

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES DE UNA PLANTA DE CEMENTO

TUTOR ACADÉMICO: Ing. José L. Perera

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Vincencio Colmenares

Presentado Ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Bachilleres:

Carrasco O., Susana C.

Ortega G., José J.

para optar al Título
de Ingeniero Mecánico

Caracas, 2002

*A mis Padres por su inmenso
amor,
ejemplo a seguir y
guía a lo largo de mi vida,
todo se lo debo a ustedes...
A Dios por permitirme vivir...
A José mi compañero de alegrías y tristezas, TQM...
A mi familia, que siempre están presentes en mí...
Susana Carrasco*

*A mi Padre y a mi Nonno, que a pesar de no estar presentes
físicamente
sé que siempre están a mi lado...
A mi madre, lo más grande de mi vida!
A mi Nonna, por estar siempre a mi lado y ofrecirme su amor
incondicional...
A mis hermanos, Mary y Frank por ayudarme siempre...
A mi gran familia, de la cual me siento muy orgulloso de pertenecer...
A la Tuti una inmejorable compañera...
¡Los quiero a todos!
José Ortega*

AGRADECIMIENTOS

A la Ilustre Universidad Central de Venezuela, por darnos la oportunidad de estudiar y crecer profesionalmente en sus aulas y pasillos.

A nuestro tutor académico José Luis Perera, por el tiempo dedicado, su aporte y asesoría en la elaboración de este trabajo.

Al tutor industrial Ing. Vincencio Colmenares por compartir con nosotros sus experiencias y su apoyo.

Queremos agradecer la valiosa colaboración prestada por todos los trabajadores de la empresa LAFARGE-VENEZUELA, Planta Ocumare del Tuy, en especial a Luis González, por su ayuda y dedicación.

Al Ing. Juan Carrasco por su guía, apoyo y dedicación.

Al Ing. Sebastián Peña por su orientación en la elaboración de la presente Tesis de Grado.

Al Prof. Rodolfo Grullón por su valioso tiempo y aporte.

A nuestras familias por apoyarnos, alentarnos y su inmensa paciencia durante nuestra carrera, los queremos muchísimo.

Agradecemos a nuestros compañeros de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela por su valioso tiempo y aporte al desarrollo de este trabajo.

Y a todos los que de una manera u otra nos ayudaron a hacer de ésta una realidad.

RESUMEN

Carrasco O., Susana C. y Ortega G., José J.

DISEÑO DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES DE UNA PLANTA DE CEMENTO

Tutor Académico: Prof. José L. Perera. Tutor Industrial: Ing. Vincencio Colmenares. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2002. 173 pág.

Palabras claves: Agua, Bombas, Tuberías, Válvulas, Incrustaciones.

Para el presente diseño de abastecimiento de aguas efectuado en una planta de cemento, se realizó el estudio del sistema actual, considerando la calidad del agua usada. Se determinó los caudales de demanda de los equipos y del consumo humano, la presión y la temperatura de trabajo.

En base a esto se diseñó el nuevo sistema, el cual está constituido por la selección de bombas centrífugas, sistema de tuberías y su distribución, planos y accesorios. En este diseño se consideró factores de optimización de la distribución, minimización de costos de operación y mantenimiento por la reducción de equipos y componentes. Se determinó los costos del proyecto y el plan básico de mantenimiento para la mejora estudiada, con lo cual se cumple a cabalidad los objetivos planteados.

ÍNDICE GENERAL

	Página
AGRADECIMIENTOS	<i>iv</i>
RESUMEN	<i>v</i>
ÍNDICE GENERAL	<i>vi</i>
ÍNDICE DE FIGURAS	<i>xi</i>
ÍNDICE DE TABLAS	<i>xv</i>
 INTRODUCCIÓN	 1
 CAPÍTULO I – IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA	
1.1 Reseña Histórica	3
1.2 Organización de la Empresa	5
1.3 Proceso de Fabricación del Cemento (Planta Ocumare)	8
 CAPÍTULO II – DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	
2.1 Antecedentes del Problema	14
2.2 Planteamiento del Problema	15
 CAPÍTULO III – FUNDAMENTO TEÓRICO	
3.1 Teoría del Agua	16
3.1.1 Fuentes de Agua	16
• Abastecimientos Subterráneos	16
• Abastecimientos Superficiales	19
3.1.2 Análisis físico - químico del agua	20
• Dureza del agua	20
• Índice de Langelier	22
3.2 Conceptos básicos de los fluidos	22
3.2.1 Definición de fluidos	22
3.2.2 Propiedades físicas de los fluidos	23
• Viscosidad	23

	• Peso Específico	23
	• Densidad	23
	• Densidad Relativa	23
	• Presión	24
3.3	Principios de Mecánica de los Fluidos Aplicados a los Sistemas de Bombeo	25
3.3.1	Régimen permanente	25
	• Tipos de Flujo	25
	• Ecuación de la Continuidad	27
	• Ecuación de Bernoulli	27
	• Pérdidas de Carga en Tuberías	29
	• Cavitación	41
3.3.2	Régimen transitorio	45
	• Golpe de Ariete	45
	• Criterios relativos al Golpe de Ariete	47
3.4	Sistemas de Bombeo	48
3.4.1	Definición y Clasificación de las Bombas	49
	• Bombas de Desplazamiento Positivo	49
	• Bombas Rotodinámicas	49
3.4.2	Características de las Bombas Rotodinámicas	49
	• Clasificación de las Bombas Rotodinámicas	49
	• Elementos Constitutivos	50
	• Caudal o Gasto de Bombeo	51
	• Velocidad Específica	51
	• Velocidad de Rotación	52
	• Potencia Hidráulica	52
3.4.3	Potencia de los Sistemas de Bombeo	52
	• Potencia Instalada	53
3.4.4	Rendimiento	53
3.4.5	Torque	53

3.4.6	Instalación de una bomba	54
	• Tubería de Aspiración	54
	• Tubería de impulsión	57
3.4.7	Carga o Altura Dinámica Total de Bombeo	57
	• Calculo de H	59
	• Curva del Sistema	60
	• Curvas de la Bomba	61
	• Tipos de Curvas	63
3.4.8	Carga Neta Positiva de Succión Disponible (NPSH) _d	64
3.4.9	Carga Neta Positiva de Succión Requerida (NPSH) _r	64
3.4.10	Arreglos de las Bombas	64
	• Arreglos en paralelo	65
	• Arreglos en serie	65
	• Bombas Multietapas	65
3.5	Sistemas de Tuberías	65
	• Línea de aducción por gravedad	68
	• Línea de aducción por bombeo	68
3.5.1	Análisis de Redes de Tuberías. Redes Cerradas	69
	• Principios Fundamentales de Análisis de Redes Cerradas	70
	• Método de la Teoría Lineal	74
3.5.2	Válvulas	80
	• Tipos de Válvulas	80
3.6	Motores Eléctricos	85
3.6.1	Motores Corriente Alterna	86
3.6.2	Motores Corriente Continua	87
3.6.3	Acoplamientos	87
	• Tipos de Acoplamientos	88
3.7	Mediciones Hidráulicas	92
3.7.1	Medidores de Presión	93
3.7.2	Medidores de Caudal	94

3.7.3	Medidores de Niveles	96
3.8	Equipos que utilizan agua en la Planta	97
3.9	Mantenimiento	97
	• Clasificación del mantenimiento	98
3.10	Certificación ISO 14000	99

CAPÍTULO IV – MARCO METODOLÓGICO

4.1	Revisión Bibliográfica	101
4.2	Levantamiento del Sistema	101
4.3	Cálculo del Consumo	101
4.4	Análisis del Levantamiento	102
4.5	Diseño del Nuevo Sistema	102
4.6	Cotizaciones	103
4.7	Determinación de Costos	103
4.8	Plan Básico de Mantenimiento	103

CAPÍTULO V – DISEÑO DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUAS

5.1	Levantamiento del Sistema	105
5.2	Cálculo del Consumo	109
5.3	Diseño y Selección del Nuevo Sistema de Abastecimiento de Agua	113
5.3.1	Bases del Diseño	113
	• Tubería seleccionada	113
	• Instrumentación utilizada	114
5.3.2	Análisis del Levantamiento y Diseño del Sistema	114

CAPÍTULO VI – DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS

6.1	Costo por Concepto de energía	141
6.2	Costos por Concepto de Materiales, Equipos e Instalación	144

CAPÍTULO VII – PLAN BÁSICO DE MANTENIMIENTO

• Bombas Centrífugas	146
----------------------	-----

• Tuberías	150
• Válvulas	151
CAPÍTULO VIII – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
8.1 Conclusiones	152
8.2 Recomendaciones	153
BIBLIOGRAFÍA	154
ANEXOS	156

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Organigrama general de la Planta Ocumare del Tuy	5
2	Organigrama de la Gerencia de Mantenimiento	7
3	Proceso productivo del cemento en la Planta Ocumare del Tuy	9
4	Partes de un pozo profundo	20
5	Relación de la presión con la carga	25
6	Flujo laminar	26
7	Flujo turbulento	26
8	Continuidad de caudal	27
9	Balance de energía para dos puntos del fluido	28
10	Diagrama de Moody	31
11	Ensanchamiento brusco y gradual	35
12	Contracción brusca y gradual	35
13	Pérdidas en válvulas de mariposa	36
14	Pérdidas en válvulas de bola	37
15	Pérdidas en válvulas de compuerta	37
16	Pérdidas en válvulas de retención	38
17	Codos estándar	38
18	Curvas y codos de 90° con bridas o para soldar a tope	39
19	Curva de 180° de radio corto	40
20	Conexión en "T"	40
21	Entradas de tuberías	40
22	Salidas de tuberías	41
23	Onda de presión en el cierre instantáneo de una válvula	46
24	Elementos constitutivos de una bomba centrífuga	51
25	Colocación correcta de la tubería de succión de una bomba	55
26	Tuberías de aspiración	56

Figura		Página
27	Esquema representativo de la instalación de una bomba que suministra a un tanque elevado	59
28	Succión negativa	59
29	Succión positiva	60
30	Curva del sistema	60
31	Curvas de funcionamiento de una bomba	62
32	Curva tipo Steep	63
33	Curva tipo Rising	63
34	Curva tipo Flat	63
35	Presiones internas en tuberías	66
36	Red cerrada.	71
37	Red cerrada para ilustrar el uso del método de la teoría lineal.	77
38	Válvula de compuerta	81
39	Válvula de globo	82
40	Válvula check	82
41	Válvula de pie	83
42	Válvula en “Y”	83
43	Válvula de bola	84
44	Válvula de diafragma	84
45	Válvula de mariposa	84
46	Válvula de alivio	85
47	Acoplamiento del tipo de engranaje	88
48	Acoplamiento de cadena	89
49	Acoplamiento de rejilla	89
50	Acoplamiento con elemento metálico	90
51	Acoplamiento con llanta de caucho	91
52	Acoplamiento con rosquilla de caucho	91
53	Acoplamiento elemento ranurado	91

Figura		Página
54	Acoplamiento de quijada	91
55	Manómetro de tipo Bourdon	94
56	Transmisión de ondas en flujo a presión	95
57	Principio del funcionamiento de las mediciones ultrasónicas	96
58	Serie de Normas ISO 14000	100
59	Distribución de la red del sistema actual	105
60	Distribución de los tanques A, B, C y tanque principal	107
61	Nueva descarga de pozo 4 y 6	115
62	Gráfica Q vs H del sistema de pozo 4	117
63	Gráfica Q vs H del sistema de pozo 6	117
64	Direccionamiento del agua de los polines	118
65	Detalle de la ubicación de los polines	119
66	Esquema de la red cerrada de Horno 1 y Horno 2 con descarga en el Tanque de las T.A.G.	120
67	Detalle de la red cerrada en cada fundación	120
68	Detalle de la red cerrada de Horno 1	122
69	Detalle de la red cerrada de Horno 2	123
70	Detalle de la ubicación de las válvulas en la entrada del tanque T.A.G.	124
71	Sistema de control para el llenado del tanque de las T.A.G.	126
72	Canales para las tuberías de los soportes de los polines	127
73	Diagrama del sistema de alta presión de las T.A.G.	128
74	Gráfica Q vs P de retorno de la tobera marca Lechler 260.526	129
75	Representación del punto de operación de la T.A.G. 1	131
76	Representación del punto de operación de la T.A.G. 2	131

Figura		Página
77	Distribución actual y propuesta de bombas de alta presión	132
78	Ubicación actual de los anillo de alta presión T.A.G. 2	133
79	Diseño de anillos de alta presión	133
80	Tanques elevados en los silos de caliza	134
81	Curva H vs Q de bombas de la sala de bombas	136
82	Redistribución de la sala de bombas	138
83	Reubicación de las bombas en la sala de bombas	138
84	Diseño de descarga de los compresores Duplex y 608 y Crudo 1 al tanque principal	140

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1	Clasificación del nivel de dureza internacionalmente	21
2	Valor de la C de Hanzen-Williams según el artículo 130 de la Norma del M.S.A.S. para tuberías nuevas	32
3	Otros valores de la C de Hanzen-Williams	33
4	Factores de fricción para tuberías nuevas	34
5	Valores de K para codos de 90° para soldar a tope en base a la relación r/d	39
6	Valores de K para entradas de tubería a tope	41
7	Tipo de flujo según Ns	51
8	Aumento de la potencia del motor basado en la potencia de la bomba	53
9	Capacidad (m ³) de los tanques existentes en la planta	107
10	Información de los pozos y sus bombas	108
11	Áreas aproximadas ocupadas por oficinas	109
12	Número de trabajadores por departamento	110
13	Consumo de la planta	112
14	Relación entre el diámetro y la $P_{m\acute{a}x}$ de tuberías schedule 40	113
15	Datos de la tubería de pozo 4	116
16	Datos de la tubería de pozo 6	116
17	Bombas usadas actualmente por lo pozos 4 y 6	116
18	Puntos de operación de las bombas actuales de los pozos 4 y 6 con el sistema del diseño propuesto	117
19	Caudales de la red cerrada del Horno 1	122
20	Caudales de la red cerrada del Horno 2	123
21	Caudal pulverizado (Q_{pulv}) según presión en la tobera	129
22	Puntos de operación de las T.A.G. (diseño)	131
23	Accesorios del diseño del tramo sala de bombas – silos de caliza	135

Tabla		Página
24	Puntos de operación de las bombas para la distribución de agua a la planta	136
25	Costo por concepto de energía de bombeo en el sistema actual	142
26	Costo por concepto de energía de bombeo en el sistema propuesto	143
27	Costo de la instalación y materiales del nuevo diseño del abastecimiento de aguas industriales	144
28	Plan de mantenimiento para las bombas centrífugas	146
29	Posibles causas del mal funcionamiento de bombas centrífugas	148
30	Plan de mantenimiento para tuberías	150
31	Plan de mantenimiento para v álulas	151

INTRODUCCIÓN

El mejoramiento constante de la calidad de vida del ser humano ha permitido el desarrollo a gran escala de la industria de la construcción lo que ha llevado a la existencia de grandes industrias del cemento, cuyo producto constituye un elemento vital en la construcción de viviendas, edificaciones, grandes represas, vías de comunicación y otros.

Uno de estos grandes consorcios es LAFARGE, que consolida su posición cementera en más de 70 países y uno de los cuales es Venezuela, mejor conocida como Cementos la Vega, en donde tiene ubicada dos plantas: Táchira, Edo. Táchira y Ocumare del Tuy, Edo. Miranda, es aquí donde se realizó la presente Tesis.

El agua juega un papel de suma importancia en la fabricación del producto final como lo es en el sistema de enfriamiento de muchos equipos primordiales de la planta y en la pulverización en las Torres Acondicionadoras de Gases para reducir la contaminación del proceso al ambiente.

Esta empresa presenta problemas en el sistema de distribución de aguas debido a las incrustaciones que obstruyen las tuberías, accesorios, instrumentos y equipos, lo que ha llevado a realizar nuevas instalaciones, sin eliminar las anteriores, para darle continuidad al proceso productivo y prevenir de una posible parada de planta.

En este trabajo de grado se diseñó el nuevo sistema de abastecimiento de aguas industriales de la planta, considerando las mejoras pertinentes para el funcionamiento del sistema, la reducción de los costos de operación y mantenimiento, así como la determinación del costo del proyecto.

La limitación del presente proyecto es la utilización de las partes y componentes que se encuentren en buenas condiciones, a fin de optimizar los recursos existentes.

Este trabajo, está conformado por ocho (8) capítulos para llevar a cabo su desarrollo y se exponen a continuación:

El **Capítulo I** identifica la empresa, su organización y el proceso productivo de la misma, para de esta forma familiarizarse con el proyecto y conocer la influencia del agua en el proceso.

El **Capítulo II** presenta los antecedentes del problema y el problema en específico, identificando también los sectores del sistema de mayor complicación.

El **Capítulo III** incluye el Fundamento Teórico referido a las características del agua, nociones de la mecánica de los fluidos, sistemas de bombeo, sistemas de tuberías, análisis de redes cerradas, válvulas, entre otros.

El **Capítulo IV** trata el Marco Metodológico utilizado para el desarrollo del trabajo, paso a paso considerando la importancia de cada una de sus etapas para lograr a cabalidad el diseño del sistema de abastecimiento de aguas.

El **Capítulo V** entrega el desarrollo del diseño, explicando las fases seguidas en el análisis del sistema actual, las posibles soluciones y las escogidas. Este capítulo está ilustrado con cuadros, fotos y esquemas para su respectiva discusión.

El **Capítulo VI** contiene la determinación de costos del proyecto, para conocer los costos por conceptos de energía, por instalación, materiales y equipos considerados en el diseño.

El **Capítulo VII** muestra el plan básico de mantenimiento realizado a los equipos más importantes que trabajan con el agua y sus accesorios.

El **Capítulo VIII** contiene las Conclusiones y Recomendaciones que arrojó la presente Tesis, basándose en la factibilidad de la implantación del diseño realizado para el sistema de abastecimiento de aguas industriales.

1. IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA

1.1 Reseña Histórica.

En el año 1907 Alberto Smith funda la **COMPAÑÍA ANÓNIMA FÁBRICA NACIONAL DE CEMENTOS**, quedando legalmente constituida en Venezuela, desde el 23 de noviembre de ese año, estableciéndose en el país como la primera empresa productora de cemento. Debe su nombre a la zona donde estaba ubicada: La Vega, al Sur-Oeste de la ciudad de Caracas.

Los primeros años de la Fábrica Nacional de Cementos, fueron muy duros, por la férrea competencia con el cemento importado y por la poca información que tenía la población sobre la utilidad del producto y los beneficios económicos y sociales que esta industria traería al país. Gracias a la colaboración del Estado, que creyendo en la incipiente industria que estaba naciendo, la apoya mediante la adquisición del cemento para ser usado en las obras civiles que ejecutaba el gobierno. De esta manera, reconoció la iniciativa privada, consolidando el desarrollo de la industria cementera y dando inicio a un futuro más provisor para la República.

A partir de 1910, durante la presidencia del General Juan Vicente Gómez, se inicia un período de crecimiento en el área de la construcción, siendo cubiertas las necesidades del mercado cementero casi en su totalidad por la C.A. FÁBRICA NACIONAL DE CEMENTOS.

En 1916 se hace necesaria la inyección de capital para la expansión de la fábrica debido al crecimiento en la industria de la construcción, de esta manera Don Carlos Delfino invierte y adquiere el 75% de las acciones.

La década de los años 30, marcó el comienzo de una serie de transformaciones en el país y en la empresa, orientadas a mejorar la calidad de vida del venezolano y aumentar su capacidad productiva. El crecimiento sostenido de la demanda de cemento, sumado a la posibilidad de agotamiento de las fuentes de materias primas cercanas a la planta

productiva, determinó que se tomara la decisión de adquirir una cantera adicional de Piedra Caliza en Ocumare del Tuy, denominada “Cantera El Peñón”; simultáneamente se adquirió otro horno, destinado a la Planta La Vega, que por diversas circunstancias no fue posible su instalación y vista la existencia de los equipos en Venezuela, C.A. FÁBRICA NACIONAL DE CEMENTOS tomó la decisión de buscar un terreno y adquiere parte de la Hacienda “Las Casas de Tejas”, la cual poseía gran cantidad de arcilla. La empresa con visión de futuro establece una nueva Planta en los Valles del Tuy, específicamente en Ocumare, y se instala allí el mencionado horno en esos terrenos, llevando progreso, desarrollo y fuentes de trabajo para esa zona del Estado Miranda y es en 1970 cuando se inaugura la Planta de Ocumare del Tuy, contando con los equipos y tecnología más sofisticada en la industria del cemento, para ese entonces.

La empresa obtiene en el año 1982, la Marca NORVEN N° 102 para su producto Cemento Portland Gris Tipo I, certificado de calidad oficial que avala el cumplimiento del producto con la Norma Venezolana COVENIN correspondiente (N° 28 “Cemento Portland - Especificaciones”).

En el año 1994, el Grupo Francés LAFARGE posee el control accionario de la C. A. FÁBRICA NACIONAL DE CEMENTOS, ahora bajo el nombre de LAFARGE-VENEZUELA, planta Ocumare del Tuy, localizada en la carretera nacional Charallave–Ocumare del Tuy, Sector la Cabrera, Km. 6, Estado Miranda, Venezuela.

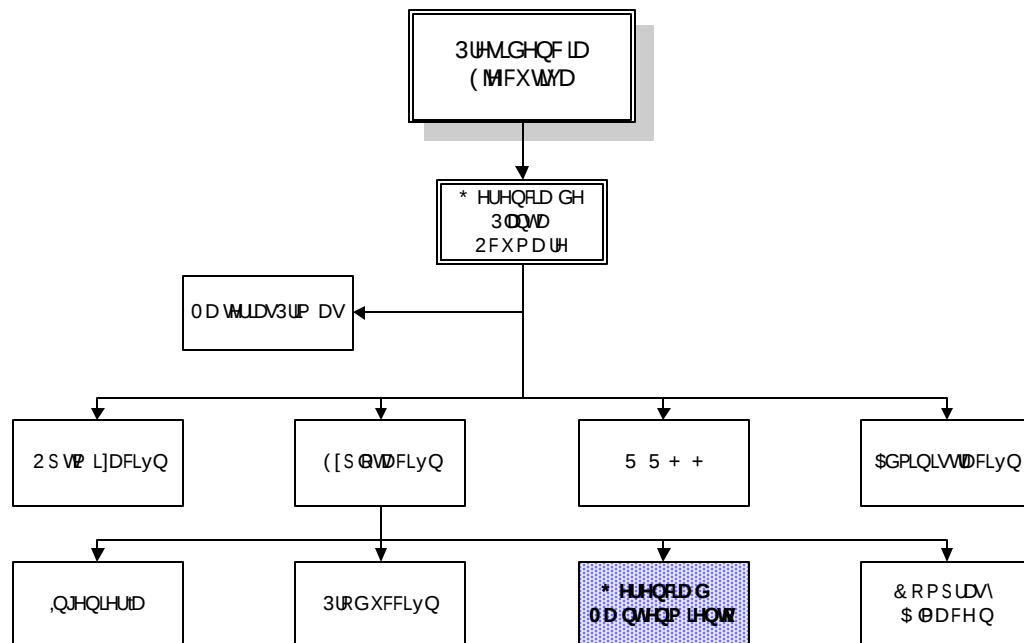
El Grupo Francés LAFARGE es líder mundial en materiales para la construcción, y día a día consolida su posición cementera en más de 70 países. Actualmente su presencia en Venezuela cuenta con oficinas administrativas en Caracas y con dos plantas productoras de Cementos.

El 14 de Noviembre de 2001 LAFARGE-VENEZUELA obtiene oficialmente el certificado de calidad con la Norma Covenin ISO 9002:1995 para la producción y comercialización del cemento Portland tipo I.

1.2 Organización de la Empresa.

La Planta Ocumare del Tuy cuenta con 172 personas de las cuales 4 forman parte de la gerencia de planta, 55 pertenecen a producción, 55 a mantenimiento, 15 a optimización, 11 a administración, 9 a compras, 14 a recursos humanos, así como las 9 restantes pertenecen a capacitación de personal.

La estructura organizacional de la Planta Ocumare del Tuy y de la Gerencia de Mantenimiento es como se aprecia en las figuras anexas:



Fuente: R.R.H.H.

Figura 1 Organigrama general de la Planta Ocumare del Tuy.

Esta Planta posee un organigrama general el cual se complementa con el de mantenimiento, lo cual significa que la estructura organizacional está debidamente integrada, esto permite la aplicación de mantenimiento

a las instalaciones y equipos de la empresa. Por otra parte, en esta organización el mantenimiento guarda estrecha relación con las áreas de producción y seguridad industrial. El Departamento de Mantenimiento está encargado de asegurar la disponibilidad de los equipos y sistemas, logrando esto al menor costo y con la máxima seguridad. Además, se encarga de mejorar los sistemas ya existentes y así lograr ser más competitivos.

1.3 Proceso Productivo del Cemento en la Planta Ocumare, LAFARGE-Venezuela.

La Fabricación del cemento Portland gris Tipo I consiste en la preparación de una mezcla de materias primas, sometidas a cocción hasta el umbral del punto de fusión y finalmente molida a polvo fino. El proceso de fabricación comprende seis fases principales:

- Fase 1: Materia Prima
- Fase 2: Molienda de Crudo
- Fase 3: Homogeneización
- Fase 4: Cocción
- Fase 5: Molienda de Cemento
- Fase 6: Despacho

- **Materia Prima:**

La materia prima utilizada para la elaboración del cemento Portland gris Tipo I en LAFARGE VENEZUELA es: caliza, arcilla, yeso y minerales correctores.

La caliza es un material portador de carbonato de calcio (CaCO_3) y el contenido de éste depende de la cantera que lo suministre. Las canteras pertenecen a la fábrica, la caliza de la cantera El Peñón es mezclada con la caliza de la cantera de Mume en una relación 50% - 50% aproximadamente, y es transportada al Silo 1 de la planta. La caliza de la cantera Melero es mezclada con la del Peñón 50% - 50%, y es almacenada en el Silo 2.

La arcilla es un material blando, portador de los óxidos de sílice, aluminio y hierro; la arcilla ferrosa, aporta el hierro necesario para mantener, el módulo de sílice de la harina cruda dentro del rango de trabajo, permitiendo con ello dosificar calizas que aporten sílice. Los yacimientos de

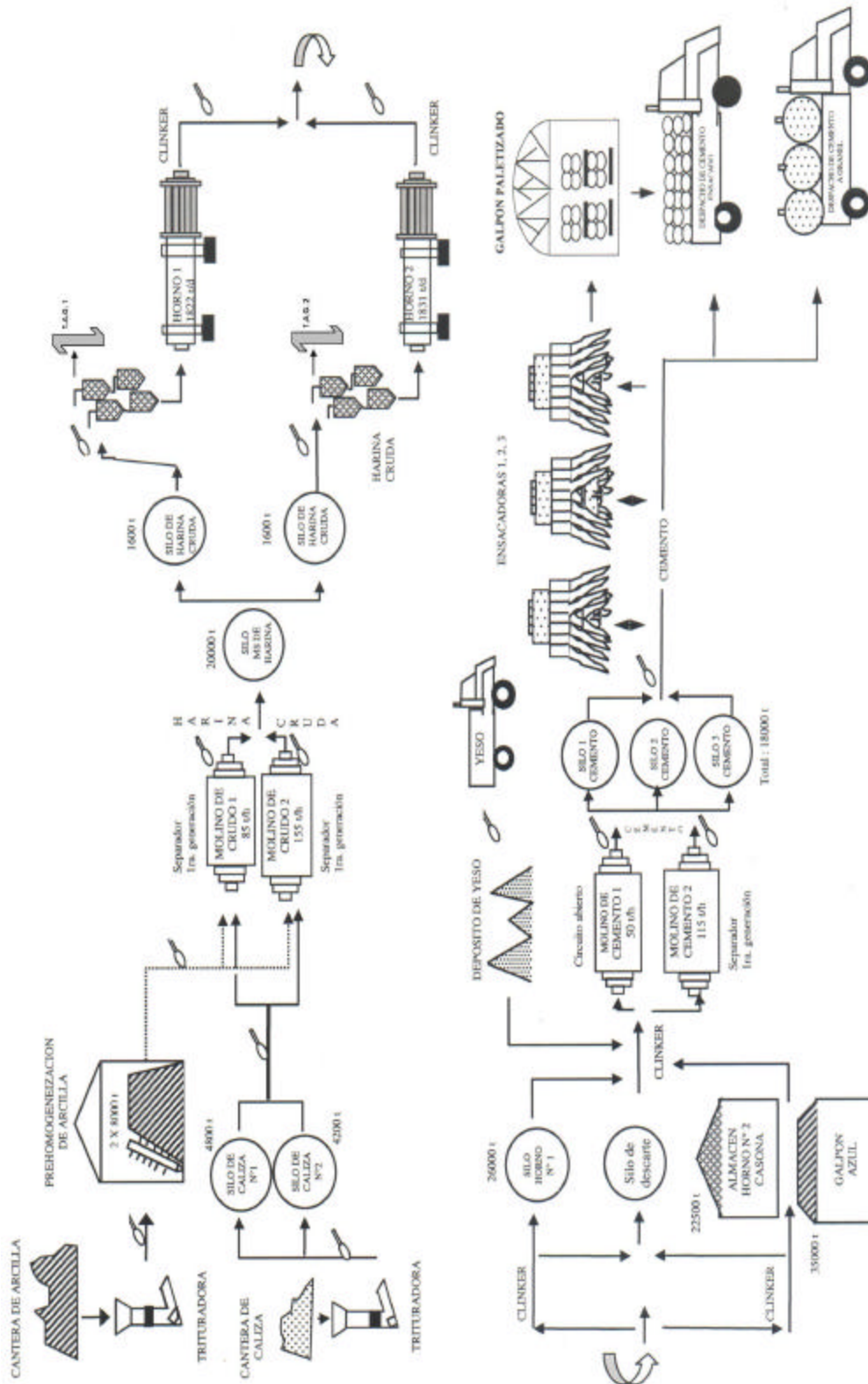


Figura 3 Esquema del Proceso Productivo del cemento en la Planta Ocumare del Tuy, LAFARGE-Venezuela.

arcilla varían bastante en composición química, los diferentes tipos de arcilla se presentan por capas, por esto es imprescindible homogeneizar las arcillas. El yeso es el material regulador del tiempo de fraguado del cemento.

- **Molienda de Crudo:**

La harina cruda es el resultado de la molienda de caliza y de arcilla, hasta obtener un polvo muy fino de color crema. Esto se realiza luego de concluida la pre-homogeneización y almacenaje de las materias primas. Estos materiales se dosifican continuamente en los molinos de bolas en una relación aproximada: 1% de arcilla Ferrosa, 20% de arcilla, 39% de caliza Silo 1 (Mume-Peñón) y 41% de caliza Silo 2 (Melero-Peñón).

Al entrar al molino, los materiales se secan al ponerse en contacto con una corriente de gases calientes generados por la combustión del gas en un hogar o estufa. Una vez dentro de las cámaras de molienda ambas materias primas son molidas y mezcladas íntimamente, esto es debido al constante choque que generan los cuerpos moledores durante el giro del molino.

Los dos sistemas de molienda son en circuito cerrado, es decir, que el material grueso a la salida del molino, se devuelve para reducir aún más su tamaño. Cada sistema cuenta además con otros equipos que contribuyen al proceso de molienda, tales como: un separador para clasificar materiales por tamaño de partículas en gruesa y finas, un ventilador de tiro para generar una corriente de aire y material a través del molino, un hogar para generar gases calientes, un filtro electrostático para el desempolvado y recuperación de los materiales más finos que son arrastrados por las corrientes de aire, un saca muestras y un sistemas de transporte para llevar el producto de un equipo a otro y finalmente al silo donde será almacenado.

En la planta de Ocumare del Tuy hay dos equipos de molienda de distintas capacidades:

	Molino de Crudo 1	Molino de Crudo 2
Cap. de Producción	85 ton/h	155 ton/h

- **Homogeneización:**

La harina cruda es transportada por medio neumático hasta un silo de homogeneización con capacidad para almacenar hasta 20.000 toneladas de material, en el se logra fluidificar y mezclar la harina producida en diferentes horas y por ambos molinos, para su posterior transporte al tanque de almacenamiento de la roto báscula Pfister de cada horno, este equipo se encarga de pesar y dosificar en forma homogénea la harina cruda introducida al sistema de cocción. La Harina luego de homogeneizada es transportada, hasta los silos de almacenaje. Existe un silo para cada horno con una capacidad aproximada de 1.350 toneladas c/u. La homogeneización se puede realizar por vía húmeda o por vía seca, dependiendo de si se usan corrientes de agua o aire para mezclar la harina cruda.

El proceso utilizado en la Planta Ocumare es por vía seca. En donde la harina cruda almacenada en el silo MS (multi-flow system), permite realizar la homogeneización de la harina, al disponer de secciones de lona en su piso, que permite el paso del aire de fluidificación. Una cámara de mezcla garantiza la homogeneización de la harina que sale del silo.

En el proceso de vía húmeda la mezcla de materia prima es bombeada a balsas de homogeneización y de allí hasta los hornos en donde se produce el clinker a temperaturas superiores a los 1.500 °C.

La harina extraída de los silos de almacenaje se lleva a una torre de pre-calcinación o torre de ciclones, donde se pone en contacto con los gases calientes que salen del horno, en este punto se incrementa su temperatura desde 80 °C hasta 850 °C. Este intercambio se produce en contra corriente, en la medida que la harina desciende por la torre y entra

en contacto con los gases que ascienden, esto permite que la harina entre al horno a 850 °C.

- **Cocción:**

La finalidad del proceso de cocción es lograr que a altas temperaturas los compuestos de la arcilla, reaccionen con los de la caliza. Dicho proceso ocurre en el horno, el cual es un cilindro metálico revestido internamente por ladrillos y concreto refractario. Está inclinado ligeramente hacia el extremo donde se encuentra el quemador y rota constantemente. La harina entra por el extremo más alto y se mueve a través del horno por la rotación e inclinación de éste. A medida que la harina se aproxima a la zona de cocción va incrementando su temperatura hasta alcanzar unos 1.450 °C. El producto de la cocción de la harina cruda es llamado Clinker.

En la planta se cuenta con dos hornos, El clinker de Horno 1 es almacenado en un silo de concreto con capacidad de 30.000 toneladas y el clinker de Horno 2 es almacenado en la Casona, este lugar cuenta con una capacidad aproximada de 24.000 toneladas. Las capacidades de producción de los hornos son diferentes, Horno I puede producir alrededor de 1.680 ton/día mientras que Horno II 1.750 ton/día.

