 265 – Febrero 13, 2001.

FUENTE: Estudio de Impacto Ambiental Actividades de Co-procesamiento de Residuos en Planta Cerro Blanco.
EFFICÁCITAS.

El ministerio de Medio Ambiente, debe convertirse en un órgano regulador estricto, comprometiéndose con las empresas dedicadas a la eliminación de manera segura de los desechos peligrosos, garantizando que este proyecto sea viable tanto legal como económicamente.

Los valores que conllevan la obtención de las licencias ambientales para llevar a cabo la incineración de estos desechos tienen un costo aproximado de 17 000 USD y así mismo un valor recurrente anual de aproximadamente 17 000 USD.

ANÁLISIS DENTRO DEL PUNTO DE VISTA ENERGÉTICO

Para este análisis se puede usar una tabla comparativa de los poderes caloríficos para distintos combustibles, tanto tradicionales como alternativos.

TABLA 38
PODER CALORÍFICO TÍPICO DE ALGUNOS COMBUSTIBLES Y
RESIDUOS

COMBUSTIBLE/RESIDUO	UNIDADES	PODER CALORÍFICO
Petcoke	MJ / kg	34
Carbón bituminoso	MJ/kg	24
Carbón sub-bituminoso	MJ/kg	29
Madera	MJ/kg	10
Gas Natural	MJ/m ³	43
Combustible derivado de llantas	MJ / kg	36
Combustible derivado de aceites usados	MJ / kg	43
Combustible derivado de plásticos	MJ / kg	42

FUENTE: Estudio de Impacto Ambiental Actividades de Co-procesamiento de Residuos en Planta Cerro Blanco. EFFICÁCITAS.

De esta tabla se puede observar que los combustibles alternativos provenientes de los aceites usados poseen un poder calorífico mayor que el actual combustible usado en los hornos de cemento. Esto torna el proyecto de mucho interés dado el ahorro de dinero por la sustitución de los combustibles tradicionales.

ANÁLISIS DENTRO DEL PUNTO DEL USUARIO

Para el sector portuario del Ecuador, este proyecto representa una manera ambientalmente amigable para deshacerse de sus desechos de aceites quemados, llamados agua de sentina por presentarse diluidos.



En nuestro medio no existe una mejor manera de disponer de dichos desechos, sin contaminar el medio ambiente, ya que como se comentó en capítulos anteriores, los incineradores comerciales no presentan todas las garantías para que al momento de incinerar estos desechos no se eliminen al ambiente gases de combustión de la misma manera como lo podría hacer un horno de cemento.

Si se presenta este proyecto de manera eficiente y eficaz ante sus posibles competidores, ésto haría que el mismo se torne en la alternativa preferida para la disposición de estos productos contaminantes. Si a esto se le suma un mayor control ambiental por parte del organismo regulador estatal, el proyecto se muestra mucho mas atrayente para el cliente.

Si se logra consolidar la conciencia ecológica y a esto se le suman los estatutos legales necesarios, por medio de una gestión eficiente del Ministerio de Medio Ambiente y del Congreso Nacional, se puede realizar una alianza al cien por cien entre los usuarios de los diferentes sistemas de eliminación de desechos peligrosos y las cementeras dedicadas a la disposición de los mismos por medio del co-procesamiento. Con esta alianza se puede poner en marcha un movimiento ecológico muy grande

y así con él, generar el interés de las personas por las alternativas ecológicas a la eliminación de sus desechos, además de un nicho económico de donde muchos pueden salir beneficiados.

5.2. Programación De La Obra

La programación de la obra consiste en la estimación de la duración de los trabajos a realizarse, usando un diagrama de Gantt para coordinar las obras y ejecutarlas de la manera más eficiente. Se estiman todos los contratiempos posibles, como retrasos en la importación de los equipos, como las bombas y se asume un factor de seguridad.

La obra básicamente será adjudicada a una empresa especializada en montaje y construcción metal-mecánica. Esta empresa se dedicará a la construcción de los tanques reservorios y su posterior montaje en sitio, así como el montaje de las bombas, tuberías, filtros, válvulas, compresores de aire y demás componentes del sistema. A la par del componente mecánico, hidráulico y neumático, se deben realizar los trabajos civiles, eléctricos, de sistema contra incendios y de inertización.



