

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO PARA MEJORAR UNA ESTACIÓN DE BOMBEO EXISTENTE DE UNA COMUNIDAD

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Bachiller:
Rivas I., Alejandro E.
para optar al Título
de Ingeniero Mecánico.

Caracas, 2003

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO PARA MEJORAR UNA ESTACIÓN DE BOMBEO EXISTENTE DE UNA COMUNIDAD

TUTOR ACADÉMICO: Prof. José Luis Perera

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Orlando Hernández

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Bachiller:
Rivas I., Alejandro E.
para optar al Título
de Ingeniero Mecánico.

Caracas, 2003

© Alejandro Enrique Rivas Iribarren, 2003.

DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso.

A mi madre y mi padre que, en todo momento, han sido un ejemplo a seguir y los pilares fundamentales sobre los que construyo mi futuro.

A la memoria de mi hermana Sandra quien ha estado y estará siempre a mi lado.

A mis hermanos Cástor y Carlos quienes me ayudan y apoyan en todo momento.

A las personas especiales que le dan felicidad a mi vida y que me han apoyado incondicionalmente.

Gracias.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela, en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería que ha sido un ente fundamental en mi formación como persona y profesional.

A mi tutor académico, el Ingeniero José Luis Perera, por el apoyo y la ayuda que me brindó para lograr el paso final en la culminación de mis estudios.

A los Profesores Pedro Lecue y Rodolfo Grullón por el aporte que me dieron para realizar este trabajo.

Al Instituto Municipal de Obras de Sucre y a su personal, especialmente a la Gerencia Técnica, por todo el apoyo brindado.

A mi tutor industrial, Ingeniero Orlando Hernández, por el apoyo y ayuda prestados.

A Carmen Muñoz por ser tan especial y haberme ayudado en todo momento en la realización de este trabajo.

Al Ingeniero Carlos Muñoz por el aporte dado en el desarrollo de este trabajo.

A mis familiares y amigos que me apoyaron, ayudaron y siempre estuvieron presentes.

Gracias.

Alejandro E. Rivas I.

**ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO PARA MEJORAR UNA
ESTACIÓN DE BOMBEO EXISTENTE DE UNA COMUNIDAD**

Tutor Académico: Profesor José Luis Perera

Tutor Industrial: Ing. Orlando Hernández

Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2003. 245 pág.

Palabras Claves: Abastecimiento, Bombeo, Red, Población, Operación

En el presente trabajo se realizó un estudio técnico – económico del sistema de abastecimiento de agua correspondiente a la estación de bombeo Vegas de Petare, con la finalidad de mejorar el funcionamiento de la misma y, a la vez, el servicio de distribución de agua que ésta presta a la comunidad. Para ello se analizó la situación en que se encuentra y se verificó la necesidad de realizar una nueva configuración de la mencionada estación. Para llevar a cabo este estudio se estimó la cantidad de habitantes actualmente servidos y la dotación diaria por habitante, se determinaron las características y el estado en que se encuentra el sistema de bombeo al igual que el comportamiento de la red de distribución. Adicionalmente, se tomaron en cuenta otros aspectos como el consumo eléctrico de los motores y los costos asociados al funcionamiento de la estación.

Se presentó, entonces, una propuesta de solución en la cual se definió, diseñó y cuantificó una nueva configuración de la estación de bombeo Vegas de Petare, tomando en consideración un período de diseño de 17 años, el crecimiento poblacional en la zona abastecida, la dotación diaria por habitante, las condiciones de operación a las que estará sometido el sistema de bombeo, el aumento de la rugosidad en el tiempo y alternativas de ahorro de energía con el uso de un variador de velocidad de motores trifásicos de inducción, entre otros. Finalmente, se determinaron las características del sistema de succión y descarga, el número de unidades de bombeo y su capacidad, el sistema eléctrico y se verificaron los efectos del golpe de ariete en caso de falla del suministro eléctrico. La propuesta incluye un estudio económico asociado a la inversión necesaria para llevar a cabo esta solución.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN	III
ÍNDICE DE CONTENIDO	IV
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE GRÁFICAS	XII
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	XIII
GLOSARIO DE TÉRMINOS	XIV
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA	3
1.1. Reseña Histórica del Instituto.....	3
CAPÍTULO 2: DEFINICIÓN DEL PROYECTO	5
2.1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO.....	5
2.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
2.3. OBJETIVOS Y ALCANCES.....	7
2.3.1. Objetivo General.....	7
2.3.2. Objetivos Específicos.....	7
2.3.3. Alcances.....	7
CAPÍTULO 3: FUNDAMENTO TEÓRICO	8
3.1. PROYECCIONES DE POBLACIÓN.....	8
3.1.1. Estimación.....	8
3.1.2. Estimación de población.....	8
3.1.3. Proyecciones de Población.....	9

3.1.4. Utilidad de las proyecciones de población.....	9
3.1.5. Métodos generales para elaborar las proyecciones.....	9
3.1.6. Cálculo de las Proyecciones de Población.....	13
3.2. PRINCIPIOS DE MECÁNICA DE LOS FLUIDOS APLICADOS	
A LOS SISTEMAS DE BOMBEO.....	14
3.2.1. Ecuación de Continuidad.....	14
3.2.2. Flujos de Fluidos Viscosos.....	16
3.2.3. Flujos Laminares y Turbulentos.....	17
3.2.4. La Ecuación de Bernoulli.....	18
3.2.5. Pérdidas en Sistemas de Tuberías.....	19
3.2.6. Envejecimiento de las Tuberías.....	23
3.2.7. Cavitación.....	24
3.2.8. Régimen Permanente.....	27
3.2.9. Régimen Transitorio.....	33
3.3. CRITERIOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE	
ABASTECIMIENTO DE AGUA	45
3.3.1. Consumo de Agua.....	45
3.3.2. Factores que Afectan el Consumo.....	46
3.3.3. Variaciones periódicas de los consumos e influencia sobre las diferentes partes del sistema.....	47
3.3.4. Redes de Distribución.....	51
3.4. ESTACIÓN DE BOMBEO.....	52
3.4.1. Equipo de Bombeo.....	52
3.4.2. Parámetros de las Bombas.....	53
3.4.3. Válvulas en las Estaciones de Bombeo.....	57
3.4.4. Motor Eléctrico.....	59
 CAPÍTULO 4: SITUACIÓN ACTUAL DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO.....	 63
4.1. PLANOS DE UBICACIÓN.....	63

4.2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....	65
4.2.1. Obra Civil.....	65
4.2.2. Equipo de Bombeo.....	66
4.2.3. Sistema de Tuberías en la Estación de Bombeo.....	66
4.2.4. Conexión Actual de las Bombas.....	67
4.2.5. Motores eléctricos.....	69
4.3. LA RED DE DISTRIBUCIÓN.....	69
4.3.1. Descripción General.....	69
4.3.2. Cálculo de la población actual abastecida por la estación de bombeo.....	75
4.3.3. Estimación de la Rugosidad Actual de las Tuberías.....	86
4.3.4. Característica del Sistema.....	88
4.3.5. Gastos de Consumo.....	93
4.4. CONSUMO ELÉCTRICO.....	96
4.5. COSTOS POR MANTENIMIENTO ELECTROMECAÁNICO DE LA ESTACIÓN.....	98
4.6. ANÁLISIS GENERAL DE LA ESTACIÓN ACTUAL.....	102
4.6.1. Obra Civil.....	102
4.6.2. Equipo de Bombeo.....	104
4.6.3. Comportamiento Hidráulico.....	106
4.6.4. Consumo Eléctrico.....	111
4.6.5. Costos Asociados a la Estación.....	111
CAPÍTULO 5: CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO.....	112
5.1. DETERMINACIÓN DE LA ZONA A SER ABASTECIDA POR LA ESTACIÓN.....	112
5.2. DETERMINACIÓN DE LA POBLACIÓN A SER ABASTECIDA POR LA ESTACIÓN DURANTE EL PERÍODO DE DISEÑO.....	113

5.3. CÁLCULO DEL CAUDAL MEDIO.....	115
5.4. PERÍODO DE DISEÑO.....	117
5.5. UBICACIÓN DE LA NUEVA ESTACIÓN DE BOMBEO.....	118
5.6. RANGO DE VELOCIDADES DEL FLUIDO RECOMENDADAS EN LA SUCCIÓN Y EN LA DESCARGA.....	120
 CAPÍTULO 6: DISEÑO DE LA NUEVA ESTACIÓN DE BOMBEO.....	 121
6.1. CONCEPTO GENERAL.....	121
6.2. CÁLCULO DEL CAUDAL DE DISEÑO.....	121
6.2.1. Consumo Máximo Diario.....	121
6.2.2. Consumo Máximo Horario.....	122
6.2.3. Consumo en Caso de Ocurrencia de Incendio.....	122
6.2.4. Caudal de Diseño.....	123
6.3. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE BOMBEO Y ETAPAS.....	123
6.3.1. Determinación del Número de Unidades.....	123
6.3.2. Determinación del Número de Etapas.....	125
6.4. DISEÑO DEL SISTEMA DE SUCCIÓN Y DE DESCARGA.....	127
6.4.1. Diámetros en los Sistemas de Succión y Descarga.....	128
6.4.2. Verificación de las Velocidades en las Tuberías de Succión y Descarga para el año 2020.....	131
6.4.3. Resultados de la Selección de Diámetros.....	133
6.5. DETERMINACIÓN DE LA CARACTERÍSTICA DEL SISTEMA.....	133
6.5.1. Pérdidas por Fricción en la Estación de Bombeo.....	133
6.5.2. Rugosidad de las Tuberías de la Red de Distribución.....	135
6.5.3. Curva Característica del Sistema.....	136

6.6. DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS...	148
6.6.1. Selección de las Bombas.....	148
6.6.2. Cálculo Para Evitar la Cavitación en las Bombas.....	150
6.6.3. Alternativas de Ahorro de Energía.....	153
6.7. ESTIMACIÓN DE LOS TRANSITORIOS HIDRÁULICOS.....	163
6.7.1. Golpe de Ariete por Falla en el Suministro Eléctrico de los Grupos Motobomba.....	163
6.8. SELECCIÓN DE VÁLVULAS.....	175
6.9. ESPECIFICACIONES DE LAS TUBERÍAS.....	177
6.10. SELECCIÓN DE LOS MOTORES.....	178
6.10.1. Potencia de los Motores.....	178
6.10.2. Especificaciones de los Motores.....	179
6.11. INSTALACIONES ELÉCTRICAS.....	180
6.11.1. Sistemas de Potencia y de Control de los Motores.....	180
CAPÍTULO 7: ESTUDIO ECONÓMICO.....	183
7.1. PRESUPUESTO.....	183
7.1.1. Breve Descripción de Capítulos.....	183
7.1.1. Breve Descripción de Capítulos.....	187
CONCLUSIONES.....	188
RECOMENDACIONES.....	189
APÉNDICES.....	190
BIBLIOGRAFÍA.....	218

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Características del agua y su relación con α	24
Tabla 3.2 Módulos de elasticidad y relación de Poisson de algunos materiales	38
Tabla 3.3 Consumos mínimos permisibles según las normas INOS	45
Tabla 3.4 Consumo per. cápita de acuerdo al tipo de vivienda	47
Tabla 4.1 Especificaciones técnicas de las bombas	66
Tabla 4.2 Especificaciones técnicas de los motores eléctricos	69
Tabla 4.3 Red de la zona alta: tramo de mayor cota	72
Tabla 4.4 Red de la zona alta: tramo secundario	72
Tabla 4.5 Red de la zona baja: tramo de menor cota	73
Tabla 4.6 Red de la zona alta: otro tramo de importancia	73
Tabla 4.7 Datos de población del INE	75
Tabla 4.8 Áreas del Municipio Sucre	76
Tabla 4.9 Población del Municipio Sucre según el INE	77
Tabla 4.10 Resultados por el método lineal	78
Tabla 4.11 Resultados por el método geométrico	79
Tabla 4.12 Resultados por el método parabólico	80
Tabla 4.13 Proyección de población según el INE	80
Tabla 4.14 Datos de los segmentos (INE)	83
Tabla 4.15 Caudales manejados por cada bomba	92
Tabla 4.16 Velocidades del flujo en la descarga de la E/B	95
Tabla 4.17 Consumo eléctrico mensual del equipo de bombeo	98
Tabla 4.18 Costos por mantenimiento de las E/B del IMAS en el año 1998	99
Tabla 4.19 Costos por mantenimiento de las E/B del IMAS en el año 1999	100
Tabla 4.20 Rendimientos de las bombas	105
Tabla 5.1 Proyección de la población que será surtida por la E/B Vegas de Petare	114
Tabla 5.2 Caudal medio que surtirá la estación estimado a lo largo del período de diseño	116
Tabla 6.1 Referencias del esquema general de la figura (6.1)	127
Tabla 6.2 Velocidad media para diámetros tentativos en múltiple de succión y descarga	129
Tabla 6.3 Veloc. media para diámtrs. tentativos en tramos individuales succión y descarga	129
Tabla 6.4 Velocidad media en el sistema de succión para el año 2020	131
Tabla 6.5 Velocidad media en el sistema de descarga para el año 2020	132

Índice de Tablas

Tabla 6.6 Diámetros en el sistema de succión y descarga de la estación	133
Tabla 6.7 Rugosidad absoluta de las tuberías de la red de distribución	135
Tabla 6.8 Curva del sistema de la red en el año 2005. Opción A	139
Tabla 6.9 Curva del sistema de la red en el año 2020. Opción A	139
Tabla 6.10 Curvas del sistema de la red en los años 2005 y 2020. Opción B	142
Tabla 6.11 Curvas del sistema de la red en los años 2005 y 2020. Opción C	145
Tabla 6.12 Capacidad del equipo necesario en cada opción	147
Tabla 6.13 Requerimientos de presión y caudal del sistema	149
Tabla 6.14 Costos asociados al consumo eléctrico de los motores	155
Tabla 6.15 Consumo eléctrico diario de los motores en cada alternativa	161
Tabla 6.16 Costos por consumo eléctrico de los motores en cada alternativa	161
Tabla 7.1 Totales de cada capítulo y total de la inversión	187

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Velocidad media en dirección axial del conducto	15
Figura 3.2 Cambios en el área de la sección transversal del conducto	16
Figura 3.3 Esquema general de un sistema de bombeo	29
Figura 3.4 Recta Positiva de Bergeron	41
Figura 3.5 Transmisión de las ondas de perturbación en una derivación en “Y”	44
Figura 3.6 Esquema del diagrama de flujo de motor trifásico inducción	60
Figura 4.1 Estación de bombeo actual	64
Figura 4.2 Vista superior de la E/B	65
Figura 4.3 Esquema general de la red de distribución	70
Figura 4.3 Vista superior de la red de distribución	71
Figura 4.4 Transformación de las Parroquias en Municipios	76
Figura 4.5 Columna de agua remanente en los días de parada	108
Figura 5.1 Nueva ubicación de la estación de bombeo	118
Figura 6.1 Esquema general de la estación de bombeo	127
Figura 6.2 Detalles del sistema de tuberías en la estación	134
Figura 6.3 Red de distribución actual	136
Figura 6.4 Red de distribución agregando tramo en paralelo a la red zona alta	137
Figura 6.5 Red de distribución sustituyendo los tramos principales	137
Figura 6.6 Simplificación de la red de distribución / año 2005	164
Figura 6.7 Simplificación de la red de distribución / año 2020	170
Figura 6.8. Diagrama unifilar del circuito de potencia	180
Figura 6.9. Circuito de control de motores trifásicos de inducción	182

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 3.1 Factor de potencia	61
Gráfica 4.1 Conexión en paralelo de las bombas 1 y 4	68
Gráfica 4.2 Conexión en paralelo de las bombas 2 y 3	68
Gráfica 4.3 Progresiva de los tramos principales de la red de distribución	74
Gráfica 4.4 Método geométrico	78
Gráfica 4.5 Proyección de la población del Municipio Sucre según el INE	80
Gráfica 4.6 Proyecciones de la población de la Parroquia Petare	81
Gráfica 4.7 Curva del sistema de la zona alta	91
Gráfica 4.8 Curva del sistema de la zona baja	92
Gráfica 4.9 Curva Representativa de los Consumos Registrados de la Zona	94
Gráfica 4.10 Costos porcentuales por mantenimiento de las E/B del IMAS en el año 1998	99
Gráfica 4.11 Costos porcentuales por mantenimiento de las E/B del IMAS en el año 1999	101
Gráfica 6.1 Curva de pérdidas en sistema de succión y descarga	134
Gráfica 6.2 Curvas del sistema en los años 2005 y 2020. Opción A	140
Gráfica 6.3 Curvas del sistema en los años 2005 y 2020. Opción B	143
Gráfica 6.4 Curvas del sistema en los años 2005 y 2020. Opción C	145
Gráfica 6.5 Puntos de operación de 2 bombas y sistema. Años 2005 y 2020	150
Gráfica 6.6 Desconexión de una bomba en horas de menor consumo	154
Gráfica 6.7 Caudal, presión y potencia en función de la velocidad	157
Gráfica 6.8 Comportamiento de la corriente de arranque con varios métodos	159
Gráfica 6.9 Ejemplo del consumo eléctrico de los motores en día promedio	162
Gráfica 6.10 Disipación de la depresión por efecto de la onda reflejada en la derivación	168
Gráfica 6.11 Variación de las variables de interés por efecto de la detención de los grupos	169
Gráfica 6.12 Variación de caudal y presión por desconexión accidental de los grupos	171
Gráfica 6.13 Variación de las variables de interés por efecto de la detención de los grupos	172