- **Molienda de Cemento:**

El clinker es transportado luego hacia los molinos de cemento, donde es molido junto al yeso en un porcentaje de 95 y 5 por ciento, respectivamente, obteniéndose así el cemento.

En la Planta de Ocumare se encuentran instalados dos (2) molinos de bolas para la molienda del cemento, ambos molinos tienen inyección de agua interna en la entrada y en la salida, de esta manera se logra mantener la temperatura en un punto donde no se provoque la deshidratación del yeso.

El sistema del molino N° 1, es de circuito abierto, por lo que el material

sale del molino con la finura requerida. Este sistema no posee separador pero su producción es menor (50 ton/h) y el consumo de energía por tonelada de material, es mayor. Este molino posee tres cámaras de molienda, en donde la inyección de agua se realiza en la 1^{ra} y 3^{ra} cámara, tiene una longitud de 11 m y 4 m de diámetro.

El sistema del molino N° 2 es de circuito cerrado, posee dos (2) separadores para tener un mayor control y mayor eficiencia en la clasificación del producto terminado. Este molino posee dos cámaras de molienda y la inyección de agua se realiza en ambas, puede producir hasta 120 ton/h, tiene una longitud de 15 m, y 4,42 m de diámetro.

- **Despacho:**

Una vez obtenido el cemento éste se almacena en tres silos con capacidad de 17.000 toneladas cada uno, para su posterior despacho en camiones a granel o en sacos de 42,5 Kg. Para realizar el proceso de llenado de sacos se cuenta con tres máquinas ensacadoras:

- ❖ Flux: 2000 sacos/h (manual)
- ❖ Haver & Boker 1: 1800 sacos/h (manual)
- ❖ Haver & Boker 2: 2200 sacos/h (paletizado)

Para el despacho a granel, en cada silo se cuenta con dos mangas para el llenado de camiones.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

2.1 Antecedentes del Problema.

La planta de Cemento LAFARGE-Ocumare del Tuy, fabrica cemento PORTLAND Tipo I, este es el normalmente utilizado en la industria de la construcción, el área de distribución de esta planta es la zona central del país.

La planta fue diseñada de manera que el agua utilizada en ella proviene directamente de pozos profundos sin circular previamente por una planta suavizadora, debido a lo anterior el agua es netamente cruda (sin ningún tipo de tratamiento), en la planta se dispone de 6 pozos cuya dureza varía entre 908-1148mg/L. El valor máximo aceptable es de 500 mg/L, pero el óptimo es de 250 mg/L según las normas M.S.A.S. 11.02.98. [19]

El agua juega un papel esencial en el proceso productivo de la planta, debido a que es el refrigerante usado por el sistema de enfriamiento de compresores, soportes de maquinarias rotativas, de gases salientes de los hornos, entre otros, aparte de los usos habituales en el área administrativa de la planta.

A raíz de la calidad del agua, ésta no debería ser usada directamente para procesos industriales, ya que trae como consecuencia que las tuberías de aguas y sus accesorios se obstruyen prontamente, producto de la calcificación del agua en sus paredes, variando así los caudales de diseño y finalmente afectando las condiciones de desempeño de las maquinarias que necesitan agua para su operación.

Para no paralizar el proceso productivo, se han implementado instalaciones provisorias en paralelo (bypass), aliviando así el problema temporalmente, sin haber realizado esfuerzos por erradicarlos. Al efectuar lo antes dicho repetidamente sin dejar constancia a la sala técnica, los

múltiples trozos de tuberías nuevos no se refieren en los planos de la planta, creando así desinformación sobre el sistema y las pérdidas de carga.

2.2 Planteamiento del Problema.

Debido a la calidad de agua antes mencionada, se generan problemas de calcificación en el sistema de tuberías que abastece agua a la planta, incluyendo sus accesorios y equipos que necesitan este fluido para trabajar. Esto tiene como consecuencia un costo elevado por concepto de mantenimiento. Además, esta agua es dañina para seres humanos ya que afecta a su salud y la hace no apta para su consumo.

El mal funcionamiento de las válvulas ubicadas específicamente en las áreas sanitarias, produce una pérdida de flujo que se traduce en un costo energético producto del incremento del factor de utilización de las bombas.

A lo anterior habría que sumarle el costo que genera para la empresa tener un equipo productivo detenido a raíz de un problema de calcificación, y el costo de su puesta en marcha.

3. FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1 Teoría del Agua.

3.1.1 Fuentes de Agua

El agua circula continuamente a través del ciclo hidrológico: precipitación o lluvia, escurrimiento, infiltración, retención o almacenamiento, evaporación, reprecipitación, y así sucesivamente. Se entiende por fuente de abastecimiento de agua aquel punto o fase del ciclo natural del cual se desvía, temporalmente, para ser usada, regresando finalmente a la naturaleza. Esta agua puede o no volver a su "fuente" original, lo cual depende de la forma en que se disponga de las aguas de desperdicio.

Para el abastecimiento público de agua se usan comúnmente tanto los recursos superficiales como los subterráneos. Las razones para elegir uno u otro son muchas, e incluyen consideraciones tales como la calidad, la cantidad disponible, la seguridad del abastecimiento y el costo de construcción y operación.

- **Abastecimientos Subterráneos.** Generalmente, las comunidades más pequeñas son las que emplean abastecimientos subterráneos de agua, por lo limitado que resulta el volumen de un acuífero. Un inconveniente de los abastecimientos subterráneos es su tendencia a proporcionar aguas excesivamente duras, lo cual se debe a que los constituyentes que causan la dureza son lavados de los depósitos minerales. Por otro lado, el abastecimiento subterráneo tiene la ventaja de proporcionar aguas que requieren un menor grado de tratamiento referente a los sólidos disueltos, porque las "impurezas" se eliminan en forma natural a medida que el agua atraviesa las capas del suelo y el subsuelo. Sin embargo, debe tenerse siempre presente que, aunque estas condiciones corresponden a la generalidad de las aguas subterráneas, no siempre contribuyen a la dureza los depósitos minerales, y que la conformación del suelo y del

subsuelo puede no ser del tipo que elimina con eficacia la materia indeseable del agua.

Pozos poco profundos. Aunque no existe un límite exacto que distinga entre pozos poco profundos y pozos profundos, usualmente se clasifican como “poco profundos” aquellos cuya profundidad es menor de 30 metros y como “profundos” aquellos cuya profundidad es superior a dicho límite. Los pozos poco profundos pueden ser cavados o entubados.

Los pozos cavados consisten de un hoyo vertical, por lo general de 1,20 m a 1,80 m de diámetro, excavados desde la superficie del suelo hasta encontrar el manto acuífero. Estos pozos pueden recubrirse con hormigón, ladrillo, piedra brasa o baldosa vidriada. El recubrimiento debe extenderse desde unos 30 cm sobre la superficie del suelo, hasta cuando menos 3 m bajo la misma, y debe ser impermeable para evitar escurrimientos e infiltraciones superficiales. El hormigón es el material mas adecuado para recubrir la parte superior del pozo; se prefiere el ladrillo, la piedra brasa o la baldosa vidriada para recubrir la sección permeable que queda dentro del estrato acuífero.

Pozos profundos. Cuando el suelo situado encima de las formaciones rocosas no contiene agua, los pozos deben perforarse ya sea dentro de las rocas para extraer el agua de las grietas o a través de la roca hasta localizar los estratos acuíferos más profundos.

Ante tales circunstancias, o cuando solamente se puede disponer de agua de los estratos profundos, se hacen pozos perforados. Comúnmente los pozos perforados son de 15 a 30 cm de diámetro, pero pueden ser mayores. Los recubrimientos metálicos pueden proporcionar una protección efectiva contra la introducción de aguas superficiales y aguas subterráneas contaminadas, siempre y cuando el recubrimiento este bien soldado para impedir la entrada de toda clase de contaminaciones. Si el estrato que lleva agua es arenoso o contiene grava, debe colocarse una coladera de dimensiones adecuadas conectada

en el extremo inferior del recubrimiento. Como quiera que el agua no pueda elevarse más de unos metros mediante succión, el dispositivo de bombeo debe colocarse debajo del suelo, cerca o más abajo del nivel superficial de agua del pozo.

Se acostumbra a menudo recubrir las paredes del pozo con grava, cuando el estrato que lleva agua es de arena muy fina e impide que pase el volumen adecuado de líquido hacia dentro del recubrimiento metálico del pozo. Tales pozos son similares a los ordinarios, con la diferencia de que se elimina la arena en un espacio de algunos centímetros alrededor del tamiz del pozo y se sustituye por grava. Esto hace que aumente la superficie de contacto con el estrato que lleva agua, disminuyéndose la resistencia al flujo del agua hacia el interior del recubrimiento metálico y aumentándose así la capacidad. La grava que queda fuera del tamiz del pozo ayuda también a impedir que la arena pase al interior del recubrimiento metálico durante los periodos de intenso bombeo. Los resultados globales de operación de este tipo de pozos han sido, por lo general, muy satisfactorios, y algunas autoridades abogan por su uso como practica normal cuando se extrae el agua de un estrato acuífero constituido por material poco consolidado. La grava puede colocarse de muy diferentes maneras, pero en todo caso requiere habilidad por parte del perforador de pozos y solamente deben hacerlo aquellos que tengan experiencia en este tipo de trabajo.

Conceptos básicos sobre pozos profundos: [15]

Nivel de Referencia (NR) o Datum: Es la línea horizontal referida a la boca del pozo.

Nivel Estático (NE): Es el nivel libre de agua en el pozo, cuando no existe extracción.

Nivel de Bombeo (NB): es el nivel de la superficie de líquido en el pozo tanquilla cuando hay extracción.

Abatimiento (DN): Es la diferencia entre el nivel de bombeo y el nivel estático.

Longitud de columna (LC): Es el largo de la columna, desde la parte interior del cabezal de descarga hasta el cuerpo de bomba.

Longitud Total (LT): Es la longitud, desde el nivel de referencia hasta el extremo inferior del motor de la bomba sumergible.

Diámetro del Pozo (DP): Es el diámetro nominal del revestimiento del pozo.

Diámetro de la Tubería (DT): Es el diámetro nominal de la tubería de columna o de conducción.

Diámetro Exterior Máximo de la Bomba (DB): Es el diámetro exterior de la bomba.

Longitud de la bomba (LB): Es la longitud del cuerpo de tazonos en las bombas de turbina o la longitud de la bomba más el motor en las bombas sumergibles.

Todos estos parámetros se pueden visualizar en la figura 4.

Manantiales. Aparecen donde un estrato que lleva agua alcanza la superficie del terreno, o donde las fisuras de la roca "afloran" a la superficie, en condiciones tales que el agua subterránea es forzada a través de las grietas. Formando una especie de lago.

- **Abastecimientos Superficiales.** Por lo general, las grandes ciudades dependen de abastecimientos superficiales, y en la mayoría de los casos las aguas superficiales, ya sean de corrientes, lagos o embalses, no son seguras para el consumo humano y requieren de tratamiento. Ejemplos de este tipo de fuentes de agua son las siguientes, ríos, lagos naturales, embalses, entre otros. Estos son mas propensos a la contaminación ya sea por bacterias, desperdicios, entre otros debido al escurrimiento superficial.

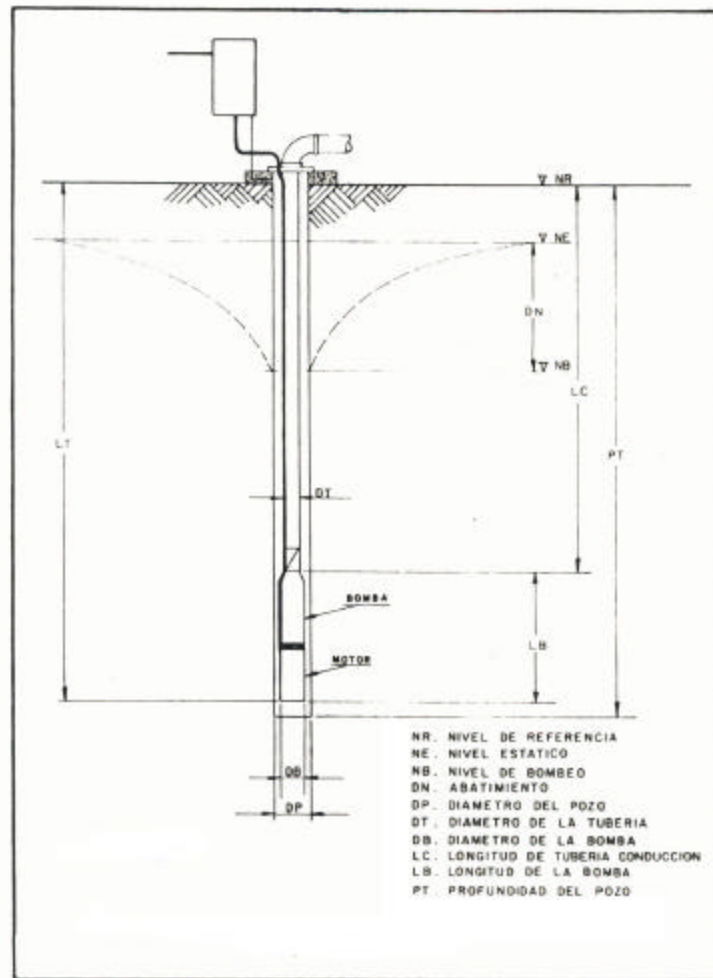


Figura 4 Partes de un pozo profundo.

3.1.2 Análisis Físico – Químico del Agua

- **Dureza del Agua**

Característica del agua impartida principalmente por sales de calcio y magnesio, tales como bicarbonatos, carbonatos, sulfatos, cloruros y nitratos, que produce formación de incrustaciones en calderas, daños a algunos procesos industriales y a veces, sabor desagradable.

El término dureza del agua se refiere a la cantidad de calcio y magnesio disueltos en el agua. Estos minerales tienen su origen en las

formaciones rocosas calcáreas, y pueden ser encontrados, en mayor o menor grado, en la mayoría de las aguas naturales.

El calcio y magnesio causan dos principales problemas:

1. Cuando el agua es calentada, ellos se precipitan fuera de la solución, y forman una costra dura, de apariencia rocosa (Sarro). Esta costra acelera la corrosión, restringe el flujo de agua, y reduce la transferencia de calor.
2. Cuando se combinan con el jabón, reaccionan para formar un cuajo, que interfiere con el efecto de la limpieza, seca la piel, y forma depósitos en cañerías y ropas.

La dureza es medida en partes por millón (equivalentes a mg/litro). No existen límites de aceptación establecidos de dureza del agua, pero comienza a ser considerada problemática cuando alcanza 50 mg/l en estándares internacionales.

Clasificación	Dureza [mg/l]
Blanda	0 - 17
Levemente Dura	17 - 60
Moderadamente Dura	60 - 120
Dura	120 - 180
Muy Dura	Mas de 180

Tabla 1 Clasificación del nivel de dureza internacionalmente.

En Venezuela el organismo encargado de evaluar las aguas es el Ministerio de Sanidad y Asistencia Social M.S.A.S., en la norma M.S.A.S. 11.02.98. [19] “Normas Sanitarias de Calidad de Agua Potable”, se reseña que el valor de dureza deseable es de 250 mg/l y el valor máximo aceptable es de 500 mg/l, para los efectos de este trabajo estos serán los valores adoptados.

- **Índice de Langelier**

Existen pruebas valiosas para ilustrar los principios de la estabilidad del carbonato de calcio. Langelier desarrolló un método para predecir el pH a saturación (llamado pH_s) de cualquier agua. Si el pH real del agua está por debajo del nivel calculado (pH_s) el agua tiene un índice de Langelier negativo y disolverá al CaCO_3 . Generalmente esto también se interpreta indicando que el agua puede corroer el acero si se encuentra oxígeno presente. Si el pH medido excede el pH_s , el índice de Langelier es positivo, y estando saturada con CaCO_3 , es probable que el agua forme depósitos. Cuanto mayor es la desviación del pH real del pH_s , más pronunciada es la inestabilidad.

3.2 Conceptos Básicos de los Fluidos.

3.2.1 Definición de Fluido:

Es aquella sustancia que, debido a su poca cohesión intermolecular, carece de forma propia y adopta la forma del recipiente que lo contiene. Los fluidos se clasifican en líquidos y gases:

Los líquidos a una presión y temperatura determinadas ocupan un volumen determinado. Introducido el líquido en un recipiente adopta la forma del mismo, pero llenando sólo el volumen que le corresponde. Si sobre el líquido reina una presión uniforme, por ejemplo, la atmosférica, el líquido adopta una superficie plana, como la superficie de un lago.

Los gases a una presión y temperatura determinadas tienen también un volumen determinado, pero puestos en libertad se expansionan hasta ocupar el volumen completo del recipiente que los contiene, y no presentan superficie libre.

En resumen los sólidos presentan gran resistencia al cambio de forma y volumen; los líquidos ofrecen gran resistencia al cambio de volumen mas

no de forma; y los gases no ofrecen ningún tipo de resistencia a los cambios anteriores.

3.2.2 Propiedades Físicas de los Fluidos:

La solución de cualquier problema de flujo de fluidos requiere del conocimiento previo de las propiedades físicas exactas de los fluidos en cuestión, cada una de estas propiedades se expresan a continuación:

- **Viscosidad:** ésta expresa la facilidad que tiene un fluido para fluir cuando se le aplica una fuerza externa, la viscosidad absoluta o dinámica de un fluido, es una medida de su resistencia al deslizamiento o a sufrir deformaciones internas.

La viscosidad cinemática es el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad, sus unidades en el sistema internacional son las siguientes: Viscosidad dinámica [Pa s], y viscosidad cinemática [m²/s].

- **Peso Específico:** Es el peso por unidad de volumen de un fluido. Esta propiedad es muy importante para el cálculo de la potencia de una bomba ya que no es lo mismo bombear agua limpia que agua residual, se denomina con la letra griega (γ) y su unidad en el sistema internacional es [Kg/m³]

- **Densidad:** La densidad de un fluido se define como la masa por unidad de volumen y se denomina con la letra griega (ρ) y su unidad en el sistema internacional es [Kg/m³], la densidad es la misma en cualquier campo gravitatorio y se relaciona con el peso específico como sigue.

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (3.1)$$

- **Densidad Relativa:** Es una unidad adimensional que relaciona el peso unitario de un fluido con el peso unitario del agua a una temperatura fija. También se puede expresar como la relación entre la densidad de un fluido y la del agua.

$$s = \frac{\gamma}{\gamma_{agua}} \quad (3.2)$$

• **Presión:** La presión es el término más importante en la mecánica de fluidos. El movimiento del fluido y las fuerzas en el equipo debidas al fluido son debidos básicamente a la presión en el fluido. Por definición, la presión es la fuerza por unidad de área de la superficie con la cual el fluido está en contacto, y siempre actúa en sentido normal a la superficie considerada.

$$P = \frac{F}{A} = \gamma \cdot h \quad (3.3)$$

Donde:

$P \rightarrow$ intensidad de la presión, (kgf/m²)

$F \rightarrow$ fuerza total que actúa sobre una superficie, (kgf)

$A \rightarrow$ área de la superficie, (m²)

$\gamma \rightarrow$ peso específico del fluido, (kgf/m³)

$h \rightarrow$ carga = altura de la superficie libre del fluido por arriba de cierto punto de la superficie, (m)

La última parte de la ecuación anterior emana en realidad de los principios de la hidrostática, en la cual la única energía disponible proviene de la carga estática de la columna de fluido. En esta forma la presión hidrostática en un punto es igual a la presión creada por la altura de la columna de fluido por arriba de ese punto, como se puede apreciar en la figura 5. Ya que la densidad de los gases suele ser muy pequeña comparada con la de los líquidos, la presión hidrostática de los gases se desprecia generalmente en la ingeniería practica a menos que se desee un nivel muy alto de precisión. Lo anteriormente expuesto se aprecia en la figura 5.

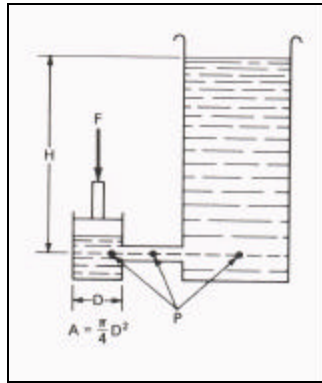


Figura 5 Relación de la presión con la carga.

3.3 Principios de Mecánica de los Fluidos Aplicados a los Sistemas de Bombeo.

3.3.1 Régimen Permanente:

Los sistemas de conducción de fluidos están caracterizados por una operación estable o casi estable durante la mayor parte de sus periodos de funcionamiento y, por consiguiente, el respectivo régimen se clasifica como permanente. En este tipo de movimiento las ecuaciones fundamentales de la hidráulica se simplifican notablemente, y tanto más cuando se las refiere al régimen unidimensional, turbulento, de un líquido considerado como incompresible, que se verifica en un conducto de sección circular.

- **Tipos de Flujo.**

El flujo viscoso se puede clasificar como laminar o turbulento, dependiendo de tres parámetros, la velocidad del fluido dentro de la tubería, el diámetro de la misma y la viscosidad del fluido.

El Flujo laminar es aquel en que sus partículas se deslizan unas sobre otras en forma de láminas formando un perfil de velocidades simétrico y en forma de parábola, como se aprecia en la figura 6.

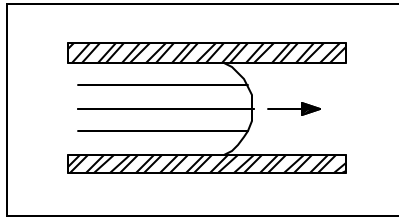


Figura 6 Flujo laminar.

El Flujo turbulento, en cambio, es aquel cuyas partículas se deslizan en forma desordenada y las trayectorias de las partículas se entrecruzan formando pequeños remolinos no periódicos, como en la figura 7.

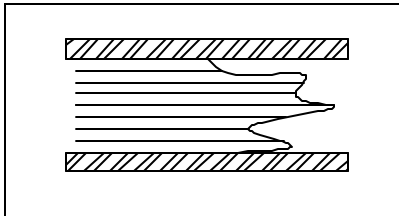


Figura 7 Flujo turbulento.

En ambos casos la velocidad en el perfil de velocidades varía de una máxima a una mínima, siendo la máxima en la zona central de la tubería y la mínima en la zona de contacto con las paredes del tubo.

Para predecir el tipo del flujo dentro de la tubería se utiliza el número de Reynolds (Re), un parámetro adimensional definido por:

$$Re = \frac{V \cdot D}{?} \quad (3.4)$$

donde:

D → diámetro de la tubería

V → velocidad característica

? → viscosidad cinemática

Para un flujo turbulento el número de Reynolds es mayor a 4000 y para un flujo laminar es menor a 2.000. Para valores intermedios se tiene un

flujo de transición que en ciertas condiciones se comporta como laminar y en otras como turbulento.

- **Ecuación de la Continuidad.**

Esta ecuación se cumple para fluidos incompresibles en movimiento como consecuencia del principio de la conservación de las masas y nos dice que la masa de fluido por unidad de tiempo que atraviesa cualquier sección de un conducto permanece constante. El caudal es igual al área por la velocidad ($Q = A \cdot v = \text{constante}$).

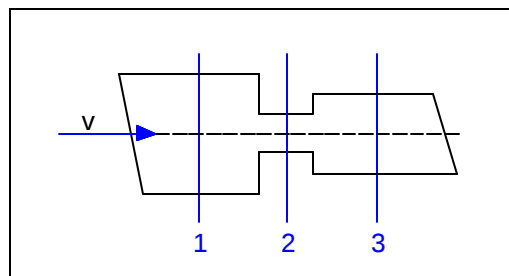


Figura 8 Continuidad de caudal.

En la figura 8 podemos observar un tramo de tubería con tres diámetros diferentes. Según la ecuación de la continuidad el caudal permanece constante en las tres secciones aún variando el área.

$$Q = A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 = A_3 \cdot V_3 \quad (3.5)$$

Para que esta proporción se cumpla, al aumentar el área de una tubería se reduce la velocidad y viceversa. Esta propiedad nos permite, en ciertas ocasiones, variar el diámetro de una tubería a fin de mantener ciertas velocidades recomendadas.

- **Ecuación de Bernoulli.**

La ecuación de Bernoulli tiene una gran importancia en la mecánica de los fluidos ya que agrupa los tres tipos de energía que se consideran para un fluido en movimiento, estas son:

$$\text{ENERGÍA CINÉTICA} \rightarrow V^2/2g$$

ENERGÍA DE PRESIÓN O PIEZOMÉTRICA → $P/\rho g$

ENERGÍA POTENCIAL → Z

Las tres energías vienen expresadas en metros o pies de columna de fluido y su suma permanece constante a lo largo de un sistema de tuberías y es la carga total o energía específica total. Para un fluido ideal, en el que se consideran las pérdidas de carga por efecto del roce igual a cero, se tiene:

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + Z = \text{cte} \quad (3.6)$$

Sin embargo, en la realidad existen pérdidas o incrementos de energía por rozamiento que deben incluirse en la ecuación de Bernoulli. Por lo tanto, el balance de energía puede escribirse para dos puntos del fluido, según se indica en la figura 9. Aunado a esto se deben incluir las pérdidas ocasionadas por los accesorios de las tuberías quedando la ecuación de Bernoulli expresada de la siguiente manera:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_f + h_{fs} \quad (3.7)$$

donde:

h_f → pérdida de carga debida al roce

h_{fs} → pérdida de carga debida a los accesorios

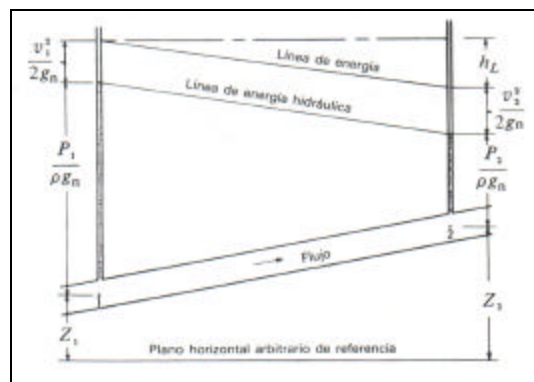


Figura 9 Balance de energía para dos puntos del fluido.

- **Pérdidas de Carga en Tuberías.**

Las pérdidas son la suma de todos los términos que representan formas de energía no utilizables.

La cantidad de pérdida de altura o presión para un sistema dado depende de las características del líquido que se esté manejando (densidad y viscosidad), así como también del tamaño de la tubería, rugosidad que está presente a lo largo de la superficie interior, caudal que se esté manejando, entre otros. La rugosidad depende entonces del tipo de material y por supuesto de su acabado. Para efectos de cálculos cada material tiene su rugosidad determinada en el laboratorio.

Las **pérdidas primarias** se producen por el contacto entre el fluido y el material de la tubería por efecto de la fricción que allí se produce, son proporcionales a la rugosidad de la tubería. Tienen lugar en flujo uniforme, por tanto se distribuyen por la longitud de la tubería de sección constante.

En la ecuación de Bernoulli, hablando ahora de fluido reales, se debe introducir un nuevo término (h_f)

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_f = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (3.8)$$

donde, $h_f \rightarrow$ altura correspondiente a la pérdida de carga

La ecuación básica de las pérdidas de carga por Darcy-Weisbach es:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (3.9)$$

donde,

$f \rightarrow$ coeficiente de fricción

$L \rightarrow$ longitud de la tubería de igual diámetro

$V \rightarrow$ velocidad del fluido

$D \rightarrow$ diámetro de la tubería

$G \rightarrow$ gravedad

El coeficiente de fricción (f) varía según el tipo de flujo que se esté manejando. Para flujo laminar ($Reynolds < 2000$) la rugosidad o condición interior de la tubería no incide directamente en la pérdida de carga por fricción (excepto en secciones con cambios de dirección), el factor de fricción se obtiene mediante la ecuación:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (3.10)$$

donde, $Re \rightarrow$ número de Reynolds

Para flujo turbulento ($Reynolds > 4000$), el factor de fricción se encuentra afectado por la rugosidad de las paredes interiores de la tubería y el número de Reynolds puede ser determinado por la ecuación desarrollada por Colebrook-White (1939):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k_s}{3,7 \cdot D_i} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (3.11)$$

donde,

$Re \rightarrow$ número de Reynolds (adimensional)

$f \rightarrow$ factor de fricción

$k_s \rightarrow$ rugosidad absoluta [m]

$D_i \rightarrow$ diámetro interior de la tubería [m]

$$\text{ó} \quad f = \frac{0,25}{\left(\log \left(\frac{k_s}{3,7 \cdot D_i} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right)^2} \quad (3.12)$$

Como el factor de fricción f no puede expresarse explícitamente de la ecuación de White-Colebrook, entonces, para el cálculo de este factor se

necesita iterar la ecuación, lo cual se hace un trabajo extenso, por esto la ecuación ha sido representada por la ecuación (3.12) propuesta por Swamee o gráficamente sobre cartas desarrolladas por L.F. Moody, esta gráfica muestra la relación entre el factor de fricción y el número de Reynolds (Re), y la rugosidad relativa (k_s/D_i), en donde k_s es la rugosidad absoluta y D_i es el diámetro de la tubería.

Hay que tomar muy en cuenta que las pérdidas de carga únicamente se pueden calcular en tramos de igual diámetro; cuando éste varía, hay que aplicar todo el procedimiento nuevamente a cada tramo. Una vez hecho el cálculo para todos los tramos se sumarán todas las pérdidas por tramos para encontrar la total.

En la figura 10 observamos el procedimiento para trabajar con el diagrama de Moody: entrar con el número de Reynolds (Re) y subir hasta cortar la curva correspondiente al valor obtenido de la rugosidad relativa, luego continuar con la recta hacia la izquierda hasta conseguir el valor de f y con este valor se calcula h_f .

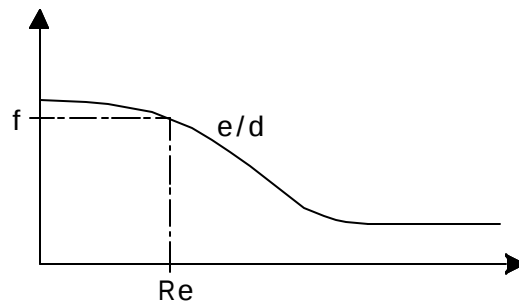


Figura 10 Diagrama de Moody.

Aparte de la fórmula de Darcy-Weisbach/Colebrook, otras soluciones matemáticas han sido desarrolladas para estimar las pérdidas de presión por fricción, algunos ingenieros prefieren usar fórmulas empíricas que han sido desarrolladas para el cálculo de flujo de agua en condiciones de régimen turbulento.

Una de estas fórmulas regularmente aceptadas y muy usadas para el cálculo de aducciones es la fórmula empírica de Hazen-Williams, que la experiencia demuestra que produce resultados reales, una forma de trabajar es la siguiente:

$$h_f = L \cdot \frac{10,675}{D_i^{4,87}} \cdot \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,852} \quad (3.13)$$

donde:

h_f → Pérdida de altura debido a la fricción (m).

L → Longitud de tubería inclinada longitud equivalente por pérdida por accesorios (m)

Q → Caudal manejado (m³/s).

C → Coeficiente de fricción de Hazen-Williams.

D_i → diámetro interno de la tubería (m).

De la siguiente tabla se obtienen los valores del factor de fricción para tuberías nuevas de Hazen-Williams:

CLASE DE TUBERÍA	C DE HANZEN WILLIAMS
Hierro fundido	100
Con revestimiento interno de concreto	110
Acero	120
Asbesto-cemento	120
Policloruro de vinilo (PVC)	140

Tabla 2 Valor de la C de Hazen-Williams según el artículo 130 de la Norma del M.S.A.S. para tuberías nuevas.

Otros valores de la C pueden apreciarse en la siguiente tabla:

CONDICIÓN	C
Tubos rectos: extremadamente lisos; asbesto-cemento	140
Tubos muy lisos; concreto; hierro fundido nuevo	130
Formaleta de madera; acero soldado nuevo	120
Arcilla vitrificada; acero ribeteado nuevo	110
Hierro fundido después de años de uso	100
Acero ribeteado después de años de uso	95
Tubos antiguos en malas condiciones	60-80

Tabla 3 Otros valores de la C de Hazen – Williams.

Esta fórmula se basa en un fluido con una viscosidad cinemática ($\nu = 0,00001216 \text{ ft}^2/\text{s}$) (1,13 centistokes) ó 31,5 SSU como es el caso del agua a $15,5^\circ\text{C}$ (60 $^\circ\text{F}$). Pero la viscosidad del agua puede variar apreciablemente desde 0°C (32 $^\circ\text{F}$) a 100°C (212 $^\circ\text{F}$) donde la fricción puede incrementar o disminuir en aproximadamente un 40% entre estos dos valores de temperatura. Pero esta fórmula puede ser utilizada para líquido cuya viscosidad se encuentra en la cercanía de los 1,13 centistokes.

Las **pérdidas secundarias o menores** son aquellas producidas por los accesorios que necesariamente debemos colocar en las tuberías para que éstas puedan realizar funciones específicas, estos pueden ser:

- ❖ Ensanchamientos
- ❖ Contracciones
- ❖ Válvulas
- ❖ Codos y curvas
- ❖ Tes
- ❖ Entradas y salidas de tuberías

Cada uno de estos elementos causa un cambio en la magnitud y/o la dirección de los vectores de velocidad y por tanto produce una pérdida. En general, si un dispositivo acelera gradualmente el flujo, las pérdidas son muy pequeñas; las pérdidas relativamente grandes están asociadas a

ensanchamientos repentinos a causa de la aparición de regiones separadas y flujos secundarios. Estas pérdidas a diferencia de las primarias se concentran en las inmediaciones del cambio de geometría.

Expresamos una pérdida menor en términos de un coeficiente de pérdida K , definido por:

$$h_{fs} = K \times \frac{V^2}{2g} \quad (3.14)$$

donde:

$h_{fs} \rightarrow$ pérdida de carga secundaria

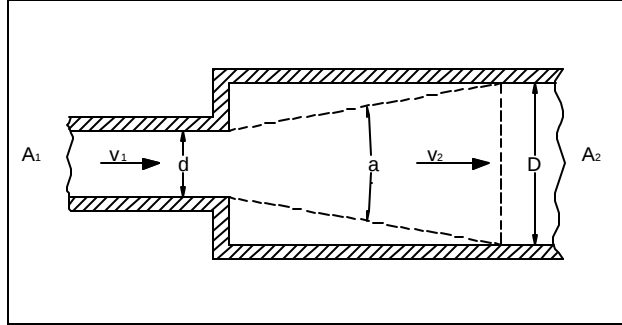
$K \rightarrow$ coeficiente adimensional de pérdida de carga secundaria

$V \rightarrow$ velocidad media en la tubería antes del accesorio

Factores de fricción para tuberías comerciales nuevas, de acero, con flujo en la zona de total turbulencia.