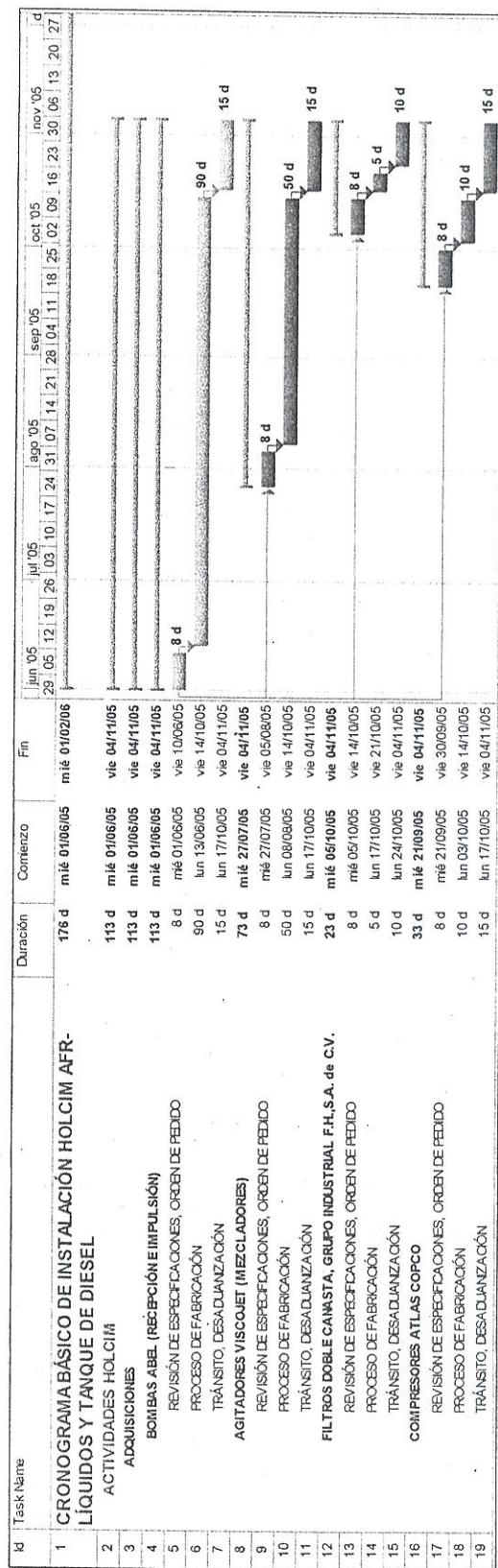


FIGURA 5.1: CRONOGRAMA DE LA EJECUCIÓN DE LA OBRA



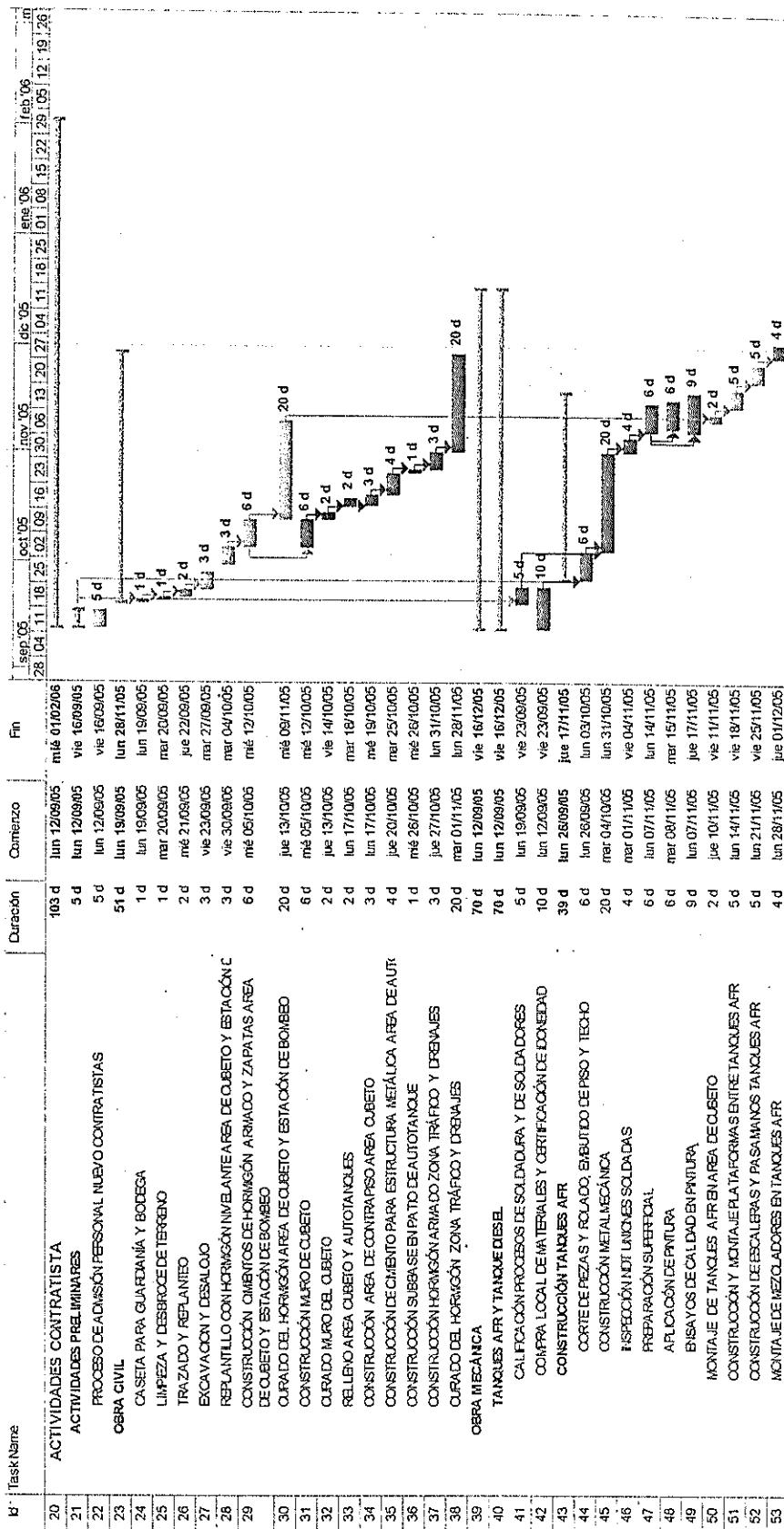


FIGURA 5.2: CRONOGRAMA DE LA EJECUCIÓN DE LA OBRA

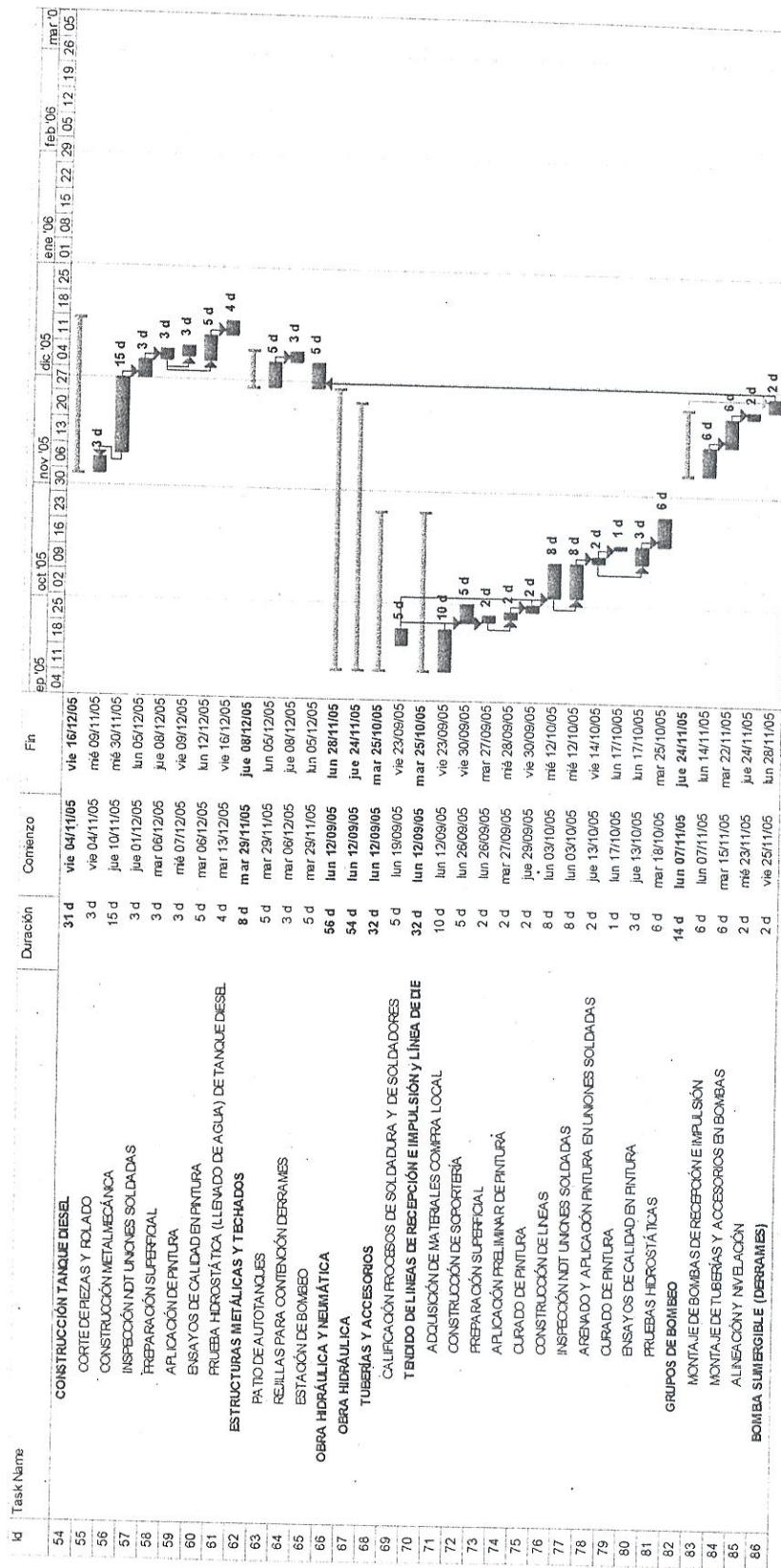


FIGURA 5.3: CRONOGRAMA DE LA EJECUCIÓN DE LA OBRA



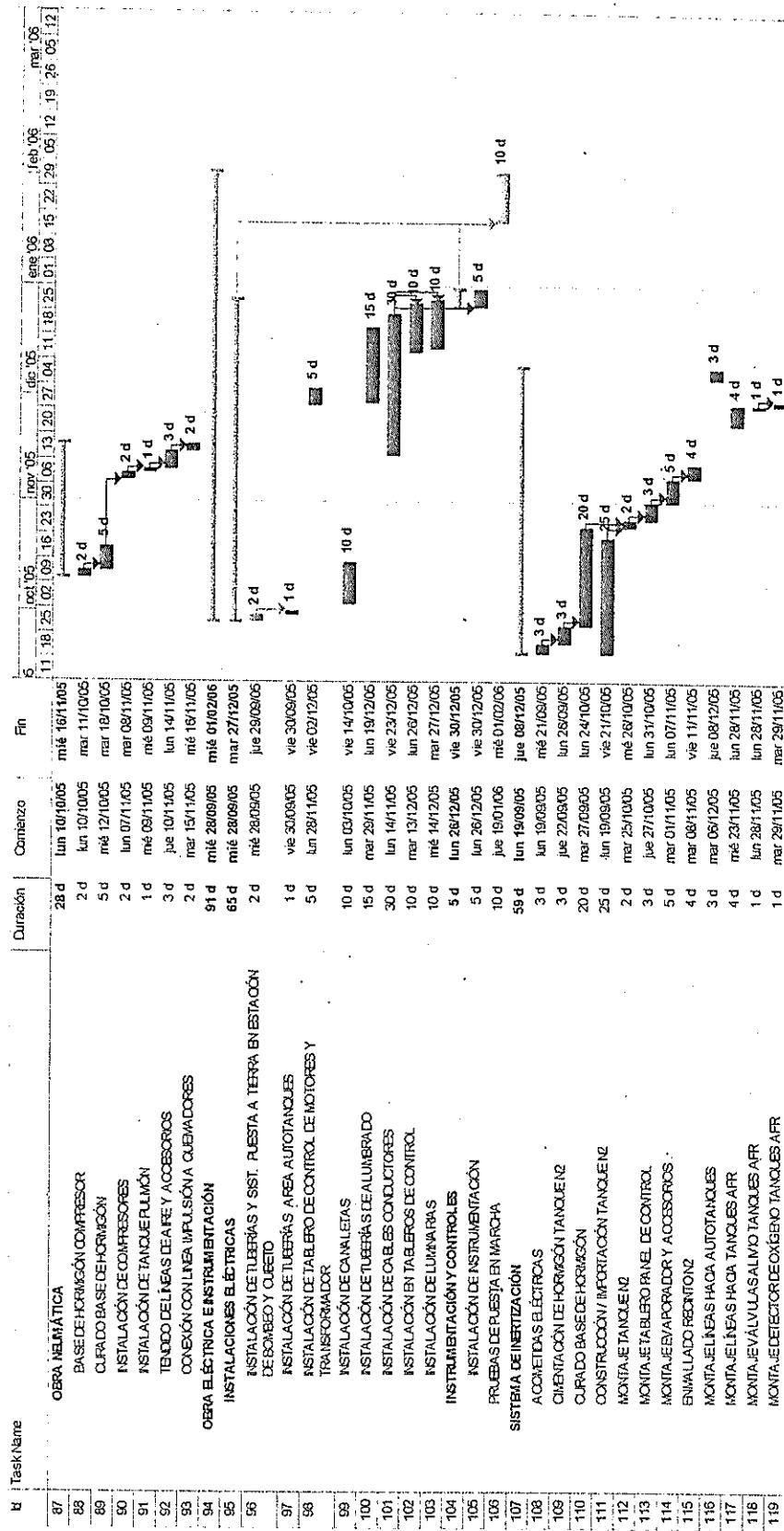


FIGURA 5.4: CRONOGRAMA DE LA EJECUCIÓN DE LA OBRA

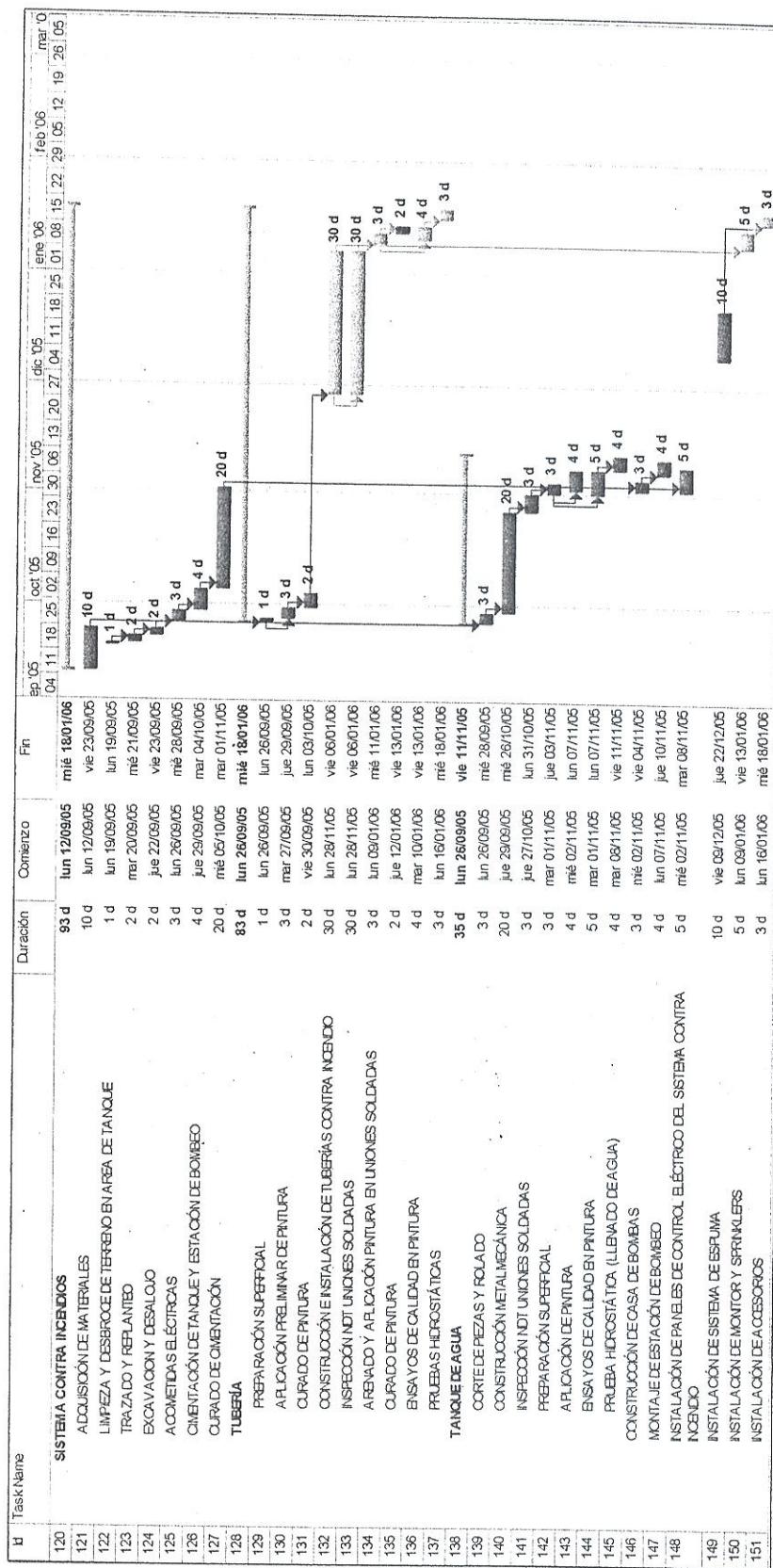


FIGURA 5.5: CRONOGRAMA DE LA EJECUCIÓN DE LA OBRA

CAPITULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

1. El sistema de bombeo resulta un diseño viable, siendo aprobado para su construcción a partir de noviembre de 2006.
2. La estación de bombeo tiene una capacidad de impulsión a los hornos de hasta 40 GPM, lo que la vuelve una estación preparada para ofrecer un servicio con miras a la expansión futura.
3. La infraestructura tiene una autonomía de 41 horas a una tasa de 20 GPM, considerando los dos tanques de almacenamiento llenos, cada uno de 94 m³.
4. El uso de bombas de membrana hidráulica para la etapa de recepción del desecho líquido, responde única y exclusivamente al hecho de manejar solventes en la mezcla de desechos, lo que físicamente expondría a otros tipos de bombas más eficientes para esta tarea a una pronta degradación.

5. El usar bombas de membrana tanto para la recepción como para la impulsión encarece la estación de bombeo en un 30%, lo que aumenta la inversión total.
6. No existe un impacto negativo en las emisiones producidas al incinerar los desechos, a 2000 °C, sobre el medio ambiente lo que lo hace ambientalmente viable.
7. Los beneficios presentados con la inclusión de este proyecto en el mercado ecuatoriano de disposición de desechos son superiores a cualquier otro proyecto de similares características, estando muy por encima de sus principales competidores.
8. Este proyecto se presenta como una alternativa generadora de trabajos, tanto para la empresa cementera como para las dedicadas al manejo y recolección de estos desechos, aportando con su parte en el crecimiento económico-ambiental del Ecuador.
9. La quema de desechos líquidos constituirá una fuente de energía alterna que puede suplir la demanda en épocas de déficit de combustibles tradicionales, como el coke usado actualmente.



6.2. Recomendaciones

1. Se debería incorporar en un futuro estudio, el análisis de una planta de pre-proceso de los desechos, donde se pueda homogeneizar las propiedades del combustible, previo a su uso final.
2. Si se decide eliminar los solventes de la mezcla de desechos, es factible ahorrar en los costos de las bombas, ya que se vuelve factible usar otros tipos de bombas de menor costo y de mayor rendimiento económico.
3. En caso de aumentarse la capacidad de producción de cemento con la incorporación de un nuevo horno, es recomendable aumentar el número de bombas para la impulsión, ya que así se puede manejar de manera individual el flujo de combustible alternativo necesario para cada horno.
4. Las leyes ecuatorianas deberían poder ejercer mas presión, no permitiendo que los grandes contaminadores del medio ambiente, como las industrias con alto índice de desechos industriales peligrosos, puedan evadir los procedimientos catalogados como ecológicos para el desecho de sus contaminantes, comprometiéndose así con el bienestar general de los ciudadanos y su medio ambiente.