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 4.1 Fachada de la E/B Vegas de Petare	102
Ilustración 4.2 Detalle de la carcasa deteriorada de una de las bombas	103
Ilustración 4.3 Detalle del deterioro de las bases de los grupos	103
Ilustración 4.4 Detalle del deterioro de las bases metálicas	103
Ilustración 5.1 Terreno destinado para la nueva estación de bombeo	119
Ilustración 5.2 Terreno destinado para la nueva estación de bombeo	119

GLOSARIO DE TÉRMINOS

a:	velocidad de propagación de las ondas de perturbación elásticas
A:	área
AWG:	Galga de Conductores Americanos
B:	bobina del contactor
C:	factor de colocación de la tubería
c_1, c_2, c_3 :	constantes de una ecuación cuadrática del tipo $f(x) = a + b \cdot x + c \cdot x^2$
CAD:	dibujo asistido por computador
$\cos\phi$:	factor de potencia
Covenin:	Comisión Permanente de Normas para Estructuras de Edificios del Ministerio del Desarrollo Urbano
d:	diámetro interior de la tubería
D:	diámetro exterior de la tubería
e:	espesor de la tubería
e_1, e_2 :	valores inicial y final de la energía específica
e_s, e_e :	energía específica en la salida y en la entrada de una bomba
E:	módulo de elasticidad del líquido
E_1, E_2 :	valores inicial y final de la energía de un sistema
E_c :	módulo de elasticidad de la tubería
f:	factor de fricción
f_1 :	onda reflejada en una derivación
f_{hfd} :	factor de fricción en tubería de hierro fundido dúctil
f_{hg} :	factor de fricción en tubería de hierro galvanizado
ft:	pies (“feet” en inglés)
F:	fuerza
F_1, F_2, F_3 :	ondas transmitidas en los tramos de tuberías (1, 2 y 3) de una derivación
g:	aceleración de la gravedad
h:	altura piezométrica
hab:	habitantes
h_f :	pérdida de carga por efectos viscosos

hfd:	hierro fundido dúctil
hg:	hierro galvanizado
h_s :	pérdidas de carga totales del lado de la succión
H:	altura
H_a :	aumento o disminución de la presión por efecto de golpe de ariete
H_e :	carga estática
H_o :	altura en la condición de régimen permanente
hr:	hora
H_v :	carga o altura en la válvula
I:	momento de inercia de masa de las partes rotatorias
I_L :	corriente de línea
IMAS:	Instituto Municipal de Aguas de Sucre
in:	pulgadas (“inches” en inglés)
Inc:	caudal para combatir incendios
INE:	Instituto Nacional de Estadística
INOS:	Instituto Nacional de Obras Sanitarias
J:	constante de la ecuación de dinámica de giración
k:	coeficiente de pérdida localizada de energía
K:	constante de la curva de pérdidas
k_a :	tasa de cambio de la población en proporción lineal
k_e :	valor de la pendiente de la gráfica de población en papel semilog
K_1 :	relación entre el consumo medio diario y el consumo máximo diario
K_2 :	relación entre el consumo medio diario y el consumo máximo horario
K_3 :	relación entre el consumo medio diario y el consumo en caso de incendio
L:	longitud
L :	trabajo específico efectuado por el sistema
l/s:	litros por segundo
m:	flujo másico
m:	masa
M:	torque del conjunto conformado por rotor del motor, acople y bomba
m_B :	pendiente de la recta de Bergeron

m.c.a.:	metros de columna de agua
M_N :	par nominal del motor
MS:	control de marcha en seco
m.s.n.m.:	metros sobre el nivel del mar
N:	velocidad de rotación de la bomba y el motor
NEMA:	Nacional Electrical Manufacturers Association
$NPSH_d$:	carga neta de succión positiva disponible
$NPSH_r$:	carga neta de succión positiva requerida
n_q :	número de vueltas específico del rodete
Nºaños :	período de estimación de la proyección
OCEI:	Oficina Central de Estadística e Información
OL:	relé de protección de sobrecarga
p:	presión
p_a :	presión barométrica
P_{des} :	presión en la descarga de la bomba
p_e :	presión estática
$p_e/\gamma + z$:	carga o altura piezométrica
pers:	persona
pH:	grado de acidez o de basicidad de un fluido
p_s :	presión en la succión
p_T :	presión total o presión de estancamiento
p_v :	presión de vapor del líquido a la temperatura del flujo
P_b :	potencia requerida en el eje de la bomba
P_e :	potencia eléctrica
P_N :	potencia nominal del motor
P_{ob} :	población en un tiempo en particular
P_{ob_c} :	valor de población conocida
P_o :	potencia neta en el eje del motor
P_u :	potencia útil
Q:	caudal
Q_{comerc} :	caudal referido al consumo por comercios

$Q_{\text{diseño}}$:	caudal de diseño
Q_i :	caudal en el tramo i
Q_I :	caudal para el caso de ocurrencia de incendio
Q_m :	caudal medio diario
$Q_{\text{máx-diaro}}$:	consumo máximo diario
$Q_{\text{máx-horario}}$:	consumo máximo horario
Q_{res} :	caudal referido al consumo residencial
$Q_{\text{zona alta}}$:	caudal correspondiente al consumo de la zona alta
$Q_{\text{zona baja}}$:	caudal correspondiente al consumo de la zona baja
r :	factor de transmisión de la onda de perturbación
R :	radio de giro
Re :	número de Reynolds
Re_{crit} :	número de Reynolds crítico
s :	factor de reflexión de la onda de perturbación
S :	contactor de arranque
t :	intervalo de tiempo
t_c :	tiempo de fase o tiempo crítico igual a $2L/a$
T_1, T_2, T_3 :	bornes del motor
viv :	vivienda
V :	velocidad media del flujo
V_L :	tensión de línea
V_o :	velocidad en la condición de régimen permanente
W :	peso del conjunto en giración
X :	población en miles de habitantes
z :	posición relativa en sentido vertical
$1M$:	contactor de línea
$1Q_2$:	calor transmitido al sistema durante el proceso del estado 1 al 2
$1W_2$:	trabajo efectuado por el sistema durante un proceso
$2M$:	contactor de triángulo
α :	coeficiente de proporcionalidad para envejecimiento de la tubería

α_t :	ángulo de inclinación de la tubería
α_v :	relación de velocidades
β :	valor de par relativo al par del conjunto en condiciones permanentes
γ :	peso específica relativo del agua
ε :	rugosidad absoluta de la tubería
$\varepsilon_{inicial}$:	rugosidad inicial de la tubería
ξ, τ, c :	parámetros que describen los efectos transitorios en una conducción
η :	rendimiento de la bomba
η_{mec} :	rendimiento mecánico
η_{mot} :	rendimiento del motor
μ :	relación Poisson
ν :	viscosidad cinemática
ρ :	densidad de un fluido
ω :	velocidad angular
ΔP_{ob} :	crecimiento de población en un período de tiempo determinado
Δt :	diferencia de tiempo
Δz :	diferencia de cotas entre dos puntos

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objeto el estudio de la estación de bombeo Vegas de Petare perteneciente a una comunidad en la Parroquia Petare, de la cual se encarga el Instituto Municipal de Aguas de Sucre (IMAS). Esta estación presenta una situación técnica y económica desfavorable, dando como resultado un servicio inapropiado que no se ajusta a las necesidades de la población beneficiaria de la misma. La relación costo-funcionalidad de la estación de bombeo es muy elevada con respecto al resto de las estaciones que pertenecen al Instituto, por lo cual se requiere mejorar el servicio y disminuir los costos asociados a dicha estación.

La importancia de un buen servicio de abastecimiento de agua y disposición de las aguas residuales, radica en el aumento de las posibilidades de desarrollo de las poblaciones, evitando enfermedades y mejorando la calidad de vida de los habitantes. La realidad en nuestro país es que los sistemas de abastecimiento de agua en las zonas populares han sido el producto, en muchas ocasiones, de las exigencias directas de los pobladores a los organismos encargados y no el resultado del desarrollo de proyectos con objetivos sociales a largo plazo.

Esto ha originado sistemas de distribución de agua como la estación de bombeo Vegas de Petare, que han tenido un aumento progresivo de su capacidad pero que no se ajustan a las necesidades reales de la comunidad en la actualidad y a futuro, y a su vez requieren costos por mantenimiento muy elevados con relación a sistemas de mayor importancia.

El desarrollo de este trabajo se basa, fundamentalmente, en la cuantificación de los requerimientos de agua de los habitantes de la zona. Para ello se realizó una estimación de la población que permitiera determinar el gasto requerido. Adicionalmente, se realizó el levantamiento de los equipos y sistemas de tuberías asociados a la estación, con la finalidad de realizar un análisis de los mismos y determinar las posibilidades a futuro de este sistema

de abastecimiento de agua. Se verificó la deficiencia del sistema con respecto a las necesidades de la población, así como los problemas hidráulicos y mecánicos que presenta.

Se tomaron en cuenta ciertas consideraciones importantes para el desarrollo de un nuevo sistema de bombeo. Estas consideraciones son principalmente la variación de las necesidades de agua de la población a lo largo de un período de diseño apropiado, el diseño de los sistemas de tuberías en la estación y la selección de los equipos que mejor se ajustan a las variaciones de la demanda de agua.

Para lograr un sistema eficiente se siguieron criterios económicos que, a su vez, cumplieran con requerimientos hidráulicos adaptados a las posibilidades técnicas de este sistema y se verificaron posibles inconvenientes, como las fluctuaciones temporales de la presión, producto del fenómeno conocido como golpe de ariete.

La alternativa que genera beneficios económicos a mediano y largo plazo, propuesta en este trabajo, es la implementación de variadores de velocidad de motores trifásicos de inducción, que permiten una disminución en el consumo eléctrico y un aumento de la disponibilidad de los equipos.

El diseño de la estación se basa en criterios hidráulicos, mecánicos, eléctricos, económicos y de ahorro de energía mediante nuevas alternativas, de tal manera que resulten en un proyecto de interés social de alto rendimiento que se ajuste a la realidad de nuestro país.



CAPÍTULO 1

IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA

Breve Reseña Histórica del Instituto

El área metropolitana de Caracas es considerada como una de las zonas más complejas en cuanto a los sistemas de abastecimiento de agua potable. Este hecho, aunado al constante crecimiento de la población, con más del 40% de ésta en estado de pobreza, favorece al surgimiento de problemas en los sistemas de conducción de las aguas que deben ser resueltos para mantener la calidad de este servicio.

Este constante esfuerzo por mantener dicha calidad se ha observado a lo largo de los años en esta ciudad. Haciendo un breve recuento de su historia, vemos que a finales del siglo antepasado, entre las primeras obras de acueducto importantes que se realizaron están las fuentes de abastecimiento de Macarao y Catuche, así como otros cursos de aguas que nacen en el Ávila, siendo aprovechados mediante infraestructuras como diques, canales, estanques y redes de distribución.

En los años 30, se comienza la explotación del subsuelo del Valle de Caracas por medio de una gran cantidad de pozos. En 1943 se funda el I.N.O.S. (Instituto Nacional de Obras Sanitarias) otorgándosele la concesión para la gestión integral del servicio en el Área Metropolitana de Caracas. Para esta fecha, la población demanda más agua de la producida en el valle. Se comienza la construcción del sistema Tuy I, el cual conducía a la ciudad desde la cuenca del río Tuy unos 2000 l/s. Se construyen otras obras complementarias como la ampliación de Macarao, los alimentadores principales, estaciones de rebombeo y la planta La Mariposa. La ciudad cuenta con unos 3.750 l/s.

El continuo desarrollo obliga a la construcción del Sistema Tuy II (año 1967) y Tuy III (año 1980) y sus obras complementarias que permitan entregar a la ciudad unos 17.000 l/s.

Sin embargo, el final de la década de los 80, la problemática debido al caos del importante sistema de abastecimiento es tal, que las manifestaciones son constantes y obligan a la creación de las hidro-regionales. Es entonces cuando se decide crear el IMAS. El Instituto comienza las actividades en el año 1992 y luego de un duro comienzo, momentos en los que el 60% de los sectores no tenían servicio, se logra adelantar las acciones y al cabo de unos años se logra abastecer al 90% de la población.

El Instituto se constituyó como tal el 20 de Diciembre de 1991, mediante la Ordenanza Municipal Número Extraordinario 572-12/91, modificada posteriormente mediante la Ordenanza de fecha catorce (14) de Julio de Mil Novecientos Noventa y Cuatro (1994), publicada en Gaceta Municipal número Extraordinario 198-4/94, fecha Veintidós (22) de Julio de Mil Novecientos Noventa y Cuatro (1994).

El IMAS tiene como objetivo proporcionarle un servicio de excelente calidad y continuo a la población del Municipio Sucre. Otro de sus propósitos es adquirir una tecnología que permita el control y automatización de los procesos y un programa eficiente de formación de personal.



CAPÍTULO 2

DEFINICIÓN DEL PROYECTO

2.1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

Para cubrir la demanda de agua en Caracas el río Tuy se subdivide en sectores de servicio y se emplean los sistemas: TUY I, TUY II y TUY III.

El TUY I, sector la Mariposa, está ubicado a una distancia de 70 km. de la ciudad. Comienza en la represa de Lagartijo en los valles del Tuy y se extiende hasta el embalse de la Mariposa. Posee 4 estaciones de bombeo y este sistema produce 3 800 litros de agua por segundo.

EL TUY II comienza en las cercanías de Santa Teresa del Tuy y culmina en la Planta de Tratamiento La Guairita, en Caracas. Tiene una longitud de 33 km. Cuenta con 5 estaciones de bombeo. Lo abastece el embalse Lagartijo y el río Taguacita. Su capacidad es de 8 000 litros de agua por segundo. Cubre el sector este de la ciudad así como parte del oeste.

De la estación de bombeo 2-5, que se surte del sistema Tuy II, salen tres aducciones que se distribuyen por varios sectores, a saber: Alimentador Norte, Alimentador Sur y Alimentador Este.

EL TUY III comprende: la aducción Camatuy, el tramo de la planta de tratamiento Caujarito y el estanque Las Morochas. La aducción Camatuy tiene una tubería de 56 km. de longitud y cuenta con 4 estaciones de bombeo. En la planta de tratamiento Caujarito se tratan las aguas y se envían mediante dos bombeos sucesivos a los estanques Las Morochas, por una aducción que tiene una longitud de 18,7 km y una tubería de 2,54 m de diámetro. Las Morochas son dos estanques de concreto con una capacidad de 20 millones y 40 millones de litros de agua respectivamente. Desde estos estanques se distribuye el agua para Caracas por gravedad.

2.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La estación de bombeo Vegas de Petare se encuentra ubicada en el Municipio Sucre y actualmente abastece a unas 12.000 personas de las barriadas adyacentes a un promedio de 200 litros diarios por persona. Esta estación no funciona de forma permanente sino cuatro o cinco veces por semana. La situación en la que se encuentra la infraestructura de esta estación es bastante crítica tomando en cuenta los costos de mantenimiento y reparaciones necesarias para mantener el sistema funcionando en su mínima capacidad y con una eficiencia bastante baja.

Por tal motivo, se requiere un estudio técnico económico que determine una solución que permita mejorar la situación económica y técnica que presenta la mencionada estación de bombeo.

Como solución tentativa se plantea la reestructuración total de la estación, con la que sería necesaria una inversión inicial grande pero que le traería beneficios a largo plazo y, al mismo tiempo, se obtendría beneficio de espacio en el terreno en el que ésta se encuentra para futuros desarrollos de instalaciones.

2.3. OBJETIVOS Y ALCANCES

2.3.1. OBJETIVO GENERAL

- Realizar un estudio técnico–económico que permita mejorar la estación de bombeo Vegas de Petare.

2.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar y evaluar las condiciones actuales de operación de la estación Vegas de Petare.
- Determinar aspectos hidráulicos y mecánicos del sistema de tubería existente
- Definir y diseñar una nueva configuración de la estación adecuada a las condiciones de operación actuales y a futuro, incluyendo los costos asociados.

2.3.3. ALCANCES

- Análisis técnico económico de la situación actual de la estación de bombeo.
- Determinación de la población que se beneficia actualmente del bombeo de la estación.
- Diseñar una nueva estructura de la estación tomando en cuenta la población a ser servida durante el período de diseño, ubicación, obras civiles, hidráulica, mecánica, sistema eléctrico, ahorro de energía.
- Realizar un diseño hidráulico y mecánico así como un estudio preliminar de golpe de ariete.

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1. PROYECCIONES DE POBLACIÓN

Las proyecciones de población constituyen uno de los aspectos más importantes en la planificación de las actividades económicas y sociales de un país. En sí, una proyección de población es el resultado de un conjunto de estimaciones elaboradas mediante técnicas demográficas y estadísticas, que buscan establecer las posibles tendencias de las variaciones que experimenta la población. Es necesario aclarar que no siempre los cálculos sobre el futuro de una población son 100 por ciento exactos, ya que existen variaciones inesperadas por el efecto de un repentino cambio en el comportamiento de las variables demográficas.