Diámetro Nominal		Factor de fricción (f_f)	Diámetro Nominal		Factor de fricción (f_f)
mm	pulg		mm	pulg	
15	½	0,027	65-80	2½-3	0,018
20	½	0,025	100	4	0,017
25	1	0,023	125	5	0,016
32	1¼	0,022	150	6	0,015
40	1½	0,021	200-250	8-10	0,014
50	2	0,019	300-400	12-16	0,013

Tabla 4 Factores de fricción para tuberías nuevas

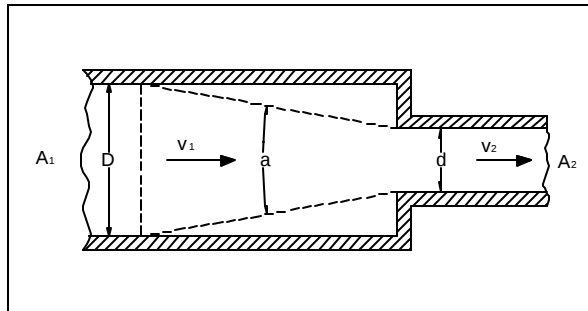
Coefficiente adimensional de pérdida de carga “K” para diversos accesorios.❖ **Ensanchamientos:****Figura 11** Ensanchamiento brusco y gradual.

En la figura 11 se pueden apreciar los ángulos y los diámetros representativos para utilizar las ecuaciones. El coeficiente de pérdidas debida a ensanchamientos bruscos y graduales puede expresarse por,

$$\text{Si: } a = 45^\circ \quad K = \frac{2,6 \times \left(\text{Sen} \frac{a}{2} \right) \times (1 - b^2)^2}{b^4} \quad (3.15)$$

$$45^\circ < a = 180^\circ \quad K = \frac{(1 - b^2)^2}{b^4} \quad (3.16)$$

donde: $\beta \rightarrow \frac{d}{D}$

❖ **Contracciones:****Figura 12** Contracción brusca y gradual.

En la figura 12 se pueden apreciar los ángulos y los diámetros representativos para utilizar las ecuaciones siguientes. Las contracciones graduales son piezas que están caracterizadas, en general, por pérdidas localizadas de energía de pequeña magnitud. El coeficiente de pérdidas debida a ensanchamientos bruscos y graduales puede expresarse por,

$$\text{Si: } a = 45^\circ \quad K = \frac{0,8 \times \left(\text{Sen} \frac{a}{2} \right) \times (1 - b^2)}{b^4} \quad (3.17)$$

$$45^\circ < a = 180^\circ \quad K = \frac{0,5(1 - b^2) \times \sqrt{\text{Sen} \frac{a}{2}}}{b^4} \quad (3.18)$$

donde: $\beta \rightarrow \frac{d}{D}$

❖ Válvulas:

Válvulas de Mariposa:

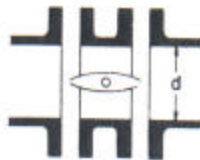


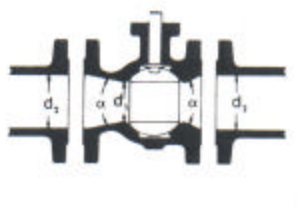
Figura 13 Pérdidas en válvulas de mariposa.

En la figura 13 se representan el valor de **d** que clasifica a las ecuaciones siguientes.

$$\text{Diámetro 50mm (2") a 200mm (8")} \quad \rightarrow \quad K = 45 \cdot f_T \quad (3.19)$$

$$\text{Diámetro 250mm (10") a 350mm (14")} \quad \rightarrow \quad K = 35 \cdot f_T \quad (3.20)$$

$$\text{Diámetro 400mm (16") a 600mm (24")} \quad \rightarrow \quad K = 25 \cdot f_T \quad (3.21)$$

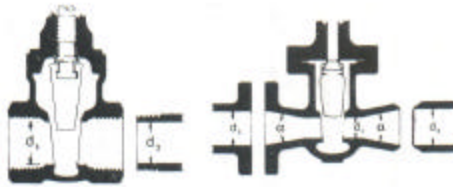
Válvulas de Bola:**Figura 14** Pérdidas en válvulas de bola.

Los valores de β , α , d y D se muestra en la figura 14.

$$\text{Si: } \beta = 1, \alpha = 0 \quad K_1 = 3 \cdot f_T \quad (3.22)$$

$$\beta < 1 \text{ y } \alpha = 45^\circ \quad K_2 = \frac{(K_1) + \text{Sen} \frac{\alpha}{2} [0,8 \cdot (1 - b^2) + 2,6 \cdot (1 - b^2)^2]}{b^4} \quad (3.23)$$

$$\beta < 1 \text{ y } 45^\circ < \alpha = 180^\circ \quad K_2 = \frac{(K_1) + 0,5 \sqrt{\text{Sen} \frac{\alpha}{2} (1 - b^2) + (1 - b^2)^2}}{b^4} \quad (3.24)$$

Válvulas de Compuerta:**Figura 15** Pérdidas en válvulas de compuerta.

Los valores de β , α , d y D se muestra en la figura 15.

$$\text{Si: } \beta = 1, \alpha = 0 \quad K_1 = 8 \cdot f_T \quad (3.25)$$

$$\beta < 1 \text{ y } \alpha = 45^\circ \quad K_2 = \frac{(K_1) + \text{Sen} \frac{\alpha}{2} [0,8 \cdot (1 - b^2) + 2,6 \cdot (1 - b^2)^2]}{b^4} \quad (3.26)$$

$$\beta < 1 \text{ y } 45^\circ < \alpha = 180^\circ \quad K_2 = \frac{(K_1) + 0,5 \sqrt{\text{Sen} \frac{\alpha}{2} (1 - \beta^2)} + (1 - \beta^2)^2}{b^4} \quad (3.27)$$

Válvulas de retención de disco oscilante:

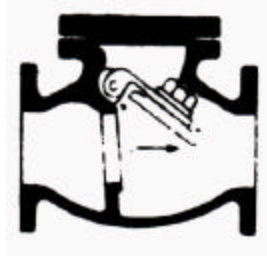


Figura 16 Pérdidas en válvulas de retención.

Si el disco se encuentra totalmente vertical $K = 50 \cdot f_T$ (3.28)

❖ Codos y curvas:



Figura 17 Codos estándar (roscada).

El coeficiente de pérdidas K se obtiene aplicando las siguientes fórmulas:

Para codo de 90° : $K = 30 \cdot f_T$ (3.29)

Para codo de 45° : $K = 16 \cdot f_T$ (3.30)

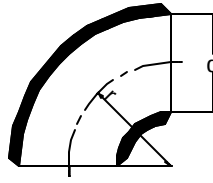


Figura 18 Curvas y codos de 90° con bridas o con extremos para soldar a tope.

El coeficiente de pérdidas K para codos o curvas de 90° con extremos para soldar a tope se obtiene de la siguiente tabla:

r/d	K	r/d	K
1	$20 f_T$	8	$24 f_T$
1,5	$14 f_T$	10	$30 f_T$
2	$12 f_T$	12	$34 f_T$
3	$12 f_T$	14	$38 f_T$
4	$14 f_T$	16	$42 f_T$
6	$17 f_T$	20	$50 f_T$

Tabla 5 Valores de K para codos de 90° para soldar a tope en base a la relación r/d .

Donde r/d se puede determinar según la figura 18.

El coeficiente K , para curvas que no sean de 90° puede determinarse con la fórmula:

$$K_B = (n-1) \left(0,25 p f_T \frac{r}{d} + 0,5 K \right) + K \quad (3.31)$$

donde:

$K \rightarrow$ coeficiente de pérdidas obtenido de la tabla 5

$n \rightarrow$ número de curvas de 90°

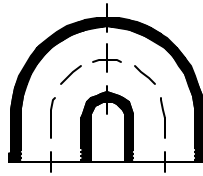


Figura 19 Curva de 180° de radio corto.

El coeficiente de pérdidas para codos de 180° de radio corto se calcula por la siguiente fórmula:

$$K_1 = 50 \cdot f_T \quad (3.32)$$

❖ Tes:

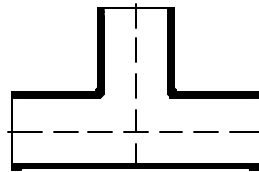


Figura 20 Conexión en "T".

Flujo directo $K_1 = 20 \cdot f_T \quad (3.33)$

Flujo indirecto $K_1 = 60 \cdot f_T \quad (3.34)$

❖ Entradas y salidas de tuberías:

Entradas,

Con resalte hacia el interior	A tope
$K = 0,78$	Los valores de K se obtienen de la tabla 6

Figura 21 Entradas de tuberías.

r/d	K
0,00*	0,50
0,02	0,28
0,04	0,24
0,06	0,15
0,10	0,09
0,15 y más	0,04

* de cantos vivos

Tabla 6 Valores de K para entradas de tubería a tope.

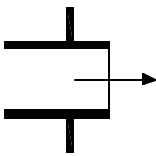
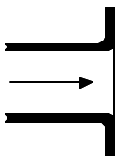
Salidas,			
Con Resalte	De cantos vivos	Redondeada	
			
$K = 1$	$K = 1$	$K = 1$	

Figura 22 Salidas de tuberías

- **Cavitación.**

Cuando la corriente en un punto de una estructura o de una máquina alcanza una presión igual a la presión de saturación de vapor, el líquido se evapora y se originan en el interior del líquido «cavidades» de vapor, de ahí el nombre de cavitación. Estas cavidades o burbujas de vapor arrastradas por la corriente llegan a zonas en que reina una presión muy elevada, y allí se produce una condensación violenta del vapor (implosión). Estas implosiones a su vez producen una elevación local de la presión que puede sobrepasar los 1.000 bar. En el interior del fluido existen, pues, zonas en que reina un gradiente fuerte de presiones que aceleran las burbujas y producen un impacto en el contorno (Venturi, bomba, turbina, etc.).

La hélice de un barco trabajando tres o cuatro meses en condiciones malas de cavitación queda totalmente inutilizada. El rodete de una bomba centrífuga que ha funcionado con cavitación presenta un aspecto esponjoso, como carcomido o corroído. Asimismo, se da el caso de que un álabe de una turbina de espesor de 25 mm queda totalmente erosionado por la cavitación en un solo año.

Estos impactos son además periódicos, es decir, se produce un fenómeno vibratorio que aumenta la erosión del material por fatiga. A estas vibraciones hay que referir la explicación del fallo de algunas piezas de los sistemas expuestos a este fenómeno.

Los principales fabricantes de estructuras y máquinas hidráulicas, por ejemplo de bombas, poseen en sus laboratorios equipo para estudiar este fenómeno, y poder determinar cual es el funcionamiento de su producto bajo este régimen.

La cavitación en las bombas (y en las turbinas) produce dos efectos perjudiciales: disminución del rendimiento y erosión. La aparición de la cavitación en las bombas está íntimamente relacionada a:

- a) con el tipo de bomba (en general el peligro de cavitación es tanto mayor cuanto mayor es el número específico de revoluciones);
- b) con la instalación de la bomba (la altura de suspensión de la bomba o cota del eje de la bomba sobre el nivel del líquido en el depósito de aspiración, debe ser escogida cuidadosamente para evitar la cavitación), este punto será mejor explicado en los apartados 3.4.8 y 3.4.9;
- c) con las condiciones de servicio de la bomba (el caudal de la bomba nunca debe exceder el máximo permisible para que no se produzca la cavitación).

De acuerdo con la intensidad, nivel de ruidos y daños, se han propuesto diversas clasificaciones para la cavitación. Una de ellas es la siguiente:

- ❖ Cavitación Incipiente: corresponde a la aparición de la cavitación. El ruido que la acompaña proviene de un débil burbujeo intermitente y no han de esperarse daños por vibración o erosión de las partes del dispositivo expuestas al flujo.
- ❖ Cavitación Crítica: en este nivel se presenta un ruido característico, claramente perceptible. Aunque es una fase más severa que la cavitación incipiente, no se producen daños apreciables. Por esta razón, tal nivel de cavitación es a veces adoptado como límite a los efectos de diseño.
- ❖ Daño Incipiente: Esta fase corresponde a la aparición de la erosión en los contornos sólidos debido al impacto de las cavidades condensadas sobre tales contornos. Las vibraciones y el ruido alcanzan niveles considerablemente superiores a los correspondientes a la cavitación crítica.
- ❖ Estrangulamiento por Cavitación: condición en la cual la presión de vapor prevalece en toda la región de flujo adyacente a la salida del dispositivo, y por lo tanto, una disminución de la presión del líquido aguas debajo de esa región no produce aumento de caudal. En esta situación se dice que el flujo está estrangulado y los daños se producen generalmente aguas abajo del dispositivo cuyo funcionamiento hidráulico determina la cavitación.

La cavitación también se puede clasificar en:

- ❖ Cavitación General: ocurre cuando la presión media del sistema alcanza la presión de saturación.
- ❖ Cavitación Local: causada por obstrucciones.

- ❖ Cavitación Transitoria: causada por arranques bruscos, aumentos de rpm, etc.
- ❖ Cavitación Permanente: Es la más peligrosa ya que produce el desgaste continuo sobre las partes metálicas.

En sistemas de líquidos a presión los principales factores que determinan la posibilidad de ocurrencia de la cavitación son los siguientes:

- ❖ Energía total y presión del flujo de entrada, H y P_1 , respectivamente.
- ❖ Presión aguas abajo, P_2 .
- ❖ Presión de vapor del líquido a la temperatura del flujo, P_v
- ❖ Características hidromecánicas de los dispositivos y geometría de las piezas especiales.
- ❖ Densidad del líquido, ρ

Los índices más utilizados para caracterizar la cavitación son:

$$s = \frac{P_2 - P_v}{P_1 - P_2} \quad (3.35)$$

$$s = \frac{P_2 - P_v}{P_1 + r \cdot \frac{V^2}{2} - P_2} \quad (3.36)$$

Otro de los índices de cavitación utilizados es el número de Thoma que es un parámetro que vincula las condiciones del flujo en un punto determinado (P_1 ó P_2) con el fenómeno. Dicho índice está definido por la siguiente expresión:

$$s = \frac{P - P_v}{r \cdot \frac{V^2}{2}} \quad (3.37)$$

donde

$s \rightarrow$ Índice de cavitación del flujo

$P \rightarrow$ Presión absoluta en el sitio de interés en [kgf/m]

$P_v \rightarrow$ Presión absoluta de vapor del agua, en [kgf/m]

$\rho \rightarrow$ Densidad del agua, en [kg-s]

$V \rightarrow$ Velocidad promedio del flujo en el sitio de interés, en [m/s].

En este índice, el numerador representa a las fuerzas que resisten la desorganización en la continuidad del flujo, mientras que el denominador es representativo de aquellas que promueven el rompimiento del orden, si el número de Thoma se acerca a cero es susceptible a la cavitación.

3.3.2 Régimen Transitorio:

Por razones de su propio funcionamiento, los sistemas de transferencia de líquidos a presión están invariablemente sujetos a modificaciones temporales de las magnitudes del flujo. Estas modificaciones, en general, están relacionadas con la acción hidromecánica de ciertos dispositivos y máquinas hidráulicas, instaladas en determinados sectores de la conducción. Son así, ejemplos típicos del régimen transitorio los casos de variaciones de la velocidad y de las presiones determinados por el accionamiento de una válvula, o las alteraciones en las condiciones del régimen que se producen en los múltiples de entrada y de salida de las estaciones de bombeo como consecuencia del accionamiento o de la detención de los grupos moto-bombas. Estos cambios localizados de presión y de velocidad se propagarán a todo el conducto con una celeridad cercana a la del sonido en el medio líquido no confinado, estableciéndose una compleja configuración de ondas primarias y reflejadas, cuyos efectos superpuestos para un tiempo dado y en una sección particular de la tubería, determinan allí las condiciones transitorias del flujo.

- **Golpe de Ariete**

En las tres fases: proyecto, instalación y funcionamiento de ciertas estructuras y máquinas hidráulicas es necesario un control del fenómeno

llamado “golpe de ariete”, que origina sobre-presiones o depresiones excesivas y que pueden conducir a averías, llegando hasta la destrucción misma de la estructura o de la máquina.

En el estudio de este fenómeno hay que abandonar las dos hipótesis normalmente utilizadas: fluido incompresible, régimen permanente. El golpe de ariete es un fenómeno transitorio y por tanto de régimen variable, en que la tubería ya no es rígida y el líquido es ligeramente compresible.

Este fenómeno se produce en los conductos al cerrar o abrir una válvula y al poner en marcha o parar una máquina hidráulica, o también al disminuir bruscamente el caudal.

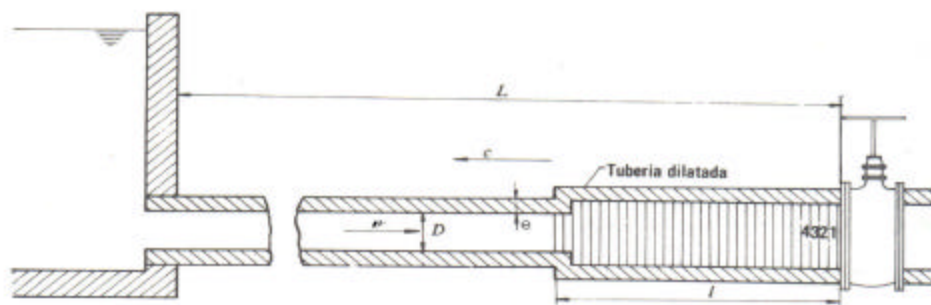


Figura 23 Onda de presión en el cierre instantáneo de una válvula, c es la velocidad de propagación de la onda y v la velocidad del fluido.

La Figura 23 representa una tubería de longitud L , espesor e y diámetro interior D por la que circula agua proveniente de un embalse y que termina en su extremo derecho en una válvula. Si se cierra ésta rápidamente, en virtud del principio de conservación de la energía, al disminuir la energía cinética, ésta se va transformando en un trabajo de compresión del fluido que llena la tubería y en el trabajo necesario para dilatar esta última en este caso se ha producido una sobre-presión, o un golpe de ariete positivo.

Por el contrario, al abrir rápidamente una válvula se puede producir una depresión, o golpe de ariete negativo.

Una válvula se puede cerrar rápida o lentamente, para estas dos ocasiones existen fórmulas diferentes para calcular la sobre-presión en la tubería, para efectos de este trabajo solo se presentaran para cierre lento que es lo más usado en la práctica debido a que genera menor sobre-presión.

Para simplificar, supondremos que la tubería es rígida, o sea indeformable, y que el cierre de la válvula es uniforme.

La fórmula para conocer el ΔP experimentado dentro de la tubería (o sobre-presión) es la siguiente:

$$\Delta P = k \frac{\rho \cdot L \cdot v}{t_c} \quad (3.38)$$

donde:

$\Delta P \rightarrow$ Sobre-presión generada en el interior de la tubería

$k \rightarrow$ Coeficiente comprendido entre 1 y 2, normalmente inferior a 1,5 para tomar en cuenta el efecto de la elasticidad de la tubería

$\rho \rightarrow$ Densidad del fluido

$L \rightarrow$ Longitud de la tubería

$v \rightarrow$ Velocidad inicial del fluido

$t_c \rightarrow$ Tiempo de cierre de la válvula

- **Criterios relativos al Golpe de Ariete:**

- ❖ En general, el golpe de ariete en estaciones de bombeo está relacionado con la puesta en servicio y desconexión de los grupos moto-bomba, así como también, con el tipo y características del

accionamiento de las válvulas previstas en los múltiples de entrada y de salida.

- ❖ Durante la operación normal del bombeo, y siempre que existan válvulas de accionamiento controlado, las fluctuaciones transitorias podrán atenuarse, en la mayoría de los casos, mediante especificación de los tiempos de cierre y apertura de estos dispositivos.
- ❖ Usualmente en líneas de bombeo el caso crítico del golpe de ariete se relaciona con la detención en emergencia de las moto-bombas, por averías electromecánicas o por falla del suministro de energía a la estación. En este caso, el accionamiento apropiado de las válvulas de control en el múltiple contribuye en forma apreciable a mitigar los efectos del golpe de ariete.

3.4 Sistemas de Bombeo.

Consideramos como sistema de bombeo o estación de bombeo a aquella que toma el agua directamente o indirectamente de la fuente de abastecimiento y la eleva al tanque de almacenamiento, a una estación de rebombeo o a la red. En ellas se localizan los equipos electromecánicos y facilidades necesarias para la operación de la misma. Para el diseño de una estación de bombeo se debe considerar los siguientes aspectos:

- El equipo de bombeo, integrado por la bomba, el motor y el acople, también llamado el equipo moto-bomba.
- Los accesorios complementarios, integrados por válvulas, instrumentos de medición, entre otros.
- Las edificaciones y las fundaciones.

El número de unidades de bombeo dependerá fundamentalmente del caudal, la altura de bombeo, la cavitación y de sus variaciones. Además, debe suponerse un margen de seguridad, previendo equipos de reserva para atender situaciones de emergencias y de mantenimiento.

3.4.1 Definición y Clasificación de las Bombas

Bomba es una máquina que absorbe energía mecánica y restituye al líquido que la atraviesa energía hidráulica.

Las bombas se emplean para impulsar toda clase de líquidos (agua, aceites de lubricación, combustibles, ácidos; líquidos alimenticios: cerveza, leche, etc.; estas últimas constituyen el grupo importante de las bombas sanitarias). También se emplean las bombas para bombear líquidos espesos con sólidos en suspensión, como pastas de papel, melazas, fangos, desperdicios, etc.

Las bombas se clasifican en:

1) Bombas de Desplazamiento Positivo. A este grupo pertenecen no sólo las bombas alternativas, sino las rotativas llamadas rotoestáticas porque son rotativas, pero en ellas la dinámica de la corriente no juega un papel esencial en la transmisión de la energía. Su funcionamiento se basa en el principio de desplazamiento positivo.

2) Bombas Rotodinámicas. Todas y sólo las bombas que son turbomáquinas pertenecen a este grupo.

- ❖ Estas son siempre rotativas. Su funcionamiento se basa en la ecuación de Euler, y su órgano transmisor de energía se denomina rodete.
- ❖ Se llaman rotodinámicas porque su movimiento es rotativo y la dinámica de la corriente juega un papel esencial en la transmisión de la energía.

3.4.2 Características de las Bombas Rotodinámicas

En la presente Tesis se trabajara con bombas del tipo rotodinámicas, por lo tanto se hará mayor énfasis en sus características y funcionamiento.

- **Clasificación de las Bombas Rotodinámicas:**

Según la dirección del flujo: bombas de flujo radial, de flujo axial y de flujo

mixto.

Según la posición del eje: bombas de eje horizontal, de eje vertical y de eje inclinado.

Según la presión engendrada: bombas de baja presión, de media presión y de alta presión.

Según el número de flujos en la bomba: de simple aspiración o de un flujo y de doble aspiración, o de dos flujos.

Según el número de rodets: de un escalonamiento o de varios escalonamientos.

- **Elementos Constitutivos**

En la Figura 24 se representa una bomba radial de eje horizontal en la cual pueden verse los elementos siguientes:

Rodete (1), que gira solidario con el eje de la máquina y consta de un cierto número de álabes que imparten energía al fluido en forma de energía cinética y energía de presión.

Corona directriz (2) o corona de álabes fijos, que recoge el líquido del rodete y transforma la energía cinética comunicada por el rodete en energía de presión, ya que la sección de paso aumenta en esta corona en la dirección del flujo. Esta corona directriz no existe en todas las bombas; porque encarece su construcción; aunque hace a la bomba más eficiente.

Caja espiral (3), que transforma también la energía dinámica en energía de presión, y recoge además con pérdidas mínimas de energía el fluido que sale del rodete, conduciéndolo hasta la tubería de salida o tubería de impulsión.

Tubo difusor troncocónico (4), que realiza una tercera etapa de difusión o sea de transformación de energía dinámica en energía de presión.

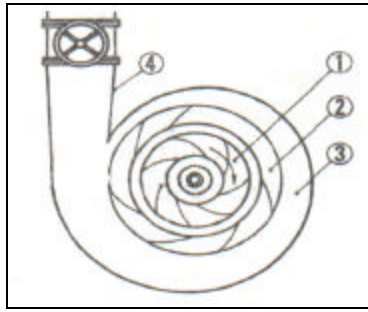


Figura 24 Elementos constitutivos de una bomba centrífuga.

- **Caudal o Gasto de Bombeo (Q)**

Es el volumen de líquido que fluye a través de la bomba por unidad de tiempo. Se expresa con frecuencia en m³/s, l/s ó gpm (galones por minuto).

- **Velocidad Específica**

Las bombas rotodinámicas pueden ser definidas en forma más explícita utilizando un parámetro adimensional llamado velocidad específica (Ns), el cual se expresa como:

$$N_s = \frac{N \cdot \sqrt{Q}}{H^{0,75}} \quad (3.39)$$

donde:

Q → Caudal [m³/s]

H → Altura total de la bomba [m]

N → Velocidad de rotación [rpm]

Tipo de Bomba	Rango de Ns
Centrífuga o flujo radial	10 a 40
Flujo mixto	40 a 140
Flujo axial	140 a 300

Tabla 7 Tipo de flujo según Ns.

Los rangos anteriores no constituyen límites rígidos; por ello deben interpretarse siempre como una guía rápida para establecer que tipo de flujo es el más probable en una determinada bomba.

- **Velocidad de Rotación:**

Es la velocidad angular de los elementos giratorios del grupo moto-bomba. Se expresa bien sea en revoluciones por minuto (N) [rpm], o en (?) [rad/s].

- **Potencia Hidráulica:**

Es la energía por unidad de tiempo transferida al flujo, y se expresa en Kw ó hp.

$$Pot_h = g \cdot Q \cdot H \quad (3.40)$$

3.4.3 Potencia de los Sistemas de Bombeo

El conjunto elevador (moto – bomba) deberá vencer la diferencia de nivel entre los dos puntos, más las pérdidas de carga en todo el trayecto (pérdida por fricción a lo largo de la tubería y pérdidas locales debidas a las piezas y accesorios). Por lo cual la potencia en los sistemas de bombeo se determina mediante la siguiente expresión:

$$Pot_{motor} = \frac{g \cdot Q \cdot H}{h} \quad (3.41)$$

donde:

$Pot_{motor} \rightarrow$ Potencia [w]

$g \rightarrow$ Peso específico del líquido al ser elevado [N/m³]

$Q \rightarrow$ Caudal [m³/s]

$h \rightarrow$ Eficiencia del sistema de bombeo

$H \rightarrow$ Altura dinámica total de bombeo [m]

1 hp = 745,45 w

La eficiencia del sistema de bombeo es:

$$h = h_{motor} \cdot h_{bomba} \quad (3.42)$$

- **Potencia Instalada:**

Se debe admitir, en la práctica, un cierto margen de potencia para los motores, los siguientes aumentos son recomendables (Tabla 8):

Aumento de la Potencia del motor [%]	Potencia de la Bomba [hp]
50	Menos de 2
30	De 2 a 5
20	De 5 a 10
15	De 10 a 20
10	Más de 20

Tabla 8 Aumento de la potencia del motor basado en la potencia de la bomba.

3.4.4 Rendimiento:

Es la relación entre la potencia hidráulica y la transmitida por el motor de la maquina. El rendimiento es necesariamente menor que la unidad, en razón de las pérdidas que ocurren en el proceso de transferencia de energía en el interior de la bomba.

$$h = \frac{Pot_h}{Pot_{motor}} \quad (3.43)$$

3.4.5 Torque:

Es el par de las acciones dinámicas inherentes al proceso de transformación de energía en el interior de la bomba, con respecto al eje de transmisión. En condiciones normales existe equilibrio entre ese torque y el generado por el motor y la máquina rota a velocidad constante. De acuerdo a la dinámica de los movimientos giratorios, la relación entre torque y potencia es:

$$M_t = \frac{Pot_{motor}}{w} \quad (3.44)$$

donde:

$M_t \rightarrow$ Torque [kgf· m]

$P_{motor} \rightarrow$ Potencia [kgf· m/s]

$w \rightarrow$ Velocidad de rotación [rad/s].

3.4.6 Instalación de una Bomba

Las tuberías se deben instalar de tal forma que no transmitan a la bomba ningún esfuerzo adicional. La bomba no se debe considerar como punto fijo para las tuberías.

- **Tubería de aspiración:**

El correcto funcionamiento de la bomba depende, en primer término, de la instalación correcta de la tubería de aspiración. La tubería de aspiración deberá estar completamente estanca y se instalará de forma que no puedan formarse bolsas de aire en ningún punto de la misma. Por esta razón, la posición de la tubería hacia la bomba debe ser siempre ascendente al tratarse de una succión negativa como se muestra en la figura 25.

Consideraciones para una succión negativa.

1. El cono reductor normal permite las formaciones de bolsas de aire, por ello se debe emplear por tanto conos reductores excéntricos.
2. La válvula de compuerta con husillo vertical hacia arriba también permite la formación de bolsas de aire, por lo tanto se debe instalar la válvula de modo que el husillo quede en posición horizontal o vertical hacia abajo. (esta válvula debe de estar completamente abierta durante el servicio de la bomba).

3. La tubería de aspiración debe instalarse siempre en posición ascendente hacia la bomba, esto al tratarse de una succión negativa, si se tratara de una succión positiva la tubería debe de llevar una inclinación ascendente hacia el tanque a ras de piso o elevado.
4. Utilizar siempre codos normales y evitar las curva pronunciadas.
5. El colador con válvula de pie se debe instalar 0,5m por debajo del nivel del agua mínimo y 0,5 m por encima del fondo, con ello se evita que la bomba aspire aire o arena y fango.
6. Tapón para el cebado de la bomba y la purga del aire.

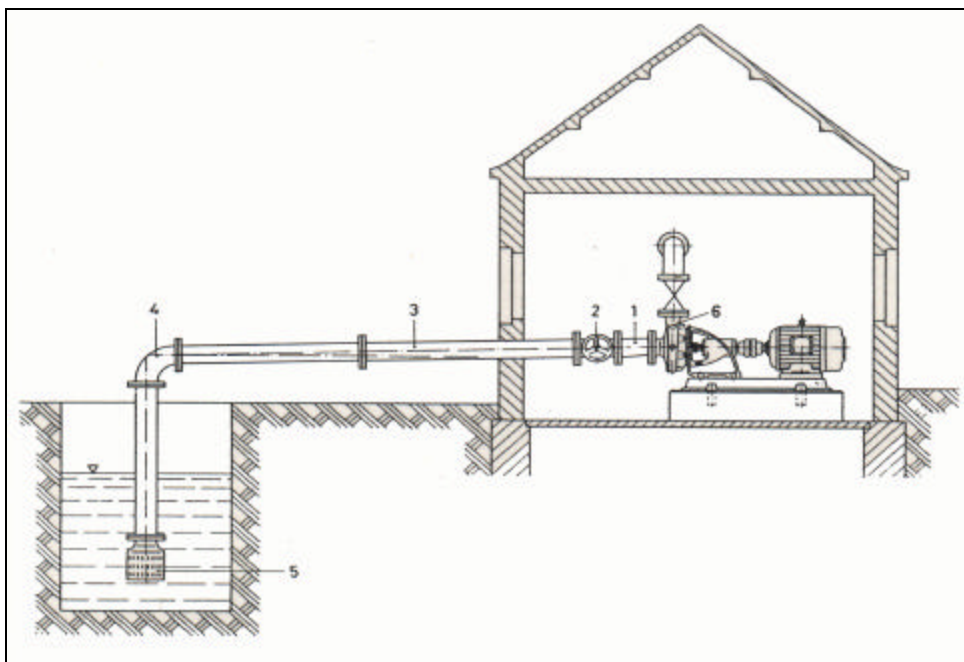


Figura 25 Colocación correcta de la tubería de succión de una bomba. (Succión negativa)

La succión de una bomba centrífuga debe ser lo más corta posible y con el menor número de accesorios a fin de disminuir las pérdidas de carga por fricción, si necesariamente se tiene que colocar una línea de succión larga, habrá que aumentar el diámetro para reducir las pérdidas por fricción, es preciso sellar bien las uniones para evitar la entrada de aire en la

tubería.

El diámetro nominal de la boca de aspiración de la bomba no tiene ninguna influencia sobre el diámetro nominal de la tubería de aspiración. La velocidad de flujo en la tubería de aspiración no debe de superar los 2m/s. por lo general debe de llevar cada bomba su correspondiente tubería de aspiración, pero si por causas especiales no fuera así, se deberá calcular la tubería de aspiración común a varias bombas teniendo en cuenta que la velocidad del líquido en ella sea reducida y procurando que su diámetro sea igual hasta la última bomba como se aprecia a continuación.

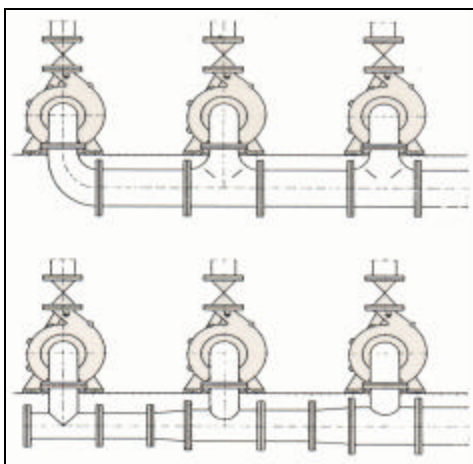


Figura 26 Tuberías de Aspiración.

Se deberá evitar siempre las curvas pronunciadas y las variaciones repentinas de diámetro y de dirección. Además se debe observar también que las juntas de entre las bridas no sobresalgan hacia el interior de la tubería.

Cuando la succión es positiva, se recomienda instalar una válvula de compuerta en la tubería de succión, con la que se pueda cerrar el paso al líquido de carga hacia la bomba cuando se realicen intervenciones a esta, durante el servicio esta válvula debe estar completamente abierta.

- **Tubería de Impulsión:**

El diámetro nominal de la brida de impulsión tampoco es decisivo para el dimensionamiento de la tubería de impulsión. La velocidad de flujo en la tubería de impulsión no debe sobrepasar los 3m/s. De ser posible se evitarán, también en la de impulsión, las curvas y desviaciones pronunciadas. Para alturas de impulsión superiores a los 15m y para tuberías de impulsión largas se recomienda instalar en la tubería de impulsión una válvula de retención, ésta protege a la bomba de las sobre-presiones o golpe de ariete que se producen cuando la bomba detiene su marcha y toda la columna de fluido tiende a regresar. Igualmente impide que la bomba gire en sentido contrario cuando detiene su marcha, finalmente protege los sellos mecánicos y las estopas con prensa estopa de estas sobre-presiones. Inmediatamente después de ésta se debe instalar una válvula de compuerta, ésta es necesaria para el cebado y para cortar el flujo ante una posible reparación de la bomba o de la válvula de retención.