5. Un estudio alterno debería analizar el uso de desechos sólidos también como combustibles y/o materias primas alternativas.



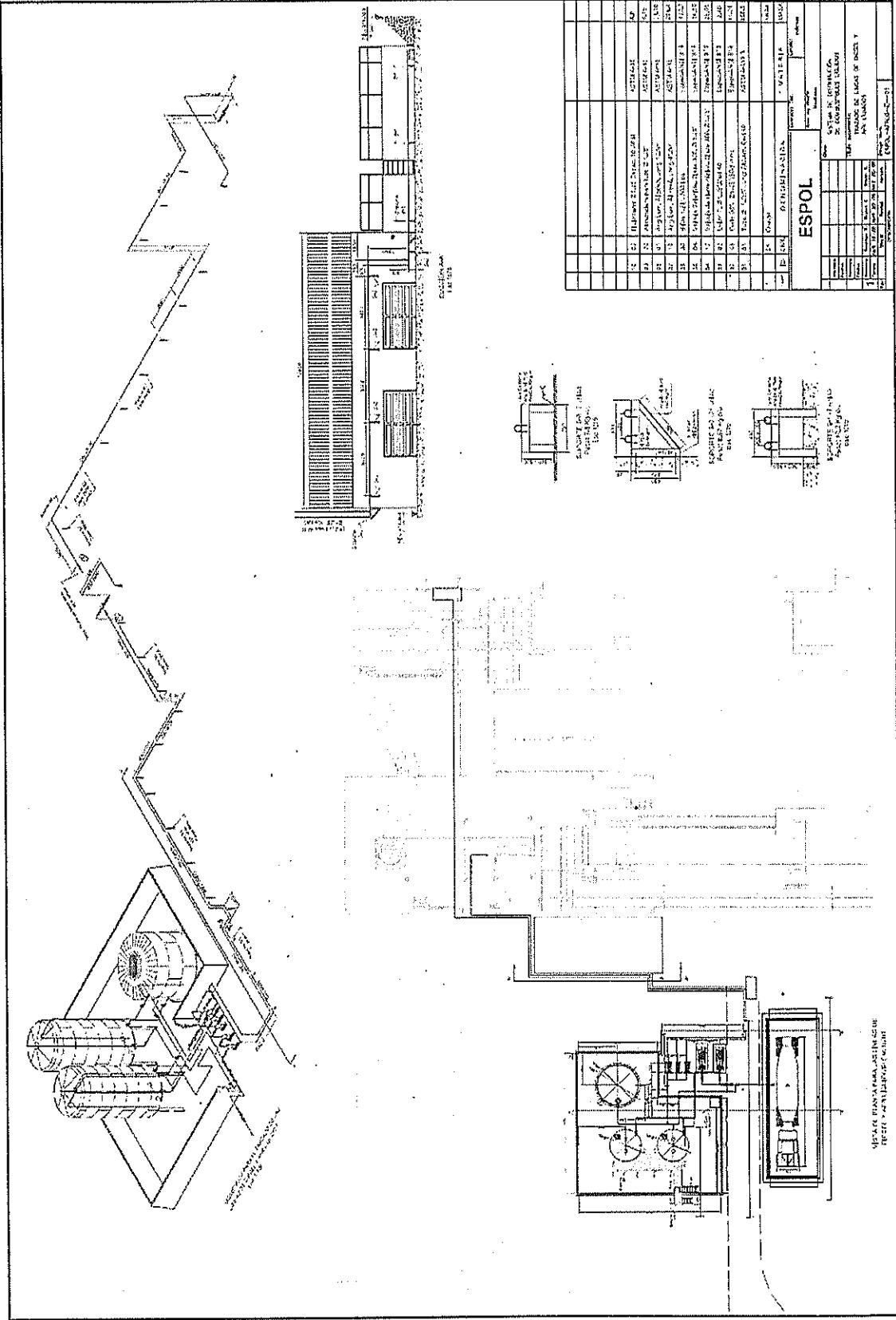
APÉNDICES



APÉNDICE A

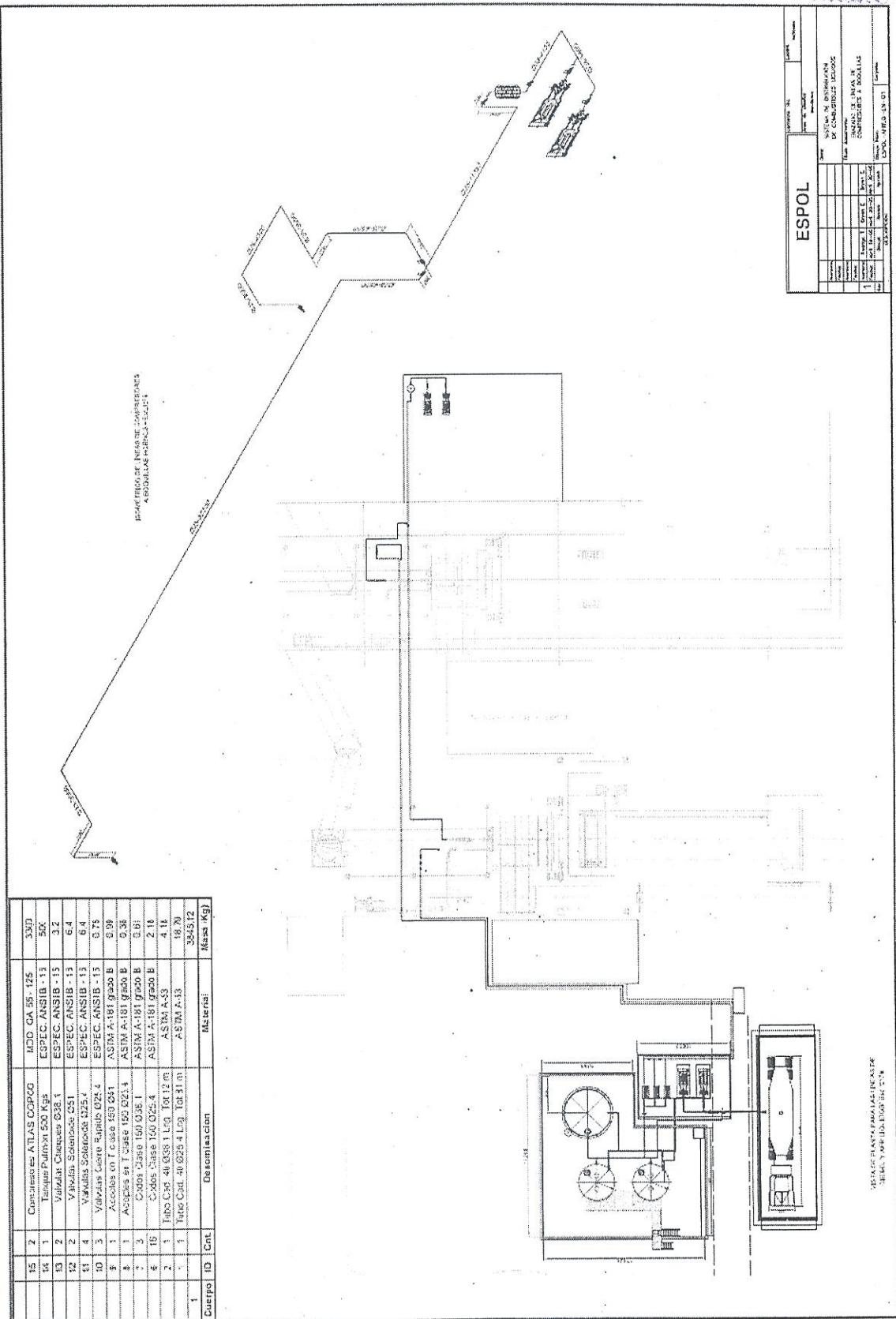
PLANOS







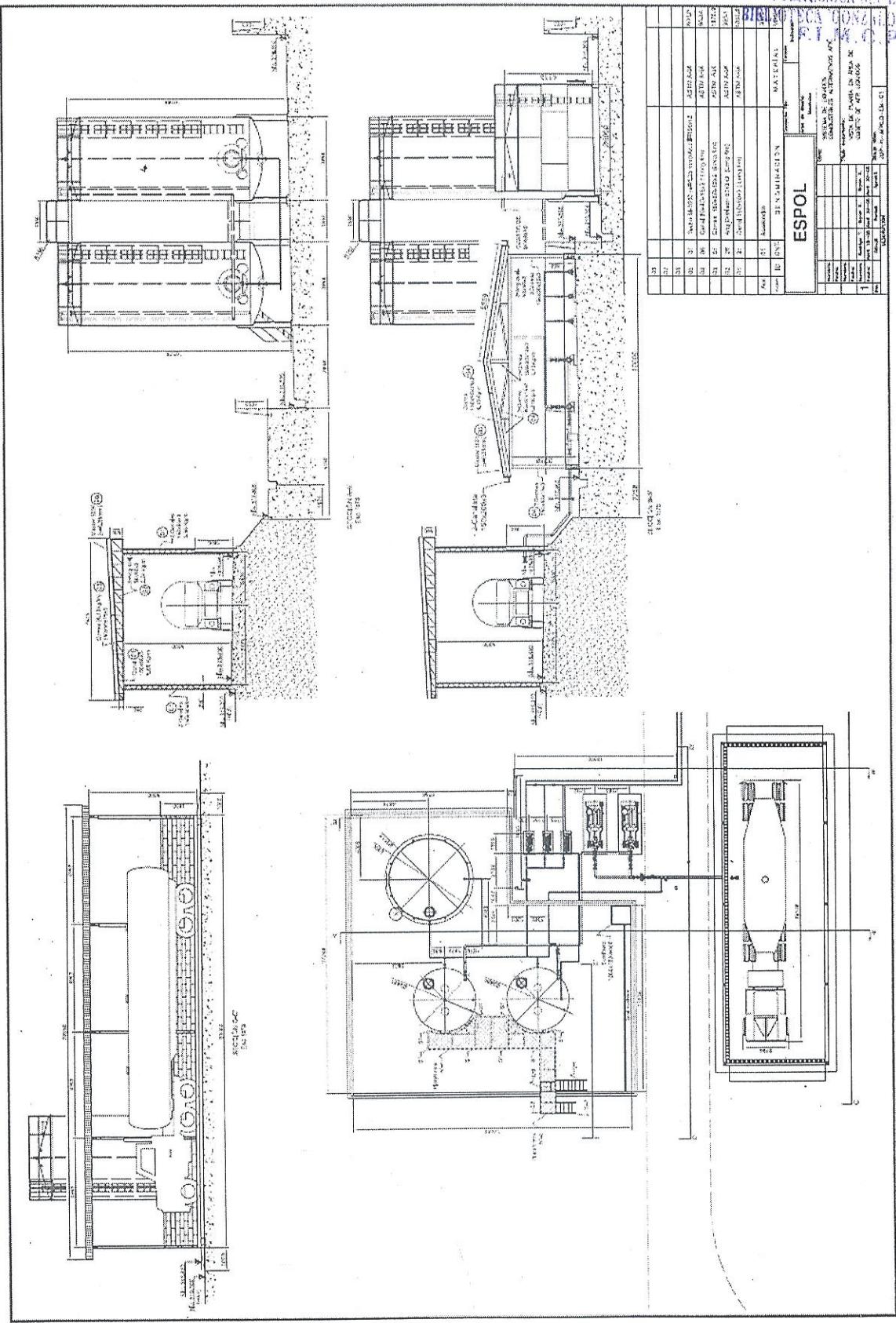
POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS"
P.T.M.C.P.