El objetivo de esta sección es examinar algunas de las metodologías utilizadas con mayor frecuencia para proyectar poblaciones mediante las siguientes definiciones básicas.

3.1.1. Estimación

Es la cuantificación de algún hecho que en principio, no se obtiene por métodos de medición convencionales. Puede ser una estimación de la población o de cualquiera de los fenómenos demográficos en el pasado, presente o futuro (para una determinada fecha o lugar dado).

3.1.2. Estimación de población

Se interpreta como el número de personas que tiene o tendrá una localidad en un momento específico del tiempo. Tal número no es el producto de una medición directa, sino que para obtenerlo se tuvo en cuenta cierta información sobre la población como lo son las estimaciones del total de habitantes de un país en diversos momentos dentro de un período intercensal, entre otras.

3.1.3. Proyecciones de Población

Es el conjunto de resultados provenientes de cálculos relativos a la evolución futura de una población, partiendo usualmente de ciertos supuestos respecto al curso que seguirán: la fecundidad, mortalidad y las migraciones. Por lo general se trata de cálculos formales que muestran los efectos de los supuestos adoptados.

El objeto de las proyecciones es calcular la magnitud y composición futura de una población basándose en un adecuado conocimiento de los hechos: demográficos, sociales y económicos, ocurridos en el presente y pasado próximo, considerando además los cambios que se prevé ocurrirán en los factores que influyen sobre la dinámica demográfica.

3.1.4. Utilidad de las proyecciones de población

Las proyecciones de población representan un insumo básico para la planificación económica y social de un país. Esto debe considerarse en relación a la doble función de la población en la sociedad, en un primer momento su participación como consumidora de bienes y servicios, y en un segundo término como la generadora de los bienes y servicios indispensables para el sostenimiento de ella misma.

Por lo tanto, la importancia de las proyecciones de población radica en la capacidad de anticipar las necesidades y capacidades básicas de un país o región a otros en un tiempo futuro.

3.1.5. Métodos generales para elaborar las proyecciones

3.1.5.1. Métodos Matemáticos

Son aquellos métodos que permiten calcular la población apoyándose en la observación de las tendencias pasadas del crecimiento de la población y/o de sus componentes, utilizando dichas tendencias en la adopción de una función matemática, la misma que puede ser representada o ajustada a una línea recta, a una curva polinómica de segundo o tercer orden, a una curva exponencial simple o modificada.

El uso de estos métodos tiene algunas de las siguientes limitaciones:

- a) Dificultad para establecer la función más adecuada que determine el comportamiento real de la población.
- b) No considera la estructura por edad de la población, según sexo y grupos de edad, y sus interrelaciones.
- c) Sólo sirven para proyectar a corto plazo.

Los métodos matemáticos más importantes son los siguientes:

Método Lineal

De acuerdo a este método, el crecimiento de la población sigue una trayectoria recta. Esto se verifica observando en la data histórica si ha habido un incremento constante en los últimos censos.

El cálculo de la población futura se realiza de acuerdo a la siguiente igualdad:

$$\text{Pob} = \text{Pob}_c + k_a \cdot \text{N}^\circ\text{años} \quad (3.1)$$

donde

Pob : población en un tiempo en particular

Pob_c : población conocida

Nºaños : período de estimación de la proyección

k_a : tasa de cambio de la población

La constante k_a se define matemáticamente como:

$$k_a = \frac{d(\text{Pob})}{dt} \quad (3.2)$$

y se puede determinar gráficamente, o a partir de las poblaciones en censos sucesivos como:

$$k_a = \frac{\Delta P_{ob}}{\Delta t} \quad (3.3)$$

Por lo general, este método se utiliza para proporciones en plazos de tiempo muy cortos, básicamente para obtener estimaciones de población a mitad de año.

El método lineal, supone un crecimiento constante de la población, lo cual significa que la población aumenta o disminuye en el mismo número de personas.

Método Geométrico o Exponencial

Un crecimiento de la población en forma geométrica o exponencial supone que la población crece a una tasa constante, lo que significa que aumenta exponencialmente en cada período de tiempo.

El crecimiento geométrico supone que la tasa de incremento es proporcional a la población y se describe a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{d(Pob)}{dt} = k_e \cdot P_{ob_c} \quad (3.4)$$

De la integración de esta ecuación se obtiene lo siguiente:

$$\ln(Pob) = \ln(P_{ob_c}) + k_e \cdot \Delta t \quad (3.5)$$

Para verificar esta hipótesis se representa el crecimiento registrado de la población en papel semilogarítmico y se ajusta una línea recta a los datos determinando así el valor de la pendiente k_e :

$$k_e = \frac{\Delta P_{ob}}{\Delta t} \quad (3.6)$$

Método Parabólico

En los casos en que se dispone de estimaciones de la población referidas a tres o más fechas pasadas y la tendencia observada no responde a una línea recta, ni a una curva geométrica o exponencial, es factible el empleo de una función polinómica, siendo las más utilizadas las de segundo o tercer orden.

Una parábola de segundo grado puede calcularse a partir de los resultados de tres censos o estimaciones. Este tipo de curva no sólo es sensible al ritmo medio de crecimiento, sino también al aumento o disminución de la velocidad de ese ritmo.

La fórmula general de las funciones polinómicas de segundo grado es la siguiente:

$$\text{Pob} = c_1 + c_2 \cdot t + c_3 \cdot t^2 \quad (3.7)$$

donde:

t : es el intervalo cronológico en años, medido desde fecha de la primera estimación.

Pob : es la cantidad de habitantes estimada t años después de la fecha inicial.

c_1, c_2, c_3 : son constantes que pueden calcularse resolviendo la ecuación para tres fechas censales o de estimaciones pasadas.

Al igual que en la aplicación de la curva geométrica, el empleo de una curva parabólica puede traer problemas si se extrapola la población por un período de tiempo muy largo, pues los puntos llegan a moverse cada vez con mayor rapidez, ya sea en sentido ascendente o descendente. Ello puede conducir a que en un período futuro lejano se obtengan valores de la población inmensamente grandes, o muy cercanos a cero.

3.1.5.2. Métodos Demográficos

Conocido también como método de los componentes, consiste en proyectar por separado cada grupo poblacional, según edad y sexo, a partir de la proyección de los tres elementos que componen la dinámica demográfica: natalidad, mortalidad y migraciones.

Como resultado de la aplicación de este método se obtiene la cantidad y composición futura de la población, según sexo y grupos de edad lo cual permite con posterioridad, la obtención de proyecciones derivadas sobre ciertos grupos poblacionales.

3.1.5.3. Métodos Económicos

Es posible hacer proyecciones que se basan en procedimientos que consideran los cambios demográficos, especialmente las migraciones, como fenómenos que dependen directamente de alguna variable económica importante, por ejemplo el crecimiento industrial de una región determinada.

En este tipo de proyecciones es necesario un profundo conocimiento teórico y empírico de las relaciones entre la economía y la población.

3.1.6. Cálculo de las Proyecciones de Población

Cabe mencionar que antes de elegir cualquiera de los métodos de proyección señalados anteriormente deben tomarse en cuenta ciertos criterios tanto para elegir el método adecuado como para el planteamiento de las hipótesis, a saber:

- a) Se debe conocer el tipo de información disponible: calidad, cobertura, consistencia interna y actualidad de la misma. En países como el nuestro, donde no se cuenta con buenos registros de las estadísticas vitales no nos permite contar con estimaciones confiables de los fenómenos demográficos a nivel de divisiones políticas secundarias. Por ende no es posible hacer proyecciones por el método de los componentes a nivel regional.

- b) Se debe tener en cuenta el alcance cronológico de las proyecciones. El plazo depende de las necesidades de investigación y pueden ser de largo, mediano y corto plazo (más de quince años, entre 5-15 años y hasta 5 años o menos respectivamente). Se pueden hacer proyecciones para cualquier año, pero lo más usual es hacerlas para años terminados en 0 y 5 y a mitad de año.
- c) Se deberá tener en cuenta el destino que se dará a las proyecciones. Si solamente se necesita el volumen total de la población, no sería necesario aplicar el método de los componentes. Pero si el fin de las proyecciones es la planificación a mediano plazo de la cobertura educativa de un país, entonces sí se requerirá del empleo del método de los componentes.

3.2. PRINCIPIOS DE MECÁNICA DE LOS FLUIDOS APLICADOS A LOS SISTEMAS DE BOMBEO

3.2.1. Ecuación de Continuidad

En mecánica de los fluidos, la ley de la conservación de la masa se expresa mediante la ecuación de la continuidad. Dependiendo de los factores específicos del caso de flujo sujeto a análisis, esta ecuación adopta una variedad de formas más o menos complejas. Para el efecto de este trabajo sólo será analizada para el flujo de líquidos incompresibles en tuberías consideradas inelásticas. Igualmente sólo se tomarán en cuenta los cambios en las propiedades del flujo y del fluido en la dirección principal del movimiento (método unidimensional de análisis). Así, para caracterizar cinemáticamente al régimen en una sección particular de la tubería, se hará referencia a su velocidad media, y a un valor único ρ , representativo de la densidad del fluido en tal sección. Bajo tales aspectos se tiene que:

$$V = f(x) \tag{3.8}$$

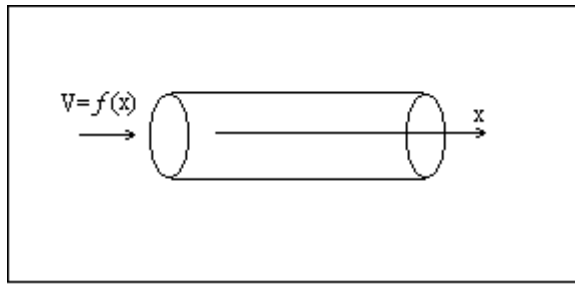


Figura 3.1 Velocidad media en dirección axial del conducto

A partir de la ecuación (3.8), y considerando que el flujo es permanente, unidimensional, de fluido considerado incompresible, se tiene la ecuación de la continuidad en términos de derivadas ordinarias:

$$\frac{d(A \cdot V)}{dx} = \frac{dQ}{dx} = 0 \quad (3.9)$$

cuya integral es:

$$Q = V \cdot A = \text{constant} \quad (3.10)$$

siendo Q el caudal o volumen de fluido que pasa por la sección transversal de un conducto A en una unidad de tiempo.

La ecuación de la Continuidad es consecuencia del principio de la conservación de las masas, que dice que la masa de fluido por unidad de tiempo que atraviesa cualquier sección de un conducto permanece constante.

Si se aplica la ecuación de la continuidad en un conducto con diferentes secciones transversales se tiene que:

$$V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 = V_3 \cdot A_3 = \dots = V_n \cdot A_n \quad (3.11)$$

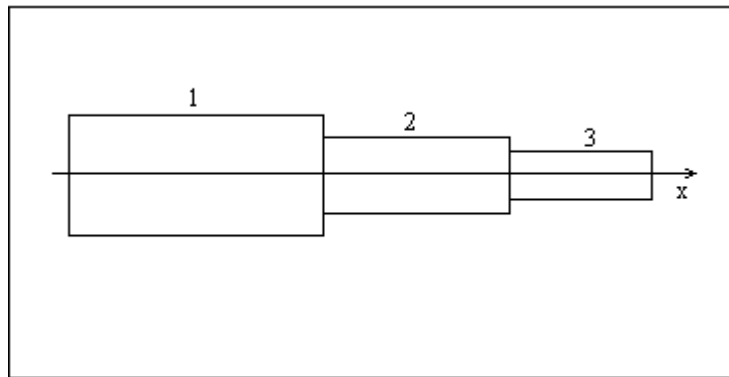


Figura 3.2 Cambios en el área de la sección transversal del conducto

Esta ecuación se cumple para flujos permanentes a través de tuberías en serie y es la forma más conocida de la ecuación de la continuidad en la hidráulica aplicada. Por otro lado, según la ecuación de la continuidad el caudal permanece constante en cualquier sección aun variando el área. Para que esta proporción se cumpla, al aumentar el área de una tubería se reduce la velocidad y viceversa.

3.2.2. Flujos de Fluidos Viscosos

Un flujo viscoso es aquel en el cual los efectos de los esfuerzos cortantes entre dos partículas de fluido que afectan el movimiento relativo entre ellas, es importante y no pueden despreciarse. Cualquier efecto viscoso que pudiera existir está confinado a una capa delgada, llamada *capa límite*, que está unida a la frontera.

Los flujos viscosos incluyen la amplia clase de los flujos internos, como los flujos en tuberías y conductos y canales abiertos. En tales flujos los efectos viscosos causan *pérdidas* sustanciales y explican las enormes cantidades de energía que hay que gastar para transportar petróleo y gas por tuberías, así como agua y otros líquidos viscosos. La condición de no deslizamiento que da pie a una velocidad cero en la pared, y los esfuerzos cortantes resultantes, generan directamente dichas pérdidas.

3.2.3. Flujos Laminares y Turbulentos

El flujo viscoso se puede clasificar como laminar o como turbulento. En el *flujo laminar* el fluido se mueve sin que haya mezcla significativa de partículas de fluido vecinas. Los esfuerzos cortantes viscosos siempre afectan los flujos laminares. El flujo puede depender considerablemente del tiempo o puede ser estable.

En un *flujo turbulento* los movimientos del fluido varían de forma irregular, de modo que las cantidades como velocidad y presión exhiben variaciones aleatorias con las coordenadas de espacio y tiempo.

El régimen de flujo depende de tres parámetros físicas que describen las condiciones de flujo. El primer parámetro es una escala de longitud del campo de flujo, como el espesor de una capa límite o el diámetro de una tubería. El segundo parámetro es una escala de velocidad tal como un promedio espacial de la velocidad. El tercer parámetro es la viscosidad cinemática.

Los tres parámetros pueden combinarse en uno solo que puede utilizarse para predecir el régimen de flujo. Esta cantidad es el **número de Reynolds**, un parámetro adimensional que se define como:

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (3.12)$$

donde L y V son una longitud y una velocidad características, respectivamente, y ν es la viscosidad cinemática. Si el número de Reynolds es relativamente pequeño el flujo es laminar; si es grande, el flujo es turbulento. Para ser más preciso al respecto, se define el número de Reynolds crítico, $Re_{crít}$, tal que el flujo es laminar si $Re < Re_{crít}$. En un flujo dentro de una tubería con paredes ásperas se determina que $Re_{crít}$ es aproximadamente igual a 2000. Éste es el número de Reynolds crítico mínimo y es el que se emplea en la mayor parte de las aplicaciones de ingeniería.

3.2.4. La Ecuación de Bernoulli

Uno de los supuestos para la deducción de esta ecuación es que los efectos viscosos son insignificantes. Adicionalmente, se supone flujo estable, sin variaciones en la densidad del flujo y con marco de referencia inercial.

Se satisface, de acuerdo a los supuestos anteriores, que a lo largo de una misma línea de corriente:

$$\frac{V^2}{2} + \frac{p_e}{\rho} + g \cdot z = \text{constante} \quad (3.13)$$

donde

V: velocidad media

p_e : presión estática

ρ : densidad del fluido

g: aceleración de la gravedad (9,807 m/s)

z: posición relativa de la sección transversal en sentido vertical

o entre dos puntos (1 y 2) de una misma línea de corriente:

$$\frac{V_1^2}{2} + \frac{p_{e1}}{\rho} + g \cdot z_1 = \frac{V_2^2}{2} + \frac{p_{e2}}{\rho} + g \cdot z_2 \quad (3.14)$$

siendo esta la *ecuación de Bernoulli*, de acuerdo a las suposiciones hechas anteriormente.

Si dividimos esta ecuación entre g, se convierte entonces en:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 \quad (3.15)$$

La suma de los dos términos $(p_e/\gamma + z)$ se denomina *carga piezométrica* y la suma de los tres términos es la *carga total*. Otro término comúnmente utilizado la presión p_e referido como *presión estática*, y la suma de los dos términos se denomina *presión total* p_T o *presión de estancamiento*.

3.2.5. Pérdidas en Sistemas de Tuberías

Las pérdidas pueden dividirse en dos categorías: las debidas al esfuerzo cortante de pared en los elementos de las tuberías, y las debidas a los componentes de la tubería. Las primeras se distribuyen a lo largo de los elementos de la tubería. Las segundas se tratan como discontinuidades discretas en la línea de declive hidráulico y en la línea de nivel de la energía, y comúnmente se denominan pérdidas secundarias; se deben primordialmente a flujos separados o secundarios.

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

En la ecuación de Bernoulli, hablando ahora de fluidos reales, debemos introducir un nuevo término (h_f):

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + h_f \quad (3.16)$$

donde h_f es la altura correspondiente a la pérdida de carga por fricción por efecto de la viscosidad.

Una gran cantidad de investigaciones se han hecho para determinar la cantidad de pérdidas por fricción para diferentes condiciones, y varias expresiones basadas sobre datos experimentales que han sido desarrolladas para el cálculo de las pérdidas por fricción. La expresión mas comúnmente usada en la práctica es la ecuación de Darcy-Weisbach. Esta ecuación contempla que la pérdida por fricción en la tubería depende de ciertas condiciones como: rugosidad de la superficie interior de la tubería, velocidad del flujo, viscosidad y diámetro.