Si se utilizan reducciones en la tubería de descarga, éstas deberán colocarse entre la válvula de retención y la bomba, las características de la tubería de descarga son determinadas por la pérdida de carga, la velocidad y la viscosidad del fluido por lo que siempre es conveniente utilizar tubos con un diámetro superior al diámetro de descarga de la bomba y nunca inferior a éste.

3.4.7 Carga o Altura Dinámica Total de Bombeo (H ó A.D.T.)

La Altura Dinámica Total de bombeo representa todos los obstáculos que tendrá que vencer un líquido impulsado por una bomba (expresados en metros de columna del mismo) para poder llegar hasta el punto específico considerado como el más desfavorable del sistema.

La expresión para el cálculo del H ó A.D.T. proviene de la ecuación de Bernoulli y es como sigue:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{g} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + (Z_2 - Z_1) + hf_{succión} + hf_{descarga} + h_{fs} \quad (3.45)$$

donde:

$H \rightarrow$ Carga [m]

$P_2 \rightarrow$ Presión en el punto 2 [Pa]

$P_1 \rightarrow$ Presión en el punto 1 [Pa]

$\gamma \rightarrow$ Peso específico del fluido [N/m^3]

$V_2 \rightarrow$ Velocidad en el punto 2 [m/s]

$V_1 \rightarrow$ Velocidad en el punto 1 [m/s]

$(Z_2 - Z_1) \rightarrow$ Diferencia de cota entre el nivel de succión y descarga del sistema.

$hf_{succión} \rightarrow$ Sumatoria de las pérdidas primarias en la tubería de succión.

$hf_{descarga} \rightarrow$ Sumatoria de las pérdidas primarias en la tubería de descarga.

$h_{fs} \rightarrow$ Sumatoria de las pérdidas secundarias tanto en la tubería de succión como en la de descarga.

Estos datos se pueden ver descritos en la figura 27.

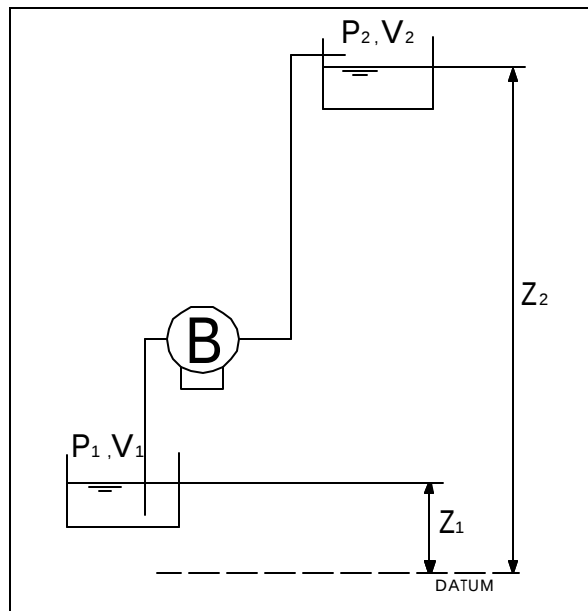


Figura 27 Esquema representativo de la instalación de una bomba que suministra a un tanque elevado.

- **Calculo de H.**

La ecuación de H se ve modificada en función de la configuración de la red y del tipo de succión positiva o negativa (si el nivel del líquido a succionar se encuentra por encima o por debajo respectivamente del eje de la bomba) a la cual estará sometida la bomba.

En las figuras siguientes se muestran ambos casos. En la medida de lo posible es conveniente colocar la bomba con succión positiva, ya que así se mantiene la misma llena de fluido, a la vez que se le disminuye la A.D.T. ó H, debido a la presión adicional agregada por la altura del líquido.

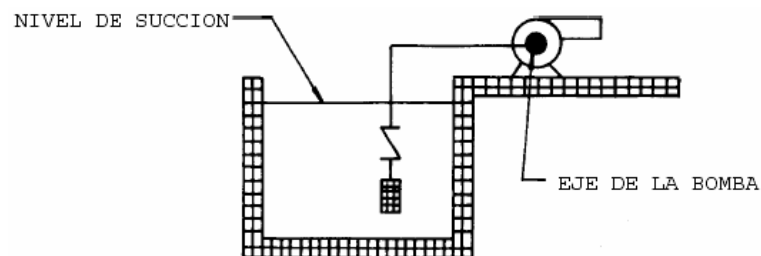


Figura 28 Succión Negativa.

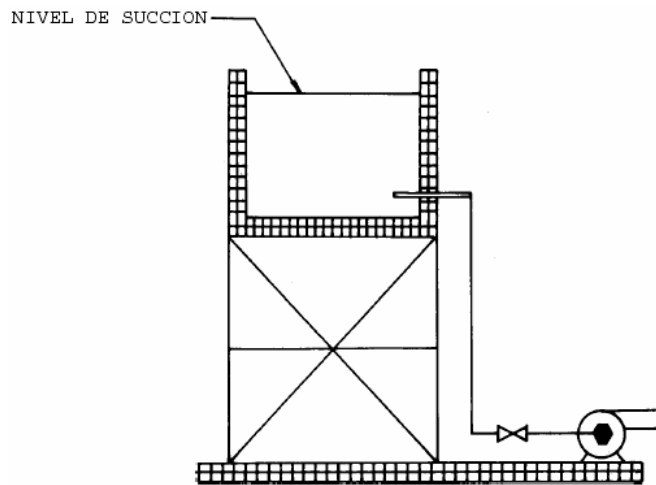


Figura 29 Succión Positiva.

Para su cálculo se resuelve la ecuación 3.45, si el resultado es positivo, este será el H que tendrá que generar la bomba para poder movilizar el flujo por ese sistema satisfactoriamente, si este número diera negativo, significa que no se necesita una bomba en el sistema.

- **Curva del Sistema**

Ésta da información sobre cómo aumentan las pérdidas por fricción mientras se le aumenta el caudal en el sistema.

Para hallar esta curva se tiene que resolver la ecuación 3.45 para diferentes caudales, esto dará una curva Q vs H la cual es conocida como curva del sistema, esta curva tiene la siguiente forma general.

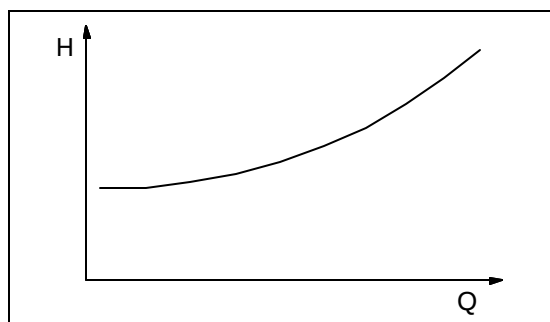


Figura 30 Curva del sistema

- **Curvas de la Bomba**

En la teoría de las bombas se demuestra que, una vez fijadas las dimensiones y geometría de sus partes constitutivas, así como la velocidad de rotación del impelente, se determina una relación única entre el caudal y el resto de los parámetros hidromecánicos asociados con la operación del bombeo. Por la complejidad del movimiento que tiene lugar en el interior de la unidad, esta relación debe ser obtenida mediante ensayos experimentales y los resultados se presentan en curvas funcionales.

En la siguiente figura se pueden apreciar las curvas de funcionamiento de una bomba. La magnitud del caudal y de la altura de bombeo en el punto de máximo rendimiento (Q_N , H_N , señalado con la flecha), se utilizan con frecuencia como valores nominales o de referencia de la bomba.

Estas curvas son de especial importancia a la hora de elegir una bomba para un sistema en específico, la llamada curva de la bomba es la Q vs H , ésta al ser interceptada con la curva del sistema a la misma escala da como resultado el punto de operación, que no es más que el punto en el cual trabajaría la bomba en el sistema especificado, este punto detalla la altura de bombeo y el caudal que puede proporcionar dicha bomba funcionando en ese sistema. Con estos datos se puede determinar si la bomba ofrece lo que se requiere para ese sistema.

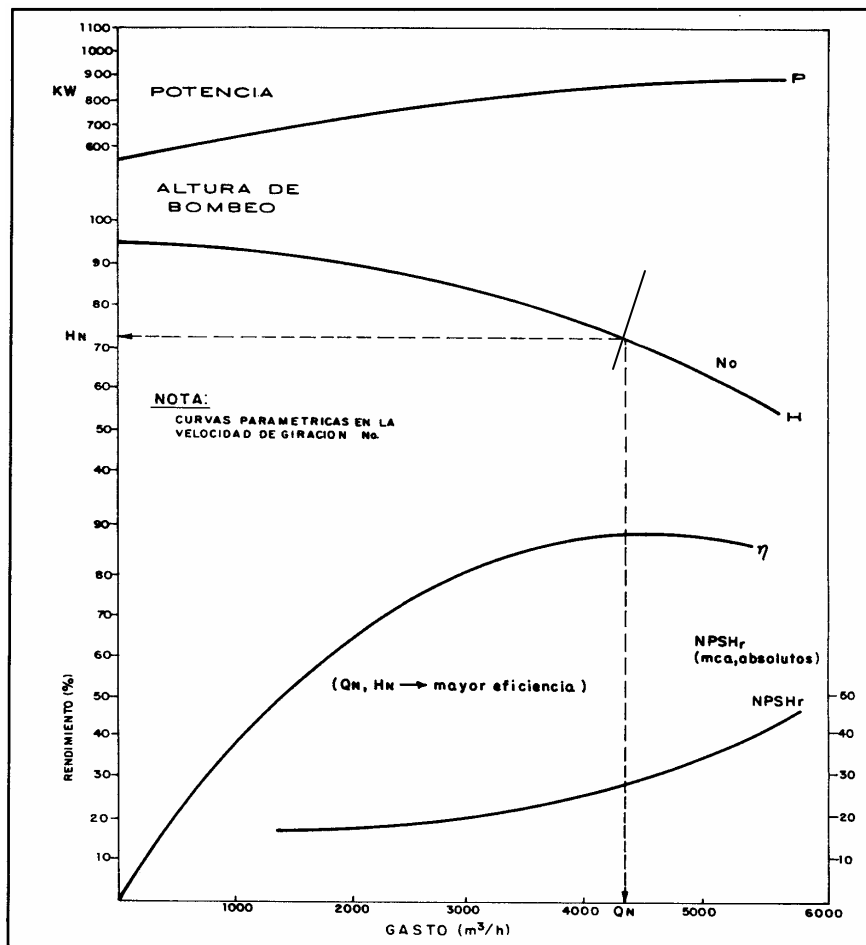


Figura 31 Curvas de funcionamiento de una bomba ($D=\text{cte}$; $N=\text{cte}$)

Hay que tomar en cuenta también las otras curvas mencionadas anteriormente, por ejemplo la de la eficiencia, debe escogerse una bomba en la cual el punto de operación se ubique cercano del punto de máxima eficiencia, con esto se ahorra energía en la operación de la misma.

La curva de la potencia indica la potencia que debe suministrar el motor al grupo moto-bomba (este factor es también de vital importancia para el ahorro de la energía), debido a que existen bombas que por tener un rodete más avanzado pueden dar el mismo punto de trabajo suministrándole una menor potencia.

Tipos de Curvas (dependiendo del ángulo β_{2p}):

- **STEEP:** Este tipo de curva tiene una mayor inclinación debido a que muestra una gran diferencia de altura manométrica para diferentes valores de caudal.

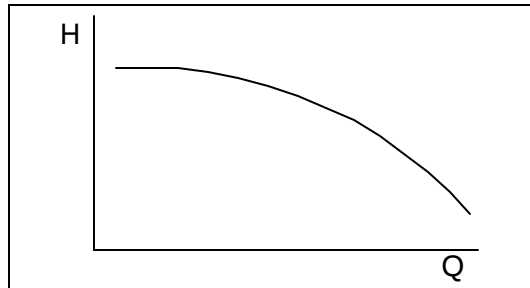


Figura 32 Curva tipo Steep

- **RISING:** Es una curva en la cual a medida que el caudal disminuye aumenta la altura manométrica.

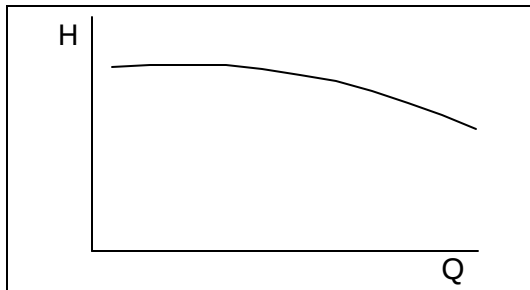


Figura 33 Curva tipo Rising

- **FLAT:** En esta curva la altura manométrica varía muy poco con relación al caudal.

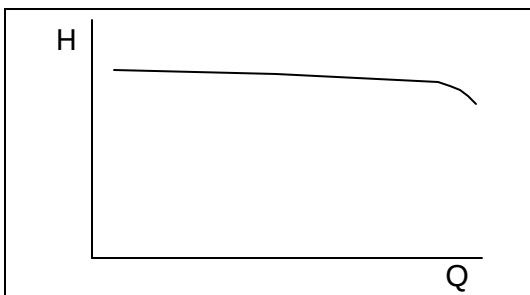


Figura 34 Curva tipo Flat

La curva que indica el (NPSH)_r se explicará a continuación.

3.4.8 Carga Neta Positiva de Succión Disponible (NPSH)_d

Según la definición de la ISO es la altura total absoluta referida a un plano horizontal que contiene al eje de apertura de succión (bombas horizontales) o al plano inferior del primer impelente (bombas verticales), menos la presión de vapor (absoluta) del líquido bombeado a la temperatura del flujo.

$$(NPSH)_d = \frac{P_1 + P_{atm} - P_v}{g} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} - h_c - h_{f_{succión}} \quad (3.46)$$

3.4.9 Carga Neta Positiva de Succión Requerida (NPSH)_r

Es la altura total mínima absoluta que se requiere en la succión de la bomba para garantizar un funcionamiento satisfactorio de la máquina, evitando la posibilidad de la vaporización del líquido en su interior y de la subsiguiente cavitación. El NPSH_r siempre se expresa en unidades absolutas y para su determinación se utilizan ensayos sobre modelos en laboratorios especializados, con diversos arreglos de los equipos de prueba y medición. Esta información es dada por el fabricante de la bomba como se muestra en la figura 31.

Se debe tener en cuenta siempre que para evitar la cavitación de una bomba se debe cumplir que para un determinado caudal de operación:

$$NPSH_d > NPSH_r$$

Tanto el NPSH requerido como el disponible tienen una relación directa con el caudal.

3.4.10 Arreglos de las Bombas

Existen dos formas de colocar las bombas dependiendo del caudal y de la presión que se necesiten en el sistema, estos son: arreglos en paralelo y arreglos en serie. Un sistema particular de los arreglos en serie es la bomba

multietapa.

- **Arreglos en paralelo:**

Utilizando dos bombas idénticas para alimentar fluido desde la misma fuente y entregarlo en la misma cabeza del sistema duplica la velocidad de flujo entregada. Esta colocación es útil, cuando un aumento de la demanda de agua obligase a aumentar el caudal bombeado, manteniendo la altura constante y la capacidad deseada está más allá del límite de capacidad de la bomba por sí sola. Este método también proporciona flexibilidad en la operación del sistema, debido a que una de las bombas pueda apagarse durante las horas de baja demanda o para darles mantenimiento.

- **Arreglos en serie:**

Bajo ciertas consideraciones es posible que más que un aumento de caudal, se precise un aumento de la carga dinámica a vencer, como consecuencia de modificaciones previstas o hechas al sistema de abastecimiento para atender a zonas desarrolladas a elevaciones mayores. En estas condiciones, una posible solución se logra mediante el acoplamiento de bombas en serie, dirigiendo la salida de una bomba a la entrada de otra bomba, permitiendo la obtención de la capacidad a una cabeza total igual a la suma de los valores de todas las bombas.

- **Bombas Multietapas:**

Un funcionamiento similar al que se logra por medio de la utilización de bombas en serie se puede obtener utilizando bombas multietapas. Dos o más impulsores se arreglan en la misma cubierta de tal forma que el fluido corre en forma sucesiva de una etapa a la siguiente. En cada etapa se incrementa la presión del fluido de tal forma que se puede desarrollar un valor de cabeza total muy elevado. El motor a acoplar a este tipo de bombas tiene que tener una potencia igual a la suma de la potencia requerida por cada impulsor.

3.5 Sistemas de Tuberías.

En los proyectos de sistemas de bombeo intervienen las tuberías como elementos principales del sistema. Por ello, la selección del material a emplear debe hacerse atendiendo a diversos factores que permitan lograr el mejor diseño.

Un diseño ventajoso es aquél que logra la utilización del material apropiado, aprovechando al máximo sus características (teniendo en cuenta el fluido a manejar, evitando siempre en lo posible la corrosión). Esta condición de diseño económico y funcional puede lograrse si utilizamos la tubería correcta para cada condición de trabajo.

Siendo la tubería un elemento sujeto a soportar presiones internas (presiones hidrostáticas e hidrodinámicas), es conveniente conocer que la presión interna origina una fuerza por unidad de longitud.

$$F_x = P \cdot D_i \quad (3.47)$$

lo que a su vez genera un esfuerzo s_t como se observa en la figura 35.

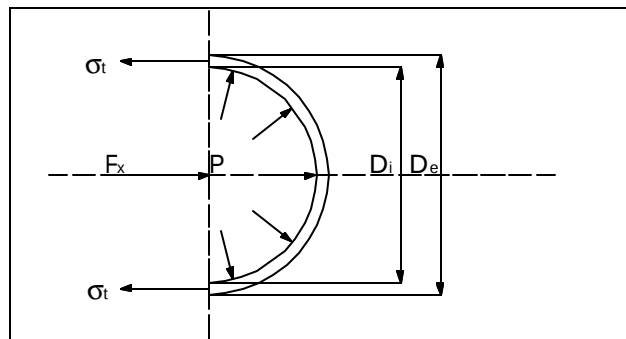


Figura 35 Presiones internas en tuberías

En la gran mayoría de los casos de diseño de tuberías fabricadas con hierro fundido dúctil, asbesto-cemento y plástico reforzado con fibra de vidrio se puede formular una simple relación entre las variables indicadas en la figura anterior, considerando el equilibrio según las x, admitiendo la distribución uniforme del esfuerzo tangencial s_t . De se obtiene la ecuación:

$$e = \frac{P \cdot D_i}{2 \cdot s_t} \quad (3.48)$$

donde:

$e \rightarrow$ espesor [m]

$D_i \rightarrow$ diámetro interno [m]

$P \rightarrow$ presión de diseño o de trabajo [Pa]

$s_t \rightarrow$ esfuerzo de trabajo [Pa]

Esta ecuación es aplicable siempre que (e/D_i) sea aproximadamente igual o menor de 0,02. Por otra parte, para compensar ciertas diferencias observadas entre los esfuerzos medidos y los calculados por la ecuación inmediatamente anterior, se prefiere utilizar la denominada ecuación de Barlow:

$$e = \frac{P \cdot D_e}{2 \cdot s_t} \quad (3.49)$$

donde:

$D_e \rightarrow$ Diámetro externo.

Para el acero, el esfuerzo de trabajo s_t se define de las formas siguientes:

$$s_t = K_a \cdot s_f \quad (3.50)$$

$$s_t = K_b \cdot s_r \quad (3.51)$$

donde:

$s_f \rightarrow$ es el punto cedente o de fluencia del acero.

$s_r \rightarrow$ el esfuerzo de rotura.

La selección de K_a y K_b , depende de las recomendaciones de diversos institutos relacionados de una u otra forma con el proyecto de tuberías, Así,

por ejemplo, las recomendaciones de la AWWA asocian s_t con el punto cedente, e indican un valor $K_a = 0,50$ por solicitaciones derivadas de la operación normal de la línea de flujo y $K_a = 0,75$ para las solicitaciones ocasionales, por ejemplo, las generadas por golpe de ariete. Por otra parte, en Venezuela ha sido una práctica común adoptar para s_t el menor de los valores determinados por $K_a = 0,60$ y $K_b = 0,40$ en solicitaciones derivadas del régimen permanente.

- **Línea de aducción por gravedad:**

Una línea de aducción por gravedad debe aprovechar al máximo la energía disponible para conducir el gasto deseado, lo cual en la mayoría de los casos nos conduce a la selección de diámetro mínimo que cumple con las especificaciones técnicas (capacidad), permita presiones iguales o menores que las que la resistencia física del material soportaría.

Los siguientes criterios son entonces fundamentales para el diseño de una línea de aducción por gravedad:

- ❖ Carga disponible o diferencia de elevación.
- ❖ Capacidad para transportar el gasto máximo diario.
- ❖ La clase de tubería capaz de soportar la presión hidrostática.
- ❖ La clase de tubería en función del material que la naturaleza del terreno exige.
- ❖ Diámetros.
- ❖ Estructura complementarias que se precisen para el buen funcionamiento.

- **Línea de aducción por bombeo:**

La existencia de fuentes de abastecimiento de agua a elevaciones inferiores a los sitios de consumo, obligará a estudiar alternativas de bombeo. A diferencia de un sistema de aducción por gravedad, donde la

carga disponible es un criterio lógico de diseño que permite la máxima economía, al elegir diámetros cuyas pérdidas de carga sean máximas; en el caso de aducción por bombeo, la diferencia de elevación es carga a vencer que va a ser incrementada en función de la selección de diámetros menores y consecuentemente ocasionará mayores costos de equipos y energía.

Dentro de estas consideraciones se tendrán dos alternativas extremas:

Diámetros pequeños y equipos de bombeo grandes con lo cual se tiene un costo mínimo para la tubería, pero máximo para los equipos de bombeo y su operación.

Diámetros grandes y un equipo de bombeo de baja potencia, resultando altos costo para la tubería y bajos costos para los equipos de bombeo y su operación.

3.5.1 Análisis de redes de tuberías. Redes Cerradas.

Este apartado está dedicado a la presentación de los diferentes métodos que se utilizan para el análisis y diseño de redes cerradas de tuberías o redes de distribución en sistemas de abastecimiento de agua. Estas redes se caracterizan por tener al menos un circuito cerrado, garantizándose así que cualquier zona cubierta por la red sea alcanzada simultáneamente por más de una tubería, con el objetivo de aumentar la confiabilidad del abastecimiento.

A lo largo de este apartado se presentan los métodos más utilizados en el análisis y diseño. Esto obedece a dos hechos importantes. En primer lugar, los métodos más modernos están basados en los más antiguos, los cuales en términos matemáticos son más sencillos pero requieren un mayor número de iteraciones para llegar a un resultado final. La necesidad de disminuir los tiempos de análisis en computador, aspecto importante en las décadas de 1970 y 1980, impulsó el desarrollo de nuevos métodos. En segundo lugar, en el mercado existen programas comerciales basados en

diferentes métodos de análisis. Por consiguiente, es importante que los ingenieros encargados del diseño, construcción y operación de redes de acueductos conozcan la base matemática de los programas a su alcance.

En orden cronológico se presentarán los siguientes métodos de análisis y diseño de redes cerradas.

- ❖ Método de Hardy-Cross con corrección de caudales en los circuitos
- ❖ Método de Hardy-Cross con corrección de cabezas en los nodos
- ❖ Método de Newton-Raphson
- ❖ Método de la teoría lineal
- ❖ Método del gradiente hidráulico

• Principios Fundamentales de Análisis de Redes Cerradas

Si se considera la red cerrada mostrada en la figura 36 y se tiene en cuenta que $Q_{D1}, Q_{D2}, Q_{D3}, Q_{D4}, \dots, Q_{D_{Nu}}$, son los caudales consumidos en cada uno de los nodos, algunos de los cuales podrían tener un valor nulo en un momento dado, y que $Q_{e1}, Q_{e2}, Q_{e3}, Q_{e4}, \dots, Q_{em}$, son los caudales que alimentan la red de distribución, se puede establecer la siguiente ecuación:

$$\sum_{i=1}^m Q_e = \sum_{I=1}^{Nu} Q_D \quad (3.52)$$

donde Nu es el número de uniones (nodos) que existe en la red.

La ecuación 3.52 es una ecuación de conservación de la masa. Por otro lado, para cada uno de los nodos se puede establecer una ecuación similar, debido a que localmente se debe cumplir el que la masa se conserve. Dicha ecuación es:

$$\sum_{j=1}^{NTi} Q_{ij} - Q_{Di} = 0 \quad (3.53)$$

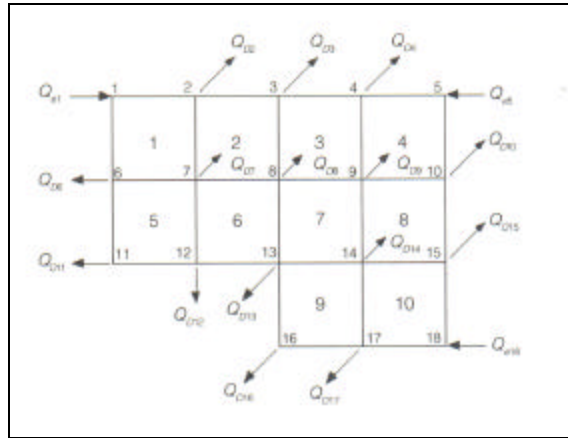


Figura 36 Red cerrada. Caudales consumidos en los nodos y caudales de alimentación a la red.

Donde NT es el número de tubos que llegan al nodo i y Q_{ij} representa el caudal que pasa por la tubería ij hacia el nodo i desde el nodo j . Puede ser positivo (va hacia el nodo i) o negativo (sale de dicho nodo).

Para cada uno de los caudales Q_{ij} de la ecuación 3.53 se puede plantear la siguiente ecuación de conservación de la energía entre los nodos i y j , incluyendo las pérdidas por fricción y las pérdidas menores:

$$H_j - H_i = \sum K_m \frac{V_{ij}^2}{2 \cdot g} + h_f = \frac{P_j - P_i}{g} \quad (3.54)$$

$$H_j - H_i = \frac{V_{ij}^2}{2 \cdot g} \left(\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right) \quad (3.55)$$

$$H_j - H_i = \frac{Q_{ij}^2}{2 \cdot g \cdot A_{ij}^2} \left(\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right) \quad (3.56)$$

Si se despeja Q_{ij} de esta última ecuación se obtiene la siguiente expresión, la cual relaciona el caudal que pasa por la tubería ij con las cabezas en los nodos i y j .

$$Q_{ij} = \left(\frac{H_j - H_i}{\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}}} \right)^{1/2} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot A_{ij} \quad (3.57)$$

Si se remplaza este último resultado en la ecuación 3.53 se obtiene:

$$\sum_{j=1}^{NT_i} \left(\frac{H_j - H_i}{\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}}} \right)^{1/2} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot A_{ij} - Q_{Di} = 0 \quad (3.58)$$

donde NT_i representa el número de tuberías que llega a la unión (nodo) i . A fin de tener en cuenta en forma automática el signo del caudal ij la ecuación 3.57 se puede cambiar por la siguiente expresión:

$$Q_{ij} = \sqrt{2 \cdot g} \cdot A_{ij} \frac{H_j - H_i}{\left(\sum K_m + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right)^{1/2}} \left(H_j - H_i \right)^{-1/2} \quad (3.59)$$

Este tipo de ecuaciones para el diseño y análisis de redes cerradas de tuberías se conocen como las ecuaciones de cabeza. En la red se tienen en total $(Nu - 1)$ ecuaciones de este tipo, debiéndose conocer o cualquier otra cabeza en la red para poder solucionar dichas ecuaciones. En caso contrario se puede suponer alguna de las cabezas, ya que los valores absolutos de éstas no afectan la distribución de caudales, y además debe tenerse en cuenta que las ecuaciones de cabeza son ecuaciones no lineales.

Por otro lado, a partir de los circuitos de tubos que conforman la red, los cuales pueden ser adyacentes o superpuestos, se pueden plantear las siguientes ecuaciones:

Ecuación de continuidad en las uniones que conforman el circuito:

$$\sum_{j=1}^{NT_i} Q_{ij} - Q_{Di} = 0 \quad (3.60)$$

Ecuación de conservación de la energía alrededor del circuito:

$$\sum_{j=1}^{NT'_i} h_{fij} + \sum_{j=1}^{NT'_i} h_{mij} = 0 \quad (3.61)$$

donde NT'_i , es el número de tubos del circuito i. Luego, si se utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach en esta última ecuación, se obtiene la siguiente expresión:

$$\sum_{j=1}^{NT'_i} \frac{V_{ij}^2}{2 \cdot g} \left(\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right) = 0 \quad (3.62)$$

$$\sum_{j=1}^{NT'_i} \frac{Q_{ij}^2}{2 \cdot g \cdot A_{ij}^2} \left(\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right) = 0 \quad (3.63)$$

Las ecuaciones de tipo 3.63 se conocen como las ecuaciones de caudal de la red. En total se tienen NC ecuaciones de caudal, donde NC es el número de circuitos que conforman la red. Nuevamente se puede observar que son ecuaciones no lineales.

Lo anterior implica que para el análisis de la red cerrada se tienen en total $NC + (NU - 1)$ ecuaciones que pueden ser utilizadas para encontrar las cabezas en cada nodo, una de las cuales debe ser conocida o supuesta, y los caudales en cada uno de los tubos que conforman la red. Sin embargo, este conjunto de ecuaciones no puede ser resuelto fácilmente debido a su naturaleza no lineal.

Una vez más debe establecerse una convención de signos para las ecuaciones de caudal 3.63. Los caudales en el circuito se consideran positivos si giran en el sentido de las agujas del reloj y negativos si lo hacen en sentido contrario. Para asegurar una correcta asignación del signo, estas ecuaciones se pueden transformar tal como se indica a continuación:

$$\sum_{j=1}^{NT_i} \frac{\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}}}{2 \cdot g \cdot A_{ij}^2} \cdot Q_{ij}(|Q_{ij}|) = 0 \quad (3.64)$$

Los métodos de análisis de redes de tuberías utilizan conjuntos de ecuaciones de cabeza y de caudal para solucionar la red. En todos los casos se conocen los diámetros y rugosidades de las tuberías, lo cual implica que en realidad se trata de procesos de comprobación de diseño y no de diseños en sí.

En esta tesis, de los métodos nombrados anteriormente solo se ampliará información sobre el método de la Teoría Lineal, el cual fue el usado en el desarrollo de ésta.

• Método de la Teoría Lineal

Este método fue desarrollado por D. J. Wood y C. O. A. Charles entre 1970 y 1972. Se basa en la linealización de las ecuaciones de energía en cada una de las tuberías de la red. Es un método muy apto para ser programado, ya que solo requiere de inversión de matrices y algunas iteraciones. Se ha demostrado que converge mucho más rápidamente que los métodos antes nombrados.

El método de la teoría lineal se basa en las siguientes ecuaciones:

1. Para cada unión (nodo) de la red se debe cumplir la ecuación de continuidad:

$$\sum_{j=1}^{NT_i} Q_{ij} - Q_{Di} (+Q_{ei}) = 0 \quad (3.65)$$

Si N_u representa el número de nodos de la red se tendrán N_u ecuaciones, una de las cuales es redundante.

2. Para cada uno de los circuitos de la red se debe cumplir la ecuación de conservación de la energía:

$$\sum_{j=1}^{NT_i} \left(h_{fij} + \sum_{j=1}^{NT_j'} h_{mij} \right) = 0 \quad (3.66)$$

Si NC representa el número de circuitos de la red, se tendrán NC ecuaciones. Mediante la ecuación de Darcy-Weisbach en la ecuación 3.66 se obtiene:

$$\sum_{j=1}^{NT_i'} \left(\frac{Q_{ij}^2}{2 \cdot g \cdot A_{ij}^2} + \left(\sum k_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right) \right) = 0 \quad (3.67)$$

La anterior ecuación indica que se tienen NC ecuaciones no lineales para el caudal. Dado que no es posible resolver directamente estas ecuaciones simultaneas no lineales, en el caso de flujo en redes se deben utilizar métodos iterativos.

Las ecuaciones anteriores, de las cuales existe una por cada circuito, se pueden transformar en:

$$\sum_{j=1}^{NT_i} k_{ij} \cdot Q_{ij}^2 = 0 \quad (3.68)$$

Es claro que el factor k_{ij} estaría definido como:

$$k_{ij} = \frac{\sum k_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}}}{2 \cdot g \cdot A_{ij}^2} \quad (3.69)$$

Para resolver el sistema de ecuaciones, el método de la teoría lineal propone el procedimiento siguiente:

$$h_{fij} + \sum h_{mij} = k'_{ij} \cdot Q_{ij} \quad (3.70)$$

en donde:

$$k'_{ij} = k_{ij} \cdot Q_{oij} \quad (3.71)$$

El caudal Q_{oij} es el caudal estimado si se trata de la primera iteración, o el caudal corregido de la iteración previa para las demás iteraciones. Al remplazar la ecuación 3.71 en la ecuación 3.68 se obtiene que:

$$\sum_{j=1}^{NT'_{ij}} k'_{ij} \cdot Q_{ij} = 0 \quad (3.72)$$

Si en el circuito existe una bomba esta última ecuación cambia a:

$$\sum_{j=1}^{NT'_{ij}} k'_{ij} \cdot Q_{ij} = H_B \quad (3.73)$$

Las NC ecuaciones 3.72, una para cada circuito, se combinan con las n ecuaciones de continuidad (una de las cuales es redundante, luego en realidad se utilizan $n-1$ ecuaciones) para formar un sistema de $NT = NC + NU - 1$ ecuaciones lineales. Es fácil demostrar que NT es el número de tubos de la red. Es decir, se tiene una ecuación para cada tubo y la incógnita para ellas es el caudal. Las cabezas de los nodos pueden ser calculadas, si se requieren, posteriormente.

Para utilizar las ecuaciones anteriores se debe suponer un caudal inicial en cada tubo. Una de las grandes ventajas del método de la teoría lineal radica en que al no tener estos que cumplir la ecuación de continuidad en el nodo no se requiere tiempo para la preparación de datos iniciales. El caudal inicial puede ser supuesto igual para todos los tubos: por ejemplo, $Q = 100$ l/s para todo t_i . Esta situación no afecta la velocidad de convergencia.