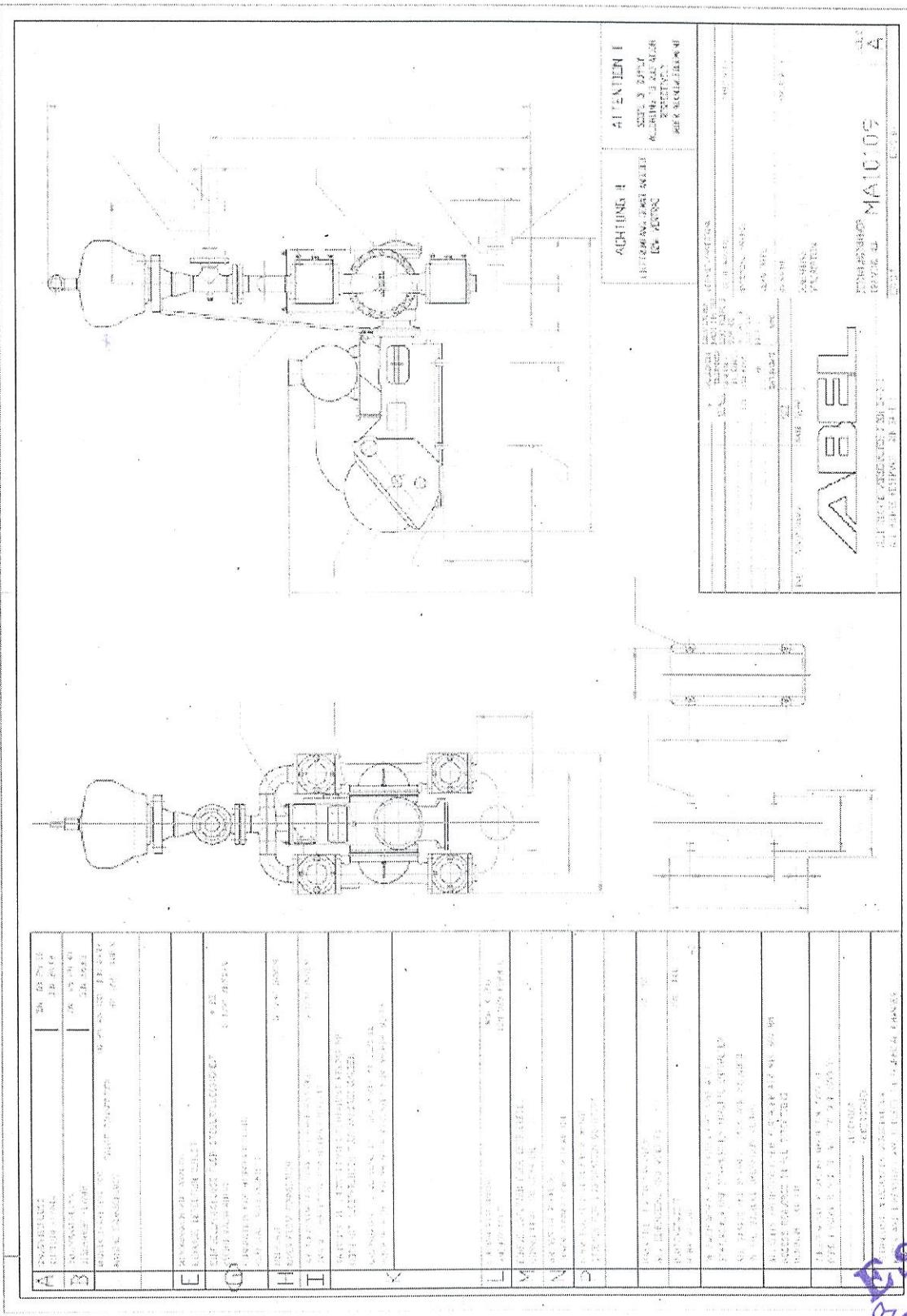




POLITECNICA DEL LITORAL

BIBLIOTECA DON ALFREDO ZEVALLOS





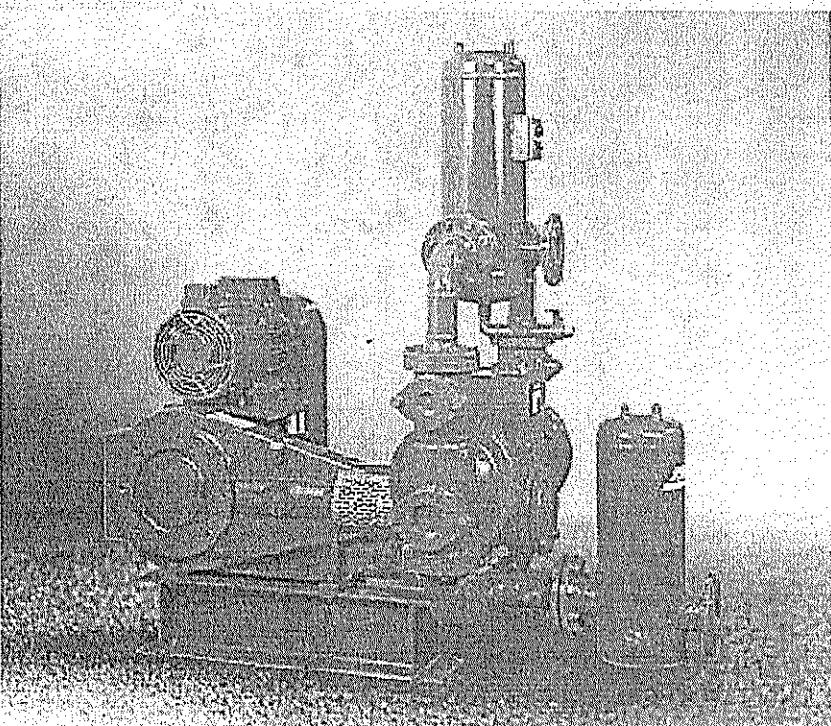
APÉNDICE B

CATÁLOGOS DE LOS EQUIPOS



Membrane Pumps
Solids Handling Pumps
High Pressure Pumps
Marine Pumps

Hydraulic Membrane Pumps Low Energy Consumption



Highly Efficient, Reliable, and Dependable

ABEL®
Pump Technology

Hydraulic Membrane Pumps
Low Energy Consumption

ABEL HM Hydraulic Membrane Pumps Capacity range up to 116 m³/h, up to 10.0 MPa

Versatile modular construction

Optimum membrane performance

ABEL HM in action for

- Filter press feed
- Sludge transfer
- Spray dryer feeding
- Furnace feeding
- Metering

Markets:

- Water and wastewater industries
- Ceramic industry
- Mining industry
- Cement industry
- Chemical and petrochemical industry
- Automobile industry

Wet-end construction:

- Nodular cast iron
- Nodular cast iron/rubber lined
- Stainless steel
- Polypropylene (PPH)
- Other materials on request

ABEL Hydraulic Membrane Pumps are equipped with a newly designed, preformed membranes and pressure-balanced membrane positioning. During the suction as well as the pressure stroke the membranes are not loaded with pressure peaks; The design ensures positive membrane positioning.

Single or double acting

ABEL HM is available in simplex single or double-acting design. In addition to the attributes of piston membrane pumps such as self-priming and dry running resistance, the pumps are characterized by high efficiency, quiet running and extended service life.

Design advantages side by side

The hydraulic side is equipped with tested safety valves to safeguard the maximum allowable pressure. The product side is equipped with a preformed membrane adapted to the operating conditions. The drive side, consisting of the reduction and eccentric gear, ensures optimum power transmission even at low speed – without external oil lubrication.

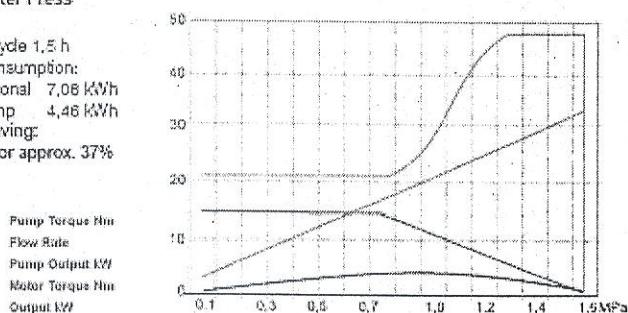
A significant reduction of the energy costs is achieved by using frequency converters in filter press operation. No heating and thus, no energy losses, occur on the hydraulic side of the pump.

The ABEL HM is compatible with current state of the art controls.

Energy Reduction by Control:

Exemple Filter Press Control:

- Filtration cycle 1,5 h
- Energy consumption:
 - conventional 7,08 kWh
 - HM-Pump 4,46 kWh
- Energy saving: 2,62 kWh or approx. 37%



Hydraulic Membrane Pumps
Low Energy Consumption

ABEL HM Hydraulic Membrane Pumps Capacity range up to 116 m³/h, up to 10.0 MPa

Versatile modular construction

Optimum membrane performance

ABEL HM in action for

- Filter press feed
- Sludge transfer
- Spray dryer feeding
- Furnace feeding
- Metering

Markets:

- Water and wastewater industries
- Ceramic industry
- Mining industry
- Cement industry
- Chemical and petrochemical industry
- Automobile industry

Wet-end construction:

- Nodular cast iron
- Nodular cast iron/rubber lined
- Stainless steel
- Polypropylene (PPH)
- Other materials on request

ABEL Hydraulic Membrane Pumps are equipped with a newly designed, preformed membranes and pressure-balanced membrane positioning. During the suction as well as the pressure stroke the membranes are not loaded with pressure peaks. The design ensures positive membrane positioning.

Single or double acting

ABEL HM is available in simplex single or double-acting design. In addition to the attributes of piston membrane pumps such as self-priming and dry running resistance, the pumps are characterized by high efficiency, quiet running and extended service life.

Design advantages side by side

The hydraulic side is equipped with tested safety valves to safeguard the maximum allowable pressure. The product side is equipped with a preformed membrane adapted to the operating conditions. The drive side, consisting of the reduction and eccentric gear, ensures optimum power transmission even at low speed – without external oil lubrication.

A significant reduction of the energy costs is achieved by using frequency converters in filter press operation. No heating and thus, no energy losses, occur on the hydraulic side of the pump.

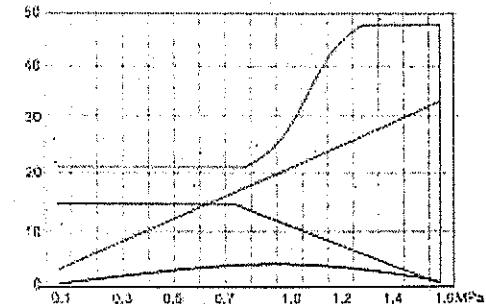
The ABEL HM is compatible with the most advanced state-of-the-art controls.