La ecuación de Darcy - Weisbach se expresa como sigue:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (3.17)$$

donde:

h_f : pérdida por fricción (metros o pies de líquido).

L : longitud de la tubería (m ó ft).

d : diámetro interior de la tubería (m ó ft).

V : velocidad promedio del flujo (m/s ó ft/s)

g : constante de gravedad (9.807 m/s²).

f : factor de fricción.

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:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (3.18)$$

donde Re es el número de Reynolds.

Para flujo turbulento el factor de fricción se encuentra afectado por la rugosidad de las paredes interiores de la tubería y éste puede ser determinado por métodos numéricos con la ecuación implícita desarrollada por C.F Colebrook (1939):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{3.71 \cdot d} + \frac{2.51}{\text{Re} \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (3.19)$$

donde:

Re: número de Reynolds, adimensional.

f: factor de fricción.

ε : rugosidad absoluta de la tubería (ft).

d : diámetro interior de la tubería (ft).

Una aproximación de esta ecuación es la propuesta por Swami, la cual expresa el factor de fricción de manera explícita tal como se observa a continuación:

$$f = \frac{0.25}{\log \left(\frac{\varepsilon}{3.71 \cdot d} + \frac{5.74}{\text{Re}^{0.9}} \right)^2} \quad (3.20)$$

Las diferencias porcentuales entre los valores de f calculados según la ecuación de Colebrook y la de Swami se pueden observar en la referencia [10], donde se concluye que el cálculo mediante la ecuación (3.20) es bastante preciso para efectos de estudio de sistemas de abastecimientos de agua.

Aparte de las fórmulas de Darcy – Weisbach, Colebrook y Swami, otras soluciones matemáticas han sido desarrolladas para estimar las pérdidas de presión por fricción, como lo son las fórmulas empíricas desarrolladas por Scobey, Manning y Hanzen - Williams .

Las pérdidas localizadas de energía en conducciones resultan como consecuencia de la separación de la capa límite, ocasionada por las alteraciones en la geometría de los contornos. En razón de la complejidad cinemática y dinámica del régimen relacionado con la separación de la capa límite, se comprende que, casi invariablemente, la estimación de las pérdidas localizadas de energía deban conseguirse por la vía de la experimentación. Las pérdidas menores o localizadas se expresan en términos de un coeficiente de pérdida K , definido por:

$$h_f = k \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (3.21)$$

Los valores de k para las piezas especiales de uso más común en sistemas de distribución de agua han sido seleccionados después de realizar numerosos ensayos y corresponden a flujo turbulento completamente establecido.

Las pérdidas localizadas correspondientes a las siguientes condiciones y piezas especiales son las más utilizadas en este tipo de proyecto:

- Cambios en la dirección del flujo
 - o Codos o curvas
 - o Codos segmentados o seccionados
- Cambios en los diámetros de las tuberías
 - o Expansiones graduales
 - o Expansiones bruscas
 - o Contracciones bruscas
 - o Contracciones graduales
- Reunión y separación de flujos en tuberías a presión
 - o Confluencias
 - o Derivaciones
- Orificios
- Pérdidas de energía por entrada

- Pérdidas de energía por salida
- Pérdidas localizadas de energía en válvulas

3.2.6. Envejecimiento de las Tuberías

Durante el período de servicio de una tubería, el grado de alteración que experimenta su rugosidad inicial dependerá de la calidad del agua transportada y de la naturaleza de la superficie del conducto. Esa alteración puede reducir la capacidad hidráulica del elemento de conducción, principalmente por el incremento del coeficiente de fricción y/o por la disminución sensible del área neta de flujo.

- Principales factores que afectan la capacidad hidráulica de un conducto: sedimentación, crecimientos orgánicos, depósitos minerales, corrosión y tuberculización.
- Corrosión: término que se utiliza para designar el deterioro interno o externo de las tuberías.
- Factores que determinan la corrosión interna de los conductos: la composición físico-química del agua, principalmente caracterizada por el pH, la naturaleza y concentración del contenido mineral y los gases disueltos, el diámetro de la tubería, la velocidad y la presión del flujo, la presencia de cierto tipo de bacterias, la temperatura del agua y el material de la tubería (superficie interna).
- Diversas investigaciones experimentales (detalles en referencia [10]) simplifican el crecimiento de la rugosidad con un comportamiento lineal, según el cual, la rugosidad ε al cabo de T años, puede expresarse como:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{inicial}} + \alpha \cdot t \quad (3.22)$$

donde:

$\varepsilon_{\text{inicial}}$: rugosidad inicial de la tubería

α : coeficiente de proporcionalidad

Para la estimación del coeficiente de proporcionalidad que aparece en la ecuación anterior, Levin (referencia [10]) propone una relación entre α y las características del agua resumidas en la siguiente tabla:

Grupo	Características del Agua	Valores de a (mm/año)		
		Mínimo	Medio	Máximo
1	Aguas poco mineralizadas, no agresivas, con poco contenido de minerales y de materia orgánica.	0,005	0,025	0,055
2	Aguas poco mineralizadas pero corrosivas (pH reducido), de contenido de hierro y materia orgánica inferior a 3 mg/l	0,055	0,070	0,180
3	Agua muy corrosiva (pH muy bajo), contenido de cloruros y sulfatos menores de 150 mg/l y hierro superior a 3 mg/l	0,180	0,200	0,400
4	Aguas corrosivas (pH reducido), contenido de cloruros y sulfatos entre 500 y 700 mg/l, considerable materia orgánica	0,400	0,510	0,600
5	Aguas muy mineralizadas, de gran dureza, pH superior a 7, residuo sólido superior a 2000 mg/l.	0,600	0,700	1,000

Tabla 3.1 Características del agua y su relación con α

3.2.7. Cavitación

El complejo fenómeno denominado cavitación se produce cuando por efectos de la viscosidad (pérdidas de carga por fricción) el flujo en una tubería a presión alcanza la presión de vapor del líquido a la temperatura de operación. Luego se generan cavidades saturadas de vapor que sometidas a los gradientes de presión que prevalecen en esa región del movimiento, estas burbujas de vapor, por su baja densidad, pueden adquirir una considerable velocidad, y se condensarán cuando se vean transferidas a zonas de mayor presión. Aquéllas que entren en contacto con un contorno de la tubería o con una de las partes de algún dispositivo que en ellas se encuentre instalado, determinarán vibraciones, ruidos y esfuerzos de impactos de gran magnitud, que afectan el comportamiento de las obras civiles y/o de los componentes mecánicos.

En general, el proceso de deterioro no es instantáneo sino progresivo, diferenciándose un período inicial donde el material se fatiga debido a las continuas implosiones de las burbujas de vapor, hasta que comienza la destrucción propiamente dicha. A partir de este momento, el fenómeno junto con sus consecuencias se acelera, ya que debido al surgimiento de nuevas irregularidades, se multiplicarán los puntos potenciales creadores de bajas presiones y por ende se ampliará la zona de influencia destructiva del fenómeno.

La cavitación es capaz de acabar con superficies hechas con los materiales más resistentes, tales como el acero, el concreto, y las fibras epóxicas. Por tales motivos, este complejo fenómeno constituye una limitación importante en la definición altimétrica de las tuberías, y en la selección de las válvulas, medidores de flujo, piezas especiales y unidades de bombeo.

La cavitación en una bomba puede ser detectada por el ruido que se produce dentro de la carcasa, así como la formación de profundas perforaciones y erosión general sobre el lado inferior de los vanos cerca de la entrada del impulsor.

La cavitación normalmente ocurre en el impulsor de una bomba centrífuga, y los daños causados por la misma pueden inutilizar el impulsor en tan solo unas cuantas semanas de operación continua.

Aunque el término cavitación se aplica a la formación de burbujas de vapor, también se usa para referenciar algunas manifestaciones de la actividad de dichas burbujas tales como:

- Erosión y picaduras en la superficie del metal.
- Caída de la capacidad de altura debido a la turbulencia.
- Limitaciones de flujo debido al bloqueo del pasaje del flujo.
- Ruidos o traqueteos causados por la formación de las burbujas de vapor.

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

- *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, aumento de r.p.m., etc.

- *Cavitación Permanente*: es la más peligrosa ya que produce el desgaste continuo sobre las partes metálicas.

3.2.8. Régimen Permanente

Los sistemas de conducción de fluidos están caracterizados por una operación estable o casi estable durante la mayor parte de sus períodos 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.

3.2.8.1. Principio de la Energía

La Primera Ley de la Termodinámica define un sistema con cambio de estado, entre un punto inicial 1 a otro final 2, como:

$${}_1Q_2 = E_2 - E_1 + {}_1W_2 \quad (3.23)$$

donde ${}_1Q_2$ es el calor transmitido al sistema durante el proceso del estado 1 al 2, E_1 y E_2 son los valores inicial y final de la energía E del sistema, y ${}_1W_2$ es el trabajo efectuado por el sistema durante el proceso.

En una turbomáquina el calor generado en su volumen de control se considera igual a cero. Por unidad de masa, esta ecuación se representa como:

$$\frac{E_2 - E_1}{m} = \frac{W}{m} \quad (3.24)$$

es decir

$$e_2 - e_1 = L \quad (3.25)$$

donde e_1 y e_2 son los valores inicial y final de la energía específica, y L es el trabajo específico efectuado por el sistema.

Para bombas o turbomáquinas generadoras, el trabajo específico es igual a la energía específica en la salida menos la energía específica en la entrada, esto es:

$$L = e_s - e_e \quad (3.26)$$

Sustituyendo los valores representativos de la energía específica en cada punto se obtiene la siguiente ecuación:

$$L = \left(u_s + p_s \cdot v_s + g \cdot z_s + \frac{V_s^2}{2} \right) - \left(u_e + p_e \cdot v_e + g \cdot z_e + \frac{V_e^2}{2} \right) \quad (3.27)$$

Esta ecuación describe el comportamiento de una turbomáquina sin variación de densidad ni temperatura; es decir, una turbomáquina hidráulica.

Despreciando los términos que no afectan significativamente el valor de L , la ecuación anterior se reduce a:

$$L = \frac{p_s - p_e}{\rho} + g \cdot (z_s - z_e) + \frac{V_s^2 - V_e^2}{2} \quad (3.28)$$

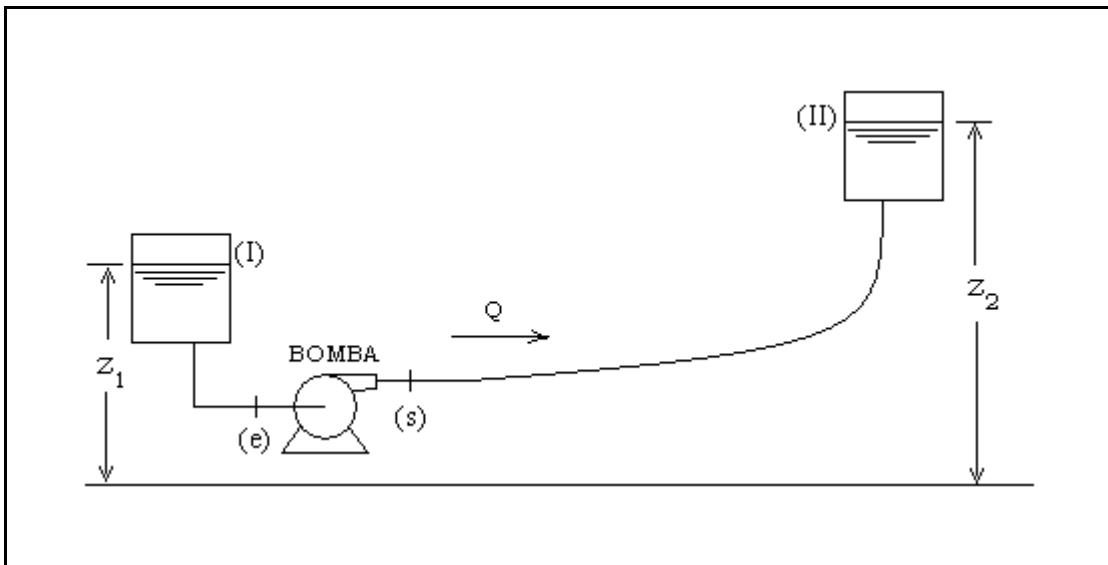


Figura 3.3 Esquema general de un sistema de bombeo

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre I y la entrada de la bomba (e) se obtiene la relación:

$$u_I + \frac{p_I}{\rho} + g \cdot z_I + \frac{V_I^2}{2} = u_e + e_e + g \cdot hf_{I_e} \quad (3.29)$$

Esto es igual a:

$$e_e = \frac{p_I}{\rho} + g \cdot z_I + \frac{V_I^2}{2} - g \cdot hf_{I_e} \quad (3.30)$$

Igualmente entre la salida de la bomba (s) y el punto II:

$$u_s + e_s = u_{II} + \frac{p_{II}}{\rho} + g \cdot z_{II} + \frac{V_{II}^2}{2} + g \cdot hf_{s_{II}}$$

$$e_s = \frac{p_{II}}{\rho} + g \cdot z_{II} + \frac{V_{II}^2}{2} + g \cdot hf_{s_{II}}$$

Por lo tanto, el trabajo específico es igual a:

$$L = \frac{p_{II} - p_I}{\rho} + g(z_{II} - z_I) + \frac{V_{II}^2 - V_I^2}{2} + g(hf_{I_e} + hf_{s_{II}}) \quad (3.31)$$

Si dividimos esta ecuación entre g , la curva del sistema queda definida como:

$$H = \frac{p_{II} - p_I}{\gamma} + (z_{II} - z_I) + \frac{V_{II}^2 - V_I^2}{2g} + hf_{I_e} + hf_{s_{II}} \quad (3.32)$$

donde hf_{I_e} y $hf_{s_{II}}$ representan las pérdidas de carga en las tuberías de succión y de descarga, respectivamente. Esta es la ecuación de energía y se puede aplicar a cualquier flujo uniforme estable con una entrada y una salida.

Se llama “carga” a la pérdida de carga porque tiene dimensiones de longitud. También se puede referir a $V^2/2g$ como carga de velocidad y a p/γ como carga de presión, porque estos términos también tienen dimensiones de longitud.

3.2.8.2. Análisis de Redes de Tuberías

Las metodologías de cálculo se fundamentan en las siguientes ecuaciones:

- Continuidad:

$$Q = V \cdot A = \text{constant} \quad (3.10)$$

- Energía:

$$H_2 + h_{f_2} + h_L + h_{f_1} = H_1 \quad (3.33)$$

- Cantidad de Movimiento:

$$F = \rho \cdot Q_1 \cdot V_1 + \rho \cdot Q_2 \cdot V_2 + \dots + \rho \cdot Q_n \cdot V_n \quad (3.34)$$

Por lo general, los planteamientos formulados sobre la base de las ecuaciones anteriores originan sistemas de ecuaciones no lineales que se resuelven sin mayores dificultades utilizando métodos de cálculo numérico.

Los métodos más utilizados en el análisis de redes son los siguientes:

- Método Gráfico
- Métodos Numéricos
 - Método Lineal o de las Características
 - Método de Hardy Cross
 - Método de Newton – Raphson

En el **método gráfico** se requiere determinar los siguientes aspectos:

1. Definir los nodos.
2. Definir las ecuaciones que describen el comportamiento de los ramales utilizando la ecuación de la energía (3.33) calculada para cada caso.
3. Simplificar la red en ramales equivalentes.
4. Determinar el punto de trabajo (sistema, ramales y bombas) gráficamente.

La linearización de las ecuaciones de energía del sistema, o **método lineal**, se realiza con la finalidad de analizar la red y determinar los caudales en cada tramo de la misma. Para ello es necesario seguir los siguientes pasos:

1. Representar la red de acuerdo a las ecuaciones que la definen mediante el balance de energía (ecuación 3.33).
2. Linearizar las ecuaciones descomponiendo los términos de segundo orden $(Q_i)^2$ en el producto de un valor discreto Q_i' y la variable de caudal Q_i , es decir:

$$(Q_i)^2 = |Q_i'| \cdot Q_i \quad (3.35)$$

3. Suponer una estimación inicial de los flujos Q_i' en cada tubería cumpliendo con la condición de continuidad.
4. Resolver el sistema de ecuaciones linearizadas.
5. Actualizar los caudales en cada tubo Q_i .
6. Repetir los pasos 4 y 5 hasta que se logre la exactitud deseada.

Para analizar una red mediante el **método de Hardy Cross**, los pasos generales a seguir son los siguientes:

1. Plantear las ecuaciones que definen a cada tramo de la red.
2. Definir un ajuste de flujo δQ para cada ciclo.
3. Suponer una estimación inicial de los caudales de tránsito de cada tramo que satisfaga la continuidad (ecuación 3.10).
4. Para cada ciclo o camino, evaluar el caudal correctivo δQ con la siguiente ecuación:

$$\delta Q = \frac{-\sum (K)_i \cdot Q_i \cdot (|Q_i|)^{n-1}}{\sum n \cdot |K_i \cdot (Q_i)^{n-1}|} \quad (3.36)$$

5. Actualizar los flujos en cada tubo de todos los ciclos sumando algebraicamente el caudal correctivo δQ a los caudales de tránsito correspondientes:

$$Q_i = Q_{o_i} + \Sigma \delta Q \quad (3.37)$$

6. Repetir los pasos 4 y 5 hasta conseguir la exactitud deseada.

3.2.9. Régimen Transitorio

Todos los sistemas de conducción de fluidos están sometidos, por diversas causas, a modificaciones temporales de las magnitudes medias de flujo que, generándose en ciertas secciones de los conductos por la acción de algún dispositivo o máquina instalada en la línea, o durante los vaciados y llenados de las tuberías, se propagan en forma de ondas elásticas a todo el resto del sistema. Estas modificaciones producen el efecto de sobrepresión.