Para obtener los k'_i en cada iteración se utilizan las siguientes ecuaciones:

- Factor de pérdidas:

$$k_{ij} = \frac{\sum k_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}}}{2 \cdot g \cdot A_{ij}^2} \quad (3.74)$$

- Ecuación de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k_{sij}}{3,7 \cdot d_{ij}} + \frac{2,51}{\text{Re}_{ij} \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (3.75)$$

- Número de Reynolds:

$$\text{Re}_{ij} = \frac{V_{ij} \cdot d_{ij}}{u} = \frac{4 \cdot Q_{o_{ij}}}{p \cdot d_{ij} \cdot u} \quad (3.76)$$

Al observar que en todos los otros procesos de cálculo de redes cerradas los valores del caudal en cada tubo convergen por encima y por debajo, sucesivamente, al caudal final, Wood propuso que el caudal de la siguiente iteración ($k + 1$) no fuera el calculado en la iteración anterior (k), sino el siguiente:

$$Q_{o_{ijk+1}} = \frac{Q_{o_{ijk}} + Q_{ijk}}{2} \quad (3.77)$$

Esta última ecuación acelera de manera considerable el proceso de convergencia. El método puede resolverse matricialmente en la forma ilustrada en la figura siguiente representativa de una red cerrada, en donde se observa la topología de la red con dos circuitos y seis nodos.

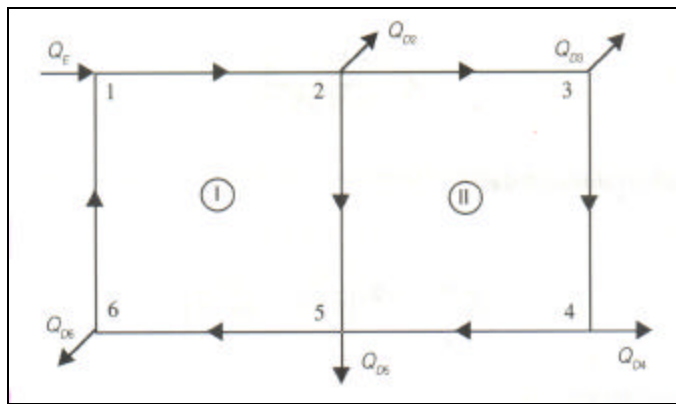


Figura 37 Red cerrada para ilustrar el uso del método de la teoría lineal.

En la figura anterior, las direcciones de los caudales son propuestas en forma arbitraria. Para esta red se pueden plantear las siguientes ecuaciones:

- Ecuaciones de continuidad en los nodos:

Se utiliza la convención usual: si el caudal llega al nodo es positivo, si sale de él es negativo. Por consiguiente:

$$\begin{array}{rclcl}
 -Q_{12} & +Q_{16} & & = & -Q_E \\
 +Q_{12} & -Q_{23} & -Q_{25} & = & Q_{D2} \\
 +Q_{23} & -Q_{34} & & = & Q_{D3} \\
 +Q_{34} & -Q_{45} & & = & Q_{D4} \\
 +Q_{25} & +Q_{45} & -Q_{56} & = & Q_{D5} \\
 +Q_{56} & -Q_{61} & & = & Q_{D6}
 \end{array}$$

- Ecuaciones de conservación de energía en los circuitos:

Nuevamente se utiliza la convención normal: Si el caudal (por consiguiente, la pérdida de energía) se dirige en sentido de las agujas del reloj es positivo; si lo hace en sentido contrario, es negativo. Para la red cerrada de la figura 37 se tiene que:

$$K'_{12} * Q_{12} + K'_{25} * Q_{25} + K'_{56} * Q_{56} + K'_{16} * Q_{16} = 0 \quad (3.78)$$

$$K'_{23} * Q_{23} + K'_{34} * Q_{34} + K'_{45} * Q_{45} - K'_{25} * Q_{25} = 0 \quad (3.79)$$

Todas las ecuaciones anteriores pueden ser ordenadas matricialmente de la siguiente manera:

-1	0	0	0	0	0	1	Q_{12}	$-Q_E$
1	-1	0	0	-1	0	0	Q_{23}	Q_{D2}
0	1	-1	0	0	0	0	Q_{34}	Q_{D3}
0	0	1	-1	0	0	0	Q_{45}	Q_{D4}
0	0	0	1	1	-1	0	Q_{25}	Q_{D5}
K'_{12}	0	0	0	K'_{25}	K'_{56}	K'_{61}	Q_{56}	0
0	K'_{23}	K'_{34}	K'_{45}	$-K'_{25}$	0	0	Q_{61}	0

O en forma reducida:

$$[A] [B] = [C] \quad (3.80)$$

Las incógnitas en cada iteración son los Q (matriz columna $[B]$), es decir, los caudales en cada uno de los tubos que conforman la red; luego:

$$[B] = [A]^{-1} [C] \quad (3.81)$$

Los valores de los k'_{ij} de la matriz $[A]$ se calculan con los Q_{0ij} para la primera iteración o con los $Q_{ij(k+1)}$ para las demás iteraciones.

En el proceso de cálculo de la red mediante el método de la teoría lineal se proponen los siguientes pasos:

1. Se suponen los caudales con sus respectivas direcciones para cada uno de los tubos. por ejemplo, se puede suponer un caudal de $Q = 100$ l/s para todo tubo i,j ; todos ellos en la dirección de las agujas del reloj.
2. Con estos caudales se calculan los k'_{ij} en las ecuaciones 3.74, 3.75, 3.76, 3.71 para cada tubo de la red.
3. Se plantean las ecuaciones lineales de continuidad y de conservación de energía.
4. Se construye la matriz $[A]$, la cual es una forma compacta de las ecuaciones de continuidad en los nodos y de conservación de energía en los circuitos.
5. Se calculan los caudales Q_{ij} en cada uno de los tubos de la red invirtiendo la matriz $[A]$, y resolviendo la ecuación 3.81.
6. Se corrigen los Q_{0ij} los caudales iniciales para la primera iteración o los caudales corregidos para las demás, antes de pasar a la siguiente iteración, utilizando la ecuación 3.77.
7. Se calculan los nuevos k'_{ij} mediante las ecuaciones 3.74, 3.75, 3.76, 3.71 y los caudales corregidos.
8. Se repiten los pasos 3 a 7 hasta que los Q_i sean todos lo suficientemente parecidos en dos iteraciones sucesivas. El grado de aproximación en los caudales es definido por el diseñador teniendo en cuenta factores tales

como el tamaño de la red y los caudales de consumo en cada uno de los nodos.

3.5.2 Válvulas

Estos son accesorios que se colocan en las tuberías para cumplir con una función específica tal como cortar, regular, desviar el flujo, prevenir un reflujo, entre otros. Generalmente están compuestas por tres partes:

El Cuerpo: que debe ofrecer la adecuada resistencia a las presiones no sólo del fluido sino también de los componentes internos.

El Obturador: Es el elemento móvil y que tiene como función principal abrir, restringir o bloquear la sección de paso del fluido.

Los Mecanismos de Accionamiento: éstos se encargan de accionar el obturador, pueden ser manuales, hidráulicos, neumáticos o eléctricos.

Es muy importante seleccionar siempre la válvula adecuada a la necesidad del sistema, este principio es esencial para obtener larga vida y bajo mantenimiento de las válvulas, para ello deben conocerse tanto la función que cada una de ellas puede realizar, como también la naturaleza del fluido y las presiones de trabajo, de modo que se seleccione la válvula no solamente del material adecuado, sino también el espesor y robustez de sus componente.

Los tipos más comunes de válvulas son los siguientes: de compuerta, de globo, de ángulo, de check, de mariposa, de diafragma, de aguja, en “Y”, entre otras.

- **Válvula de Compuerta:** Las válvulas de compuerta se usan en donde un mínimo de caída de presión a través de la válvula es importante. Se emplean donde las válvulas normalmente se encuentran completamente abiertas o cerradas. No están diseñadas para proveer una acción de estrangulamiento. En otras palabras, las válvulas de compuerta están diseñadas para permitir ya sea un flujo libre y continuo o impedir

completamente su paso. La colocación de estas válvulas debe ser en ángulo recto a la línea de flujo. De esta manera, ofrece menos resistencia al flujo que otros tipos.

Ésta, ya sea de cuña o de disco, se levanta o se baja para abrir o cerrar la válvula a la corriente de flujo. Las cuñas o discos son de varias clases. Toman las formas de cuñas sólidas, cuñas flexibles, cuñas divididas, discos de cuña doble o sencilla, disco de tapón, disco de cuña de doble huso, de asiento de doble disco paralelo, entre otras.

Los asientos de la válvula son ya sea una parte integral del cuerpo de la válvula o anillos renovables. En el último caso los anillos son generalmente de un material diferente a la del cuerpo. Los vástagos y husos pueden ser no ascendentes de tornillo interior, ascendentes o movibles de tornillo interior, o ascendentes de tornillo exterior y yugo. En la figura siguiente se aprecia esta válvula.

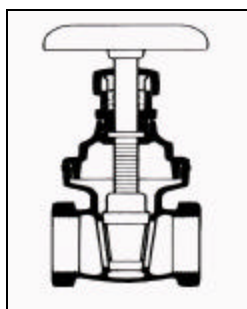


Figura 38 Válvula de compuerta.

- **Válvulas de Globo y de Ángulo:** Un uso importante de las válvulas de globo, es regular y estrangular el volumen de flujo de fluido desde un simple goteo hasta su máxima capacidad. Estas válvulas operan eficientemente son el huso o vástago en cualquier posición, desde completamente abierta hasta enteramente cerrada. Es posible, desde luego, utilizar estas válvulas para detener completamente el flujo o para el libre paso de éste, teniendo si una pérdida y un costo mucho mayor a la de compuerta. Esta se aprecia en la figura 39.

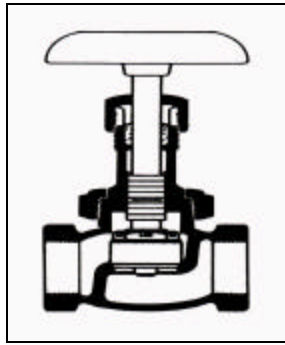


Figura 39 Válvula de globo.

- **Válvulas Check o de No Retorno:** éstas previenen la reversión de la dirección del flujo en una línea de tubería. La presión del líquido que fluye mantiene la válvula abierta, la gravedad unida a cualquier flujo reversivo, la cierra.

La acción de estas válvulas es automática, ordinariamente no tienen control externo. Los diseños básicos de este tipo de válvula son oscilantes y de elevación, en la oscilante el disco está suspendido en el cuello del cuerpo, en las de elevación, el disco o una esfera es levantada dentro de una guía desde su asiento por medio de la presión del líquido que fluye debajo de la misma. El tipo vertical es más limitado, ya que es usado en tubería vertical. Ejemplos de estas válvulas se aprecian en la siguiente figura,

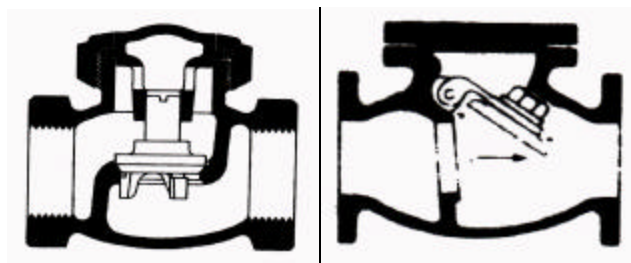


Figura 40 Válvula check.

- **Válvula de pie:** Esta es un tipo de válvula check, que es colocada al inicio de las tuberías de succión negativa, y no permite que la bomba se descebe. Esta consta de una maya metálica la cual impide la succión de partículas grandes, protegiendo así a la bomba.

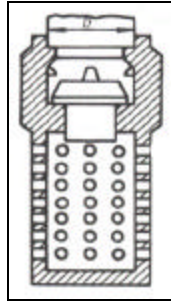


Figura 41 Válvula de pie.

- **Válvulas en “Y”:** Estas tienen características tanto de las de globo como de las de compuerta, ofrecen el paso recto y sin obstrucción del flujo de la válvula de compuerta y la habilidad de estrangulación de la de globo.

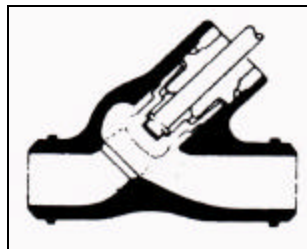


Figura 42 Válvula en “Y”.

- **Válvulas de Bola:** Ésta es del tipo abre-cierra, se usa para detener o permitir el libre flujo de un fluido. La bola o esfera tiene un conducto cilíndrico que la atraviesa, cuando este conducto se encuentra en línea con la conexión de la línea de tubería, el fluido pasa a través de la válvula, un cuarto de giro de la palanca coloca la bola en posición de cerrar el paso a cualquier flujo.

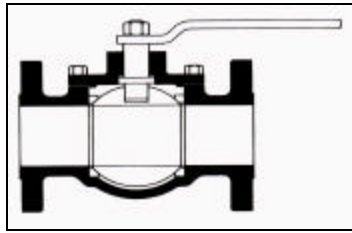


Figura 43 Válvula de bola.

- **Válvulas de Diafragma:** En este tipo de válvula, un diafragma, el cual sella y separa el área de la tapa del fluido circulante, controla el flujo, el diafragma se levanta para permitir el flujo y se baja para impedirlo.

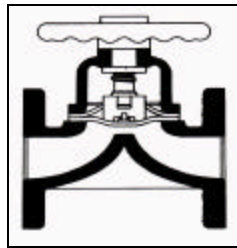


Figura 44 Válvula de diafragma.

- **Válvula de Mariposa:** El mecanismo de cierre de esta válvula está compuesto por una barra que requiere de un gran torque para moverse, debido a que el elemento obturador es un disco que gira sobre un eje colocado en el centro de la válvula, y que a medida que se va girando, se va oponiendo gradualmente al flujo. La palanca de accionamiento tiene posiciones graduadas para poder ejercer una regulación del fluido, sin embargo, son mejores para ser utilizadas para corte de flujo. Cuando su diámetro supera las 6" resultan más económicas que las válvulas de compuerta. Véase la figura 45.



Figura 45 Válvula de mariposa.

- **Válvulas de Alivio:** En caso de que se supere el límite prefijado de presión en una tubería en particular, estas válvulas se abren para dejar escapar una cantidad de fluido necesaria hasta bajar la presión a los valores de trabajo.

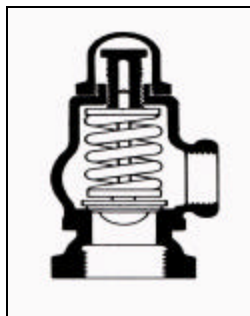


Figura 46 Válvula de alivio.

3.6 Motores Eléctricos.

El motor es el encargado de transmitir un par torsor a la bomba, fundamentalmente, para las bombas centrífugas el accionamiento puede ser generado por un motor eléctrico o de combustión interna (Gasolina o Diesel).

El funcionamiento de los motores eléctricos se basa en dos fenómenos físicos fundamentales relacionados con el magnetismo, uno es que se crea un campo magnético cada vez que se pasa corriente eléctrica a través de una bobina enrollada alrededor de un núcleo ferromagnético y el otro es que los polos magnéticos del mismo signo se repelen y los de signo diferentes se atraen. En los motores eléctricos se van creando, utilizando la corriente eléctrica, campos magnéticos de tal manera, que la polaridad en los campos fijos en la periferia del motor atrae o repele los núcleos de los campos móviles fijados en un eje, en virtud de la variación continua de la polaridad de las bobinas enrolladas alrededor de dichos núcleos.

En el motor, se suministra energía a los conductores y al campo magnético del dinamo a fin de producir un movimiento relativo entre ellos y producir por lo tanto energía mecánica. Dependiendo del tipo de corriente empleada, los motores eléctricos se dividen en dos grandes grupos:

3.6.1 Motores de Corriente Alterna:

Es la variación continua de la polaridad de la corriente, y en combinación con la posición relativa de los campos fijos y móviles, la que produce la atracción y repulsión alternada que origina la rotación.

- **Motores trifásicos.** El campo magnético rotatorio proporcionado por la potencia de **ca** trifásica permite medios simples y de bajo costo para construir un motor eléctrico. Se utilizan para todo uso y no requieren de devanado de arranque, interruptores o capacitores de arranque y giro, con lo cual se eliminan las mayores fuentes de fallas en los motores monofásicos.

El caballaje de los motores trifásicos varía desde 1/2 hasta 2.500 o más. La corriente de arranque requerida es de baja a media, alrededor de 5 a 7 veces la corriente a plena carga.

Los motores trifásicos pueden invertirse con facilidad eléctricamente, lo que los hace útiles para aplicaciones que incluyen el control de la dirección de la rotación o posicionamiento remoto. También están disponibles distintas combinaciones de las características de velocidad y par de torsión, de modo que el comportamiento del motor puede igualarse específicamente a una aplicación.

❖ Motores trifásicos de inducción de jaula de ardilla:

Con muchas ventajas, el motor más comúnmente usado para accionar las bombas centrífugas. Estos motores son básicamente máquinas de velocidad constante, aunque las características de operación pueden variarse en cierto grado modificando el diseño del rotor. Estas variaciones producen cambios predecibles en el par de torsión, la corriente y la velocidad a plena carga.

Es el motor de construcción más sencilla, éste consiste de un estator convencional devanado con un número específico de polos y fases, y un motor que tiene barras fundidas o soldadas, embebidas en el motor, no tiene colector, ni anillos rozantes. Esta construcción determina muchas

ventajas entre las que pueden citarse el funcionamiento en ambientes adversos en los que el polvo y otros materiales abrasivos constituyen un factor a considerar. Por esta razón, es el motor polifásico de **ca** más utilizado.

La evolución y la normalización en la industria de los motores han dado por resultado cinco tipos fundamentales de motores de inducción trifásicos conocidos por las letras de diseño de la NEMA.

3.6.2 Motores de Corriente Continua (cc)

Es la variación de la posición de los campos móviles en el rotor, con respecto a sus contactos de carbón que se deslizan sobre segmentos de anillos conectados a la fuente de energía, la que determina la alteración de su polaridad.

Los motores de **cc** se usan en muy diversas aplicaciones industriales debido a que sus relaciones de velocidad con el par de torsión pueden variarse en casi cualquier forma útil para aplicaciones de motor y regeneración y en cualquier dirección de rotación. Muchos motores de **cc** pueden operarse continuamente en una gama de velocidades de 8:1. El control de velocidad hasta cero, es también común durante breves lapsos o para impulsar cargas reducidas.

3.6.3 Acoplamientos

Siempre habrá alguna desalineación entre un eje impulsor y uno impulsado, y por ello deben utilizarse acoplamientos flexibles. La American Gear Manufacturers Association (AGMA) define los acoplamientos flexibles como aquellos elementos de máquinas que transmiten momento de torsión (par motor) sin resbalar y que absorben la desalineación entre los árboles impulsor e impulsado.

A través de la selección apropiada del acoplamiento y de un buen procedimiento de alineación, pueden evitarse altos costos de mantenimiento y pérdida de tiempo en la producción.

- **Tipos de Acoplamientos**

Dependiendo del método utilizado para absorber la desalineación, los acoplamientos flexibles pueden dividirse en:

- 1) acoplamiento de elementos deslizantes,
- 2) acoplamientos de elementos flexionantes y
- 3) combinación de acoplamientos deslizantes y flexionantes.

- 1) De elementos deslizantes**

Éstos absorben la desalineación por el deslizamiento entre dos o más de sus componentes. Este deslizamiento, y las fuerzas generadas por el momento de torsión transmitido, generan desgaste. Para dar lugar a una vida adecuada estos acoplamientos se lubrican, o se emplean elementos hechos de plástico de baja fricción.

- **Acoplamientos del Tipo de Engranaje.** Los acoplamientos del tipo de engranaje constituyen el diseño más universal. Pueden fabricarse casi para cualquier aplicación, estos acoplamientos pueden utilizarse en máquinas con árboles acoplados cerrados o para grandes separaciones entre los árboles conectados. Por otra parte, requieren relubricación periódica, son rígidos respecto a la torsión y son más caros que otros tipos de acoplamientos. (figura 47)

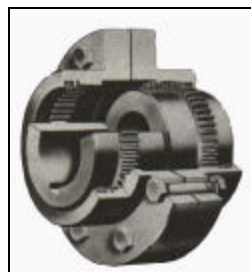


Figura 47 Acoplamiento del tipo de engranaje.

- **Acoplamientos de Cadena.** Estos acoples están constituidos por dos ruedas dentadas y un trozo de cadena doble. Por lo general se utilizan a bajas velocidades, excepto cuando se les agrega una cubierta especial, metálica o de plástico, para contener al lubricante el cual, de lo contrario, sería expulsado por la acción de las fuerzas centrífugas (Figura 48). Este tipo se utiliza en aplicaciones acopladas cerradas.



Figura 48 Acoplamiento de cadena.

- **Acoplamientos de Rejilla de Acero o Tipo Falk.** Este tipo de acoplamiento es semejante, en muchos aspectos, al de engranaje. Tiene dos cubos con dientes externos (Figura 49), pero con un perfil especial. En vez de los manguitos con dientes internos, tiene una rejilla de acero que pasa por todos los espacios entre los dientes. Debido a que la rejilla se flexiona un poco bajo la acción del momento de torsión, este tipo es menos rígido respecto a la torsión que el de engranaje.



Figura 49 Acoplamiento de rejilla.

Lubricación del acoplamiento. Este tipo de acoples requieren lubricación para minimizar el desgaste y, en consecuencia, incrementar su vida útil. Con unas cuantas excepciones, este tipo de acoplamiento se lubrica con grasa.

2) Acoplamientos de Elementos Flexionantes

Estos tipos de acoplamientos absorben la desalineación por la flexión de uno o más de sus componentes. Con el tiempo, esta flexión puede hacer que falle el elemento, el cual deberá reemplazarse. Dependiendo del material utilizado en el elemento flexionante, los acoplamientos se pueden dividir en dos tipos:

- con elemento metálico y
- con elemento elastomérico.
- **Acoplamientos con elemento metálico.** El elemento flexible no es de una sola pieza; se trata más bien de un paquete de muchos discos delgados estampados, normalmente hechos con acero inoxidable (Figura 50). El paquete de discos múltiples ofrece la ventaja de un sistema redundante, y el acoplamiento puede funcionar incluso después de que han fallado uno o más discos.



Figura 50 Acoplamiento con elemento metálico.

- **Acoplamientos con elemento elastomérico.** Existen muy pocos diseños que utilizan elementos elastoméricos, en algunos se tiene caucho, con o sin pliegues, y en otros se tienen plásticos.

Llanta de caucho. La llanta de caucho (Figura 51) está sujeta mediante mordazas a cada cubo.



Figura 51 Acoplamiento con llanta de caucho.

Rosquilla de caucho. La rosquilla (Figura 52) está atornillada por medio de sujetadores a los cubos y, en el proceso, también se precomprime para que nunca trabaje con tensión.



Figura 52 Acoplamiento con rosquilla de caucho.

Elemento Ranurado. El elemento ranurado (Figura 53) resbala axialmente hacia adentro de los cubos y es de caucho o de plástico.



Figura 53 Acoplamiento elemento ranurado.

Quijada. Este acoplamiento (Figura 54) también se conoce como de estrella debido a la forma del elemento elastomérico.



Figura 54 Acoplamiento de quijada.

Selección del acoplamiento:

La elección de un acoplamiento con el tamaño correcto es muy importante. Para hacerlo es necesario conocer no sólo la potencia y velocidades requeridas, sino también la severidad del servicio que debe absorber. Será necesario aplicar un factor de corrección o de servicio.

Aunque los acoplamientos representan un porcentaje pequeño del costo total de una pieza de la maquinaria, pueden causar tantos problemas, como el resto del equipo si no se seleccionan apropiadamente.

3.7 Mediciones Hidráulicas.

De este importante y amplio tema de la tecnología hidromecánica, sólo se presentarán los dispositivos más utilizados para medir las presiones, caudales y velocidades en las tuberías a presión, así como también, los niveles de las superficies libres de los estanques. El registro periódico de esas magnitudes, y su clasificación, almacenaje y evaluación, son actividades indispensables para estimar la eficiencia y para programar las mejoras de los sistemas de abastecimiento de agua. En efecto, con un buen programa de mediciones es posible lograr, entre otros, los siguientes objetivos:

- Verificar sistemáticamente el funcionamiento hidromecánico de los componentes operacionales del sistema, y tomar acciones correctivas cuando se adviertan fallas o situaciones objetables en el transporte de agua.
- Determinar las variaciones horarias, estacionales y anuales del consumo y, de esta forma, actualizar los criterios de diseño y operación de los sistemas.
- Registrar el crecimiento del consumo de agua y ajustar el modelo de predicción de la demanda, así como fundamentar las ampliaciones y mejoras del sistema sobre bases reales.

- Evaluar periódicamente la eficiencia general del sistema de abastecimiento de agua, definida como la relación entre los volúmenes de agua aprovechados en las fuentes y usadas por los equipos.
- Proporcionar datos reales que sirvan para calibrar y ajustar los modelos teóricos de operación.
- Utilizar las instalaciones del sistema de la forma más racional técnica y económicamente.
- Poner de manifiesto la existencia de ciertos tipos de fugas o tomas ilegales del agua a lo largo de las líneas de flujo.
- Con los costos globales operativos, establecer los costos unitarios del agua en diferentes secciones significativas del sistema.

3.7.1 Medidores de Presión

- a) Barómetros: miden la presión absoluta ambiental
- b) Manómetros absolutos: miden la presión absoluta en espacios cerrados.
- c) Manómetros: miden las presiones relativas positivas en espacios cerrados, con respecto a la presión atmosférica local.
- d) Vacuómetros: miden las presiones relativas negativas o vacíos, con respecto a la presión atmosférica local.
- e) Manómetros diferenciales: miden la diferencia de presiones entre dos puntos de un fluido confinado.

De los dispositivos mencionados anteriormente, se describen aquí sólo los utilizados con mayor frecuencia en los sistemas de conducción de agua por tuberías.

En los manómetros y vacuómetros elásticos, la acción de la presión admitida a uno de los compartimientos de su cuerpo, provoca la deformación de un sensor (tubo, diafragma, fuelle), cuyo movimiento

desplaza una aguja indicadora sobre una escala graduada. En el exterior del sensor prevalece presión atmosférica, por lo que esta clase de medidor registra presiones relativas. Los manómetros Bourdon se han usado exitosamente por décadas, su construcción es simple, poco costosa, cubren un amplio rango de presiones, se adaptan fácilmente a instrumentos para convertir y transmitir señales y, aunque requieren de calibraciones periódicas, su precisión es casi siempre compatible con las necesidades derivadas del control del flujo en sistemas de abastecimiento de agua mediante tuberías a presión. (Figura 55)

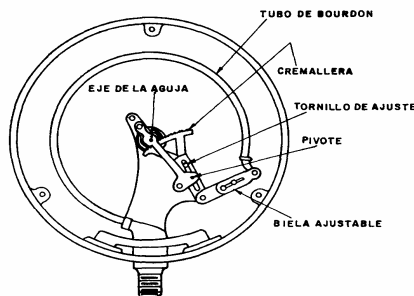


Figura 55 Manómetro tipo Bourdon.

3.7.2 Medidores de Caudales

Los instrumentos que más se utilizan para medir el caudal o gasto en conductos de agua a presión, al menos en nuestro país, pueden agruparse en las categorías siguientes: medidores volumétricos o de desplazamiento positivo; de turbina o hélice; medidores diferenciales; medidores hidráulicos de la velocidad del flujo y, más recientemente, los medidores ultrasónicos y de inserción magnética.

De los antes mencionados, se hará hincapié en los medidores ultrasónicos por ser éstos los propuestos en este trabajo.

Si en un punto tal como el m de la figura 56 se emite un impulso sónico de celeridad a , la velocidad del flujo V determinará que la velocidad de propagación absoluta de ese impulso sea de $V + a$ en la dirección del

movimiento y de $V - a$, en el sentido contrario.

En los medidores ultrasónicos, se miden los tiempos de recepción de ondas emitidas desde A y B, separadas una distancia L , figura 56, las cuales se relacionan con la velocidad media del flujo según el siguiente planteamiento:

Los tiempos requeridos para que el impulso desde A alcance a B y viceversa, son los siguientes:

$$t_1 = \frac{L}{a + V \cdot \cos \alpha} \quad (3.82)$$

$$t_2 = \frac{L}{a - V \cdot \cos \alpha} \quad (3.83)$$

Invirtiendo las ecuaciones anteriores y restando:

$$\Delta f = \frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} = \frac{a + V \cdot \cos \alpha - a + V \cdot \cos \alpha}{L} \quad (3.84)$$

o sea:

$$V = \frac{L \cdot \Delta f}{2 \cdot \cos \alpha} \quad (3.85)$$

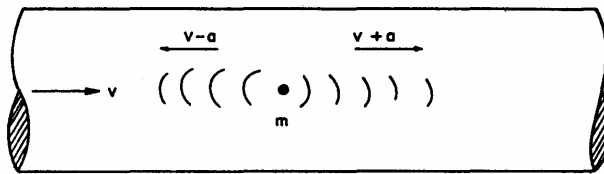


Figura 56 Transmisión de ondas en flujo a Presión.

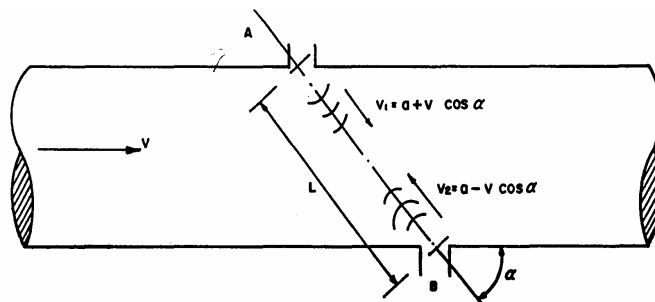


Figura 57 Principio del funcionamiento de las mediciones ultrasónicas.

El instrumento convierte los tiempos t_1 y t_2 en magnitudes eléctricas y entrega una señal proporcional al caudal en la tubería.

Como todos los instrumentos, los medidores ultrasónicos necesitan de atención sistemática y aunque sus costos son todavía relativamente elevados, poseen la ventaja de no interferir con la circulación del agua, evitando, por consiguiente, pérdidas localizadas de energía. Algunos de ellos son de instalación permanente y eventualmente requieren la fabricación de perforaciones en la tubería para la colocación de los emisores y sensores del ultrasonido. Actualmente, sin embargo, se han desarrollado modelos portátiles, no invasivos, es decir, su utilización sólo exige la aplicación exterior de los accesorios sobre dos sectores de la tubería apropiadamente habilitados y seleccionados, sin que sea necesario interrumpir el servicio de la línea de flujo.

En los medidores de caudales tipo diferencial, de ultrasonido o de inducción magnética, es necesario garantizar una distribución uniforme de la velocidad del agua en el sector de la tubería donde se instalan estos instrumentos, sólo así serán confiables las lecturas de gastos que se realicen.

3.7.3 Medidores de Niveles

La medición de los niveles líquidos en estanques y otras estructuras que se utilizan en los sistemas de abastecimiento de agua, se realiza mediante una gran variedad de dispositivos, uno de los más recientes son los

fotoeléctricos o los ultrasónicos. Teniendo en cuenta también las peras de nivel, y las válvulas mecánicas de nivel mediante flotador.

3.8 Equipos que Utilizan Agua en la Planta.

En la planta de cemento LAFARGE – Ocumare del Tuy, existen una variedad de equipos que utilizan el agua para su buen funcionamiento. Estos serán presentados a continuación y se indicará la función que tiene el agua en cada uno de ellos.

Los molinos de Cemento (1 y 2), los molinos de Crudo (1 y 2), y los hornos (1 y 2) por ser equipos rotativos poseen una serie de apoyos los cuales son refrigerados por aceite, el cual es a su vez refrigerado por agua temperatura ambiente.

El sistema de Crudo, tanto el 1 como el 2 constan de compresores (conocidos como 608 y Duplex respectivamente) los cuales son refrigerados por agua a temperatura ambiente.

Ambos molinos del sistema de Cemento también usan el agua a temperatura ambiente para inyectarla en su interior mediante toberas dándole así la humedad requerida en la fabricación del cemento.

El sistema de Las Torres Acondicionadoras de Gases, se encarga de pulverizar agua a temperatura ambiente en su interior mediante una serie de toberas con la finalidad de enfriar los gases salientes del horno a una temperatura específica para el buen funcionamiento de los electro-filtros y así reducir la contaminación ambiental.

3.9 Mantenimiento.

Se puede afirmar, que el mantenimiento es vital en el proceso productivo para que nos asegure el fin último que es el servicio, como lo indica Dounce [4] al señalar que “cuando un equipo nos proporciona un

servicio clasificado como vital o importante, por ningún motivo permitiremos que deje de funcionar dentro de sus parámetros establecidos. Sin embargo, siempre existe la posibilidad de que a pesar de todos nuestros cuidados y esfuerzos, se presenta alguna contingencia y tengamos una falla en el servicio”.

Según La Fiscalía General de Mantenimiento [20] “Mantenimiento es el conjunto de acciones continuas y permanentes, orientadas a prever y asegurar el funcionamiento normal, la eficiencia y la buena presentación de los bienes”.

El mantenimiento se clasifica básicamente en los siguientes tipos:

- **Mantenimiento Preventivo.**

De acuerdo con la Norma COVENIN N° 3049-93: “Es el que utiliza todos los medios disponibles, incluso los estadísticos, para determinar la frecuencia de las inspecciones, revisiones, sustituciones de piezas claves, probabilidad de aparición de averías, vida útil u otros”. Su objetivo es adelantarse a la aparición de de las fallas.

- **Mantenimiento Predictivo.**

Éste constituye una herramienta básica de diagnóstico que permite detectar técnicamente la condición del equipo y en función de ello tomar una acción concreta de mantenimiento preventivo para evitar la ocurrencia de una falla.

- **Mantenimiento Correctivo.**

Éste es el que normalmente se ejecuta cuando se presenta cualquier anomalía en la operación de un bien y da origen a que se tomen acciones inmediatas a fin de corregir las deficiencias presentadas. En función de la magnitud del problema los costos pueden llegar a ser impredecibles con las consecuencias propias para el sistema involucrado.

3.10 Certificación ISO 14000.

Las Normas ISO 14000 son una serie de estándares Internacionales para la gestión medioambiental. Estas normas establecen herramientas y sistemas para administrar las obligaciones ambientales sin dictaminar las metas que debe alcanzar una organización. Las normas ISO 14000 tendrán un efecto importante en el estado ambiental del planeta en general, conforme las organizaciones mundiales empiecen a seguirlas, pues aunque no tiene metas ambientales específicas, promueven y ponen en practica la administración ambiental en las organizaciones delineando herramientas comprensivas y flexibles en cuanto a su enfoque para ponerlas en practica.

Los estándares ISO 14000 están diseñados para proveer un esquema reconocido internacionalmente para gestión, medición, evaluación y audición ambiental. La idea es que las organizaciones tengan herramientas para calcular y controlar el impacto ambiental de sus actividades, productos o servicios.

Existen cinco temas fundamentales relacionados con el ambiente que las normas tratan:

- Sistemas de Gestión Ambiental.
- Auditorias Ambientales.
- Etiquetados y Declaraciones Ambientales.
- Evaluación de Actuación Ambiental.
- Valoración del Ciclo de Vida.