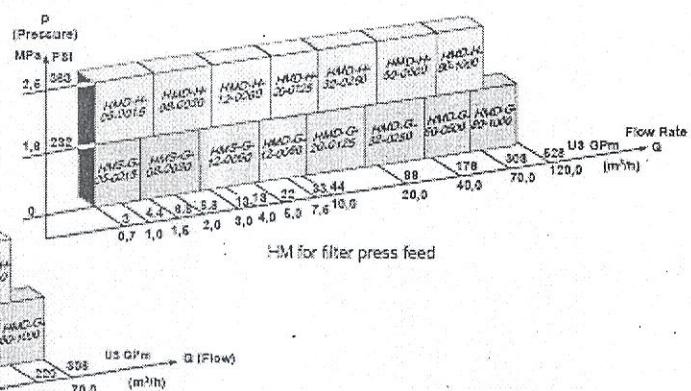
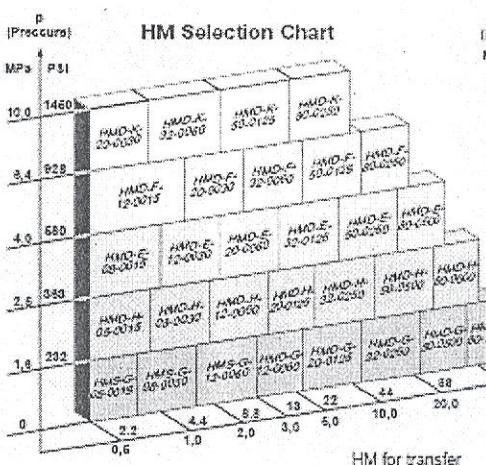
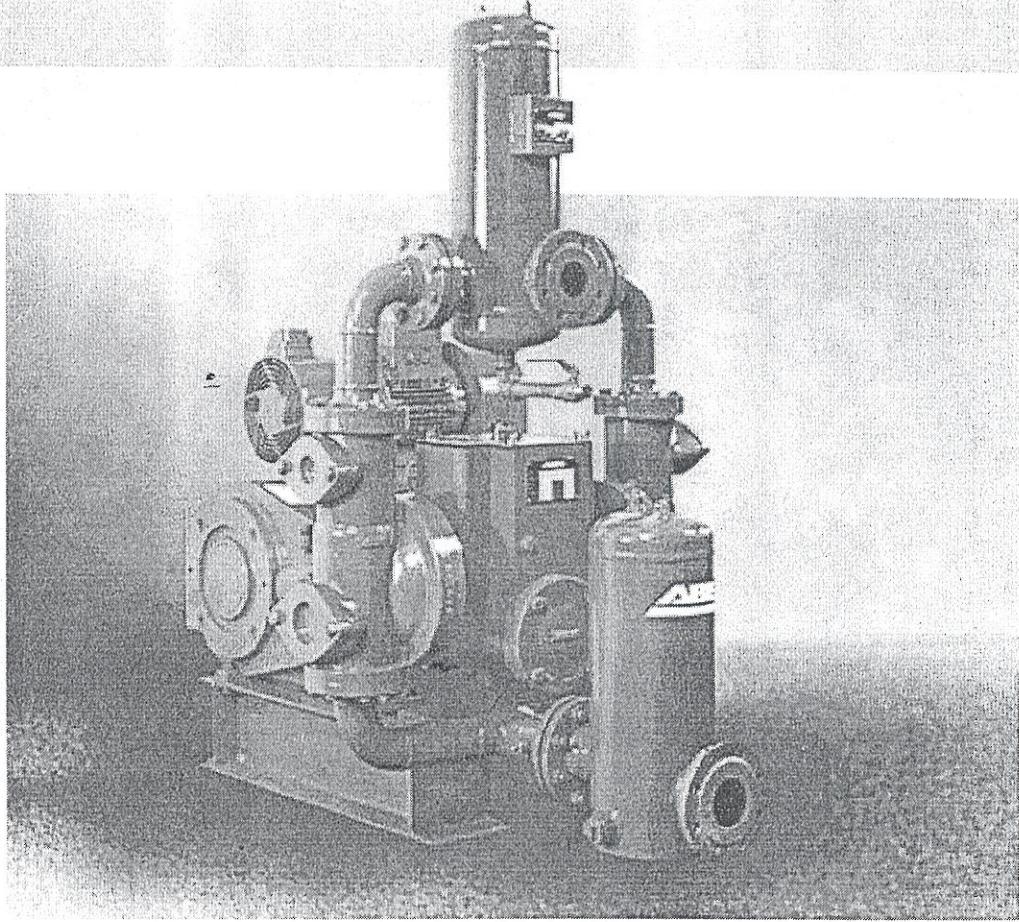
Energy Reduction by Control:

Example Filter Press Control:

- Filtration cycle 1,5 h
- Energy consumption:
 - conventional 7,06 kWh
 - HM-Pump 4,46 kWh
- Energy savings: 2,62 kWh or approx. 37%

Pump Torque Nm
Flow Rate
Pump Output kW
Motor Torque Nm
Output W

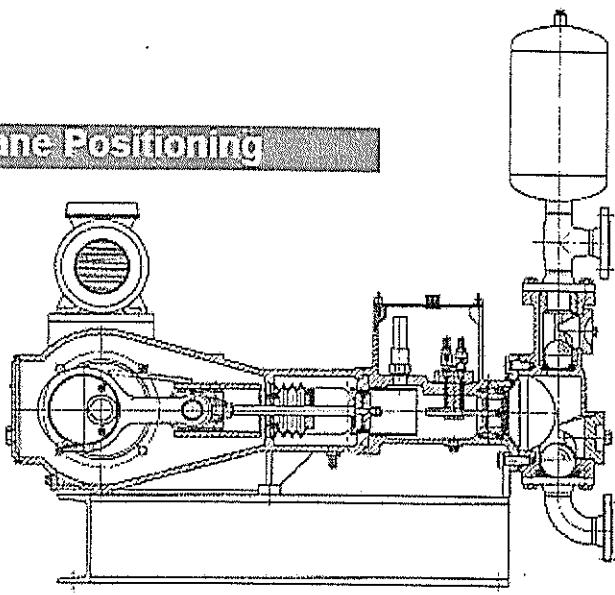




POLITECNICA DEL LITORAL
BIBLIOTECA 'GONZALO ZEVALLOS'
F.I.M.C.P.

Positive Membrane Positioning

Durable under pressure

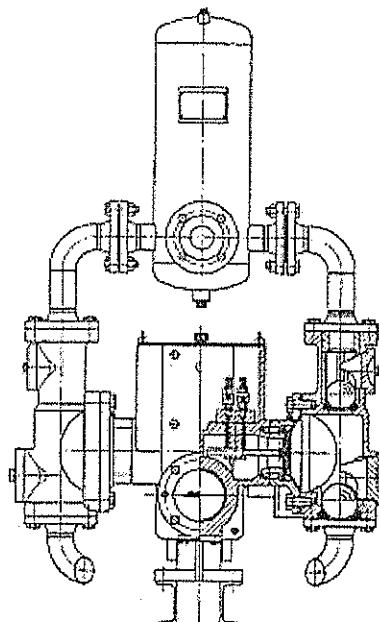


Single-acting design

Through V-belt, external transmission gear and eccentric gear the motor speed is converted into a reciprocating piston movement. The stroke volume displaced by the piston deflects the membranes.

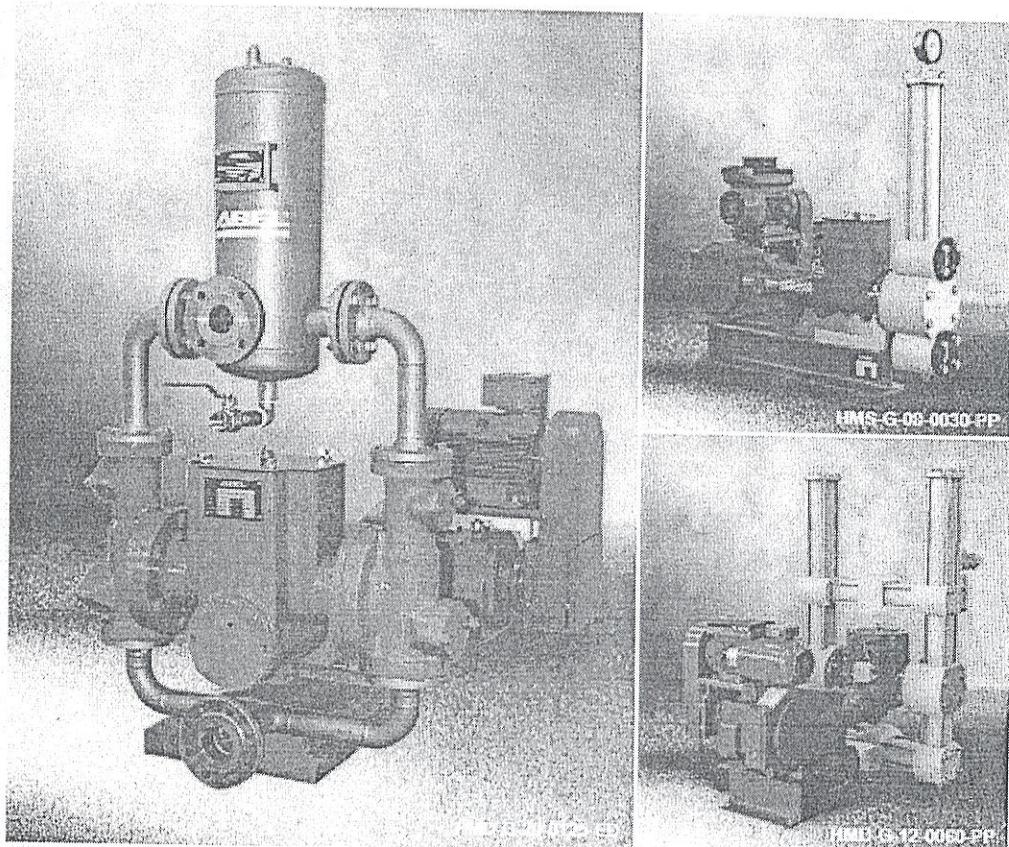
During the suction and pressure stroke the membrane positioning system monitors the controlled movement of the membranes.

ABEL HM pumps are available in single or double-acting design depending upon pump capacity.



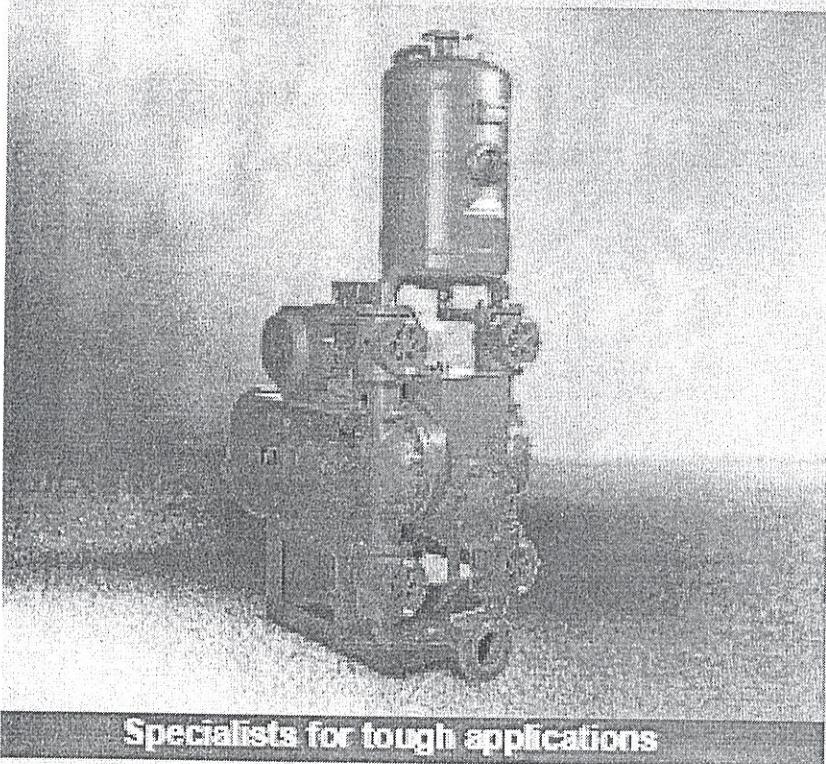
Double-acting design

Hydraulic Membrane Pumps
Low Energy Consumption



Membrane Pumps
Solids Handling Pumps
High Pressure Pumps
Master Pumps

Compact Membrane Pumps Problem solvers for difficult media



Specialists for tough applications

ABEL[®]
Pump Technology

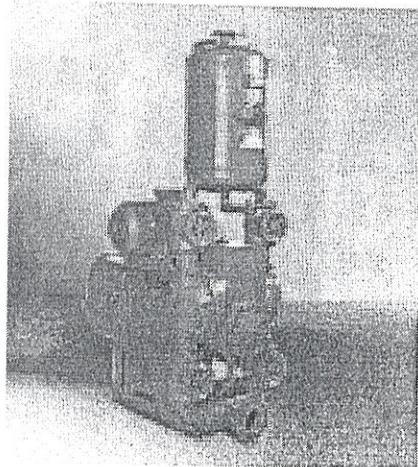
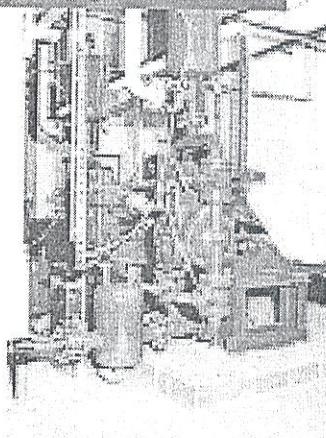


Compact Membrane Pumps
Problem solvers for difficult media

ABEL CM Compact Membrane Pumps Capacity up to 945 GPM, Pressure up to 1450 PSI

Specialists for tough applications

Stronger than ever. Reliability through double membrane technology.