Las sobrepresiones son sobrecargas bruscas y transitorias que ocurren en las tuberías de aducción, causada por el efecto pulsátil de la onda irruptiva generada por un cambio abrupto de la velocidad del agua dentro de dicha tubería. Este efecto es también conocido como "golpe de ariete" o "ariete hidráulico" (waterhammer).

La columna de agua circulando a determinada velocidad posee una cierta cantidad de energía cinética que debe ser disipada al interrumpirse bruscamente el flujo. Si la tubería fuese completamente rígida, la única forma de disipar esta energía sería por compresión de la columna de agua. Tomando en cuenta que la tubería posee cierto grado de elasticidad, parte de la energía de velocidad será utilizada para ensanchar la tubería y el resto se transformará en energía potencial de compresión sobre el agua.

Al cerrar instantáneamente o para el equipo de bombeo, la compresión del agua y la expansión de la tubería comienzan en el punto de cierre, transmitiéndose hacia arriba a una

velocidad determinada, conocida como velocidad de la onda de presión o celeridad de la onda.

Cuando la onda de presión llega al extremo superior de la tubería, la totalidad de la columna de agua ha sido comprimida, la tubería se ha expandido en toda su longitud y la velocidad reducida a cero. Por tanto, la energía cinética se ha transformado en energía potencial, y el agua y la tubería han sido deformados elásticamente.

Esta condición de energía potencial almacenada es inestable, y debido a que el agua en la tubería se encuentra ahora a una presión superior a la del depósito, ésta comenzará a fluir en dirección contraria.

Este fenómeno se repite al volver la tubería a su forma original y una nueva onda de presión se produce.

Debido a la complejidad de las ecuaciones descriptivas y los múltiples factores que intervienen el golpe de ariete, la selección del medio de protección más adecuado para un caso particular, implica cálculos sucesivos donde se prueban diversas estructuras y dispositivos hasta identificar aquella solución que mejor se adapta al problema que se analiza, tanto desde el punto de vista técnico como económico.

El golpe de ariete en estaciones de bombeo está relacionado, generalmente, con la puesta en servicio y desconexión de los grupos, 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 la especificación acertada de los tiempos de cierre y apertura de esos dispositivos.

Usualmente en líneas de bombeo el caso crítico de golpe de ariete se relaciona con la detención en emergencia de las motobombas, por averías electro-mecánicas o por fallas en el 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. Este recurso será más efectivo cuanto mayor sea la velocidad de giración inversa que admita el conjunto moto-bomba puesto que, de esta manera, se puede incrementar el tiempo de cierre de estas válvulas. Adicionalmente a esto, mientras mayor sea el momento de inercia de los grupos moto-bomba más lentamente se detendrán y menores serán los efectos transitorios.

3.2.9.1. Descripción Matemática del Régimen Transitorio en Tuberías

Las ecuaciones descriptivas del movimiento transitorio en tuberías a presión deben formularse tomando en cuenta las características que definen este tipo de movimiento admitiendo la variabilidad temporal de las magnitudes del flujo y la elasticidad del líquido y del conducto.

Tales ecuaciones son las de continuidad y movimiento. Para este caso de flujo, dentro del enfoque unidimensional de análisis, y con la limitación de ser aplicables a líquidos y a conductos circulares de propiedades únicas y poco elásticos, las respectivas ecuaciones adoptan las formas siguientes:

- Ecuación de la Continuidad:

$$V \cdot \frac{dh}{dx} + \frac{dh}{dt} + V \cdot \text{sen} \alpha_t + \frac{a^2}{g} \cdot \frac{dV}{dx} = 0 \quad (3.37)$$

en la cual:

V: velocidad media del flujo

α_t : ángulo de inclinación de la tubería

h: altura piezométrica

g: aceleración de la gravedad

x: dirección del movimiento

a: velocidad de propagación de las magnitudes del flujo

t: tiempo

- Ecuación Dinámica del Movimiento:

$$\frac{dh}{dx} + \frac{V}{g} \cdot \frac{dV}{dx} + \frac{1}{g} \cdot \frac{dV}{dt} + f \cdot \frac{V \cdot |V|}{2g \cdot D} = 0 \quad (3.38)$$

En esta ecuación f es el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach y la expresión cuadrática en el término que evalúa los efectos de la fricción se decompone de esta forma para que ese término invierta su signo cuando lo haga la velocidad en la evolución del régimen transitorio.

- Velocidad de Propagación de las Ondas Elásticas o Perturbaciones de las Magnitudes de Flujo:

$$a = \sqrt{\frac{\frac{E}{\rho}}{1 + \frac{E \cdot D}{E_c \cdot e}}} \quad (3.39)$$

en la cual:

- a : velocidad de propagación de las perturbaciones
- E : módulo de elasticidad del líquido
- E_c : módulo de elasticidad del material del conducto
- ρ : densidad del agua
- D : diámetro del conducto
- e : espesor del conducto
- C : factor de colocación de la tubería

Las ecuaciones (3.37) y (3.38) conforman un sistema de ecuaciones en derivadas parciales no lineales, cuya integración analítica, sujeta a condiciones de contorno, o es imposible o excesivamente compleja. Se utilizan, entonces, procedimientos numéricos orientados a la definición de las funciones:

$$V = f(x,t)$$

$$h = g(x,t)$$

que constituyen la solución al régimen transitorio.

De una manera aproximada, los efectos transitorios en un sistema de conducción mediante tuberías a presión pueden caracterizarse por los siguientes parámetros:

$$\xi = \frac{a \cdot V_0}{g \cdot h_0} \quad (3.40)$$

$$\tau_c = \frac{T_v}{\left(\frac{2 \cdot L}{a}\right)} \quad (3.41)$$

En estas expresiones: a es la velocidad de propagación de las perturbaciones; V_0 y h_0 son los valores de la velocidad y de la altura piezométrica relacionados con el régimen permanente; T_v es un tiempo indicativo de la rapidez de los cambios en las condiciones de borde del sistema de conducción que originan el régimen transitorio; y L es la longitud del conducto. En general, los efectos de este tipo de movimiento serán tanto más severos cuanto mayor sea el parámetro ξ y menor τ_c .

En el cálculo de la celeridad de las ondas elásticas, ecuación (3.39), el factor de colocación de la tubería C , depende de las restricciones en la tubería y de su tipo, y se define de acuerdo con las siguientes indicaciones:

- Tubería de acero o de plástico con juntas de soldadura en toda su extensión, anclada de forma tal que mantiene constante su longitud.

$$C = 1 - \mu^2 \quad (3.42)$$

donde μ representa la relación de Poisson.

- Tubería de acero con juntas mecánicas, o soldadas pero con frecuentes juntas de expansión, de longitud constante; tuberías de asbesto-cemento; de hierro fundido dúctil, de plástico, todas estas últimas con juntas que no admitan esfuerzos longitudinales y que absorban pequeñas deformaciones axiales. $C = 1$.
- Tuberías de acero con juntas de soldadura a todo lo largo de su eje y colocadas de forma tal que no se restringe la deformación axial global:

$$C = \frac{5}{4} - \mu \quad (3.43)$$

- Tuberías de concreto reforzado: en la ecuación (3.39) se utiliza como valor de E_c el módulo de elasticidad del acero siempre que para e se introduzca un espesor equivalente dado por la expresión:

$$e_e = E_r \cdot e_c + \frac{A_s}{l_s} \quad (3.44)$$

en la cual:

e_e : espesor equivalente

E_r : relación entre el módulo de elasticidad del concreto y del acero

e_c : espesor de concreto

A_s : área transversal del acero de refuerzo

l_s : espaciamiento de las barras o cables del acero de refuerzo

En la tabla siguiente se indica el módulo de elasticidad E_c de los materiales más comunes que se utilizan en la fabricación de tuberías y sus respectivas relaciones de Poisson:

Material	E_c (kgf/cm ²)	μ
Acero	$2,10 * 10^6$	0,30
Hierro Fundido Dúctil	$0,98 * 10^6$	0,25
Hierro Galvanizado	$1,687 * 10^6$	0,26
Concreto	$0,21 * 10^6$	0,10 – 0,15
Asbesto – cemento	$0,24 * 10^6$	-

Polietileno	$8,15 * 10^6$	0,46
-------------	---------------	------

Tabla 3.2 Módulos de elasticidad y relación de Poisson de algunos materiales

3.2.9.2. Formas Simplificadas de las Ecuaciones Descriptivas del Golpe de Ariete

Las formas simplificadas de las ecuaciones fundamentales (3.37) y (3.38) que describen el régimen transitorio son las siguientes:

- Ecuación de la continuidad:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{-a^2}{g} \cdot \frac{dV}{dx} \quad (3.45)$$

- Ecuación de movimiento

$$\frac{dH}{dx} = \frac{-1}{g} \cdot \frac{dV}{dt} \quad (3.46)$$

Las soluciones generales de estas ecuaciones son:

$$H - H_0 = f\left(t - \frac{x}{a}\right) + F\left(t + \frac{x}{a}\right) \quad (3.47)$$

$$V - V_0 = \frac{ag}{a} \cdot \left(f\left(t - \frac{x}{a}\right) - F\left(t + \frac{x}{a}\right) \right) \quad (3.48)$$

3.2.9.3. Método de Allievi para el Cálculo de Golpe de Ariete

Se fundamenta en las ecuaciones (3.47) y (3.48) y su aplicación tradicionalmente se limita al análisis de golpe de ariete ocasionado por el accionamiento de una válvula

instalada en el extremo aguas debajo de una tubería de diámetro constante que se alimenta de un estanque aguas arriba, cuyo nivel permanece invariable con el tiempo.

El caso más desfavorable de golpe de ariete para la configuración antes descrita lo representa el cierre completo de la válvula en tiempos menores o iguales al tiempo de fase y resulta el conocido valor extremo de sobrepresión:

$$H_a = \frac{a \cdot V_o}{g} \quad (3.49)$$

en el cual V_o es la velocidad del régimen permanente. El tiempo de fase o tiempo crítico está representado por la relación:

$$t_c = 2 \frac{L}{a} \quad (3.50)$$

donde L es la longitud total de la tubería.

3.2.9.4. Método Gráfico Simplificado de Bergeron

Este método se fundamenta en las ecuaciones integrales (3.47) y (3.48) las cuales se utilizan para obtener las ecuaciones que definen las conocidas rectas de Bergeron. Estas rectas se comportan de acuerdo a la siguiente expresión:

$$h_{(t_B, x_B)} = h_{(t_A, x_A)} + \frac{a}{gA} \cdot [Q_{(t_B, x_B)} - Q_{(t_A, x_A)}] \quad (3.51)$$

La ecuación anterior establece una relación lineal entre los valores definidos para la condición de A, (Q_A, H_A) , y B, (Q_B, H_B) , para tiempos t_A y t_B respectivamente, siempre que se cumpla la relación:

$$x_B = x_A - (t_B - t_A) \cdot a \quad (3.52)$$

Entonces, conocidas las condiciones en A, se pueden relacionar linealmente con las condiciones del flujo en una sección aguas arriba de ésta para un tiempo $(t_A + L/a)$ siempre que la distancia que las separe a ambas secciones sea L.

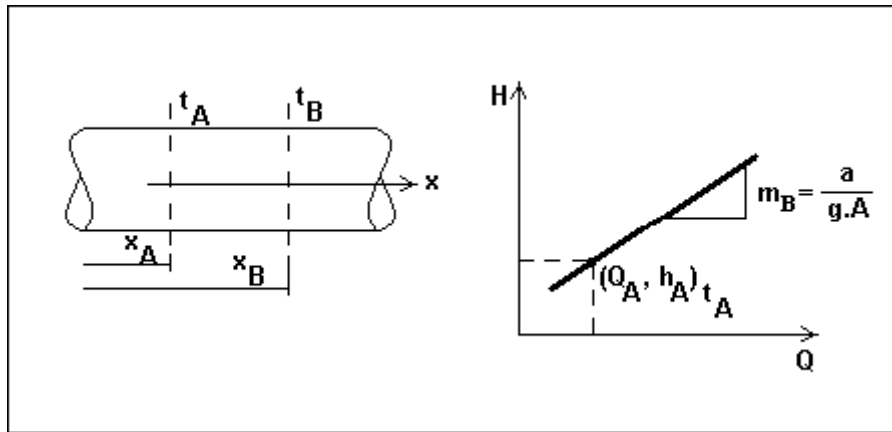


Figura 3.4 Recta Positiva de Bergeron

De la misma manera ocurre para el caso en que la pendiente de la ecuación (3.51) sea negativa: $m_B = - a / (g.A)$.

3.2.9.5. Método Gráfico Mejorado

Existen numerosas condiciones de operación en instalaciones de bombas centrífugas manejadas por motores eléctricos que son capaces de producir cambios sustanciales de presión en las líneas de descarga. Una de las más importantes es la desaceleración violenta de los grupos motobomba debido a fallas por desconexión eléctrica.

Cuando se interrumpe el suministro de energía eléctrica al motor, la única energía que mantiene el movimiento de la bomba en el sentido original es la energía cinética del conjunto en rotación conformado por el rotor del motor, el rodete, los elementos transmisores de la potencia mecánica y el agua en movimiento en la bomba.

A medida que la velocidad de la bomba se reduce, de la misma manera lo hace el flujo de agua en la descarga de la bomba. Estas ondas de presión no estables se mueven rápidamente hacia la línea de descarga donde se produce una reflexión de dichas ondas. Seguidamente, la velocidad de la bomba se reduce hasta el punto en que el flujo de agua se detiene. Si no hay válvula de control en la línea de la bomba, el flujo se devuelve a través de esta a pesar de que la bomba podría estar rotando aún en el sentido original de rotación.

En este momento, la velocidad de la bomba se reduce más rápidamente hasta que se detiene hasta que unos instantes después, comienza girar en sentido contrario operando como una turbina. Mientras la bomba sigue girando en sentido contrario el flujo se reduce nuevamente produciendo un aumento de la presión a lo largo de la tubería de descarga.

Los factores más importantes a ser considerados para realizar el estudio de golpe de ariete por detención accidental del grupo motobomba son: el momento de inercia de la masa del conjunto en rotación, la característica de la bomba y el fenómeno de transmisión de las ondas perturbadoras en la línea de descarga.

La ecuación dinámica de giración del conjunto motobomba es:

$$M = \frac{-W \cdot R^2}{g} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{dN}{dt} \quad (3.53)$$

Para un intervalo de tiempo muy pequeño $\Delta t = t_2 - t_1$, esta ecuación se escribe aproximadamente como sigue:

$$\frac{M_1 + M_2}{2} = -\frac{W \cdot R^2}{g} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{N_1 - N_2}{\Delta t} \quad (3.54)$$

Se considera el valor de $\beta = M / M_o$ como el valor de par relativo al par del conjunto en condiciones permanentes, referido a la característica de la bomba para efectos de resolución gráfica de los transitorios hidráulicos.

El desarrollo completo de este método se encuentra más detallado en la referencia [12] de la bibliografía.

3.2.9.6. Reflexión de la Onda de Perturbación en Confluencias

Considerando la derivación de la figura 3.5, de acuerdo con las ecuaciones (3.47) y (3.48) aplicadas en cada tramo de tubería, se obtienen los factores de transmisión y reflexión de la onda que llega a la confluencia de tal manera que:

$$F_2 = F_3 = s \cdot F_1 \quad (3.55)$$

$$f_1 = r \cdot F_1 \quad (3.56)$$

donde

$$s - r = 1 \quad (3.57)$$

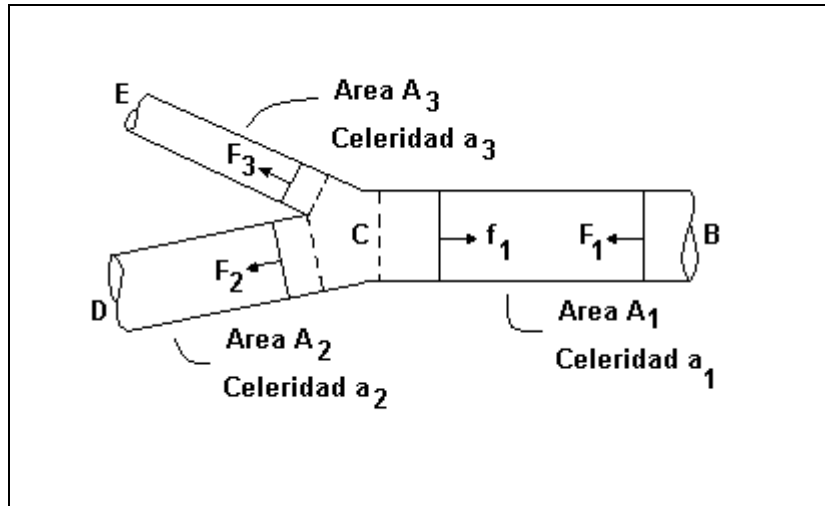


Figura 3.5 Transmisión de las ondas de perturbación en una derivación en “Y”

En estas ecuaciones, r y s son los factores de transmisión y reflexión de la onda de perturbación, respectivamente. Estos factores dependen del área de la sección transversal y de la velocidad de propagación de la onda de cada sección de tubería. Los valores de estos factores se hallan con las ecuaciones:

$$s = \frac{2 \frac{A_1}{a_1}}{\frac{A_1}{a_1} + \frac{A_2}{a_2} + \frac{A_3}{a_3}} \quad (3.58)$$

$$r = \frac{\frac{A_1}{a_1} - \frac{A_2}{a_2} - \frac{A_3}{a_3}}{\frac{A_1}{a_1} + \frac{A_2}{a_2} + \frac{A_3}{a_3}} \quad (3.59)$$

De acuerdo a las ecuaciones (3.51) y (3.52), se nota que en cada confluencia que alcanza una perturbación se produce una reflexión de la onda f_1 y una transmisión de igual magnitud $F_2 = F_3$ hacia los tramos CD y CE.