El diseño de las normas ISO 14000 ha sido elaborado de tal forma que sea compatible con la norma ISO 9000 para facilitar los sistemas operativos a aquellas empresas que previamente hayan implantado dicha norma. De esta manera se puede establecer un sistema integral de calidad Y ambiente.

Los temas cubiertos en ISO 14000 pueden dividirse en dos áreas separadas (Figura 57): la primera se relaciona con la administración de una

organización y sus sistemas de evaluación; y la segunda, con herramientas ambientales para la evaluación del producto. La evaluación de la organización consta de tres subsistemas que incluyen el sistema de gestión ambiental, la auditoría ambiental y la evaluación del desempeño ambiental; la evaluación del producto consiste de tres aplicaciones separadas e incluye aspectos ambientales en los estándares del producto, clasificación ambiental y la evaluación del ciclo de vida.

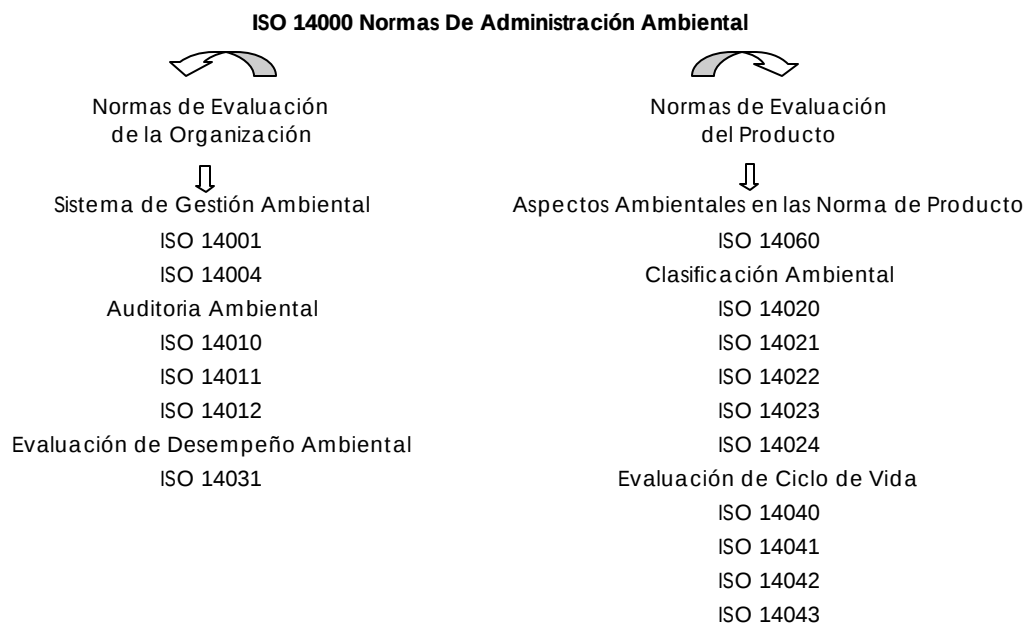


Figura 58 Serie de Normas ISO 14000 (Cascio et al, 1997)

4. MARCO METODOLÓGICO

La metodología utilizada para la realización de este diseño se basó en las siguientes fases procedimentales:

4.1 Revisión Bibliográfica.

Se recopiló información documental contenida en libros, textos, manuales sobre el agua, sus fuentes, su composición físico-química y su influencia en las tuberías, también se revisó material bibliográfico sobre fluidos, sistemas de bombeo, tuberías, entre otros.

4.2 Levantamiento del Sistema.

Para iniciar el diseño del nuevo sistema de abastecimiento de aguas, se levantó el sistema actual para estudiar, analizar y detectar deficiencias que poseía, así se pudo conocer en profundidad las instalaciones, equipos y componentes de dicho sistema. También se determinó la condición de los elementos que componen el sistema y que tengan un buen funcionamiento para así ser aprovechados en el sistema nuevo y contribuir así con un ahorro en los costos del proyecto.

4.3 Cálculo del Consumo.

El calculo del consumo de agua de la planta, se determinó midiendo el consumo de todos los equipos de la planta en funcionamiento y el consumo extra (humano, oficinas, almacén, entre otros).

Se cálculo volumétricamente el consumo de los equipos, para esto se utilizó un recipiente de volumen conocido, y se tomó el tiempo que tardó en llenarse por completo, esta medición se efectuó a la descarga de agua de los mismos.

Para el cálculo del consumo extra se utilizaron las “Normas Sanitarias Para Proyecto, Construcción, Reparación y Reforma de Edificios” tomada de La Gaceta Oficial Año XC – Mes V, N° 752 [18], que expresa lo siguiente:

- Según el artículo 98 por cada m² de oficina se estimarán 6 l/día.
- Según el artículo 99 el consumo por m² de almacenes es de 0,5 l/día.
- Según el artículo 102 existe un consumo de 80 litros por trabajador por cada turno de trabajo de 8 horas.
- Según el artículo 108 cada consultorio médico consume 500 l/día.
- Según el artículo 111 el consumo por m² de área verde es de 2 l/día.

Para hallar el total de consumo extra se sumaron los valores obtenidos en la aplicación de los artículos anteriores.

4.4 Análisis del Levantamiento.

Luego de conocer el funcionamiento del sistema y los caudales que se consumen en la planta, se procedió a analizar el funcionamiento de éste.

Para verificar que los equipos estuviesen trabajando con los caudales de diseño y que sus conexiones a la red de abastecimiento fuesen las indicadas se verificaron los manuales de dichos equipos.

Luego de analizar todos los equipos y sistemas de abastecimiento y retorno existentes en la planta se procedió a proponer nuevas ideas para contribuir con el mejoramiento de éstos.

4.5 Diseño del Nuevo Sistema.

Teniendo en cuenta las nuevas ideas propuestas, se realizó el diseño específico de éste. Estos diseños incluyen la selección de bombas, selección

de todo lo referente a las tuberías (accesorios, soportes, entre otros) y la colocación de la instrumentación adecuada en el lugar apropiado.

En los diseños también se consideró el funcionamiento de los sistemas de control para ser instalados en el sistema.

Para la realización de estos cálculos se utilizaron la mayoría de las fórmulas expuestas en el fundamento teórico.

4.6 Cotizaciones.

Luego de tener los diseños listos se solicitaron las cotizaciones para la realización de éstas a las compañías de servicio residentes en la planta (outsourcing), estas cotizaciones fueron de dos modalidades una a “todo costo” la que incluye montaje, materiales y equipos, mano de obra y seguridad. En el otro caso no incluye los materiales ni los equipos, para este caso se debió pedir presupuestos a otras empresas externas a la planta encargadas en la venta de los mismos.

4.7 Determinación de Costos

Se calculó el costo por concepto de energía consumida y con las cotizaciones obtenidas de la ejecución de obras, materiales y equipos, se procedió a determinar el costo por estos conceptos. Se efectuó un análisis entre los costos y los beneficios que aportará la realización del presente diseño.

4.8 Plan Básico de Mantenimiento.

Por último se realizó un plan básico de mantenimiento para el sistema de abastecimiento de aguas industriales, para garantizar su buen funcionamiento, eficiencia y presentación. Se tomó en cuenta el

mantenimiento requerido en los accesorios de los diferentes sistemas y de componentes de los equipos involucrados directamente con el flujo del agua.

5. DISEÑO DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUAS

5.1 Levantamiento del Sistema

Luego de realizar el levantamiento se pudo conocer cual es la distribución del agua en el sistema, la cual se puede apreciar en la figura 59, presentada a continuación:

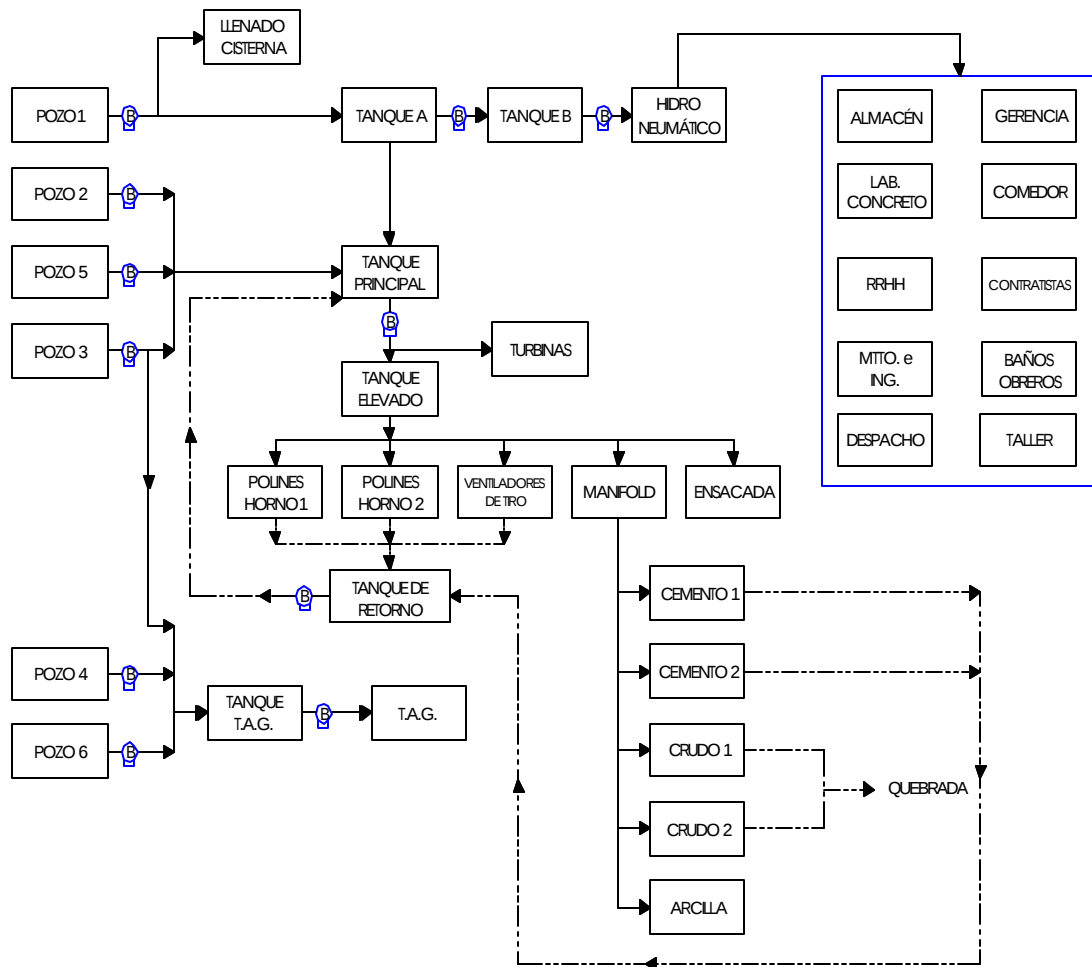


Figura 59 Distribución de la red del sistema actual.

En el diagrama mostrado las líneas continuas representan el abastecimiento y las líneas punteadas la descarga de los equipos.

La planta consta de seis pozos de los cuales se obtiene el agua utilizada por toda la planta, los pozos 2, 3 y 5 le sirven agua al tanque

principal que luego será bombeada a los tanques elevados ubicados arriba de los silos de caliza (a una cota de 42 m), desde allí se le distribuye agua a los polines (soportes de los hornos) de ambos hornos, a las chumaceras de los ventiladores de tiro, a los baños de ensacada y al manifold principal, de éste último se distribuye el agua a los sistemas de Cemento 1 y 2, a los sistemas de Crudo 1 y 2 (incluyendo a los compresores Duplex y 608), y a los baños de Arcilla.

También se puede apreciar la existencia de un Tanque de Retorno el cual regresa al Tanque Principal las descargas de los polines, ventiladores de tiro, y de ambos sistemas de Cemento.

El Pozo 1 abastece al Tanque A, el cual está comunicado con el tanque Principal y a su vez se bombea desde éste un caudal que abastece al tanque B, desde este último es succionada agua por el Hidroneumático el cual distribuye agua a todos los departamentos encerrados en el recuadro azul en la figura 59.

Los pozos 4 y 6 abastecen de agua al tanque de las Torres Acondicionadoras de Gases (T.A.G.), desde aquí se alimentan dichas torres, el agua utilizada por éstas se evapora, por lo tanto es desechada al ambiente, siendo ésta agua no retornable.

Se puede apreciar que el agua de descarga de los sistemas de Crudo es liberada a la quebrada derrochando así este caudal.

Por otra parte, se pudo verificar el mal estado de las válvulas debido al fenómeno de la calcificación, éstas presentan fallas de movilidad lo cual dificulta su apertura y cierre, afectando así las labores de mantenimiento.

Las toberas usadas por las Torres Acondicionadoras de Gases, presentan obstrucción periódica debido a la calcificación, sufriendo también los filtros del sistema al tener que filtrar el agua cruda sin un prefiltrado, ocasionando así su obstrucción más pronto de lo debido,

generando un aumento de las pérdidas en la succión de las bombas multietapas.

Las capacidades de todos los tanques existentes en la planta se resumen en la tabla 10.

Tanque	Capacidad [m ³]
Tanque A	160
Tanque B	127,5
Tanque C	147,9
Tanque Elevado (silo de Caliza 1)	50
Tanque Elevado (silo de Caliza 2)	50
Tanque de las T.A.G.	50
Tanque de retorno	20
Tanque Principal	549,5

Tabla 9 Capacidad (m³) de los tanques existentes en la planta.

Para una mejor comprensión de la distribución de los tanques A, B, C y principal se presenta el siguiente esquema.

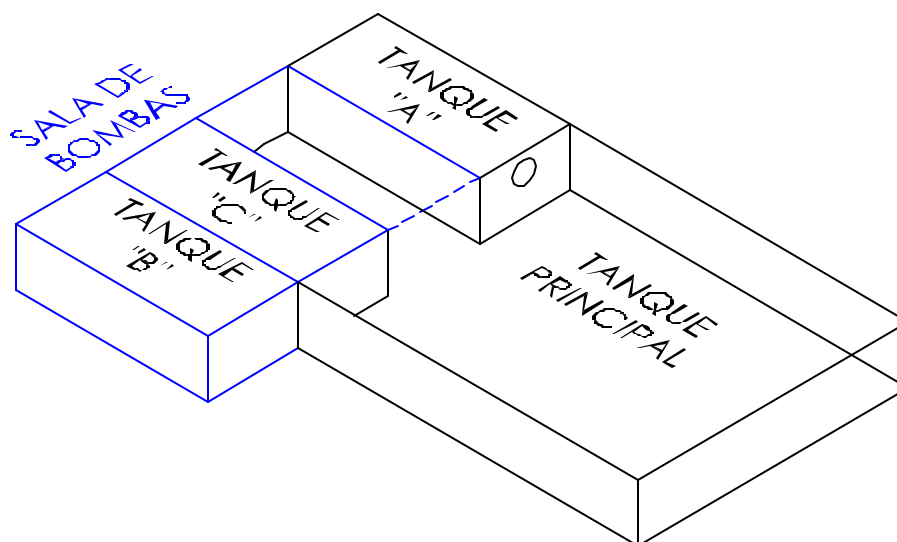


Figura 60 Distribución de los tanques A, B, C y tanque principal.

Actualmente no está en uso el tanque C, éste era usado para un sistema de rociadores el cual ya no está en funcionamiento.

En éste levantamiento se obtuvo información sobre los pozos y sus bombas instaladas, esta información se presenta en la tabla 10 a continuación:

	POZO 1	POZO 2	POZO 3	POZO 4	POZO 5	POZO 6
TIPO	Sumergible	Sumergible	Sumergible	Sumergible	Sumergible	Sumergible
MARCA	Famoven	Famoven	Famoven	Famoven	Famoven	Famoven
MODELO	1006 – L5	1006 – L5	304 – MS	756 – CL3	1006 – L5	756 – CL3
VOLTAJE	220 volt 3 fases	220 volt 3 fases	220 volt 3 fases	220 volt 3 fases	420 3 fases	420 3 fases
POTENCIA	10 HP-60Hz	10 HP-60Hz	3 HP-60Hz	7,5 HP-60Hz	10 HP-60Hz	7,5 HP-60Hz
rpm	3450	3450	3450	3450	3450	3450
CONSUMO	27 amps. p/f	26 amps. p/f	10 amps. p/f	30 amps. p/f	13amps. p/f	13amps. p/f
H	65 m	95 m	43 m	40 m	98 m	23 m
CAUDAL	9,5 l/s	4,7 l/s	3,2 l/s	9,2 l/s	4,8 l/s	12,4 l/s
PROFUNDIDAD DEL POZO	55 m	52m	11 m	39 m	60 m	121 m
DIÁMETRO TUBO DESCARGA	4"	3"	3"	3"	3"	4"

Tabla 10 Información de los pozos y sus bombas.

Dando como resultado un caudal disponible por los pozos de 43,83 l / seg.

5.2 Cálculo del Consumo

Para el cálculo del consumo de los equipos se utilizó un recipiente de volumen conocido, y se tomó el tiempo que tardó en llenarse por completo, esta medición se efectuó repetidas veces a la descarga de agua de los mismos, realizando luego un promedio entre las diferentes mediciones por cada equipo.

El consumo extra se calculó según Gaceta Oficial N° 752 “Normas Sanitarias Para Proyecto, Construcción, Reparación y Reforma de Edificios”, [18] los cálculos realizados se presentan a continuación:

Según el artículo 98 por cada m² de oficina se exigen 6 l/día, teniendo un aproximado de área útil de oficinas como se indica en la tabla 12:

Oficina	Área [m ²]
Mantenimiento	600
Sala de Control	220
Lab. Concreto	300
R.R.H.H.	145
Romana	30
Facturación	60
Compras	300
Gerencia	100
Servicios Generales	100
Lab. Cemento	100
Comedor	200
Total	2155

Tabla 11 Áreas aproximadas ocupadas por oficinas

Dando como resultado un área útil total de 2155 m², teniendo entonces:

$$Q_{\text{oficina}} = 2.155\text{m}^2 \cdot 6\text{l/m}^2 \cdot \text{día} = 12.930\text{l/día}$$

El cual es equivalente a 0,1497 l/seg por concepto de consumo de área de oficina.

Según el artículo 99 el consumo por m² de almacenes es de 0,5 l/día, teniendo un aproximado de área útil de almacén de 1100 m², se obtiene el siguiente cálculo:

$$Q_{\text{almacen}} = 1.100\text{m}^2 \cdot 0,5\text{l/día} = 550\text{l/día}$$

El cual es equivalente a 0,0064 l/seg por concepto de consumo de almacén.

Según el artículo 102 existe un consumo de 80 litros por trabajador por cada turno de trabajo de 8 horas, teniendo los datos de la siguiente tabla:

Oficina	Nº de Trabajadores
Mantenimiento	57
Sala de Control	38
Lab. Concreto	8
R.R.H.H.	8
Romana	3
Facturación	5
Compras	9
Gerencia	7
Servicios Generales	3
Lab. Cemento	3
Servicio Médico	3
Comedor	7
Contratistas	140
Total	291

Tabla 12 Número de trabajadores por departamento.

Los trabajadores señalados en la tabla 13 se reparten los distintos horarios, entonces el cálculo es el siguiente:

$$Q_{trabajadores} = 291 \cdot 80 l/día = 23.280 l/día$$

El cual es equivalente a 0,2694 l/seg por concepto de consumo humano.

La planta cuenta con dos consultorios médicos, según el artículo 108 cada uno de éstos consume 500 l/día lo cual genera el siguiente gasto:

$$Q_{consultorio} = 2 \text{consult.} \cdot 500 l/\text{consult.} \cdot día = 1.000 l/día$$

El cual es equivalente a 0,0116 l/seg por concepto de consultorios médicos.

Referente al riego de las áreas verdes se puede decir que ésta es de aproximadamente de 3.000 m², según el artículo 111 se tiene el siguiente cálculo:

$$Q_{riego} = 3.000 m^2 \cdot 2 l/m^2 \cdot día = 6.000 l/día$$

El cual es equivalente a 0,0694 l/seg por concepto de riego de áreas verdes.

Según el artículo 94 para áreas de comedor se exigen 50 l/m², teniendo entonces un área de 65 m² de comedor:

$$Q_{comedor} = 65 m^2 \cdot 50 l/m^2 \cdot día = 3.250 l/día$$

El cual es equivalente a 0,0376 l/seg por concepto de comedor.

Sumando todos estos caudales, se encuentra el caudal total de consumo extra de la planta:

$$Q_{total} = Q_{oficina} + Q_{almacen} + Q_{trabajadores} + Q_{consultorio} + Q_{riego} + Q_{comedor} = 0,5386 l/seg$$

Teniendo en cuenta un factor de seguridad de 2, el consumo a tener en cuenta sería de 1,0772 l/seg, tomando en cuenta goteras, escapes a la

atmósfera en el proceso y posibles futuras ampliaciones, se tomó como valor de $Q_{total} = 2 \text{ l/seg.}$

Agrupando todos los caudales de la planta se construyó la tabla 13:

	Q(m3/h)	Q (L/S)	¿RETORNABLE?
Crudo 1			
Compresor 608	5,7715	1,6032	Si
Molino	4,7819	1,3283	Si
Crudo 2			
Compresor Dúplex	13,8971	3,8603	Si
Molino 2			
Horno 1			
Polines	9,2743	2,5762	Si
Horno 2			
Polines	12,7919	3,5533	Si
T.A.G. 1			
Toberas	16,0000	4,4444	No
T.A.G. 2			
Toberas	21,0000	5,8333	No
Cemento 1	5,6275	1,5632	No
Cemento 2	5,6275	1,5632	No
Ventiladores 1 y 2	1,4627	0,4063	Si
Laboratorio, Contratistas, Sala de control, Ensacada, Mantenimiento, Lavado de gandolas y otros.	7,2000	2,0000	No

Tabla 13 Consumo de la planta.

Como se puede apreciar a la tabla 13 se le anexó una columna que determina si el caudal puede ser retornable (o sea que el agua no sufre contaminación en su recorrido, no se disipa al ambiente o al proceso), este factor es de vital importancia para ahorrar energía de bombeo y para no

desechar agua sin razón contribuyendo así a la conservación del acuífero.

De dicha tabla se puede concluir que existe un caudal total de bombeo a los tanques elevados de 28,7317 l/seg, de los cuales son retornables al tanque principal sólo 13,3276 l/seg, disipándose al ambiente y al proceso 15,4041 l/seg.

5.3 Diseño del Nuevo Sistema de Abastecimiento de Agua.

5.3.1 Bases del Diseño.

- **Tubería seleccionada.**

Es importante destacar que la presión más elevada de la red de aguas industriales es de 500 psi, por lo tanto se procedió a calcular en base al apartado 3.5 las presiones máximas que pueden soportar las tuberías de cédulas específicas, luego de realizados los cálculos se escogió la cédula 40 (schedule 40) por ser la más comercial y soportar las presiones máximas del sistema. En la tabla 14 se resumieron los valores de presión interna máxima de las tuberías de los diámetros utilizados en el presente diseño de cédula 40.

Tomando s_f del acero como 21,1 Kgf/mm² y $K_a = 0,75$ y aplicando las ecuaciones (50 y 51) se obtuvo los siguientes valores:

Diámetro [pulg]	Presión máxima interna [psi]	Presión máxima interna [KPa]
1	4553,0344	31392,0671
2	2915,7854	20103,6326
2 ½	3178,4905	21914,9205
3	2778,1034	19154,3486
4	2370,8891	16346,7049
6	1902,5144	13117,3750

Tabla 14 Relación entre el diámetro y la P_{max} de tuberías Shedule 40.

Las bridas utilizadas en el diseño fueron del tipo Welding Neck, de acero al carbono ASTM A-105, ASA 150 lb para las áreas del sistema a baja presión y ASA 300 lb para las zonas de alta presión del sistema.

Fueron elegidas de este tipo por su fácil instalación y por su mejor resistencia a trabajos forzosos.

- **Instrumentación utilizada.**

Los manómetros utilizados en el diseño son de tipo Bourdon con glicerina. Estos estarán conectados en zonas rectas de tuberías, a una distancia considerable ($> 8d$) de cambios de sección y dirección de flujo para evitar falsas mediciones. En su instalación se implementará una válvula de bola que normalmente estará cerrada y sólo será abierta para verificar la presión en la tubería en un momento dado, prolongando así la vida del instrumento.

En las tuberías de descarga de las bombas o grupo de ellas se colocaran manómetros para controlar el sistema y verificar así las condiciones de operación de éstas.

5.3.2 Análisis del Levantamiento y Diseño del Sistema.

Al comenzar a analizar el levantamiento se relacionó el sistema actual con el problema principal, que es la calidad del agua, se llegó a la conclusión de la necesidad de instalar una planta suavizadora de agua, con el fin de bajarle la dureza al agua de toda la planta, dejando su dureza en aproximadamente 200 ppm, este valor fue adoptado basándose en la norma M.S.A.S. 11.02.98. [19]

El inconveniente que se presentó con esta decisión fue la descentralización de las aguas de los pozos, esto generó dos soluciones viables:

- La instalación de dos Sistemas de ablandamiento, uno para suavizar el agua del tanque principal proveniente de los pozos 1, 2, 3 y 5, y otro sistema

para el ablandamiento de las aguas dirigidas al Tanque de las T.A.G. provenientes de los pozos 4 y 6.

- La instalación de un solo sistema de suavización en las cercanías del tanque principal, el cual suavice toda el agua generada por todos los pozos, esta solución requiere la centralización de las aguas de los pozos en el tanque principal.

Evaluando ambas soluciones se propuso la implementación de un solo sistema de suavización, ya que éste aparte de que genera menor costo inicial, también genera menor costo de operación y mantenimiento.

Debido a que la descarga de los pozos 6 y 4 se hará hacia el Tanque Principal (líneas segmentadas en la figura siguiente), se aprovecharán dos tuberías existentes que no estarán en funcionamiento y que descargan al tanque principal. Los otros extremos de estas tuberías están cercanos a los pozos mencionados.

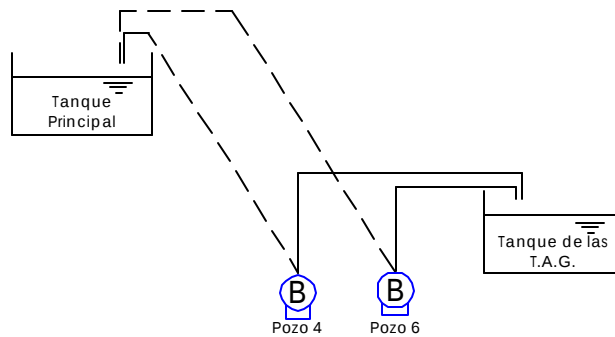


Figura 61 Nueva descarga de pozo 4 y 6

Para evaluar si las bombas de los pozos 4 y 6 existentes podrían satisfacer la condición de bombear hasta el tanque principal, se calcularon los nuevos H que tendrán que vencer dichas bombas, utilizando las formulas (3.9, 3.14 y 3.45).

En estos recorridos se utilizaron los siguientes diámetros de tubería, y las siguientes distancias de ellas: (tablas 15 y 16)

Pozo 4	
Diámetro de la Tubería [pulg]	Longitud [m]
4	350

Tabla 15 Datos de la tubería de pozo 4.

Pozo 6	
Diámetro de la Tubería [pulg]	Longitud [m]
4	248
6	198

Tabla 16 Datos de la tubería de pozo 6.

Debido a que la longitud de las tuberías es suficientemente grande, se calcularán sólo las pérdidas primarias ya que éstas serán bastante elevadas en comparación con las pérdidas secundarias, pudiéndose así despreciar las últimas.

Por otra parte, debido a que la presión de succión y la presión de descarga son iguales el primer término de la ecuación (3.45) es cero, la velocidad de succión al ser el pozo una especie de tanque también es cero, el ΔZ es la diferencia de cota entre la descarga y el nivel de bombeo del pozo.

Las bombas usadas actualmente son las siguientes:

Pozo	Bomba	
	Marca	Modelo
4	FAMOVEN-GOULD	756CL3
6	FAMOVEN-GOULD	756CL3

Tabla 17 Bombas usadas actualmente por los pozos 4 y 6

Teniendo las curvas de los nuevos sistemas, se procedió a interceptarlas con la curva de la bomba existente en ambos pozos, dando como resultado los puntos de operación siguientes:

Pozo 4

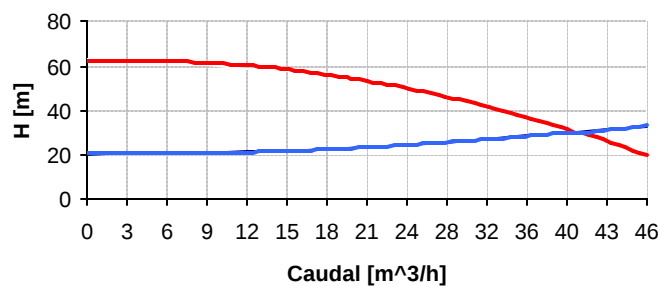


Figura 62 Gráfica Q vs H del sistema de pozo 4.

Pozo 6

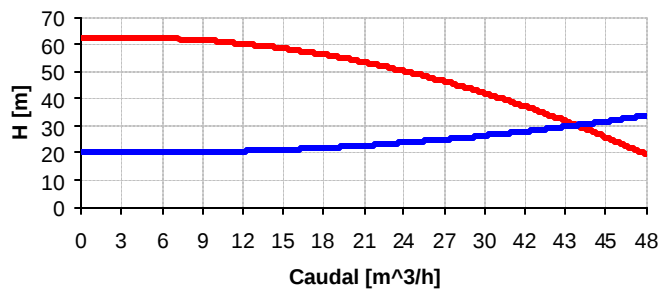


Figura 63 Gráfica Q vs H del sistema de pozo 6.

Pozo	Q[l/seg]	H[m]	h [%]
4	11,3888	30,5290	67,5
6	12,0833	30,6870	67

Tabla 18 Puntos de operación de las bombas actuales de los pozos 4 y 6 con el sistema del diseño propuesto

Como se puede apreciar en la tabla 18 las bombas existentes funcionan en el diseño propuesto, esto representa un ahorro en la compra de nuevas bombas.

Las tuberías seleccionadas para este diseño son de Hierro Negro (HN) para soldar, respetando la norma “Espaciamiento para soporte de Tuberías” DM 12.20, se le colocarán soportes cada 4,2 metros.

Ya con las aguas centralizadas en el tanque principal, se presentó el problema de la falta de abastecimiento de agua al Tanque de las T.A.G., motivo por el cual surgieron dos soluciones:

- Colocar una tubería entre el tanque elevado y el tanque de las T.A.G., solucionando así el problema de abastecimiento de agua, controlando el llenado por una válvula neumática dirigida por control lógico programable (PLC).
- Direcccionar la descarga de los polines (éstos se encuentran cercanos al tanque) a dicho tanque (figura 64), con esta solución se ahorra energía en las bombas del tanque de retorno, ya que no tienen que manejar el caudal de descarga de los polines.

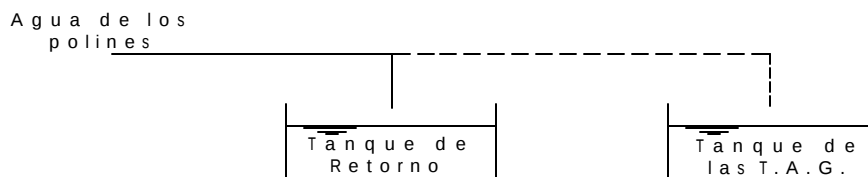


Figura 64 Direcccionamiento del agua de los polines.

Se seleccionó la segunda alternativa, a continuación se presenta su diseño:

Estos polines no son más que apoyos giratorios, los cuales se encargan de soportar al horno rotativo, éstos se calientan debido al roce y a la

radiación del horno, para evitar el recalentamiento del aceite, se mantienen refrigerados mediante un sistema de enfriamiento con un cierto caudal de agua (referidos en la tabla 13).

Cada apoyo de los hornos está ubicado sobre una fundación, y consta de dos polines uno a cada lado del horno, como se muestra en la figura 65 señalados por las flechas amarillas.

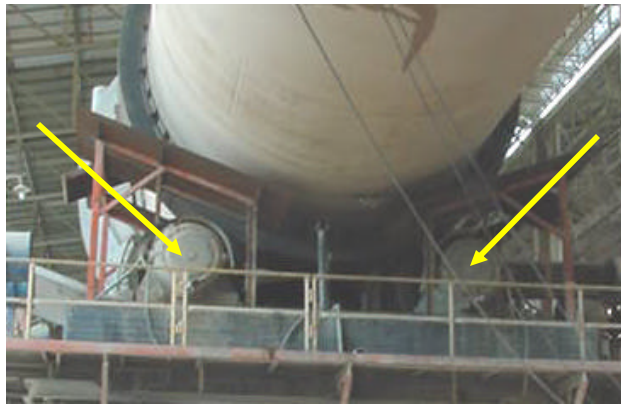


Figura 65 Detalle de la ubicación de los polines.

A cada polin le llega agua mediante una línea de aducción por gravedad, hace un recorrido por el interior del equipo intercambiando calor con el aceite (separados ambos por material metálico), y es descargada a la atmósfera (disipando en este momento toda la energía de presión que tiene), para poder llevar esta agua al tanque de las T.A.G. se requiere cerrar el sistema de descarga para no perder la presión que trae el fluido en su recorrido y así pueda llegar con fuerza al tanque en cuestión, por esta razón se diseñó una red cerrada en esta parte del sistema, esta se ilustra en la siguiente figura.