ABEL CM Pumps – for difficult media

- For sludge transfer
- For filter press or spray drier feed
- For raw sewage transfer
- For transfer of abrasive, corrosive, acidic, alkaline, pigmented, viscous and granular media

The advantages of ABEL CM

- Up to 945 GPM (215 m³/h)
- Up to 1450 PSI (10.0 MPa)
- Tested design
- Optimal controllability
- Long life
- Serviceability
- Operational reliability through double membrane technology

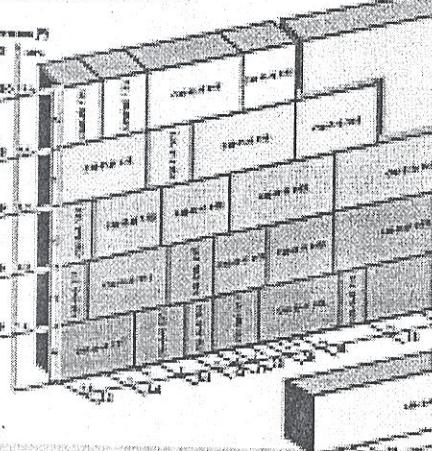
ABEL Compact Membrane Pumps are designed to handle difficult media: for all abrasive, corrosive, granular, pigmented or viscous products. Frequently they are problem solvers under delicate operating conditions.

At the beginning there are your special operating conditions. Your individual demands and goals are the measure and basis for the overall solution we develop for you. While doing so, we profit from our well-founded know-how that has grown over decades.

For difficult media and applications ABEL compact membrane pumps are the best choice. Down to the last detail they are designed to provide an optimum solution – on a permanent basis.

Enterprises belonging to the sectors of communal slurry dewatering, the ceramics, chemical, pharmaceutical, paint and automobile industry who attach utmost importance to the continuous economic efficiency, are at least equipped with ABEL Compact Membrane Pumps.

CM Selection chart

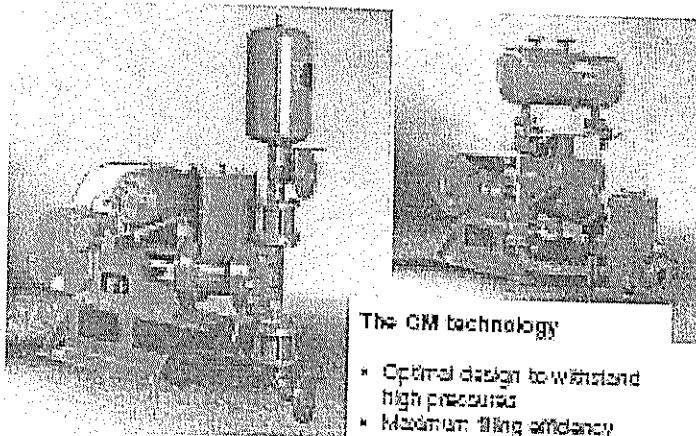


ABEL piston membrane pumps have created the reputation of the firm ABEL as a leading manufacturer of reciprocating positive displacement pumps, making them world market leaders in filter press feed (Hydraulic Institute, 1990).

ABEL Compact Membrane Pumps are simple, single or double-acting specialists for difficult media. Every day they underline their high availability and low wear - during continuous operation.

They perform in tough applications in the following industries:

- * Water and wastewater
- * Mining
- * Ceramic
- * Cement
- * Automobile



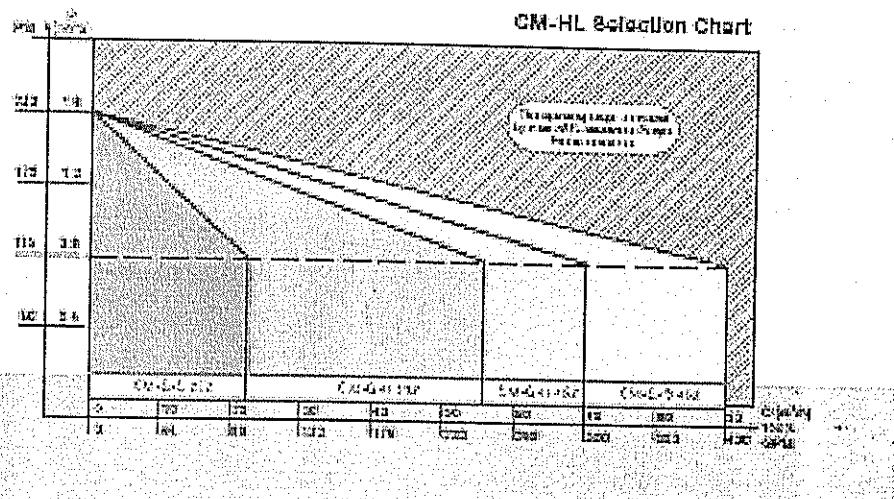
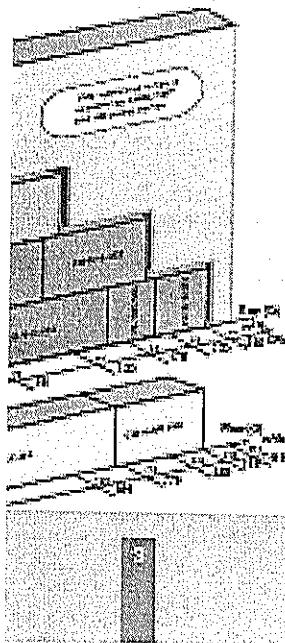
The GM technology

- * Optimal design to withstand high pressures
- * Maximum filling efficiency
- * Minimum dead spaces
- * Product side without gland packing
- * Bell or conical valves
- * Valve housing with inspection openings
- * Membrane control indicator
- * Safety valve and automatic liquid supplement in the primary circulation
- * Central pressure control during filter press operation
- * Automatic membrane position control

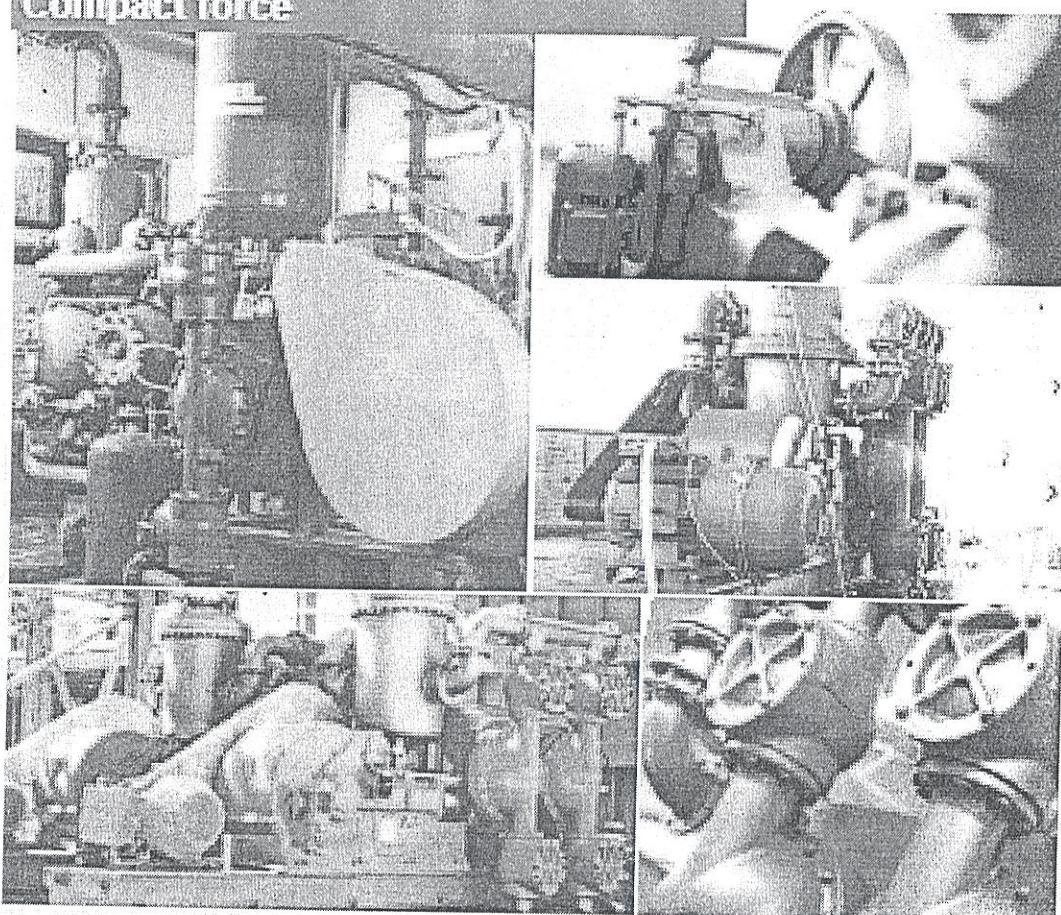
A wide range of suitable materials for all wet end parts are available

- * Nodular cast iron, also rubber lined or coated
- * Stainless steel
- * Steel casting

In line with the market demands the capacity range has once again been considerably extended and does now reach up to 260-GPM (215-m³/h).



Compact force



POLITECNICA DEL LITORAL
MURCIA CON AL OZVALDO
S. I. M. C. S.

Compact Membrane Pumps Problem solvers for difficult media

COMPACT PUMPS

ABEL Compact Membrane Pumps are unparalleled in function and quality.

Operational reliability through double membrane technology

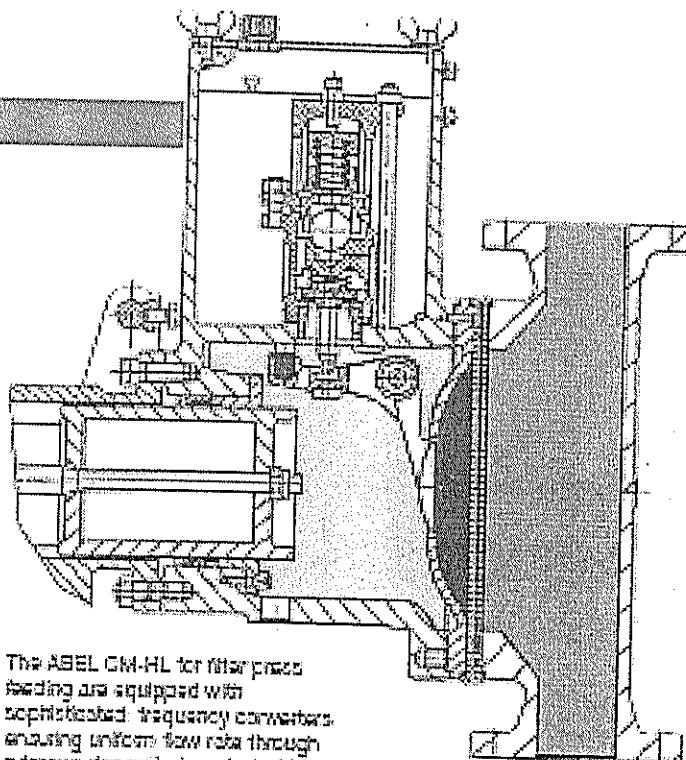
In the event the product or hydraulic medium penetrates into the intermediate space of the double membrane, it is immediately detected by the integrated control function before the product gets into the hydraulic circuit or vice versa. Alternatively an automatic alarm is activated by an electrical contact.

Valve balls for precision and durability

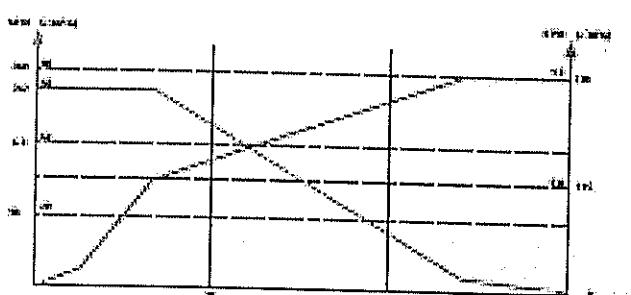
Through the combination of two soft materials ABEL Compact Membrane Pumps run smoothly. In the standard version the pumps are fitted with machine-ground valve balls of highest precision and seats made of polyurethane. Of course, many other combinations are available.

Controlled flow characteristics for feeding filter presses

The membrane stroke control by means of the control valve automatically adapts the flow rate to the throughput characteristics of the filter press. The control valve is calibrated for each application on the ABEL test stands for initiation of the final operating pressure.



The ABEL CM-HL for filter press feeding are equipped with sophisticated frequency converters ensuring uniform flow rates through a torque-dependent control which reduces energy costs.