3.3. CRITERIOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

3.3.1. Consumo de Agua

Esta información es de vital importancia en el diseño de sistemas de abastecimiento de agua. Se ha llegado a aproximaciones bastante precisas del consumo de agua de acuerdo a estudios realizados que permiten asignar cifras para las dotaciones de agua tomando en cuenta el uso de la tierra, la zonificación, y en otros casos las características de la población, expresándolas en litros/día/parcela, litros/persona/día, o, en casos de industrias, en función del tipo y de la unidad de producción.

Estas cifras conducen a la determinación de un gasto o consumo medio, lo cual ha de constituir la base de todo diseño, requiriéndose, por tanto, un conocimiento cabal de estas estimaciones.

En nuestro país se define Medio Rural a zonas con población menor de 5.000 habitantes, y Sector Urbano a aquellas zonas con más de 5.000 habitantes.

Las normas INOS sugieren como consumos mínimos permisibles para objeto de diseño de sistemas de abastecimiento de agua, los indicados en la siguiente tabla:

POBLACIÓN	Servicios con Medidores (litros/persona/día)	Servicios sin Medidores (litros/persona/día)
Hasta 20.000 habitantes	200	400
De 20.000 a 50.000 habitantes	250	500
Más de 50.000 habitantes	300	600

Tabla 3.3 Consumos mínimos permisibles según las normas INOS

3.3.2. Factores que Afectan el Consumo

3.3.2.1. Tipo de Comunidad

- *Consumo Doméstico*: constituido por el consumo familiar de agua de bebida, lavado de ropa, baño y aseo personal, cocina, limpieza, riego de jardín, lavado de carro y adecuado funcionamiento de las instalaciones sanitarias
- *Consumo Comercial o Industrial*: puede ser un gasto significativo en casos donde el área a desarrollar tenga una vinculación industrial o comercial. En tal caso, las cifras de consumo deben basarse en el tipo de industria y comercio. Cuando el comercio o industria constituye una situación tal como pequeños comercios o industrias, hoteles, estaciones de gasolina, etc., ello puede ser incluido y estimado dentro de los consumos per. capita adoptados, y diseñar en base a esos parámetros.
- *Consumo Público*: Está constituido por el agua destinada al riego de zonas verdes, parques y jardines públicos, así como la limpieza de las calles.
- *Consumo por Pérdida en la Red*: Es motivado por juntas en mal estado, válvulas, conexiones defectuosas y pueden llegar a representar de 10 a un 15 por 100 del consumo total.
- *Consumo por Incendio*: En términos generales, puede decirse que un sistema de abastecimiento de agua representa el más valioso medio para combatir incendios, y que en el diseño de alguno de sus componentes este factor debe ser considerado de acuerdo a la importancia relativa en conjunto y de lo que puede representar para el conglomerado que sirve.

3.3.2.2. Factores Económicos-Sociales

Las características económicas-sociales de una población pueden evidenciarse a través del tipo de vivienda. En este sentido, investigaciones realizadas, presentan algunas consideraciones que permiten evaluar este factor, al analizar para diversas zonas del país los consumos de agua en diferentes tipos de viviendas.

	Rancho		Casa		Vivienda Rural		Casa Quinta	
	l/viv/día	l/pers/día	l/viv/día	l/pers/día	l/viv/día	l/pers/día	l/viv/día	l/pers/día
Máximo	693 marzo	100 marzo	951 marzo	139 marzo	1.015 marzo	156 marzo	1.211 marzo	274 marzo
Mínimo	473 junio	71 junio	728 junio	106 junio	885 junio	139 junio	961 junio	193 junio
Promedio	562	85	849	127	966	149	1.100	227

Tabla 3.4 Consumo per. cápita de acuerdo al tipo de vivienda

3.3.2.3. Factores Meteorológicos

Generalmente los consumos de agua de una región varían a lo largo del año de acuerdo a la temperatura ambiental y a la distribución de las lluvias. Este mismo hecho puede establecerse por comparación entre varias regiones con diferentes condiciones ambientales, de tal forma que la temperatura ambiental de la zona define, en cierto modo, los consumos correspondientes a higiene personal de la población que influenciarán los consumos per. Cápita.

3.3.3. Variaciones periódicas de los consumos e influencia sobre las diferentes partes del sistema

Con respecto a los consumos de un sistema de abastecimiento se tiene lo siguiente:

- Se debe suministrar agua a una comunidad en forma continua y con presión suficiente, a fin de satisfacer razones sanitarias, sociales, económicas y de confort, propiciando así su desarrollo.

- Se debe conocer el funcionamiento del sistema de acuerdo a las variaciones en los consumos de agua que ocurrirán para diferentes momentos durante el período de diseño previsto.
- Los consumos de agua de una localidad muestran variaciones estacionales, mensuales, diarias y horarias que pueden expresarse en función (%) del consumo medio (Q_m).
 - Las comunidades demandan menores cantidades de agua del acueducto que en épocas de sequía.
 - Durante una semana cualquiera ocurren días de máximo consumo (generalmente lunes) y días de mínimo consumo (generalmente el domingo).
 - Durante un día cualquiera los consumos de agua presentarán variaciones hora a hora, mostrándose horas de máximo y de mínimo consumo.

3.3.3.1. Consumo Medio Diario

Adoptado un criterio para las dotaciones per. cápita, la determinación del consumo medio (Q_m), expresado en l/s, que ha de constituir la base del diseño, se hará para la población futura proyectada en el período de diseño económico que se establezca. Por tanto, la estimación del desarrollo poblacional, característica particular de cada localidad, debe ser calculada por el método que se considere más conveniente.

El consumo medio diario (Q_m) puede ser obtenido:

- Como la sumatoria de las dotaciones asignadas a cada parcela en atención a su zonificación, de acuerdo al plan regulador de la ciudad.
- Como el resultado de una estimación de consumo per. cápita para la población futura del período de diseño.
- Como el promedio de los consumos diarios registrados en una localidad durante un año de mediciones consecutivas.

Para determinar el consumo medio diario (Q_m) expresado en litros por segundo, se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_m = \frac{\text{Población} \cdot \text{Dotación}}{86400} \quad (3.60)$$

3.3.3.2. Consumo Máximo Diario

Se define el consumo máximo diario, como el día de máximo consumo de una serie de registros observados durante los 365 días de un año. Este valor, relacionado con el consumo medio, ha permitido establecer constantes de diseño apoyado en diversas investigaciones hechas.

Puede entonces establecerse la relación:

$$Q_{\text{máx_diario}} = K_1 \cdot Q_m \quad (3.61)$$

donde: $K_1 = 1,2 - 1,6$

$Q_m =$ consumo medio en litros por segundo

3.3.3.2. Consumo Máximo Horario

El consumo máximo horario, se define como la hora de máximo consumo del día de máximo consumo. Éste está relacionado respecto al consumo medio (Q_m) mediante la expresión:

$$Q_{\text{máx_horario}} = K_2 \cdot Q_m \quad (3.62)$$

Las Normas INOS expresan: “El Consumo Máximo Horario debe suponerse como 200 por 100 del consumo diario promedio anual cuando la población de la ciudad sea 100.000 mil ó más, cuando la población es mil ó menos, el consumo máximo horario promedio anual. Para ciudades con población entre estos dos extremos el consumo máximo horario puede obtenerse por medio de la fórmula siguiente:

$$Q_{\text{máx_horario}} = 275 - 0.75 \cdot X \quad (3.63)$$

en la cual, X es la población en miles de habitantes y $Q_{\text{máx-horario}}$ es el consumo máximo horario en porcentaje del promedio anual.”

3.3.3.3. Factor para el Caso de Incendios

Debe contemplarse esta condición para lo cual debe determinarse el factor K_3 , en base de un análisis de probabilidad de ocurrencia de un incendio con distintas horas de consumo más el gasto requerido para atender la contingencia de incendio.

$$Q_I = K_3 \cdot Q_m + \text{Inc} \quad (3.64)$$

Este factor K_3 dependerá del rango de confianza deseado. Un factor K_3 razonable se estima entre 1,5 y 1,8. Las Normas INOS establecen: “Debe hacerse un análisis del sistema en la demanda correspondiente a 180 por 100 del consumo promedio anual, más la demanda de incendio”.

- 10 (l/s): zona residencial unifamiliar de viviendas aisladas.
- 16 (l/s): zona residencial, comercial o mixta con 120 por 100 de área de construcción aisladas o construcciones unifamiliares continuas.
- 32 (l/s): zona industrial, de comercio, viviendas con áreas de construcción mayores de 120 por 100 y áreas de reunión pública como iglesias, cines, teatros, graderíos para espectadores, etc.
- No se exigirá dotación de incendio en parcelamiento con un promedio igual a 4 lotes por hectárea, o menor, destinados a viviendas unifamiliares aisladas.

3.3.4 Redes de Distribución

Una red de distribución es el trazado del sistema de tubería que son utilizadas para distribuir el agua, siendo de vital importancia la capacidad de la fuente de abastecimiento.

Las cantidades de agua estarán definidas por los consumos, estimados en base a las dotaciones de agua. Sin embargo, el análisis de la red debe contemplar las condiciones más desfavorables, lo cual hace pensar en la aplicación de los factores K_2 y K_3 para las condiciones de consumo máximo horario y la estimación de la demanda de incendio, dependiendo de la ciudad y de la zonificación de la zona en estudio.

Las presiones en la red deben satisfacer ciertas condiciones mínimas y máximas para las diferentes situaciones de análisis que pueden ocurrir. En tal sentido, la red debe mantener presiones de servicio mínimas, que sean capaces de llevar agua al interior de la vivienda (las normas establecen en el medio rural un mínimo de 10 m.c.a. y en el medio urbano se ha establecido un mínimo de 20 a 25 m.c.a. dependiendo de la importancia de la ciudad).

3.3.4.1 Tipos de redes

Dependiendo de la topografía, de la vialidad y de la ubicación de las fuentes de abastecimiento y del tanque, puede determinarse el tipo de red de distribución.

Tipo Ramificado:

Son redes de distribución constituidas por un ramal troncal y una serie de ramificaciones que pueden construir pequeñas mallas, o constituidos por ramales ciegos. Este tipo de red es utilizado cuando la topografía es tal que dificulta, o no permite la interconexión entre ramales.

Tipo Mallado:

Son aquellas redes constituidas por tuberías interconectadas formando mallas. Este tipo de red de distribución es el más conveniente y tratará siempre de lograrse mediante la interconexión de las tuberías, a fin de crear un circuito cerrado que permita un servicio más eficiente y permanente.

3.4. ESTACIÓN DE BOMBEO

Se considera como estación de bombeo a aquélla 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 accesorios necesarios para la operación de la misma. Para el diseño de una estación de bombeo se deben considerar los siguientes aspectos:

- El equipo de bombeo.
- Los accesorios complementarios.
- Las edificaciones y las fundaciones.

3.4.1. Equipo de Bombeo

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

Con respecto al gasto de bombeo, el factor a considerar debe ser el correspondiente al consumo máximo diario.

3.4.2. Parámetros de las Bombas

Los parámetros asociados a la operación normal de las unidades de bombeo son los siguientes:

- Caudal o gasto de bombeo: es el volumen de líquido que fluye a través de la bomba un una unidad de tiempo.
- Carga dinámica total o altura total de bombeo:
 - *Carga estática*: distancia vertical entre el nivel mínimo de las aguas de captación y la cota de rebose en el tanque o sitio de descarga.
 - *Pérdidas de carga en la tubería*: están representadas por las pérdidas de presión debido a la fricción generada en las paredes de las tuberías.
 - *Pérdidas menores*: accesorios como cambios de dirección, válvulas, etc., generan pérdidas localizadas de carga a lo largo de la línea de bombeo.
- Potencia Útil: es la potencia hidráulica suministrada al fluido por la bomba y se calcula con la expresión:

$$P_u = \gamma \cdot Q \cdot H \quad (3.65)$$

- Rendimiento o Eficiencia: representa la relación entre la potencia que recibe la bomba P_b y la potencia que esta entrega al fluido P_u , siendo esta última menor que la primera. La relación es la siguiente:

$$\eta = \frac{P_u}{P_b} \quad (3.66)$$

- Potencia: se refiere a la potencia en el eje de transmisión requerida por la bomba en un determinado punto de trabajo. Se expresa mediante la ecuación:

$$P_b = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta} \quad (3.67)$$

- Velocidad de Rotación: es la velocidad de angular de los elementos giratorios del conjunto motobomba.
- Torque o Par Mecánico: es el par necesario para producir el movimiento de rotación del conjunto en giración y la correspondiente transferencia de energía de la bomba al fluido, y es debido a la transformación de energía eléctrica en energía mecánica. De acuerdo con la dinámica de los movimiento giratorios, la relación entre torque y potencia es:

$$M = \frac{P}{\omega} \quad (3.68)$$

- Momento de Inercia del Grupo Motobomba: se refiere al momento de inercia de masa de las partes rotatorias del motor, del eje de transmisión de potencia, del impelente de la bomba, y del líquido contenido en este último componente. Se suele expresar de la siguiente manera:

$$I = W \cdot R^2 = \frac{m \cdot R^2}{g} \quad (3.69)$$

donde: m: masa del conjunto en giración

 R: radio de giro

 W: peso del conjunto en giración

- Carga Neta de Succión Positiva (NPSH):
 - o *NPSH Requerido*: es la altura total mínima absoluta que se requiere en la succión de la bomba para garantizar que se no se produzca la vaporización del líquido en su interior y la subsiguiente cavitación, la cual puede causar, en breve tiempo, graves daños a la bomba. Ésta información es suministrada por el fabricante de la bomba, expresada en unidades absolutas.

- *NPSH Disponible*: es la altura total referida al plano horizontal que contiene al eje de apertura de la 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. Este valor expresa la altura sobre el punto de vaporización del fluido en la succión de la bomba.

Si la presión en la succión es positiva:

$$NPSH_d = \frac{p_s + p_a - p_v}{\gamma} - \Delta z - h_s \quad (3.70)$$

Si la presión en la succión es negativa:

$$NPSH_d = \frac{-p_s + p_a - p_v}{\gamma} - \Delta z - h_s \quad (3.71)$$

siendo Δz : carga estática de succión
 p_a : presión barométrica del lugar
 p_v : presión de vapor del líquido a la temperatura del flujo.
 h_s : pérdidas de carga totales del lado de la succión
 γ : peso específico relativo del agua

A fin de que no se produzca cavitación en la succión de las bombas, se debe cumplir con la siguiente condición:

$$NPSH_{disponible} > NPSH_{requerido} \quad (3.72)$$

- Leyes de Semejanza: para una bomba especificada, y cuando se puedan ignorar los efectos del número de Reynolds, la teoría de semejanza de máquinas hidráulicas proporciona las siguientes relaciones:

$$\frac{Q}{Q_o} = \frac{N}{N_o} \cdot \left(\frac{D}{D_o} \right)^3 \quad (3.73)$$

$$\frac{H}{H_0} = \frac{\rho_0}{\rho} \cdot \left(\frac{N}{N_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{D}{D_0}\right)^2 \quad (3.74)$$

$$\frac{P}{P_0} = \frac{\rho}{\rho_0} \cdot \left(\frac{N}{N_0}\right)^3 \cdot \left(\frac{D}{D_0}\right)^5 \quad (3.75)$$

$$\frac{M}{M_0} = \frac{\rho}{\rho_0} \cdot \left(\frac{N}{N_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{D}{D_0}\right)^5 \quad (3.76)$$

donde Q_0, Q : caudal en la condición inicial y final, respectivamente
 N_0, N : velocidad en la condición inicial y final
 D_0, D : diámetro en la condición inicial y final
 H_0, H : carga de presión en la condición inicial y final
 ρ_0, ρ : densidad del fluido en la condición inicial y final
 P_0, P : potencia en la condición inicial y final
 M_0, M : par mecánico en la condición inicial y final

- Número Específico de Vueltas del Rodete: es un número adimensional que puede definirse como el número de revoluciones por minuto de una bomba ideal, geoméricamente igual a la bomba considerada, la cual es capaz de elevar a una altura de un metro, un caudal de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, en su punto de máximo rendimiento. Para calcular este índice de diseño hidráulico o número tipo, se expresa matemáticamente mediante la siguiente ecuación:

$$Nq = \frac{\omega \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right) \cdot \sqrt{Q \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)}}{\left(L \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}\right)\right)^{\frac{3}{4}}} \quad (3.77)$$

3.4.3. Válvulas en las Estaciones de Bombeo

Las válvulas son elementos que se colocan en las tuberías como auxiliares para la adecuada operación, mantenimiento y seguridad en los sistemas de conducción de fluidos. La clasificación más común de las válvulas según su función es la siguiente:

- Válvulas de Paso: También denominadas de reparación, tienen como objetivo permitir o interrumpir la totalidad del flujo en la tubería y, por lo general, su accionamiento se realiza en situaciones relacionadas con el mantenimiento o emergencias en los sistemas de conducción de fluidos. Entre las más comunes:
 - *Válvulas de Compuerta*: El elemento de cierre de este tipo de válvula es una compuerta de forma rectangular o circular, cuyos planos extremos pueden ser paralelos o de cuña. En el proceso de apertura o cierre, la compuerta se desliza a través de ranuras o guías, practicadas en el cuerpo de la válvula. El elemento de cierre puede ser accionado mediante un eje de transmisión a tracción o rotatorio, según el modelo.
 - *Válvulas de Mariposa*: El elemento de cierre de este tipo de válvulas está constituido por una placa circular, la cual gira alrededor de un eje, generalmente ubicado en un plano horizontal, y acoplado al mecanismo de accionamiento solidario al cuerpo de la válvula.
- Válvulas Regulatoras: este tipo de válvulas tiene como finalidad la regulación o el control de diversas magnitudes hidráulicas en los sistemas de conducción de fluidos, principalmente la presión y el caudal mediante un proceso de disipación de energía. Entre las más utilizadas están las siguientes:
 - *Válvulas de Globo*: Las válvulas de globo están caracterizadas por un elemento obturador circular, solidario a un vástago de desplazamiento, generalmente vertical, el cual cierra contra un asiento de igual geometría, contenido en el cuerpo de la válvula, y perpendicular al eje de la tubería. El flujo en su paso a través de la válvula cambia su dirección en 90°, para luego retornar al alineamiento original.