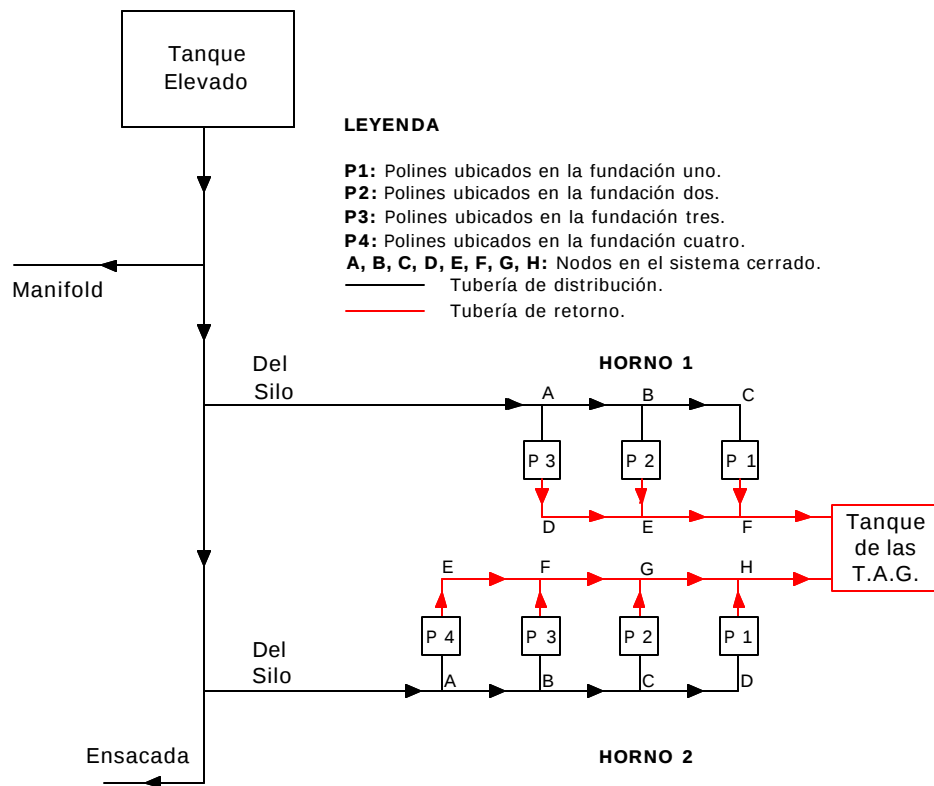


Figura 66 Esquema de la red cerrada de Horno 1 y Horno 2 con descarga en el Tanque de las T.A.G.

A continuación se presenta en detalle la red en las fundaciones.

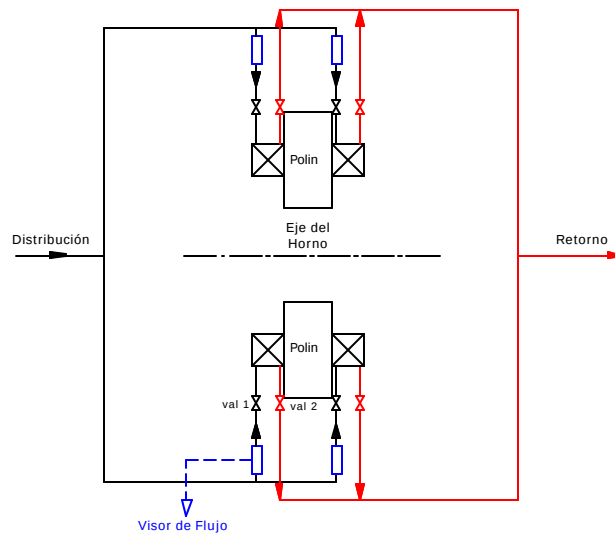


Figura 67 Detalle de la red cerrada en cada fundación.

Como se puede observar en la figura 67, cada horno tendrá su red cerrada propia, manteniendo así los dos sistemas independientes entre sí.

Para resolver las redes cerradas y poder saber como se distribuirá el caudal entre los polines, y con la finalidad de asegurar el buen funcionamiento del sistema de refrigeración, se utilizó el método de la teoría lineal ya citado en el fundamento teórico.

Para el cálculo de este método se realizó una hoja de cálculo en Excel para cada horno, ya que este método se basa en múltiples iteraciones para llegar a los resultados. El procedimiento utilizado es exactamente el descrito en el apartado 3.5.1 del fundamento teórico.

A continuación se presentarán los resultados de Horno 1 y de Horno 2 a la iteración número 30.

- Horno 1

A continuación se presenta el homólogo a la ecuación (3.80)

$$\begin{vmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 \\ 89,326 & -2634 & 0 & 0 & 0 & 2985,1 & -996,4 \\ 0 & 0 & 1418,7 & 3825,9 & -2016 & -2985 & 0 \end{vmatrix} \cdot ? = \begin{vmatrix} Q_{a-b} \\ Q_{a-d} \\ Q_{b-c} \\ Q_{c-f} \\ Q_{e-f} \\ Q_{b-e} \\ Q_{d-e} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -0,004 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Lo que sigue es la ecuación (3.81)

$$\begin{vmatrix} -0,723 & 0,2619 & 0,191 & -0,271 & -0,101 & 0,0002 & 5E-05 \\ -0,277 & -0,262 & -0,191 & 0,2714 & 0,1007 & -2E-04 & -5E-05 \\ -0,407 & -0,412 & 0,4291 & -0,276 & -0,226 & 5E-05 & 0,0001 \\ -0,407 & -0,412 & -0,571 & -0,276 & -0,226 & 5E-05 & 0,0001 \\ -0,593 & -0,588 & -0,429 & -0,724 & -0,774 & -5E-05 & -1E-04 \\ -0,315 & -0,326 & -0,238 & 0,0044 & 0,1254 & 0,0001 & -6E-05 \\ -0,277 & -0,262 & -0,191 & -0,729 & 0,1007 & -2E-04 & -5E-05 \end{vmatrix} \cdot ? = \begin{vmatrix} -0,004 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,0029 \\ 0,0011 \\ 0,0016 \\ 0,0016 \\ 0,0024 \\ 0,0013 \\ 0,0011 \end{vmatrix}$$

En la tabla 19 se presentan los caudales que pasarán por las diferentes tuberías de la red:

Tramo	Q[l/seg]	? Q
A – B	2,8914	2E-10
A – D	1,1086	2E-10
B – C	1,6295	2E-10
C – F	1,6295	2E-10
E – F	2,3705	2E-10
B – E	1,2619	2E-10
D – E	1,1086	2E-10

Tabla 19 Caudales de la red cerrada del Horno 1.

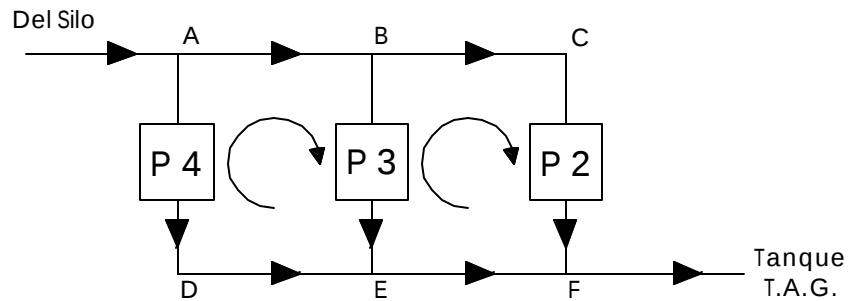


Figura 68 Detalle de red cerrada horno 1

- Horno 2

A continuación se presenta el homólogo a la ecuación (3.80)

-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	Q a-b	=	-0,0045
1	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	Q b-c		0
0	1	-1	0	0	-1	0	0	0	0	Q c-d		0
0	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	Q a-e		0
0	0	0	1	0	0	0	-1	0	0	? Q b-f		0
0	0	0	0	1	0	0	1	-1	0	Q c-g		0
0	0	0	0	0	1	0	0	1	-1	Q d-h		0
81,547	0	0	-2E+05	247674	0	0	-733	0	0	Q e-f		0
0	52,067	0	0	-2E+05	248838	0	0	-1358	0	Q f-g		0
0	0	899,13	0	0	-2E+05	252114	0	0	-2519	Q g-h		0

Lo que sigue es la ecuación (3.81)

-0,75	0,248	0,248	0,247	-0,01	-0,01	-0	3E-06	2E-06	1E-06	-0	0,00338
-0,5	-0,5	0,496	0,495	-0,01	-0,01	-0	2E-06	4E-06	2E-06	0	0,00226
-0,25	-0,25	-0,25	0,744	-0,01	-0,01	-0,01	1E-06	2E-06	3E-06	0	0,00114
-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	0,007	0,005	0,002	-0	-0	-0	0	0,00112
-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	0,004	0,005	0,002	1E-06	-0	-0	?	= 0,00112
-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0	-0	0,002	1E-06	2E-06	-0	0	0,00112
-0,25	-0,25	-0,25	-0,26	-0,01	-0,01	-0,01	1E-06	2E-06	3E-06	0	0,00114
-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,99	0,005	0,002	-0	-0	-0	0	0,00112
-0,5	-0,5	-0,5	-0,49	-0,99	-0,99	0,005	-0	-0	-0	0	0,00224
-0,75	-0,75	-0,75	-0,74	-0,99	-0,99	-0,99	-0	-0	-0	0	0,00336

En la tabla 20 se presentan los caudales que pasarán por las diferentes tuberías de la red:

Tramo	Q [l/seg]	? Q
Q a-b	3,383	2E-10
Q b-c	2,264	2E-10
Q c-d	1,140	2E-10
Q a-e	1,117	2E-10
Q b-f	1,118	2E-10
Q c-g	1,125	2E-10
Q d-h	1,140	2E-10
Q e-f	1,117	2E-10
Q f-g	2,236	2E-10
Q g-h	3,360	2E-10

Tabla 20 Caudales de la red cerrada del Horno 2.

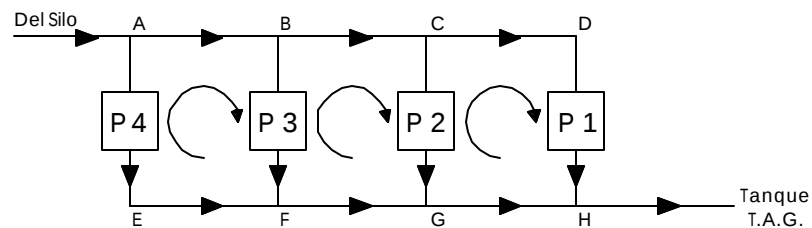


Figura 69 Detalle de red cerrada Horno 2

Con estos resultados se comprueba que no pasará menos caudal que el actual por cada soporte, por el contrario pasará un poco más, mejorando así la transferencia de calor. Los cálculos anteriores se realizaron con base en una tubería de 1 ½ pulg de diámetro, excepto los tramos dirigidos al tanque de las T.A.G. que son de 2 pulg de diámetro, ambas de hierro galvanizado schedule 40, ya que así se asegura una velocidad dentro de ésta cerca de 1 - 3 m/seg, evitando así la sedimentación y la vibración en esta parte del sistema.

Se puede apreciar que el caudal de descarga de los polines es menor que el consumido por las Torres Acondicionadoras de Gases, lo cual producirá un problema de abastecimiento al Tanque de las T.A.G., para evitar este problema se generaron dos soluciones que juntas resuelven por completo el percance, las cuales son:

- El tanque de retorno que en el sistema actual bombea agua al Tanque Principal, se redirecciona al tanque de las T.A.G., teniendo así el caudal de los ventiladores de tiro y de Cemento 1 y 2, al servicio de dicho tanque.
- Se implementa un sistema de válvulas en la descarga de los polines hacia el tanque de las T.A.G., como se puede observar en la figura 70.

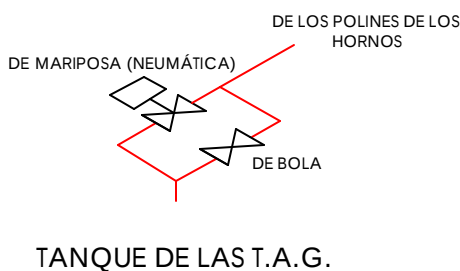


Figura 70 Detalle de la ubicación de las válvulas en la entrada del tanque T.A.G.

La válvula de bola se mantendrá en una posición fija, dejando pasar un caudal de 4 l/seg en Horno 1 y de 4,5 l/seg en Horno 2, con esto se mantiene el paso de agua por los polines manteniéndolos en su temperatura de operación, la válvula de mariposa con actuador neumático será la

encargada de abrir en el momento que el Tanque de las T.A.G. necesite más caudal.

Para verificar el impacto del golpe de ariete se utilizó la ecuación (3.38), suponiendo $k=1,3$ y sabiendo que la válvula cierra en 15 seg. y el caudal es de 10 l/seg, se obtuvo un $\Delta P=12,35$ psi, comprobando así que la tubería no sufrirá ruptura.

Este sistema de control se explica con más detalle a continuación:

1. Bomba de alta presión, se encarga de alimentar a las toberas de las Torres Acondicionadoras de Gases.
2. Bomba de retorno, se encarga de bombear el agua desde el tanque de retorno al reservorio de agua de las T.A.G.
3. Válvula de accionamiento neumático de doble efecto, apertura y cierre lento, se encarga de permitir el paso de más fluido al reservorio de agua de las T.A.G. cuando éste lo requiera.
4. Válvula de estrangulación, se encarga de permitir el paso de un caudal específico permanentemente.

El sistema descrito en la figura 71 tendrá el siguiente funcionamiento normal: la válvula 3 cerrada, bomba 2 apagada, válvula 4 abierta un porcentaje preestablecido y la bomba 1 encendida continuamente; debido a que por la bomba 1 circula más caudal que por la válvula 4 el tanque de las T.A.G. tiende a vaciarse.

Al mismo tiempo el tanque de retorno se va llenando con agua proveniente de los molinos de cemento y de los ventiladores de tiro, cuando el reservorio de agua de las T.A.G. llega a su nivel mínimo, automáticamente enciende la bomba 2 hasta que el tanque de retorno llegue a su nivel mínimo, cuando esto ocurre y el reservorio de las T.A.G. no ha llegado a su nivel máximo la válvula 3 abre hasta que se llene el reservorio.

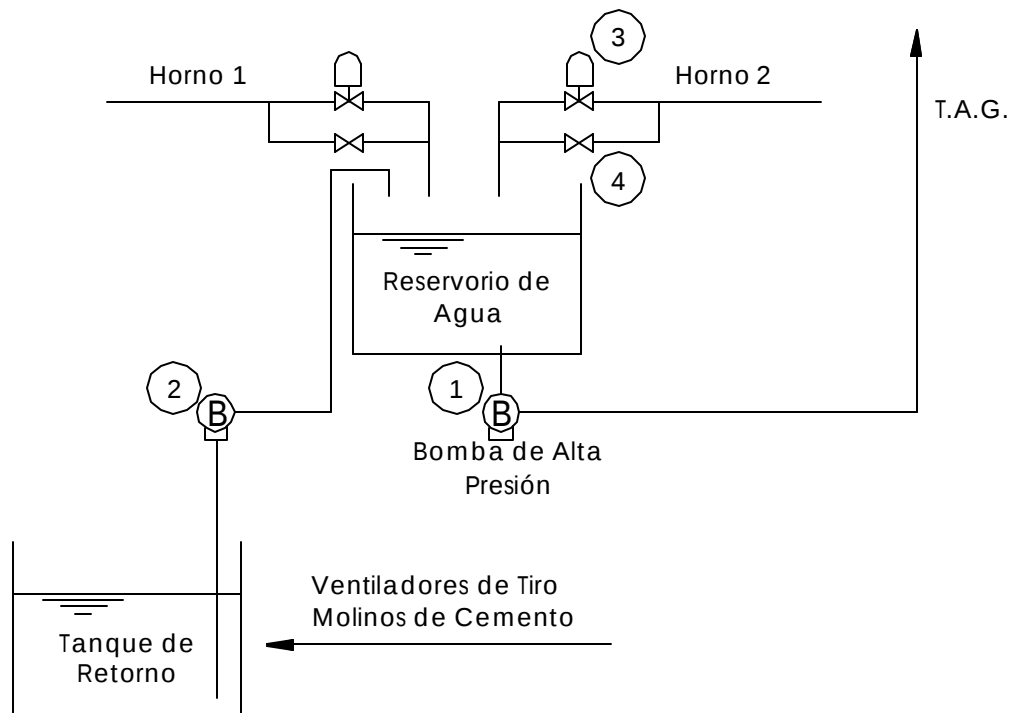


Figura 71 Sistema de control para el llenado del tanque de las T.A.G.

Luego el sistema queda en su punto de partida, listo para otro ciclo de llenado.

Cuando la válvula 3 abre, hay un incremento en el caudal que pasa por los polines, mejorando momentáneamente la transferencia de calor en éstos.

Este diseño se realizó casi totalmente aéreo, sólo se realizaron dos canales para atravesar la tubería hacia las fundaciones de horno 2 (figura 72), en el diseño se respetó la norma DM 12.20 colocando los soportes para la tubería a 2,7 m de distancia. La geometría y dimensiones de este diseño se puede apreciar en el plano “Horno 2” y “Horno 1” en los anexos.



Figura 72 Canales para las tuberías de los soportes de los polines (red cerrada).

Siguiendo el análisis del sistema se comprobó que las cuatro bombas existentes en el sistema de alta presión de las T.A.G. son de diferentes modelos, esto genera altos costos en almacén por concepto de compra de diferentes repuestos que se tienen que mantener en stock para su mantenimiento, por otra parte este aumento del activo almacenado, provoca un pago de impuestos más alto por concepto de almacén.

Para evitar estos costos adicionales se tomó la decisión de estandarizar un solo tipo de bomba en este sistema, disminuyendo así el activo en el almacén por concepto de repuestos para este banco de bombas.

La razón por la cual existen diferentes tipos de bombas se debe a la búsqueda de una que tenga un buen desempeño dentro del sistema, para elegir la mejor (existente) se estudió a fondo el sistema de pulverización de las Torres Acondicionadoras de Gases (T.A.G.), a continuación se explica su funcionamiento.

Este sistema está compuesto de los siguientes equipos:

- Tanque de las T.A.G.
- Bombas de alta presión, dos por torre.

- Tubería de distribución.
- Lanzas (o porta toberas).
- Toberas.
- Tubería de retorno.
- Válvula de control (llamada de retorno).

Cada uno de estos equipos cumple una función específica y esencial en el sistema, sin embargo como la pulverización se realiza mediante toberas se hará mayor énfasis en el funcionamiento de éstas.

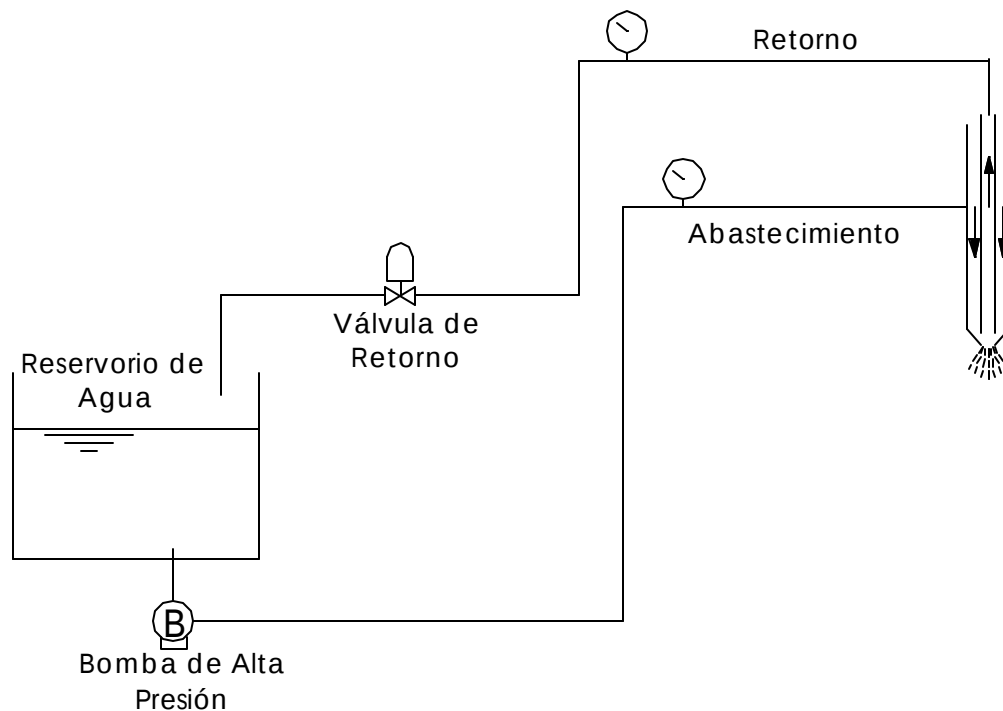


Figura 73 Diagrama del sistema de alta presión de las T.A.G.

Una tobera para que pulverice correctamente necesita un rango de presiones específico dado por su fabricante, para cada presión a la que se encuentre el fluido en la tobera habrá un caudal Q_{pulv} que puede ser pulverizado por ésta, estos datos pueden ser vistos en el diagrama de

Caudal-Presión para el tipo de tobera utilizada en las T.A.G. marca LECHLER Tipo 260.526 (ver figura 74). A continuación se presenta la tabla 21 donde se aprecia el caudal máximo $Q_{\max}$ que puede ser pulverizado por este tipo de toberas a distintas presiones teniendo el retorno completamente cerrado.

Tipo de tobera	Flujo Q_{pulv} [l/min.] a presiones P_1 [bar]					
	25 bar	30 bar	35 bar	40 bar	45 bar	50 bar
260.526	7,00	7,70	8,30	8,90	9,40	9,95

Tabla 21 Caudal pulverizado (Q_{pulv}) según presión en la tobera marca LECHLER Tipo 260.526, con el retorno completamente cerrado.

El caudal pulverizado por la tobera a una presión constante se puede graduar mediante el retorno, en dicho retorno se controla el flujo por medio de una válvula de estrangulación (llamada válvula de retorno), a medida que se varíe el retorno del fluido varía el caudal pulverizado por la tobera.

Esta válvula se regula automáticamente dependiendo de la temperatura de salida de los gases mediante un lazo de control con una termocupla ubicada a la salida del ventilador de tiro, la temperatura de estos gases debe de estar alrededor de 185 °C.

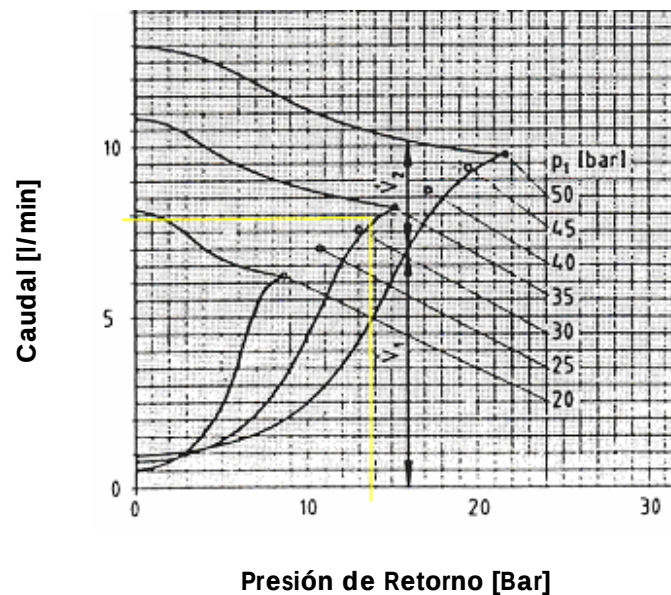


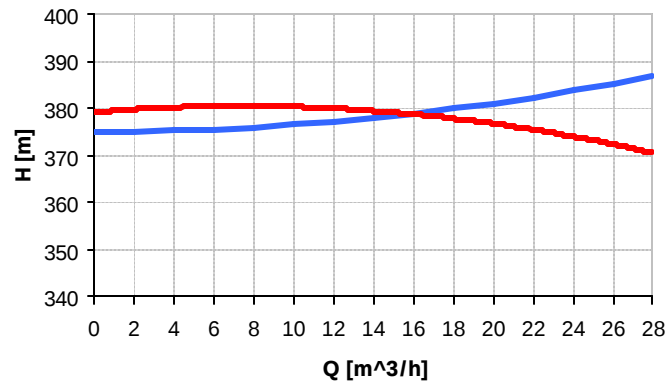
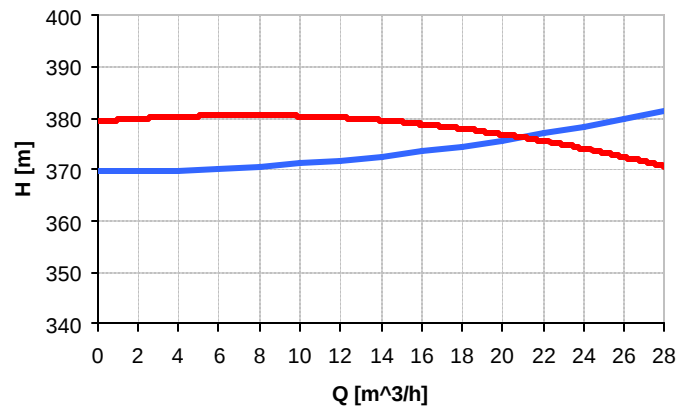
Figura 74 Gráfica Q vs P de retorno de la tobera marca LECHLER Tipo 260.526

El punto de operación de la bomba de alta presión se obtiene con el caudal a ser pulverizado por cada tobera, ya que este valor directamente nos da el valor de presión de trabajo de las mismas, y conociendo el número de toberas de cada sistema se tiene el caudal total requerido por cada T.A.G.

Cuando la válvula de retorno se abre, la presión en la tubería de retorno cae, y como se puede apreciar en la gráfica (figura 74) si disminuye la presión de retorno el caudal pulverizado por la tobera también disminuye, logrando así la regulación del caudal pulverizado. No obstante, el caudal a generar por la bomba de alta presión se incrementa, debido a esto la curva característica de la bomba debe ser del tipo FLAT, es decir, lo más plana posible, para que así ésta sea capaz de mantener una presión dada a diferentes caudales. De esta forma se garantiza una presión constante en la entrada de todas las toberas.

Para el sistema de las T.A.G. con el horno trabajando a plena carga se necesitan los siguientes caudales aproximados de agua pulverizada, para horno 2 Q_2 : $21\text{m}^3/\text{h}$ y para horno 1 Q_1 : $16\text{m}^3/\text{h}$, para calcular el H. y realizar la curva del sistema se utilizó una hoja de cálculo de Excel, en la cual se usaron las ecuaciones (3.9, 3.14 y 3.45) y las relacionadas a las pérdidas secundarias. Luego por tanteo se fueron probando las diferentes curvas de las bombas existentes en relación con la curva del sistema, eligiendo así la única que cumple con lo expuesto en los párrafos anteriores, la STERLING MSLA 0506 9BA 001 OR P01 @ 3600 rpm.

En las graficas siguientes se pueden apreciar los puntos de operación de los dos sistemas.

T.A.G. 1**Figura 75** Representación del punto de operación de la T.A.G. 1**T.A.G. 2****Figura 76** Representación del punto de operación de la T.A.G. 2

Los puntos de operación apreciables en las graficas anteriores (figuras 75 y 76) son válidos para la T.A.G. 1 y T.A.G. 2 con 11 y 15 lanzas abiertas respectivamente.

	Puntos de Operación	
	T.A.G. 1 (h %)	T.A.G. 2 (h %)
Q [m³/h]	15,9 (45)	21 (55)
H [m]	379	376

Tabla 22 Puntos de operación de las T.A.G. (diseño)

Otro aspecto que se consideró erróneo fue el que las 4 bombas no están ordenadas adecuadamente, para esto se diseñó un arreglo en el cual las nuevas bombas se presentan alineadas, y se aprecia más orden y mejor aprovechamiento del espacio en el diseño.

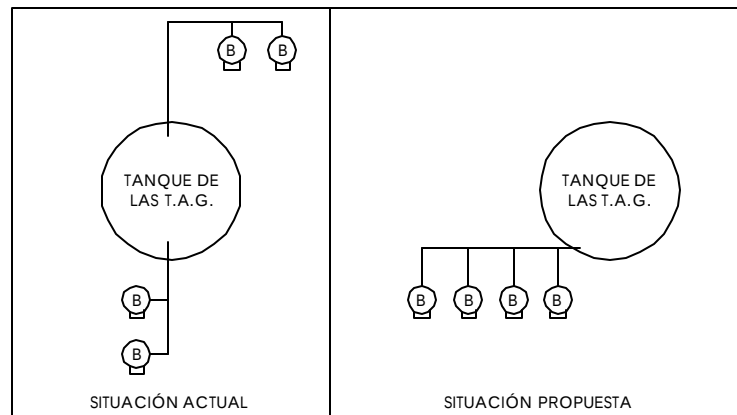


Figura 77 Distribución actual y propuesta de bombas de alta presión

Los tipos de tuberías usadas para el diseño de este arreglo fueron de 6", 3" y 2", todas de Hierro Negro Shedule 40 para soldar, por consiguiente todas las válvulas fueron elegidas para ser colocadas con bridas. Las tuberías de succión y de descarga fueron diseñadas según el apartado 3.4.6 del fundamento teórico.

En la distribución de la tubería se observaron trazados como los vistos en la figura siguiente, la cual impide el buen desenvolvimiento del trabajador en los anillos de alta presión, como se aprecia en la figura 78 (señalada por la flecha) las tuberías de abastecimiento y de retorno de los anillos de alta presión están cruzadas en medio de la plataforma, forzando al trabajador a dar la vuelta completa para tener acceso a la escalera.

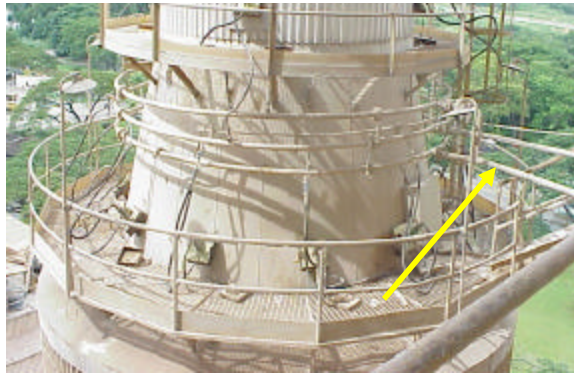


Figura 78 Ubicación actual de los anillos de alta presión T.A.G. 2

En el diseño se propone que estas tuberías crucen desde la edificación a la torre soportada por la parte inferior de la escalera y que atraviese el piso para llegar a los anillos, como la que se muestra en la figura 79.



Figura 79 Diseño de anillos de alta presión

La bomba seleccionada requiere para el punto de operación una potencia de $40 \text{ Kw} = 53,64 \text{ hp}$, debido a que cuando se abra la válvula de retorno el punto de operación se corre a la derecha de la gráfica, los fabricantes de las toberas exigen para el buen funcionamiento de éstas que el motor posea de 30-40% más potencia que la exigida por la bomba en el punto de operación, por lo tanto la potencia que se instaló en el diseño fue 70 hp (motor ABB - Tipo QY225M2ABR710624 de 70hp @ 3560 rpm).

Entre el tanque de las T.A.G. y las bombas de alta presión se encuentran filtros, los cuales no están estandarizados, en el diseño se utilizó un solo tipo de filtro, el cual es el siguiente: marca K&H EPPENSTEINER GMBH&CO tipo de filtro 10 DFLW 750 G10, con un elemento filtrante 43.751 6100-50V-O-P.

Sala de Bombas:

Otro aspecto a considerar en el diseño fue la ubicación de los equipos situados en la Sala de Bombas, ya que al instalar la planta de tratamiento de aguas se deberá redistribuir ésta porque no tendrá un orden acorde con el nuevo funcionamiento del sistema.

En los actuales momentos el agua que se suministra a la planta es succionada desde el tanque principal proveniente de los pozos 2, 3 y 5 que directamente confluyen allí e indirectamente por el pozo 1, luego es bombeada hasta los tanques elevados ubicados en los silos de caliza (1 y 2) indicados en la figura 80 con flechas amarillas, desde estos tanques se abastece de agua a la planta.



Figura 80 Tanques elevados en los silos de caliza.

Las bombas utilizadas para elevar el agua hasta los tanques son marca KSB, modelo Etanorm 65-200, 3500 rpm, $\phi = 195$ mm, se tienen cuatro bombas colocadas en paralelo y funcionan dos a la vez, turnándose entre sí. Los motores utilizados para accionar dichas bombas son Marca: BBC, Tipo: QVXY 200 L2 AD, Potencia: 46 hp/34 Kw, 3560 rpm, 60 Hz. Se evaluaron las curvas de funcionamiento de las bombas para verificar su condición de bombeo, utilizando las ecuaciones (3.9, 3.14 y 3.45). El recorrido actual de las tuberías que van hasta los silos de caliza es aérea (80 m) y enterrada (21 m), la propuesta es no enterrar las tuberías, para esto se deberá fabricar una sercha para el soporte de las tuberías, por la cual también se instalará la tubería proveniente de los silos de caliza destinada a suministrar el agua para el consumo extra, la descripción de este nuevo recorrido (tramo de tubería sala de bombas-tanques silo de caliza) se describe a continuación:

$P_1 = 14,7$ psi; $V_1 = 0$ m/s; $Z_1 = -1$ m

$P_2 = 14,7$ psi; $V_2 = 2,97$ m/s; $Z_2 = 46$ m

La tubería es de 4" y la longitud total es de $L = 100$ m

La rugosidad relativa (K_s) para tuberías comerciales de hierro negro nuevas de 4" es 0,25 mm y el factor de fricción f es $3,07 \times 10^{-2}$.

Accesorios:

Accesorio	Cantidad	Valor de "K"
Codos 90°	14	7,140
Codos 45°	2	0,544
Conexión en "T"	1	1,020
Válvula de pie	1	7,140
Válvula check	2	1,700
Válvula de compuerta	2	0,272
Ensanchamiento 4-6	1	1,560
Contracción 6-4	1	1,406

Tabla 23 Accesorios del diseño del tramo la sala de bombas – silos de caliza

Las pérdidas primarias y las secundarias (tabla 23) se obtuvieron a partir de las ecuaciones (3.9) y (3.14) respectivamente, y utilizando la ecuación (3.45) para el cálculo del H

Por otra parte, debido a que la presión de succión y la presión de descarga son iguales el primer término de la ecuación (3.45) es cero, la velocidad de succión del tanque de distribución también es cero, el ΔZ es la diferencia de cota entre la descarga y el nivel del tanque de distribución (47 m).

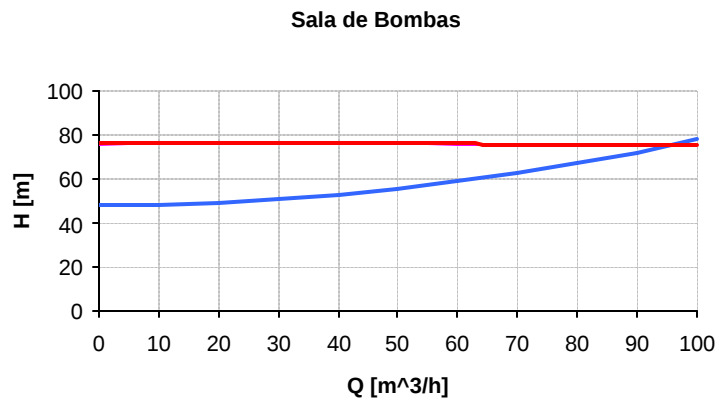


Figura 81 Curva H vs Q de bombas de la sala de bombas

Teniendo la curva del nuevo sistema, se procedió a interceptarla con la curva de las bombas existentes para éste fin, dando como resultado el siguiente punto de operación:

Q[m³/h]	H[m]	h [%]	NPSH _d [m]	NPSH _r [m]
95	76	54	5,76	1,5

Tabla 24 Puntos de operación de las bombas para la distribución de agua a la planta.