APÉNDICE C

FORMULAS



Physical Properties of Fluids

The solution of any flow problem requires a knowledge of the physical properties of the fluid being handled. Accurate values for the properties affecting the flow of fluids . . . namely, viscosity and mass density . . . have been established by many authorities for all commonly used fluids and many of these data are presented in the various tables and charts in Appendix A.

Viscosity: Viscosity expresses the readiness with which a fluid flows when it is acted upon by an external force. The coefficient of absolute viscosity or, simply, the absolute viscosity of a fluid, is a measure of its resistance to internal deformation or shear. Melted glass is a highly viscous fluid; water is comparatively much less viscous; and the viscosity of gases is quite small compared to that of water.

Although most fluids are predictable in their viscosity, in some, the viscosity depends upon the previous working of the fluid. Printer's ink, wood pulp slurries, and catsup are examples of fluids possessing such thixotropic properties of viscosity.

Considerable confusion exists concerning the units used to express viscosity; therefore, proper units must be employed whenever substituting values of viscosity into formulas.

Dynamic or Absolute Viscosity: The coherent SI unit of dynamic viscosity is the pascal second (Pa s) which may also be expressed as the newton second per square metre (N s/m^2), or as the kilogram per metre second kg/(m s) . This unit has also been called the poiseille (P) in France but it should be noted that it is not the same as the poise (P) described below.

The poise is the corresponding unit in the CGS system of units and has the dimensions of dyne seconds per square centimetre or of grams per centimetre second. The submultiple centipoise (cP), 10^{-3} poise, is the unit most commonly used at present to express dynamic viscosity and this situation appears likely to continue for some time. For this reason, and since most handbooks and tables follow the same procedure, all viscosity data in this paper are expressed in centipoise. The relationship between pascal second and centipoise is,

$$1 \text{ Pa s} = 1 \text{ N s/m}^2 = 1 \text{ kg/(m s)} = 10^3 \text{ cP}$$

$$1 \text{ cP} = 10^{-3} \text{ Pa s}$$

In this paper the symbol μ is used for viscosity measured in centipoise and μ' for viscosity measured in pascal second units. The viscosity of water at temperature of 20°C is very nearly 1 centipoise* or 0.001 pascal seconds.

Kinematic Viscosity: This is the ratio of the dynamic viscosity to the density in the SI system; the unit of kinematic viscosity is the metre squared per second (m^2/s). The corresponding CGS unit is the stokes (St), dimensions, centimetres squared per second and the centistoke (cSt), 10^{-4} stokes, is the submultiple commonly used.

$$1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ cSt}$$

$$1 \text{ cSt} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\nu (\text{Centistokes}) = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{centipoise})$$

Factors for conversion between the SI and CGS units described above and also for Imperial units of dynamic and kinematic viscosity are given on page B-2 of Appendix B.

The measurement of the absolute viscosity of fluids (especially gases and vapours) requires elaborate equipment and considerable experimental skill. On the other hand, a rather simple instrument in the form of a tube viscometer or viscosimeter can be used for measuring the kinematic viscosity of oils and other viscous liquids. With this type of instrument the time required for a small volume of liquid to flow through an orifice is determined and the measurement of kinematic viscosity expressed in terms of seconds.

Various forms of tube viscometers are used resulting in empirical scales such as Saybolt Universal, Saybolt Furo (for very viscous liquids), Redwood No 1 and No 2 and Engler. Information on the relationships between these empirical viscosities and kinematic and dynamic viscosities in absolute units is included in Appendix B.

The ASTM standard viscosity temperature chart for liquid petroleum products, reproduced on page B-6 is used to determine the Saybolt Universal viscosity of a petroleum product at any temperature when the viscosities at two different temperatures are known. The viscosities of some of the most common fluids are given on pages A-2 to A-5. It will be noted that, with a rise in temperature, the viscosity of liquids decreases, whereas the viscosity of gases increases. The effect of pressure on the viscosity of liquids and perfect gases is so small that it is of no practical interest in most flow problems. Conversely, the viscosity of saturated, or only slightly superheated, vapours is appreciably altered by pressure changes, as indicated on page A-2 showing the viscosity of steam. Unfortunately, the data on vapours are incomplete and, in some cases, contradictory. Therefore, it is expedient when dealing with vapours other than steam to neglect the effect of pressure because of the lack of adequate data.

*Actually the viscosity of water at 20°C is 1.002 centipoise ("Handbook of Chemistry and Physics" 34th Edition 1973-4 CRC Press)

Physical Properties of Fluids — continued

Density, specific volume and specific gravity: The density of a substance is its mass per unit volume. The coherent SI unit of density is the kilogram per cubic metre (kg/m^3) and the symbol designation used in this paper is ρ (Rho).

Other commonly used metric units are:

gram per cubic centimetre (g/cm^3)	1 g/cm^3 or 1 g/ml
gram per millilitre (g/ml)	

The coherent SI unit of specific volume \tilde{V} , which is the reciprocal of density, is the cubic metre per kilogram (m^3/kg)

$$\tilde{V} = \frac{1}{\rho} \quad \rho = \frac{1}{\tilde{V}}$$

Other commonly used metric units for specific volume are:

litre per kilogram (litre/kg)	1 litre/kg or 1 dm^3/kg
cubic decimetre per kilogram (dm^3/kg)	

The variations in density and other properties of water with changes in temperature are shown on page A-6. The densities of other common liquids are shown on page A-7. Unless very high pressures are being considered the effect of pressure on the density of liquids is of no practical importance in flow problems.

The densities of gases and vapours, however, are greatly altered by pressure changes. For the so-called "perfect" gases, the density can be computed from the formula:

$$\rho = \frac{P^*}{RT} \quad \text{or} \quad \frac{10^4 P^*}{RT}$$

The individual gas constant R is equal to the universal gas constant R_0 (8314 J/kg-mol K) divided by the molecular weight M of the gas,

$$R = \frac{R_0}{M} = \frac{8314}{M} \text{ J/kg K}$$

Values of R , as well as other useful gas constants, are given on page A-8. The density of air for various conditions of temperature and pressure can be found on page A-10.

Specific volume is commonly used in steam flow computations and values are listed in the steam tables shown on pages A-13 to A-17. A chart for determining the density and specific volume of gases is given on page A-11.

Specific gravity (or relative density) is a relative measure of density. Since pressure has an insignificant effect upon the density of liquids, temperature is the only condition that must be considered in designating the basis for specific gravity. The specific gravity of a liquid is the ratio of its density at a specified temperature to that of water at some standard temperature. Usually the temperatures are the same and $60^\circ\text{F}/60^\circ\text{F}$ ($15.6^\circ\text{C}/15.6^\circ\text{C}$) is commonly used. Rounding off to $15^\circ\text{C}/15^\circ\text{C}$ does not create any significant error.

$$S = \frac{\rho_{\text{any liquid at specified temperature}}}{\rho_{\text{water at } 60^\circ\text{F} (15.6^\circ\text{C})}}$$

A hydrometer can be used to measure the specific gravity of a liquid directly. Two hydrometer scales in common use are:

API scale, used for oils.

Baumé scales. There are two kinds in use: one for liquids heavier than water and one for liquids lighter than water.

The relationships between these hydrometer scales and specific gravity are:

For oils,

$$S (60^\circ\text{F}/60^\circ\text{F}) = \frac{141.8}{131.5 + \text{deg. API}}$$

For liquids lighter than water,

$$S (60^\circ\text{F}/60^\circ\text{F}) = \frac{140}{130 + \text{deg. Baumé}}$$

For liquids heavier than water,

$$S (60^\circ\text{F}/60^\circ\text{F}) = \frac{145}{145 - \text{deg. Baumé}}$$

For converting hydrometer readings to more useful units refer to table on page B-7.

The specific gravity of gases is defined as the ratio of the molecular weight of the gas to that of air, and as the ratio of the individual gas constant of air to that of gas.

$$S_g = \frac{R(\text{air})}{R(\text{gas})} = \frac{M(\text{gas})}{M(\text{air})}$$



Physical Properties of Fluids -- continued

Density, specific volume and specific gravity: The density of a substance is its mass per unit volume. The coherent SI unit of density is the kilogram per cubic metre (kg/m^3) and the symbol designation used in this paper is ρ (Rho).

Other commonly used metric units are:

gram per cubic centimetre (g/cm^3)	1 gram ³
or	or 1 g/ml
gram per millilitre (g/ml)	= 1000 kg/m ³

The coherent SI unit of specific volume V , which is the reciprocal of density, is the cubic metre per kilogram (m^3/kg)

$$V = \frac{1}{\rho} \quad \rho = \frac{1}{V}$$

Other commonly used metric units for specific volume are:

litre per kilogram (litre/kg)	1 litre/kg
or	or 1 dm ³ /kg
cubic decimetre per kilogram (dm ³ /kg)	= 0.001 m ³ /kg

The variations in density and other properties of water with changes in temperature are shown on page A-6. The densities of other common liquids are shown on page A-7. Unless very high pressures are being considered the effect of pressure on the density of liquids is of no practical importance in flow problems.

The densities of gases and vapours, however, are greatly altered by pressure changes. For the so-called "perfect" gases, the density can be computed from the formula,

$$\rho = \frac{P'}{RT} \quad \text{or} \quad \rho = \frac{10^4 P'}{RT}$$

The individual gas constant R is equal to the universal gas constant R_0 (8314 J/kg · K) divided by the molecular weight M of the gas,

$$R = \frac{R_0}{M} = \frac{8314}{M} \text{ J/kg K}$$

Values of R , as well as other useful gas constants, are given on page A-8. The density of air for various conditions of temperature and pressure can be found on page A-10.

Specific volume is commonly used in steam flow computations and values are listed in the steam tables shown on pages A-13 to A-17. A chart for determining the density and specific volume of gases is given on page A-11.

Specific gravity (or relative density) is a relative measure of density. Since pressure has an insignificant effect upon the density of liquids, temperature is the only condition that must be considered in designating the basis for specific gravity. The specific gravity of a liquid is the ratio of its density at a specified temperature to that of water at some standard temperature. Usually the temperatures are the same and 60°F/60°C (15.6°C/15.6°C) is commonly used. Rounding off to 15°C/15°C does not create any significant error.

$$S = \frac{\rho_{\text{any liquid at}}}{\rho_{\text{water at } 60^\circ\text{F (15.6°C)}}}$$

A hydrometer can be used to measure the specific gravity of a liquid directly. Two hydrometer scales in common use are:

API scale, used for oils.

Baumé scales. There are two kinds in use: one for liquids heavier than water and one for liquids lighter than water.

The relationships between these hydrometer scales and specific gravity are:

For oils,

$$S(60^\circ\text{F}/60^\circ\text{F}) = \frac{141.5}{131.5 + \text{deg. API}}$$

For liquids lighter than water,

$$S(60^\circ\text{F}/60^\circ\text{F}) = \frac{140}{130 + \text{deg. Baumé}}$$

For liquids heavier than water,

$$S(60^\circ\text{F}/60^\circ\text{F}) = \frac{145}{145 - \text{deg. Baumé}}$$

For converting hydrometer readings to more useful units refer to table on page B-7.

The specific gravity of gases is defined as the ratio of the molecular weight of the gas to that of air, and as the ratio of the individual gas constant of air to that of gas.

$$S_g = \frac{R(\text{air})}{R(\text{gas})} = \frac{M(\text{gas})}{M(\text{air})}$$

Nature of Flow in Pipe — Laminar and Turbulent

Figure 1-1
Laminar Flow

Actual photograph of coloured filaments being carried along undisturbed by a stream of water.

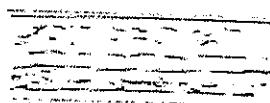


Figure 1-2
Flow in Critical Zone, Between Laminar and Transition Zones

At the critical velocity, the filaments begin to break up, indicating flow is becoming turbulent.

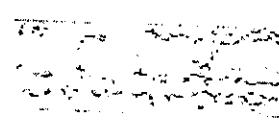


Figure 1-3
Turbulent Flow

This illustration shows the turbulence in the stream completely dispersing the coloured filaments a short distance downstream from the point of injection.

A simple experiment (illustrated above) will readily show there are two entirely different types of flow in pipe. The experiment consists of injecting small streams of a coloured fluid into a liquid flowing in a glass pipe and observing the behaviour of these coloured streams at different sections downstream from their points of injection.