- *Válvulas de Paso Anular*: El obturador de este tipo de válvula está constituido por un órgano que transforma la sección de flujo circular a una superficie anular. Ese elemento, de forma fluido-dinámica, es accionado bien sea por un vástago de manivela o por un eje de transmisión roscado. Su movimiento es en la misma dirección que el flujo, verificándose el cierre mediante el empuje del émbolo contra un asiento circular de la válvula, solidario a un cuerpo.
- *Válvulas de Esfera y Cono*: En este tipo de válvulas el obturador es de forma esférica o cónica, provista de una perforación en forma cilíndrica del mismo diámetro de la tubería. En posición de completa apertura, la superficie de paso es igual a la correspondiente en la tubería, y sus componentes, muy robustos, las habilita para resistir severas sollicitaciones hidromecánicas.
- Válvulas para el Control Direccional del Flujo: el diseño mecánico de estas válvulas es tal que admiten flujo en una sola dirección, y entre los diversos tipos disponibles, las más comunes son la de retención a clapeta basculante y las válvulas de pie. Las válvulas para el control direccional del movimiento, impiden el vaciado de tanques en las líneas de flujo, y la giración inversa de moto-bombas cuando ella debe evitarse, o garantizan el cebado de las tuberías de succión en ciertas estaciones de bombeo con unidades verticales.
 - *Válvulas de Retención*: Entre los diversos tipos de válvulas para el control de direccional de flujo, o de retención, se describe el modelo más común, el cual está constituido por una placa circular, articulada al cuerpo de la válvula mediante un eje tangencial generalmente horizontal. Bajo condiciones normales de operación, el elemento de cierre es sostenido por la acción hidrodinámica del flujo. Una vez que se interrumpe el movimiento, la compuerta cae por efecto de su propio peso, o ayudada por un contrapeso.

- Válvulas Complementarias del Servicio de Acueductos:
 - *Válvulas de Admisión y Expulsión de Aire*
 - *Válvulas de Descarga para el Vaciado de Tuberías*
 - *Válvulas de Alivio:* Estas válvulas se utilizan ocasionalmente para atenuar cierto tipo de solicitaciones transitorias que se originan como consecuencia del golpe de ariete. Están dotadas de un dispositivo de apertura, el cual se acciona cuando las presiones internas en la tubería tienden a superar cierto valor prefijado.

3.4.4. Motor Eléctrico

El elemento más utilizado para el accionamiento de bombas centrífugas en estaciones de bombeo es el motor eléctrico de corriente altera trifásico. Este transforma la energía eléctrica en energía mecánica, la transmite al eje de la bomba mediante un par o torque, que luego la bomba lo transforma en energía hidráulica.

Los motores eléctricos trifásicos de corriente alterna más comunes para esta aplicación pueden ser de dos tipos:

- Sincrónicos:
 - Rotor liso o cilíndrico
 - Rotor de polos salientes
- Asincrónicos (inducción):
 - Rotor tipo jaula de ardilla (corto-circuito)
 - Rotor bobinado o de anillos

3.4.4.1. Motor Eléctrico de Inducción Rotor Jaula de Ardilla

El principio de funcionamiento de este tipo de motores se basa fundamentalmente en tres principios:

- La Ley de Inducción Electromagnética de Faraday: relativa a la tensión inducida en un conductor por la acción de corte de líneas de fuerza de un campo magnético (campo magnético rotante).
- La Ley de Ohm: relativa a la corriente inducida que circula por las barras del rotor.
- La Ley de Laplace: relativa a la fuerza inducida en un conductor eléctrico que transporta corriente y está dentro de la acción de un campo magnético.
- Par Motor (electromagnético): relativo al movimiento de rotación.

El diagrama de flujo de potencia de un motor trifásico de inducción es el siguiente:

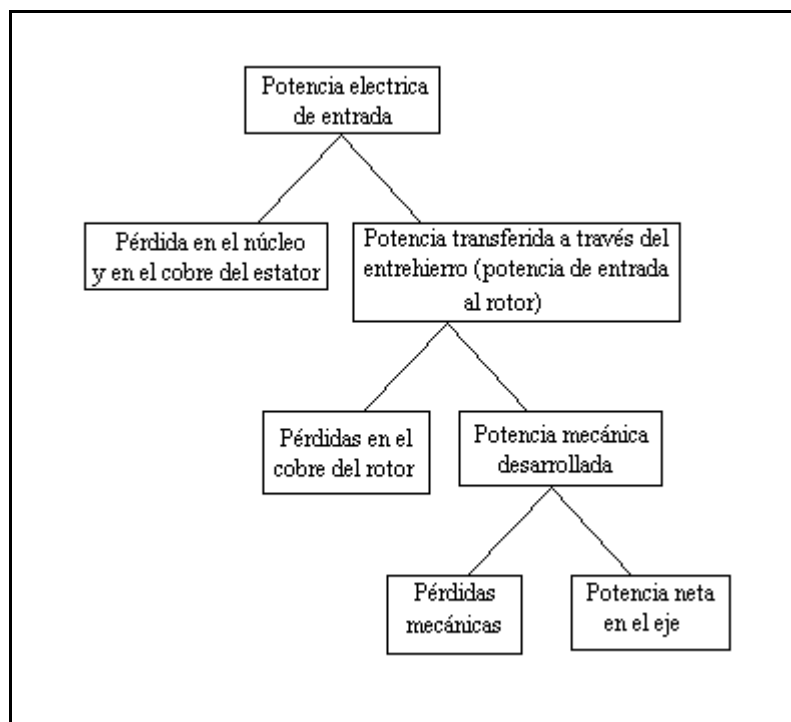


Figura 3.6 Esquema del diagrama de flujo de motor trifásico inducción

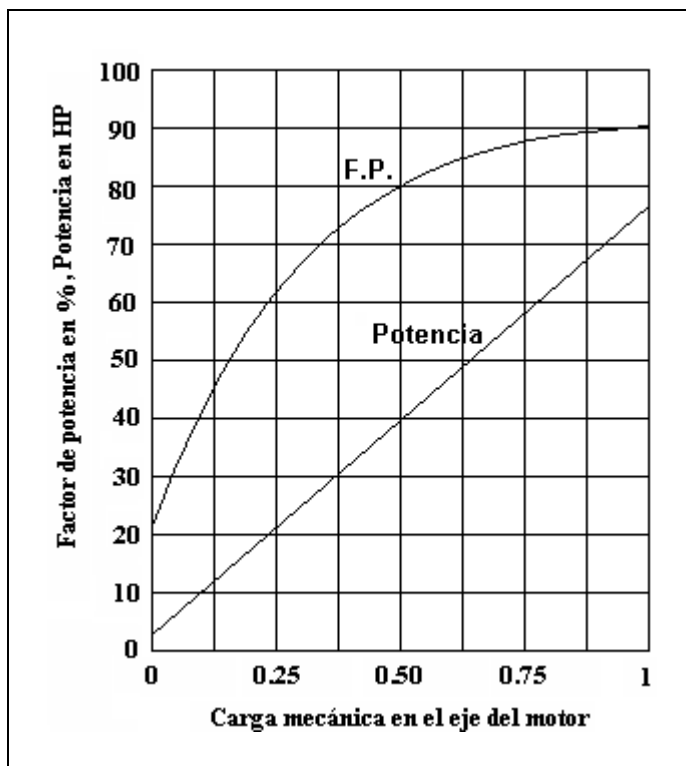
La potencia eléctrica requerida por cada motor se rige por la siguiente relación:

$$P_e = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos\phi \quad (3.78)$$

donde

- Pe: potencia eléctrica
- V_L : tensión de línea
- I_L : corriente de línea
- $\cos\phi$: factor de potencia

La curva de la gráfica 3.1 representa un comportamiento típico del factor de potencia de motores trifásicos de inducción:



Gráfica 3.1 Factor de potencia

En el caso de sistemas de bombeo, el cálculo de la potencia que debe entregar el motor a la bomba se realiza mediante la siguiente relación:

$$P_o = \frac{P_b}{\eta_{mec}} \quad (3.79)$$

donde: P_o : potencia neta en el eje del motor

P_b : potencia requerida en el eje de la bomba

η_{mec} : rendimiento mecánico de la transmisión

La relación entre la potencia neta en el eje del motor y la potencia eléctrica requerida por éste, se denomina rendimiento total del motor, e incluye todas las pérdidas mencionadas en la figura 3.6. Este rendimiento del motor es igual a:

$$\eta_{mot} = \frac{P_o}{P_e} \quad (3.80)$$

donde: P_o : potencia neta en el eje del motor

P_e : potencia eléctrica exigida por el motor

CAPÍTULO 4

SITUACIÓN ACTUAL DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO

Este estudio se basa en un sistema de abastecimiento de agua potable para comunidades urbanas por medio de bombeo directo a la red de distribución. La estación de bombeo consta de cuatro grupos, conformados cada uno por un motor eléctrico y una bomba centrífuga (Fig. 4.1).

4.1. PLANOS DE UBICACIÓN

La Estación de Bombeo Vegas de Petare se encuentra ubicada en la Av. Las Vegas de Petare de la Parroquia Petare, Municipio Sucre del Estado Miranda, a una cota de 850 metros sobre el nivel del mar (msnm). La zona de influencia del sistema de tuberías de la estación, al igual que la red misma, está representada en los planos fotoaerogramétricos L-36, LL-36 y LL-37, de acuerdo a la clasificación por planos sectorizados del Plan Caracas con origen en Loma Quintana (ver plano anexo correspondiente).

De la estación salen dos tuberías que se distribuyen a zonas diferentes, una es de 4" y la otra de 3". Como se puede observar en los planos fotoaerogramétricos correspondientes, la línea de 4" abastece de agua potable a los barrios Unión, San Pascual y El Carpintero, a lo largo de la Carretera a Sta. Lucía y de varios tramos de las calles San Rafael y San Pascual. A su vez, la línea de 3" surte de agua al barrio El Matadero, por el tramo de la Carretera a Sta. Lucía que pasa por el mismo, por la calle La Ceiba y parte de El Carmen, los callejones La Cruz y Sta. Rita, hasta el cruce de la calle Los Manolos con la calle Unión.

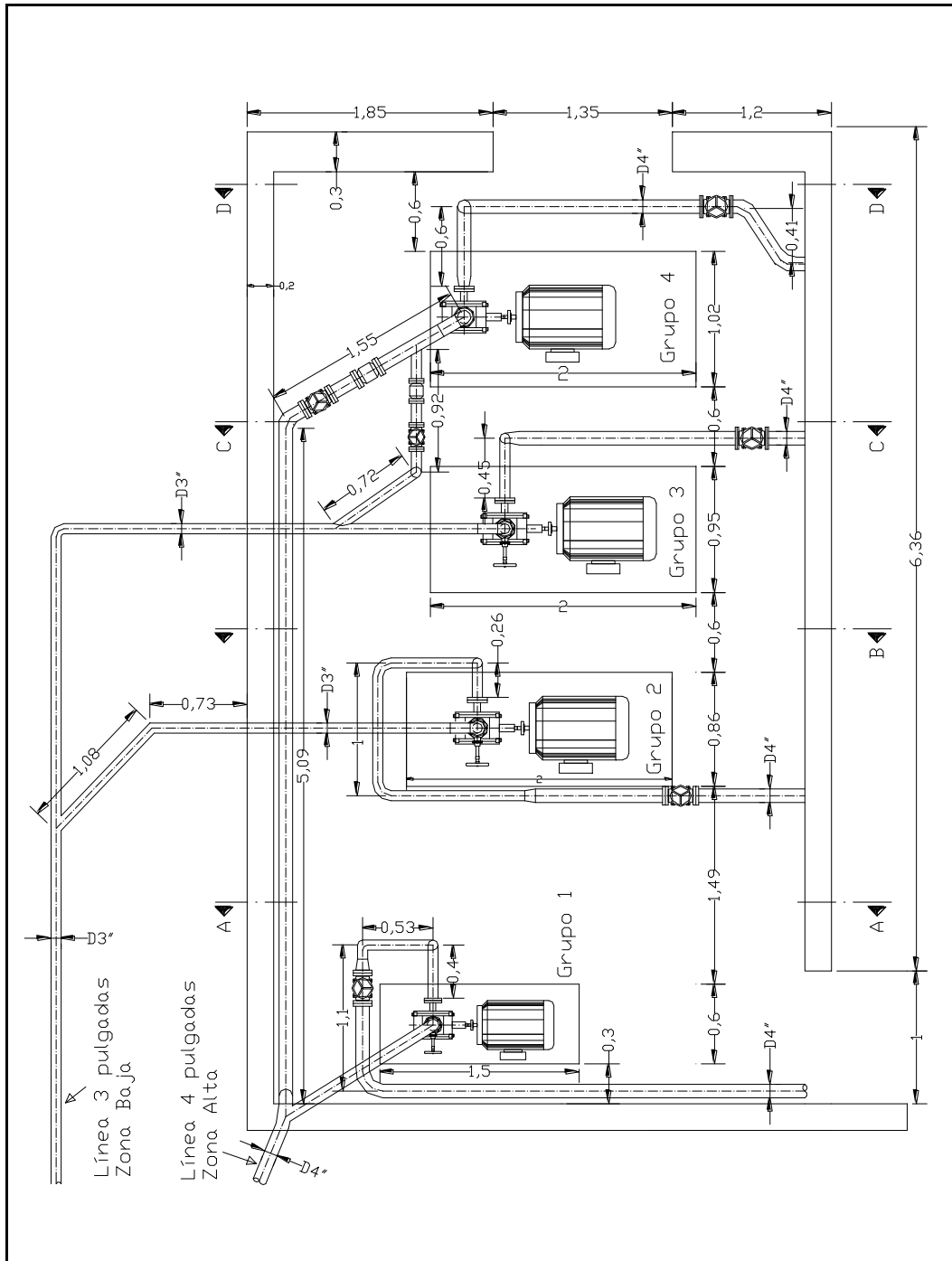


Figura 4.1 Estación de bombeo actual (cortes en el apéndice 3)

4.2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

4.2.1. Obra Civil

La estación se encuentra en una estructura típica de esta clase de sistema, con un área destinada a los grupos motobombas, otra al sistema de control y potencia eléctrica y otra para la permanencia del operador de guardia quien trabaja veinticuatro horas por turno. La vista de planta es la siguiente:

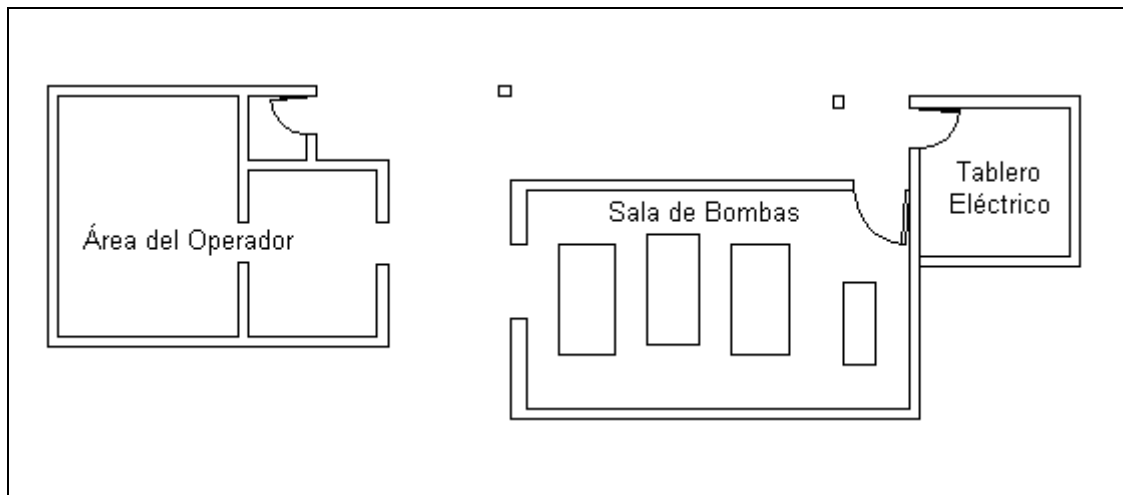


Figura 4.2 Vista superior de la E/B

Existe un tanque de concreto en la estación con una capacidad de 17.000 litros de agua, aproximadamente. Este se encuentra debajo del suelo de la estación. Actualmente está fuera de funcionamiento debido a un derrame de gasolina proveniente de la estación de gasolina que se encuentra más arriba de la estación.