Como se puede apreciar en la tabla 24 las bombas existentes en la sala de bombas para este fin funcionan en el diseño propuesto, por lo tanto, no es necesaria la compra de nuevas bombas, también se puede apreciar que el NPSH_d es mayor al NPSH_r lo cual indica que la bomba no cavita.

La distribución de agua para el consumo extra (mantenimiento, almacén, gerencia, comedor, laboratorio de concreto, contratistas, despacho y taller) se realiza mediante el siguiente recorrido: desde el tanque A hasta el tanque B y luego al hidroneumático, con éste se distribuye el agua para el consumo extra.

Con la centralización de las aguas se eliminará la descarga de pozo 1 al Tanque “A” y se realizará directamente al tanque principal, también los pozos 4 y 6 descargarán a dicho tanque, los pozos 2, 3 y 5 seguirán llegando a éste pero se redireccionaran para que desemboquen en el comienzo de este tanque, para así garantizar la circulación del agua en el mismo. (figura 75)

Para poder garantizar el almacenamiento de agua limpia se deberán unir los tanques A, B, C y la zona del tanque principal que está debajo de la sala de bombas, como se puede apreciar en la figura 82, este tanque se llamará tanque de distribución, el cual tendrá un almacenamiento de agua de 570 m³. Considerando que el consumo de agua de la planta es de 54 m³/h (sin el agua que se retorna) se tendrá un almacenamiento de agua limpia de 10 horas aproximadamente. El agua retornable proveniente de los compresores, Crudo 1 y Cemento 1, éstas por no estar contaminadas se regresaran hasta el tanque de distribución.

Además, se eliminará el hidroneumático y el consumo extra se distribuirá por gravedad aprovechando así la energía de presión, el quitar el hidroneumático implica la eliminación de cuatro bombas, de las cuales dos se utilizan para transportar el agua desde el tanque A hasta el tanque B y dos para llevar el agua desde el tanque B hasta el hidroneumático. A la salida del hidroneumático hay una tubería de distribución (D= 4 pulg) para el consumo extra, con la cual se conectará la tubería proveniente de los silos de caliza. Esta tubería que suplantará al hidroneumático se conectará desde el manifold.

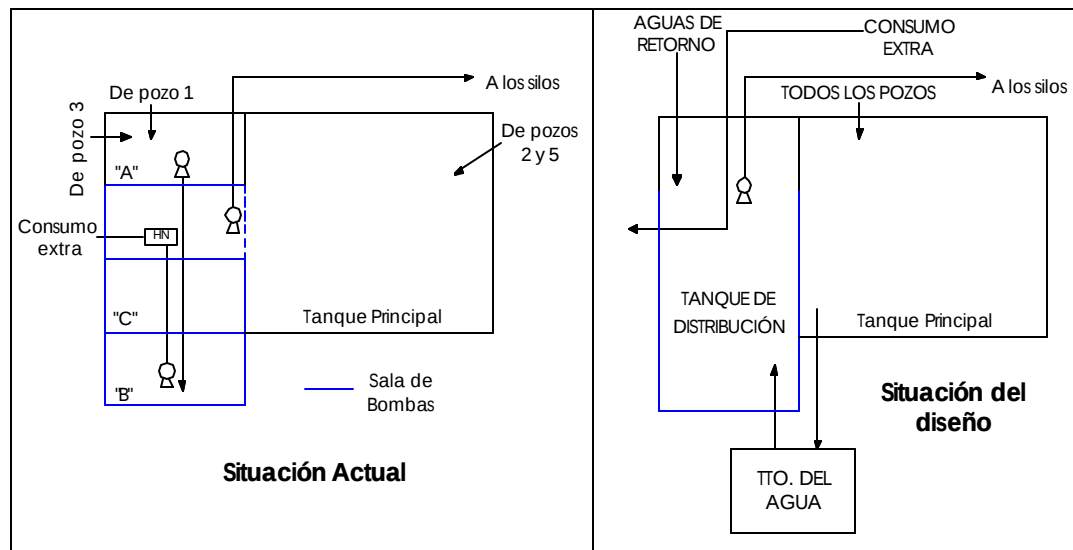


Figura 82 Redistribución de la sala de bombas.

La tubería seleccionada para la distribución de consumo extra será de 3 pulg, de hierro negro, soldada y pintada para prevenir la corrosión. Los soportes de las tuberías de 3 pulg se colocarán a una distancia máxima de 3,66 metros (12 pies) según la norma DM 12.20. [16]

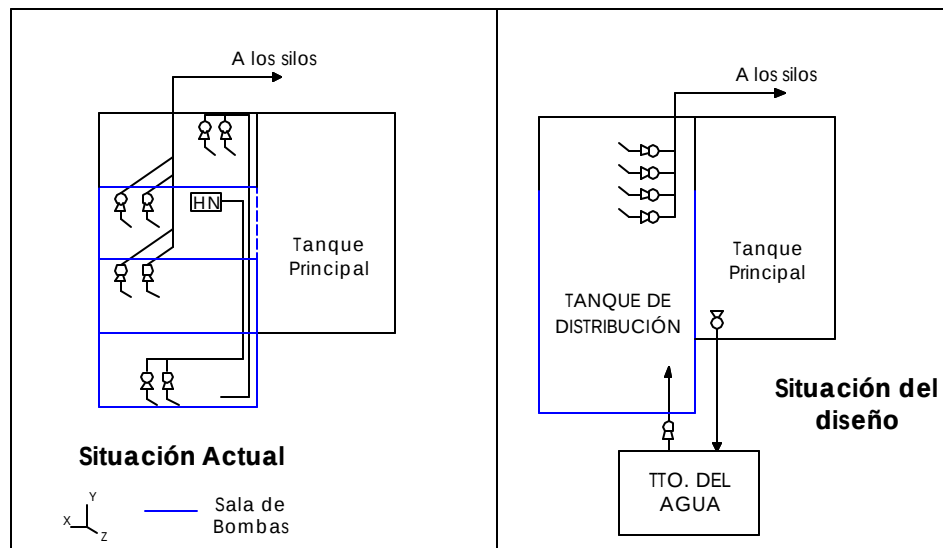


Figura 83 Reubicación de las bombas en la sala de bombas.

Retorno de los compresores Duplex, 308 y soportes de Crudo 1:

Como se denotó en el levantamiento del sistema, las descargas de los compresores 608 y Duplex, y la de los soportes de Crudo 1, están siendo canalizadas a la quebrada, derrochando así agua que puede ser retornable debido a que no sufre contaminación en su recorrido.

A raíz de este inconveniente surgieron dos soluciones presentadas a continuación:

- Canalizar esta agua a un tanque de retorno y luego desde éste último bombearla al tanque principal.
- Aprovechar la energía de presión que tiene el fluido en la salida de estos equipos (cerrando el sistema) y entubar sus descargas hasta el tanque principal.

Se eligió la segunda alternativa, debido a que la primera es más costosa su realización, y si bien ahorra en bombeo de extracción, por otro lado aumenta los costos en mantenimiento y consumo de las nuevas bombas.

Con respecto a la segunda solución, es económica su implementación y no requiere mayor mantenimiento.

Ésta se diseñó pasando unas mangueras de poliuretano de alta densidad de 2 pulg de diámetro por una tubería de 8 pulg de diámetro enterrada, ya existente, con un largo de aproximadamente de 60 m (por la cual se envía actualmente el agua hacia la quebrada), para que este diseño funcione se tienen que cerrar todas las descargas de los equipos nombrados anteriormente mediante tuberías y que sólo tengan contacto con la presión atmosférica en la descarga al tanque, como se muestra en la figura 84.

El ahorro producido en el sistema con este retorno fue de 3.076.500 Bs/año por concepto de energía de extracción de bombeo, sin contar los

ahorros producidos en desgaste de las bombas de los pozos y por consiguiente en el mantenimiento de éstas.



Figura 84 Diseño de descarga de los Compresores Duplex y 608 y Crudo 1 al tanque principal.

6. DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS.

6.1 Costo por Concepto de Energía.

Para evaluar el beneficio que se obtiene en el diseño por concepto de energía, se calculó el gasto que produce el sistema actual y se comparó con el generado por el sistema propuesto.

Para calcular el costo de la energía consumida por cada bomba se evaluó el caudal manejado diariamente por cada una o banco de éstas y el caudal del punto de operación, sacando así las horas por día de servicio de cada bomba, con este dato y teniendo la potencia del motor se realizó una hoja de cálculo en Excel, la cual arroja el costo de la energía.

El siguiente es un cálculo tipo, todos los demás costos se calcularon de la misma manera, para estos se supuso la operación total de la planta en todo el año, el costo promedio del KW-h de la planta es de Bs. 48.

Las bombas encargadas de extraer el agua del tanque principal y llevarlo a los tanques elevados ubicados en los silos de caliza, manejan 1261 m³/día, en el punto de operación de éstas indica que un par de ellas manejan juntas 95 m³/h, dividiendo las cifras anteriores se consigue el número de horas que trabajan al día las bombas, éstas trabajan 13,3 horas al día lo cual es equivalente a un factor de utilización de $f_u = 0,5542$, teniendo en cuenta la potencia de los motores 45 hp c/u , o sea 90 hp = 67 KW los dos, el factor de carga 0,94 y la eficiencia del motor 0,947, se obtuvo el siguiente cálculo.

La tabla 25 condensa información sobre la ubicación y desempeño de las bombas actualmente en operación, y su costo anual de operación.

		Costo Bs/Kw-H	Promedio Planta
Equipo:			48
DATOS PLACA			
Potencia Motor	67,11	Kw	
Factor de carga:	0,86		
Eficiencia:	0,947		
Voltaje:	220	Volts	
Factor Utilización:	0,55416		
Potencia real	60,94	Kw	
			Costo Anual 2 bombas
	Kw-h al año:	295.852,33	Bs. 14.200.911,77

Localización y Desempeño de la Bomba	Costo Anual [Bs]
Sala de bombas, Encargadas de extraer agua del tanque principal y llevarla a los tanques elevados ubicados en los silos de caliza.	14.200.911,77
Jardín, Encargadas de extraer agua de los pozos 4 y 6 y descargarla al tanque de las T.A.G.	2.705.394,52
Encargada de extraer agua del tanque de retorno y descargarlo en el tanque principal.	1.283.019,02
Ambas bombas encargadas de extraer agua del tanque de las T.A.G. y descargarla a las T.A.G.	39.865.233,71
Encargadas de extraer agua de los pozos 1,2,3 y 5 y descargarla al tanque A y al tanque principal.	6.172.489,93
Sala de bombas, encargadas de bombear desde el tanque A hasta el Tanque B.	855.346,01
Encargadas de extraer agua del tanque B y descargarla en el hidroneumático.	1.145.552,69
TOTAL	66.227.936,65

Tabla 25 Costo por concepto de energía de bombeo en el sistema actual

Se realizó el mismo procedimiento con el diseño propuesto obteniéndose la tabla 26 siguiente:

Localización y Desempeño de la Bomba	Costo Anual [Bs]
Sala de bombas, Encargadas de extraer agua del tanque principal y llevarla a los tanques elevados ubicados en los silos de caliza.	21.782.111,68
Jardín, Encargadas de extraer agua de todos los pozos descargarla al tanque Principal.	980.523,10
Encargada de extraer agua del tanque de retorno y descargarlo en el tanque de las T.A.G.	110.462,30
Ambas bombas encargadas de extraer agua del tanque de las T.A.G. y descargarla a las T.A.G.	39.865.233,71
TOTAL	62.738.330,79

Tabla 26 Costo por concepto de energía de bombeo en el sistema propuesto

Se puede apreciar que existe un beneficio de Bs. 3.489.605,86, por concepto de energía eléctrica, a éste habría que agregarle el ahorro por concepto de mantenimiento y reducción en adquisición de repuestos, esta disminución del activo almacenado contribuye en una disminución del impuesto correspondiente al almacenaje.

Aunado a esto habría que considerar los beneficios que se obtendrán al instalar la planta suavizadora de aguas (paso a seguir después de este diseño), la cual contribuirá a una mayor eficiencia y vida útil de los equipos y accesorios del sistema, y a una reducción significativa de las actividades de mantenimiento.

6.2 Costos por Concepto de Materiales, Equipos e Instalación.

A continuación se presenta la tabla 27 donde se da a conocer el costo en materiales, equipos, mano de obra e instalación del diseño propuesto:

ITEM	DESCRIPCIÓN	PRECIO (Bs.)	
		INSTALACIÓN	MATERIALES
1	Instalación de tubería de diámetro 2 ½ pulg y diámetro 3 pulg de hierro negro para soldar, desde el Tanque de Retorno hasta el Tanque de las T.A.G.	872.000	1.700.000
2	Elaboración de las 2 canales para instalar las tuberías de distribución y retorno de Horno 2.	1.300.000	-----
3	Instalación de tubería de diámetro 1 ½ pulg de hierro galvanizado, para el retorno de los polines de Horno 1 y Horno 2 hasta el Tanque de las T.A.G.	1.500.000	2.000.000
4	Válvula de accionamiento neumático de doble efecto, apertura y cierre lento. Tipo: mariposa, Marca: Siegeval, Modelo: FL-5-E-DN 50, Material de la mariposa: Acero Inox 316, Elastómero EPDM. Cantidad: 2 (para el sistema de control de los hornos)	-----	274.575
5	Actuador neumático doble efecto, Marca: Actreg, Modelo: ADA-80, para válvulas DN: 40 a DN: 80. Cantidad: 2 (para accionar las válvulas del punto 4)	-----	513.720
6	Electroválvula 5/2 namur, Marca: Metal Work, Bobina 120 V, AC. Cantidad: 2 (para funcionar con el actuador neumático)	-----	307.210
7	Instalación de la tubería de polietileno de alta densidad desde la descarga de los compresores hasta el Tanque Principal.	400.000	200.000
8	Remoción de los restos del Tanque de las T.A.G. anterior y construcción de 4 bases de apoyo para las nuevas bombas de las T.A.G.	880.000	-----
9	Bombas Marca: Sterling, Modelo: MSLA 0506 9BA 001 OR P01, 3500 rpm, con motor acople y alineados en base común. Cantidad: 3 unidades.	-----	22.500.000 (US \$ 5000 c/u)
10	Instalación de tubería de HN desde los silos de caliza destinada para el consumo extra.	900.000	2.852.775

11	Instalación de las bombas de alta presión	-----	6.000.000
Sub-total		5.852.000	36.348.280
TOTAL		42.200.280	

Tabla 27 Costo de la instalación y materiales del nuevo diseño del abastecimiento de aguas industriales.

7. PLAN BÁSICO DE MANTENIMIENTO

Las inspecciones periódicas de mantenimiento para las bombas, tuberías y accesorios revisten una gran importancia, pues pueden evitar, hechas a tiempo daños mayores en el Sistema. A continuación se presenta un plan de mantenimiento para estos elementos.

- **Bombas Centrífugas:**

Acción de Mantenimiento	Frecuencia					
	Diario	Semanal	Mensual	Trimestral	Semestral	Anual
Chequear que las fugas de fluido de las estoperas sea la normal (goteo leve).	:					
Chequear fugas de fluido en la bomba (carcasa, en la succión y en la descarga).	:					
Lectura de los manómetros para chequear que la presión de descarga sea la especificada.	:					
Medir el consumo eléctrico del motor para determinar si los valores son apropiados.	:					
Chequear los instrumentos de medición, calibrar o reemplazar si es necesario.					:	
Revisar el prensaestopa, limpiar y revisar el cambio de las empaaduras.					:	

Acción de Mantenimiento	Frecuencia					
	Diario	Semanal	Mensual	Trimestral	Semestral	Anual
Verificar la alineación del equipo moto-bomba.					·	
Suministrar la cantidad adecuada del tipo de lubricante utilizado a los cojinetes.					·	
Cambiar los cojinetes de la bomba.						·
Reemplazar estoperas.						·
Revisar el rodete y cambiar si es necesario.						·

Tabla 28 Plan de mantenimiento para las bombas centrífugas.

Si durante el funcionamiento de las bombas se presentan anomalías tales como: ruidos en el equipo moto-bomba, elevadas temperaturas en los cojinetes y vibraciones excesivas deben corregirse de inmediato.

Como complemento a este plan se presenta a continuación la tabla 29 de síntomas y posibles causas del mal funcionamiento de las bombas, para facilitarle al técnico de mantenimiento la búsqueda de la solución a los problemas de operación que presenten los equipos.

Esta tabla resume los principales síntomas que puede presentar una bomba centrífuga y las posibles causas que pueden originar esa operación deficiente.

Síntomas

Causas

	La bomba no descarga líquido	Capacidad inadecuada	Carga inadecuada	La bomba se para después de arrancar	La bomba requiere demasiada potencia	Fugas excesivas por el estopero	Hay que reemplazar el estopero con frecuencia	La bomba vibra o esta ruidosa	Calentamiento de cojinetes	La bomba trabaja forzada o se pega
Bomba y tubo de succión no tienen suficiente cebamiento con el líquido que se maneja	■	■		■				■		■
Alzada excesiva de succión	■	■		■				■		
Margen insuficiente entre alzada de succión y presión de vapor	■	■						■		■
El líquido contiene gas		■	■	■						
Bolsa de aire en tubo de succión	■	■		■						
Entrada de aire en tubo de succión		■		■						
Entrada de aire a la bomba por el estopero		■		■						
Válvula de pie muy pequeña		■								
Válvula de pie semiobstruida		■						■		
Válvula de pie y tubo de succión no están sumergidos del todo	■	■		■				■		
Conexión del sello de agua en estopero de succión obstruida				■			■			
Anillos hidráulicos en estopero mal colocados				■		■	■			
Velocidad muy baja	■	■	■							
Velocidad muy alta					■					
Sentido incorrecto de rotación	■		■							
Carga manométrica total del sistema mayor que la de la bomba	■	■	■		■					
Carga manométrica total del sistema menor que la de la bomba					■					
Densidad relativa del líquido no es la que se pensó originalmente					■					
Viscosidad del líquido no es la que se pensó originalmente		■	■		■					
La bomba funciona a muy baja capacidad								■		■
Conexión en paralelo inadecuada para condiciones específicas de operación	■	■	■							■

Síntomas

Causas

	La bomba no descarga líquido	Capacidad inadecuada	Carga inadecuada	La bomba se para después de arrancar	La bomba requiere demasiada potencia	Fugas excesivas por el estopero	Hay que reemplazar el estopero con frecuencia	La bomba vibra o esta ruidosa	Calentamiento de cojinetes	La bomba trabaja forzada o se pega
Tubo, impulsor o carcasa de bomba obstruidos	■	■			■			■		
Bomba desalineada					■	■	■	■	■	■
Cimientos desnivelados								■		
Eje de bomba torcido					■	■	■	■	■	
Una pieza giratoria toca con una estacionaria, por ejemplo, el impulsor toca con los anillos de desgaste					■			■	■	■
Cojinetes deficientes								■	■	■
Anillos de desgaste gastados		■	■							
Impulsor dañado		■	■					■		
Eje o camisa de ejes gastados dentro del estopero						■	■			
Estopero con empaquetadura incorrecta					■	■	■			
Empaquetadura inadecuada para el líquido que se maneja						■	■			
Impulsor desequilibrado						■	■	■	■	■
No se aplica agua de enfriamiento cuando se manejan líquidos calientes						■	■			
Holgura excesiva entre el eje y cavidad en la carcasa en parte inferior de empaquetadura							■			
El líquido para sello de agua tiene impurezas							■			
Estopeño muy apretado							■			
Ajuste incorrecto del eje completo de la bomba con el impulsor								■	■	■
Falta o exceso de lubricación									■	
El lubricante tiene impurezas									■	■
Cojinetes mal ajustados									■	■

Tabla 29 Posibles causas del mal funcionamiento de bombas centrífugas.

- **Tuberías:**

Acción de Mantenimiento	Frecuencia					
	Diario	Semanal	Mensual	Trimestral	Semestral	Anual
Revisión con caudalímetro ultrasónico, comparar con el caudal de diseño para detectar incrustaciones.				-		
Detectar posibles fugas en las uniones.			-			
Detectar posibles puntos de corrosión y reparar.		-				
Pintar la red de distribución de aguas industriales.						-
Chequear la condición de los puntos de apoyo y soportes.					-	

Tabla 30 Plan de mantenimiento para tuberías.

Es importante destacar que a pesar de señalarse la frecuencia a seguir en el plan de mantenimiento cualquier anomalía observada durante el funcionamiento del sistema de tuberías debe ser corregida de inmediato.

- **Válvulas:**

Acción de Mantenimiento	Frecuencia					
	Diario	Semanal	Mensual	Trimestral	Semestral	Anual
Accionarlas.			--			
Lubricación de las partes móviles.				--		
Desmontaje, revisión, limpieza y reemplazo de partes deterioradas.						--
Pintarlas.						--

Tabla 31 Plan de mantenimiento para válvulas.

Las fugas que se puedan presentar en estos accesorios se deben reparar de inmediato para prevenir pérdidas de energía en el sistema y el deterioro de las mismas.

En general, se puede señalar que algunos equipos de producción utilizan agua para intercambiar calor, y ésta calcifica las tuberías y accesorios, por lo tanto se debe realizar anualmente una limpieza con ácido clorhídrico para eliminar las incrustaciones.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

- Esta evaluación permitió diagnosticar la condición actual de los equipos del sistema de tuberías y accesorios, logrando identificar las fallas presentes en cada componente del equipo. Con esto se logro conocer las condiciones de funcionamiento, estado y características de tuberías, en donde se tomaron en cuenta las características de operación, parámetros de operación, aspecto físico del equipo, deterioros que han sufrido, entre otros, así como también de cada uno de sus componentes y accesorios.
- La estandarización de equipos permite tener menor existencia de repuestos, un mayor conocimiento del funcionamiento y mantenimiento de éstos, obteniendo así un menor costo de operación y una mayor disponibilidad.
- El sistema actual de distribución cuenta con veinte (20) bombas centrífugas, de las cuales se eliminaron siete (7), aprovechándose las restantes. En la estación de bombeo de las Torres Acondicionadoras de Gases se instalarán cuatro (4) bombas multietapas idénticas, de las cuales se adquirirán sólo tres (3).
- La elevada dureza del agua provoca múltiples problemas en la red de tuberías producto de las calcificación en éstas y pudiendo ocasionar una parada de planta.
- En la selección de válvulas para un sistema de tuberías es fundamental conocer la calidad del agua disponible.
- La ejecución de un adecuado plan de mantenimiento preventivo, es vital para asegurar el proceso productivo.

- La realización de este trabajo de grado, permitió adquirir nuevos conocimientos en cuanto al manejo de diseño de tuberías, análisis de redes cerradas, así como de los procesos productivos reales que se desarrollan en la industria del cemento.

8.2 Recomendaciones

- Implementar el diseño de abastecimiento de aguas industriales realizado en este trabajo de grado.
- En corto plazo instalar una planta suavizadora de aguas industriales, para erradicar el problema de calcificación en la red, aumentar la eficiencia de los equipos y disminuir los costos operativos de mantenimiento.
- Estandarizar los equipos y accesorios para así disminuir la existencia de repuestos en almacén y disminuir los costos de mantenimiento.
- Aplicar el plan básico de mantenimiento propuesto para garantizar el buen funcionamiento, eficiencia y la presentación de las instalaciones y equipos.
- Instalar flujómetros en la descarga de cada pozo y sondas de nivel en el interior de éstos, logrando el control de la explotación del acuífero, contribuyendo así a la futura acreditación de la ISO 14000, Los flujómetros a instalar deben ser ultrasónicos no invasivos, para evitar problemas con la elevada dureza del agua.
- Realizar un estudio de mantenimiento centrado en la confiabilidad (MCC) a fin de aplicarle un mantenimiento acorde con la importancia que posee el sistema de aguas para el proceso productivo.
- Incluir en el programa de estudios de la carrera el tema de “Análisis de Redes”, para complementar los conocimientos en el área de hidráulica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] BAVARO, Giuseppe. (1992). Curso: **Bombas Hidráulicas**.
- [2] BUSTAMANTE, Angel. (2001). Curso: **Diseño de Tuberías Industriales**.
- [3] CRANE. (1992). **Flujo de Fluidos en Válvulas, accesorios y Tuberías**. México. Editorial Mc Graw Hill/Interamericana de México, S.A. de C.V.
- [4] DOUNCE, E. (2000). **La Productividad en el Mantenimiento Industrial**. Compañía Editorial Continental, S.A., México, D.F.
- [5] KEMMER, Frank N. y McCALLION. (1989). **Manual del Agua. Su Naturaleza, Tratamiento y Aplicaciones**. México. Editorial Mc Graw Hill/Interamericana de México, S.A. de C.V.
- [6] LITTLETON, Charles. (1964). **Tubería Industrial**. México. Compañía Continental, S.A.
- [7] **Manual de Tratamiento de Aguas**. (1999). Editorial Limusa, S.A. de C.V., grupo Noriega Editores, México. Publicado por el Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York, Albany, EEUU.
- [8] MATAIX, Claudio. (1982). **Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas**. Harla, S.A. de C.V., México. Segunda Edición.
- [9] MENDEZ, Manuel Vicente. (1995). **Tuberías a Presión**. Publicaciones UCAB, Caracas, Venezuela.
- [10] PIETERSZ, Frank. (2000). **Pérdidas por Fricción Debido a la Resistencia del Flujo de Líquidos**. UCV, Escuela de Ingeniería Mecánica.
- [11] POTTER, Merle C. y WIGGERT David C. (1998). **Mecánica de Fluidos**. Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., México. Segunda Edición.

- [12] ROSALER, Robert C. y RICE, James O. (1989). **Manual del Mantenimiento Industrial**. Editorial Mc Graw Hill/Interamericana de México, S.A. de C.V., México.
- [13] SALDARRIAGA V., Juan G. (1998). **Hidráulica de Tuberías**. Editorial Mc Graw Hill Interamericana S.A., Colombia.
- [14] STREETER, Victor L. y WYLIE, E. Benjamin. (1988). **Mecánica de los Fluidos**. Editorial Mc Graw Hill/Interamericana de México, S.A. de C.V., México. Tercera Edición.
- [15] Norma Venezolana COVENIN. **Bombas-Turbinas sumergibles para pozo profundo**. 1619-80. C.D.U. 621.67.
- [16] **Normas de Instalaciones industriales**. Edita Index, Madrid-Barcelona, España.
- [17] **ANSI B 36.10 y B 36.19**. Dimensiones de Tubos en pulgadas.
- [18] Venezuela. Gaceta Oficial de la República de Venezuela. Año XC-Mes V. Caracas, 26 de Febrero de 1962. Nº 752. **Resolución por la cual se dictan Normas Sanitarias para proyecto, construcción, reparación y reforma de edificios**.
- [19] Venezuela. Gaceta Oficial de la República de Venezuela. Año CXXV-Mes V. Caracas, 13 de Febrero de 1998. Nº 36.395. **M.S.A.S. Resolución por la cual se dictan las "Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable"**.
- [20] Venezuela. Fiscalía General de Mantenimiento. Curso: **Gestión de Mantenimiento**.

ANEXO 1

Resumen de los Artículos de la Gaceta Oficial

Artículo 97: Relativo a la piscina

Artículo 98: Relativo a oficinas

Artículo 99: Relativo al almacén

Artículo 102: Consumo diario por trabajador en una industria

Artículo 108: Relativo a consultorios

Artículo 111: Relativo al riego

Artículo 115-b: Relativo al número requerido de piezas sanitarias

Artículo 97: Las dotaciones de agua para piscinas de recirculación y de flujo continuo, se calcularán de acuerdo con las siguientes cifras:

Con recirculación de las aguas del rebose, el consumo será de 10 l/día por m² de proyección horizontal de la piscina.

Sin recirculación de las aguas de rebose, el consumo será de 25 l/m² de proyección horizontal de la piscina.

Con flujo continuo, el consumo será de 125 l/m³.h.

La dotación de agua requerida para las piezas sanitarias en los vestuarios y cuartos de aseo anexos a las piscinas, se calculará adicionalmente a razón de 30 l/día por m² de proyección horizontal de la piscina. En aquellos casos en que se completen otras actividades recreacionales, se aumentará proporcionalmente esta dotación.

Artículo 98: La dotación de agua para oficinas se calculará a razón de 6 l/día por m² de área útil de local.

Artículo 99: La dotación de agua para depósitos de materiales, equipos y artículos manufacturados, se calculará a razón de 0,5 l/día por m² de área útil de local y por cada turno de trabajo de 8 horas o fracción.

Cuando la dotación de agua calculada resulte menor de 500 l/día, deberá asignarse esta cantidad como mínimo, Caso de existir oficinas anexas, el consumo de las mismas se calculará adicionalmente de acuerdo a lo estipulado por estas normas en cada caso.

Artículo 102: La dotación de agua para consumo humano en cualquier tipo de industria, se calculará a razón de 80 litros por trabajador o empleado, por cada turno de 8 horas o fracción.

Artículo 108: La dotación de agua para hospitales, clínicas de hospitalización, clínicas dentales, consultorios médicos y similares, se calculará de acuerdo con la siguiente tabla:

Hospitales y clínicas con hospitalización	800 l/día por cama
Consultorios médicos	500 l/día por consultorio
Clínicas dentales	1.000 l/día por unidad dental

El agua requerida para servicios especiales, tales como riego de áreas verdes, se calculará adicionalmente de acuerdo con lo estipulado en estas normas para cada caso.

Artículo 111: La dotación de agua para áreas verdes se calculará a razón de 2 l/día por m². No se requerirá incluir áreas pavimentadas, engrazonadas u otras no sembradas para los fines de esta dotación.

Artículo 15-b: Los edificios o locales destinados a los siguientes fines, deberán dotarse de cuartos de aseo en la forma, tipo y número que se especifican a continuación...

...b) Industrias.

Se dispondrá de cuartos separados para obreros y obreras dotados de piezas sanitarias de acuerdo con la siguiente tabla:

Obreros	Excusados	Urinarios	Lavabos	Duchas
1 – 15	1	1	1	1
16 -30	2	1	2	2
31 – 50	2	1	2	3
51 – 75	2	2	3	4
76 – 100	3	2	4	5

Mayor de 100 un excusado, un urinario, un lavabo y una ducha adicionales por cada 35 hombres o fracción.

Obreras	Excusados	Lavabos	Duchas
1 – 10	1	1	1
11 – 25	2	2	2
26 – 50	3	2	3
51 – 75	4	2	4
76 – 100	5	3	5

Mayor de 100 un excusado, un lavabo y una ducha adicionales por cada 35 mujeres o fracción.

Los empleados de oficina dispondrán de locales de aseo separados, de acuerdo con el párrafo a) de este artículo.

Cuando la industria ocupe un área muy extensa o varios edificios, los cuartos de aseo serán distribuidos en varios grupos de acuerdo al número de personas servidas, pudiéndose concentrar las duchas en el vestuario o en un grupo de aseo central.

ANEXO 2

Materiales a cotizar para el Retorno del compresor Duplex

- Tubería y accesorios de polietileno de alta densidad

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
Rollo de tubería de 100 mts de 2"	1
Adaptador hembra conexión rápida de 2"	2
Codo 90° conexión rápida	3

- Tubería y accesorios de acero galvanizado para roscar

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
Unión en "T" de 2"	1
Tubería de 2" de 6mts	2
Codo roscado de 90° de 2"	3
Angulo de 5cm x 5cm de 6mts	1
Válvula de bola de 1"	1
Copa reductora de 2" a 1" para roscar	1
Abrazadera para tubo de 2"	4
Niple corrido de 2"	1
Niple corrido de 1"	1

Materiales para la instalación de la tubería desde las bombas del tanque de retorno hasta el tanque que abastece las Torres Acondicionadoras de Gases.

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
Codo de 2 ½" de 90°	4
Unión en "T" 2 ½"	1
Válvula de paso 2 ½"	2
Válvula de paso de ¼"	1
Tapón galvanizado de ? "	2
Anillo de ¼"	1
Niple de ¼"	1
Tubo Hierro Negro Schedule 40 3"*6mts	8
Tubo Hierro Negro Schedule 40 2 ½"*6mts	1
Codo de 3" de 90° de HN para soldar	12
Junta reductora de 2 ½" a 3" para soldar HN	1

Materiales a Cotizar para el Proyecto de las Torres de enfriamiento.

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
Válvula de Mariposa de 6", Anillo EPDM, disco Acero Inox.	1
Válvula de Mariposa de 3", Anillo EPDM, disco Acero Inox.	12
Unión en T de 6" a 3"	1
Codo reductor de 90° de 6" a 3"	1
Unión en T de 3"	4
Brida de 6" ASA 150lbs Welding neck	2
Brida de 3" ASA 150lbs Welding neck	16
Bridas de 2" >600psi ASA 300lb Welding neck	16
Brida de 2 ½" ASA 150 Welding neck	4
Copa reductora de 3" a 2 ½"	4
Unión en T de 3"	2
Codo de 90° de 3"	6
Codo de 90° de 2"	16
Manómetro de 800psi de ¼" de entrada	2
Válvula de bola de ¼"	2
Codo de 90° de ¼"	2
Válvula de Mariposa de 2", Anillo EPDM, Disco Acero Inox.	4
Brida de 2" ASA 150 Welding neck	16
Codo de 90° de 2"	6
Copa reductora de 2" a 1"	4
Unión en T de 2"	6
Tubo de 6" schedule 40 de 6m	1
Tubo de 3" schedule 40 de 6m	3
Tubo de 2" schedule 40 de 6m	12

NOTA: Tubos y Bridas de hierro Negro, accesorios para soldar, Válvulas para bridar.

Materiales para el Retorno de los polines Horno1 y Horno2.

2 canales de:

- ✓ 6,6mx0,2mx0,28m (lxhxa)
- ✓ 6,8mx0,2mx0,28m (lxhxa)

Para la tubería :

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
Tubo galvanizado para roscar de 1 ½"x6m	61
Tubo galvanizado para roscar de 2"x6m	6
Brida de 2" ASA 150 Welding neck	2
Copa reductora de 2" a 1 ½"	1
Válvulas de bola de 1 ½"	37
Unión en T de de 1 ½"	31
Codo de 90° de 1 ½"	72
Esquinero de 1 ½"	2
Uniones universales	12
Anillos de 1 ½"	61
Anillos de 2"	6
Válvula mariposa de 2", Anillo EPDM, disco de Acero Inox.	2
Tapón de 1 ½"	7

Para los visores:

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
Manguera de plástico transparente de 2"	5m
Abrazaderas de 1 ½"	56
Anillo de 1 ½"	56
Niple roscado en un extremo	56
Alambre 6cmx ø0,2cm	224
Pelota	16

ANEXO 3