If the discharge or average velocity is small, the streaks of coloured fluid flow in straight lines, as shown in Figure 1-1. As the flow rate is gradually increased, these streaks will continue to flow in straight lines until a velocity is reached when the streaks will waver and suddenly break into diffused patterns, as shown in Figure 1-2. The velocity at which this occurs is called the "critical velocity". At velocities higher than "critical", the filaments are dispersed at random throughout the main body of the fluid, as shown in Figure 1-3.

The type of flow which exists at velocities lower than "critical" is known as laminar flow and, sometimes, as viscous or streamline flow. Flow of this nature is characterized by the gliding of concentric cylindrical layers past one another in orderly fashion. Velocity of the fluid is at its maximum at the pipe axis and decreases sharply to zero at the wall.

At velocities greater than "critical", the flow is turbulent. In turbulent flow, there is an irregular random motion of fluid particles in directions transverse to the direction of the main flow. The velocity distribution in turbulent flow is more uniform across the pipe diameter than in laminar flow. Even though a turbulent motion exists throughout the greater portion of the pipe diameter, there is always a thin layer of fluid at the pipe wall . . . known as the "boundary layer" or "laminar sub-layer" . . . which is moving in laminar flow.

Mean velocity of flow: The term "velocity", unless otherwise stated, refers to the mean, or average, velocity at a given cross section, as determined by the continuity equation for steady state flow:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{w}{A \rho} = \frac{wP}{A} \quad \text{Equation 1-1}$$

(For nomenclature, see page preceding Chapter 11)
"Reasonable" velocities for use in design work are given on pages 3-6 and 3-16.

Reynolds number: The work of Osborne Reynolds has shown that the nature of flow in pipe . . . that is, whether it is laminar or turbulent . . . depends on the pipe diameter, the density and viscosity of the flowing fluid, and the velocity of flow. The numerical value of a dimensionless combination of these four variables, known as the Reynolds number, may be considered to be the ratio of the dynamic forces of max flow to the shear stress due to viscosity. Reynolds number is:

$$R_e = \frac{D_{sp}}{\mu} \quad \text{or} \quad \frac{dp}{\mu} \quad \text{Equation 1-2}$$

(other forms of this equation: page 3-2.)

For engineering purposes, flow in pipes is usually considered to be laminar if the Reynolds number is less than 2000, and turbulent if the Reynolds number is greater than 4000. Between these two values lies the "critical zone" where the flow . . . being laminar, turbulent, or in the process of change, depending upon many possible varying conditions . . . is unpredictable. Careful experimentation has shown that the laminar zone may be made to terminate at a Reynolds number as low as 1200 or extended as high as 40,000, but these conditions are not expected to be realized in ordinary practice.

Hydraulic radius: Occasionally a conduit of non-circular cross section is encountered. In calculating the Reynolds number for this condition, the equivalent diameter (four times the hydraulic radius) is substituted for the circular diameter. Use friction factors given on pages A-24 and A-25.

$$R_H = \frac{\text{cross sectional flow area}}{\text{wetted perimeter}}$$

This applies to any ordinary conduit (circular conduit not flowing full, oval, square or rectangular) but not to extremely narrow shapes such as annular or elongated openings, where width is small relative to length. In such cases, the hydraulic radius is approximately equal to one half the width of the passage.

To determine quantity of flow in following formula:

$$Q = 0.2087 d^2 \sqrt{\frac{H}{f}} \quad \text{Equation 1-3}$$

the value of d^2 is based upon an equivalent diameter of actual flow area and $4 R_H$ is substituted for D .

General Energy Equation

Bernoulli's Theorem

The Bernoulli theorem is a means of expressing the application of the law of conservation of energy to the flow of fluids in a conduit. The total energy at any particular point, above some arbitrary horizontal datum

plane, is equal to the sum of the elevation head, the pressure head, and the velocity head, as follows:

$$Z + \frac{P}{\rho g_a} + \frac{v^2}{2g_a} = H$$

If friction losses are neglected and no energy is added to, or taken from, a piping system (i.e., pumps or turbines), the total head, H , in the above equation will be a constant for any point in the fluid. However, in actual practice, losses or energy increases or decreases are encountered and must be included in the Bernoulli equation. Thus, an energy balance may be written for two points in a fluid, as shown in the example in Figure 1-4.

Note the pipe friction loss from point 1 to point 2 (h_L) may be referred to as the head loss in metres of fluid. The equation may be written as follows:

Equation 1-3

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho_1 g_a} + \frac{v_1^2}{2g_a} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho_2 g_a} + \frac{v_2^2}{2g_a} + h_L$$

All practical formulas for the flow of fluids are derived from Bernoulli's theorem, with modifications to account for losses due to friction.

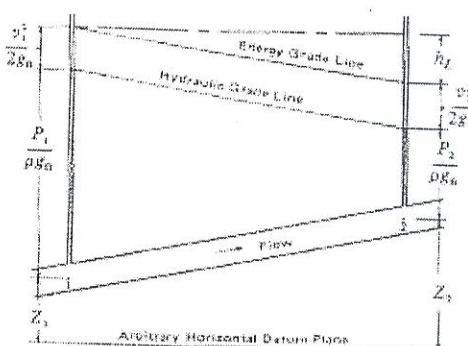


Figure 1-4
Energy Balance for Two Points in a Fluid

Adapted from *Fluid Mechanics*¹⁴ by R. A. Dodge and M. J. Thompson. Copyright 1937; McGraw-Hill Book Company, Inc.

Measurement of Pressure

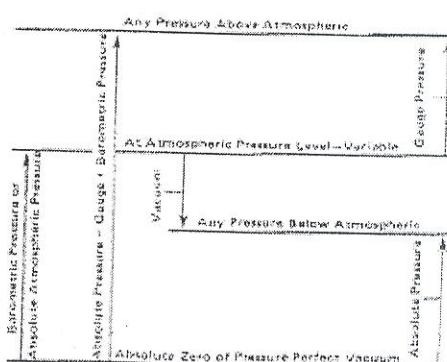


Figure 1-5
Relationship Between
Gauge and Absolute Pressures

Figure 1-5 graphically illustrates the relationship between gauge and absolute pressures. Perfect vacuum cannot exist on the surface of the earth, but it nevertheless makes a convenient datum for the measurement of pressure.

Barometric pressure is the level of the atmospheric pressure above perfect vacuum.

"Standard" atmospheric pressure is 1.013 25 bar (14.6939 lbf/in²) or 760 millimetres of mercury.

Gauge pressure is measured above atmospheric pressure, while absolute pressure always refers to perfect vacuum as a base.

Vacuum is the depression of pressure below the atmospheric level. Reference to vacuum conditions is often made by expressing the absolute pressure in terms of the height of a column of mercury or of water. Millimetre of mercury, micrometre (micron) of mercury, inch of water and inch of mercury, are some of the commonly used conventional units.

*All superior figures used as reference marks refer to the bibliography.



Darcy's Formula

General Equation for Flow of Fluids

Flow in pipe is always accompanied by friction of fluid particles rubbing against one another, and consequently, by loss of energy available for work; in other words, there must be a pressure drop in the direction of flow. If ordinary Bourdon tube pressure gauges were connected to a pipe containing a flowing fluid, as shown in Figure 1-6, gauge P_1 would indicate a higher static pressure than gauge P_2 .



Figure 1-6

The general equation for pressure drop, known as Darcy's formula and expressed in metres of fluid, is $\Delta P = fLv^2/D 2g_m$. This equation may be written to express pressure drop in newtons per square metre (pascals) by substitution of proper units, as follows:

$$\Delta P = \frac{\rho f L v^2}{2 D} \quad (\text{since } \Delta P = h_L \times \rho \times g_m) \quad \text{Equation 1-4}$$

For other forms of this equation, see page 3-2.

The Darcy equation is valid for laminar or turbulent flow of any liquid in a pipe. However, when extreme velocities occurring in a pipe cause the downstream pressure to fall to the vapour pressure of the liquid, cavitation occurs and calculated flow rates will be inaccurate. With suitable restrictions, the Darcy equation may be used when gases and vapours (compressible fluids) are being handled. These restrictions are defined on page 1-7.

Equation 1-4 gives the loss in pressure due to friction and applies to pipe of constant diameter carrying fluids of reasonably constant density in straight pipe, whether horizontal, vertical, or sloping. For inclined pipe, vertical pipe, or pipe of varying diameter, the change in pressure due to changes in elevation, velocity, and density of the fluid must be made in accordance with Bernoulli's theorem (page 1-5). For an example using this theorem, see page 4-8.

Friction factor: The Darcy formula can be rationally derived by dimensional analysis, with the exception of the friction factor, f , which must be determined experimentally. The friction factor for laminar flow conditions ($R_e < 2000$) is a function of Reynolds number only; whereas, for turbulent flow ($R_e > 4000$), it is also a function of the character of the pipe wall.

A region known as the "critical zone" occurs between Reynolds number of approximately 2000 and 4000. In this region, the flow may be either laminar or turbulent depending upon several factors; these include changes in section or direction of flow and obstructions, such as valves, in the upstream piping. The friction factor in this region is indeterminate and has lower limits based on laminar flow and upper limits based on turbulent flow conditions.

At Reynolds numbers above approximately 4000, flow

conditions again become more stable and definite friction factors can be established. This is important because it enables the engineer to determine the flow characteristics of any fluid flowing in a pipe, providing the viscosity and density at flowing conditions are known. For this reason, Equation 1-4 is recommended in preference to some of the commonly known empirical equations for the flow of water, oil, and other liquids, as well as for the flow of compressible fluids when restrictions previously mentioned are observed.

If the flow is laminar ($R_e < 2000$), the friction factor may be determined from the equation:

$$f = \frac{64}{R_e} = \frac{64 \mu^2}{D \nu \rho} \approx \frac{64 \mu}{d^2 \nu \rho}$$

If this quantity is substituted into Equation 1-4, the pressure drop in newtons per square metre is:

$$\Delta P = 32,000 \frac{\mu L v^2}{d^4} \quad \text{Equation 1-5}$$

which is Poiseuille's law for laminar flow.

When the flow is turbulent ($R_e > 4000$), the friction factor depends not only upon the Reynolds number but also upon the relative roughness, ϵ/d . . . the roughness of the pipe walls (ϵ), as compared to the diameter of the pipe (d). For very smooth pipes such as drawn brass tubing and glass, the friction factor decreases more rapidly with increasing Reynolds number than for pipe with comparatively rough walls.

Since the character of the internal surface of commercial pipe is practically independent of the diameter, the roughness of the walls has a greater effect on the friction factor in the small sizes. Consequently, pipe of small diameter will approach the very rough condition and, in general, will have higher friction factors than large pipe of the same material.

The most useful and widely accepted data of friction factors for use with the Darcy formula have been prepared by L. F. Moody¹⁴ and are reproduced on pages A-23 to A-25. Professor Moody improved upon the well-established Pigott and Kinsler¹⁵ friction factor diagram, incorporating more recent investigations and developments of many outstanding scientists.

The friction factor, f , is plotted on page A-24 on the basis of relative roughness obtained from the chart on page A-23 and the Reynolds number. The value of f is determined by horizontal projection from the intersection of the ϵ/d curve under consideration with the calculated Reynolds number to the left hand vertical scale of the chart on page A-24. Since most calculations involve

Darcy's Formula
General Equation for Flow of Fluids — continued

commercial steel or wrought iron pipe, the chart on page A-23 is furnished for a more direct solution. It should be kept in mind that these figures apply to clean new pipe.

Effect of age and use on pipe friction: Friction loss in pipe is sensitive to changes in diameter and roughness of pipe. For a given rate of flow and a fixed friction factor, the pressure drop per meter of pipe varies inversely with the fifth power of the diameter. Therefore, a 2% reduction of diameter causes an 11% increase in pressure drop; a 5% reduction of diameter increases pressure drop 29%. In

many services, the interior of pipe becomes engorged with scale, silt, tubercles or other foreign matter; thus, it is often prudent to make allowance for expected diameter changes.

Authorities³ point out that roughness may be expected to increase with use (due to corrosion or incrustation) at a rate determined by the pipe material and nature of the fluid. Ippen⁴, in discussing the effect of aging, cites a 4-inch galvanized steel pipe which had its roughness doubled and its friction factor increased 20% after three years of moderate use.