4.2.2. Equipo de Bombeo

Las cuatro bombas son de tipo radial y sus datos técnicos son los siguientes:

Bomba	Grupo			
	1	2	3	4
Marca	KSB			
Modelo	WKL			MOVI
Tamaño: Ø nominal boca descarga mm	50			65
Nº Rodetes o escalonamientos	5	6	5	2
Ø rodete mm	150x9	145x9	150x9	203x12
Presión máx. brida succión	10 kg / cm ²			16 bar
Presión máx. brida descarga	28 kg / cm ²			30 bar
Empaquetadura no refrigerada	-10 / +110			
	+110 / +140			
Sello mecánico	Según recomendación_fabricante			40 bar
Caudal mín. / máx.	0.2 x Q óptimo/ver curvas características			
Sentido de rotación	Horario, visto desde el lado de la succión (lado de accionamiento)			
Tipo de rodamiento	Lado succión	UN 208 KC3 +H 208		6307 C3
	Lado descarga	3307 C3		
Bridas	Lado succión	PN 16 DIN 2533		
	Lado descarga	PN 16 / 40 DIN 2533 / 2535		
P/n máx. permisible (Hp/rpm)	0.012			

Tabla 4.1 Especificaciones técnicas de las bombas

Las curvas características de las bombas se encuentran en el apéndice 1.

4.2.3. Sistema de Tuberías en la Estación de Bombeo

Todas las tuberías que conforman los sistemas de succión y descarga de la estación de bombeo son de hierro galvanizado.

4.2.3.1. Tuberías de Succión

Las tuberías de succión de cada bomba están conectadas con una tubería del Alimentador Este (Nivel 1) que atraviesa la Av. Las Vegas de Petare y se dirige directamente al terreno en el que se encuentra la estación.

La conexión exacta del múltiple de succión se encuentra debajo del suelo y no existen planos del mismo, por lo que se desconoce la misma.

4.2.3.2. Tuberías de Descarga

Las tuberías de descarga de las bombas se unen en diferentes puntos, de tal manera que se utilizan alternativamente algunos grupos para la línea de 3" y otros para la línea de 4", en función de los requerimientos de caudal y presión en dichas líneas; para ello, se abren o cierran las válvulas correspondientes (ver Fig. 4.1).

4.2.4. Conexión Actual de las Bombas

La operación actual de las bombas es de acuerdo al siguiente esquema:

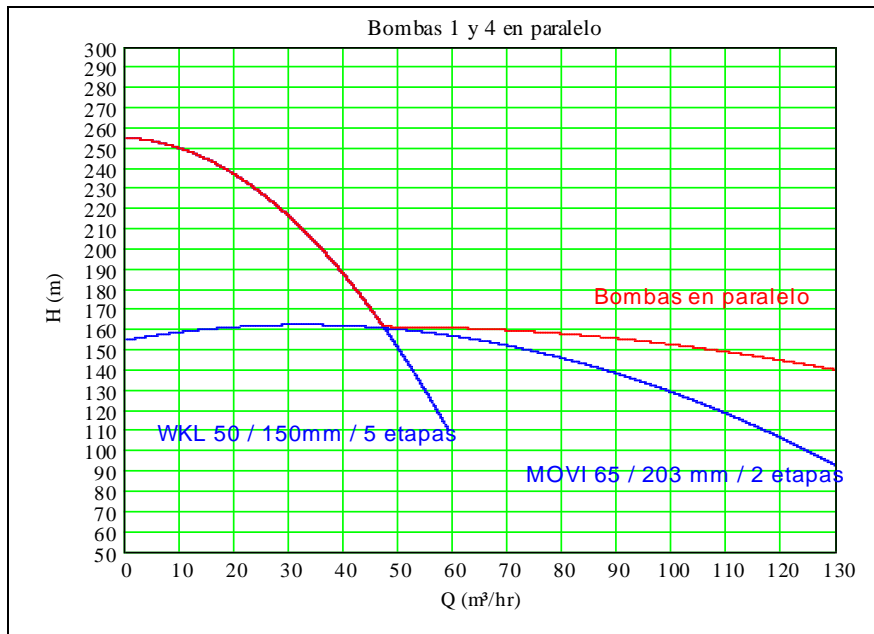
- Bombas 1 y 4 en paralelo: descarga en 4 pulgadas.
- Bombas 2 y 3 en paralelo: descarga en 3 pulgadas.

4.2.4.1. Conexión en paralelo de las bombas 1 y 4

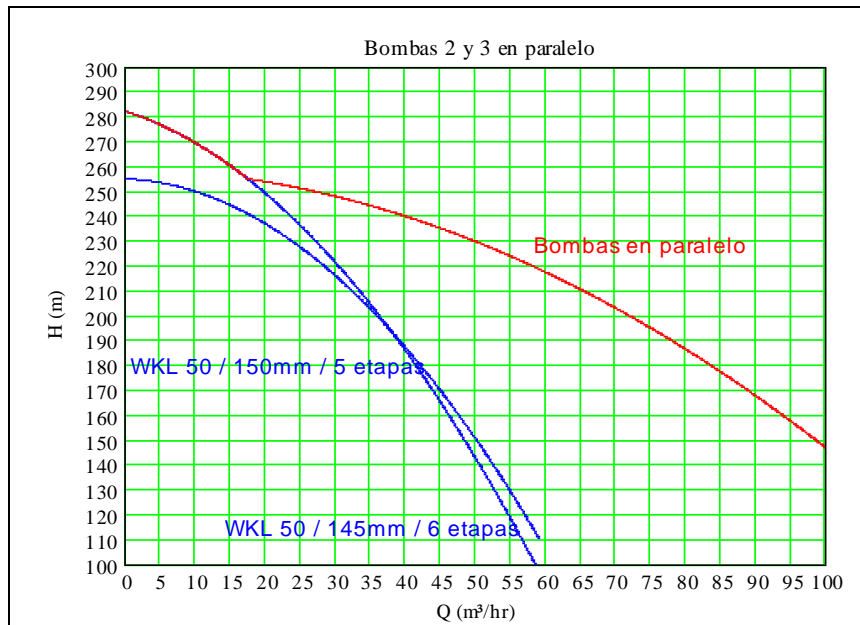
Las bombas 1 y 4 son las que impulsan el agua por la tubería de 4 pulgadas; éstas operan en paralelo. Las curvas correspondientes se observan en la gráfica 4.1.

4.2.4.2. Conexión en paralelo de las bombas 2 y 3

Las bombas 2 y 3 operan en paralelo y sus curvas características se pueden observar en la gráfica 4.2.



Gráfica 4.1 Conexión en paralelo de las bombas 1 y 4



Gráfica 4.2 Conexión en paralelo de las bombas 2 y 3

4.2.5. Motores eléctricos

Las características principales del equipo que hace funcionar a cada bomba son las siguientes:

- Tipo de motor eléctrico: trifásico de inducción rotor jaula de ardilla
- Velocidad de giro nominal: 3500 r.p.m.
- Transmisión de potencia mediante acople directo.
- Método de arranque: a tensión reducida por conmutación estrella-triángulo con transición abierta. Este tipo de arranque requiere de tres contactores para cada motor, así como un relé temporizado.
- Tensión de trabajo de los motores: 220 voltios.

Las características técnicas de los motores son las siguientes:

Grupo	1	2	3	4
Marca	BBC	BBC	BBC	BBC
Potencia	57 HP / 43 kW	77 HP / 57 kW	77 HP / 57 kW	64.5 HP / 48kW
RPM	3530	3550	3550	3550
Dimensiones	Ø 40 cm L = 62 cm	Ø 50 cm L = 75 cm	Ø 50 cm L = 75 cm	Ø 40 cm L = 60 cm
Tensión	220 Δ 440 Δ V	Δ440/330Δ220/190Δ V	Δ440/330Δ220/190Δ V	220Δ 440Δ V
Corriente	200/100 A	89/103 178/206 A	89/103 178/206 A	200/100 A
F. Potencia	cosφ 0,94	cosφ 0,9	cosφ 0,9	cosφ 0,93

Tabla 4.2 Especificaciones técnicas de los motores eléctricos

4.3. LA RED DE DISTRIBUCIÓN

4.3.1. Descripción General

La zona de influencia de la E/B Vegas de Petare se divide en dos sectores de acuerdo a los diámetros de las tuberías que salen de la estación:

- Línea de 4 pulgadas de diámetro: Red de la **Zona Alta**.
- Línea de 3 pulgadas de diámetro: Red de la **Zona Baja**.

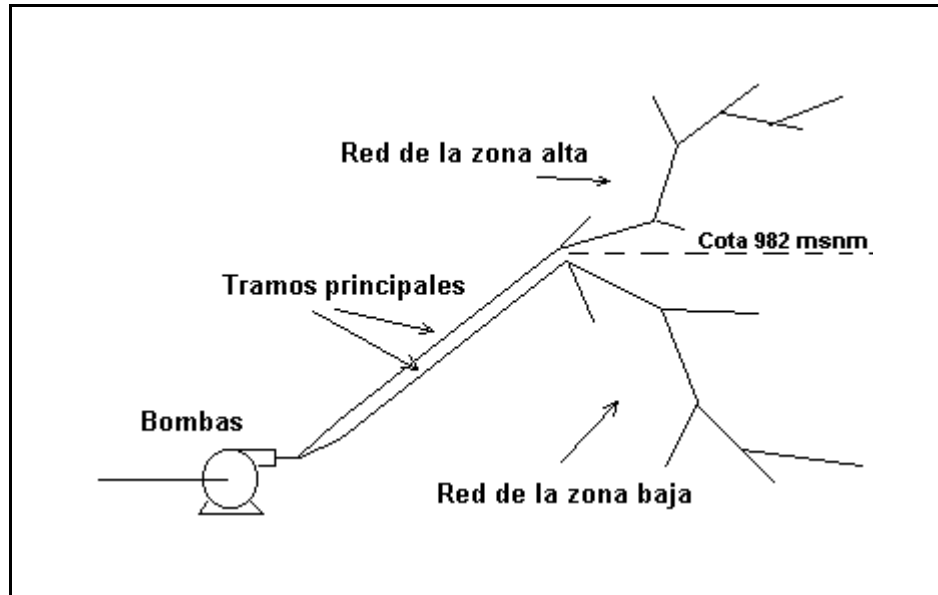


Figura 4.3 Esquema general de la red de distribución

Ambas tuberías suben hasta una cota de 982 msnm y en ese punto se separan (Fig. 4.3). La vista superior de la red se puede observar en la figura 4.4.

La línea de 4" se dirige a las zonas de mayor altura hidrostática del sistema de tubería, mientras que la de 3" desciende a cotas más bajas.

Con los planos fotoaerogramétricos de la red de distribución (digitalizados en un programa de CAD) se determinaron tanto las longitudes aproximadas como las cotas en diferentes puntos de los tramos principales.

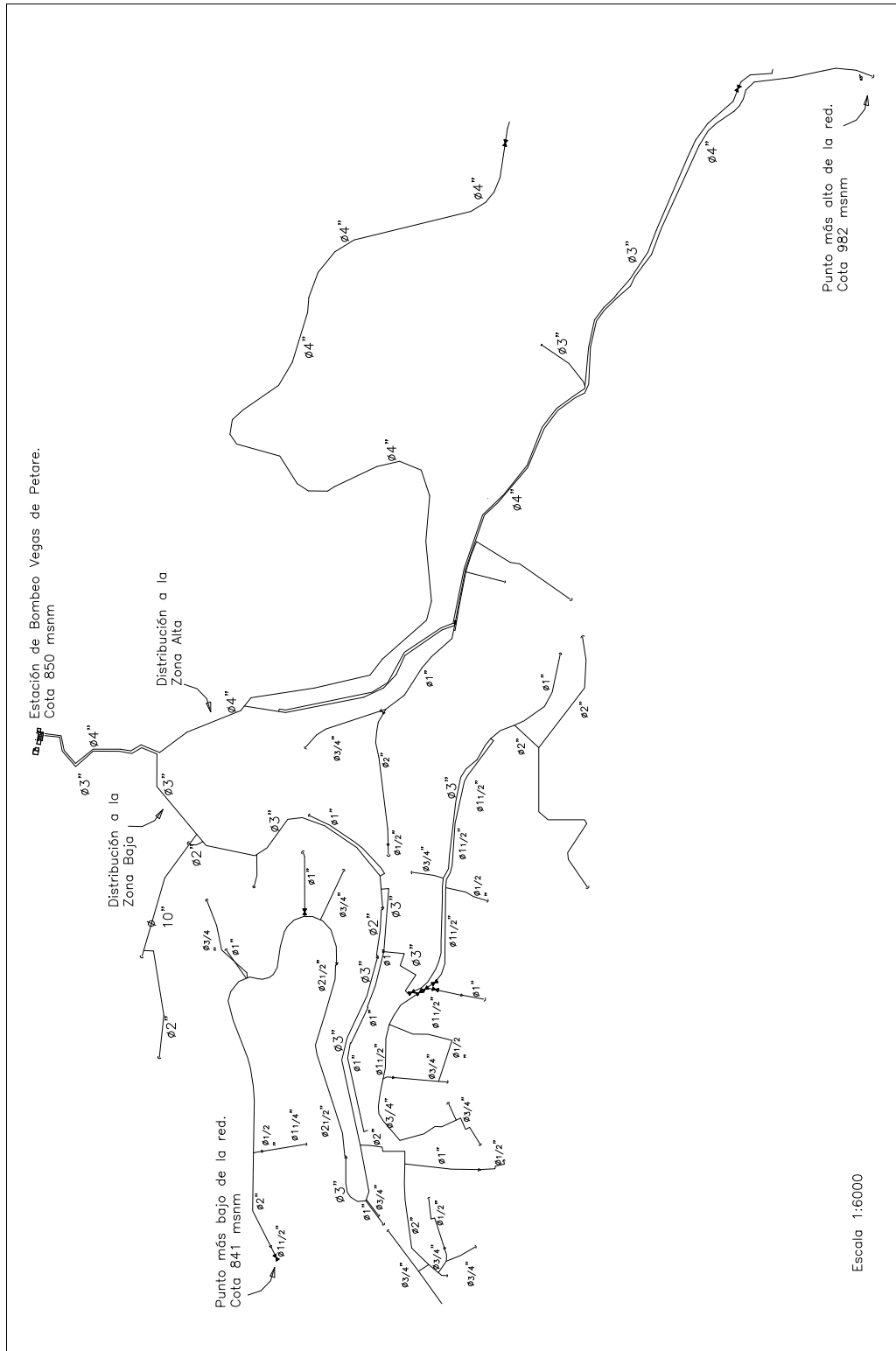


Figura 4.4 Vista superior de la red de distribución

4.3.1.1. Red de Zona Alta

Esta red de tuberías tiene las siguientes características:

- Descarga de 4 pulgadas: cota de 850 msnm (punto 1 de la tabla 4.3)
- Hierro galvanizado desde la estación de bombeo hasta la cota 891 msnm (punto 2 de la tabla 4.3). La longitud de este tramo es de 137 metros lineales de tubería.
- El resto de la red está hecha de hierro fundido dúctil en toda su extensión.
- Punto de mayor cota de la red: 982 msnm (punto 7 de la tabla 4.3).

PROGRESIVA (m)	COTA (msnm)	UBICACIÓN
0	850	1) E/B Vegas de Petare
136,54	892	2) Bomba de Gasolina (Carretera Petare Sta. Lucía)
223,86	896	3) Carretera a Sta. Lucía - Calle San Pascual
427,66	910	4) Calle San Pascual - Subida El Carpintero
543,98	931	5) Cruce Subida El Carpintero con Calle San Rafael
774,96	951	6) Calle San Rafael
1043,33	982	7) Calle San Rafael con Calle El Tanque (tanquilla 37)

Tabla 4.3 Red de la zona alta: tramo de mayor cota

- Otro tramo de importancia: 4 pulgadas de diámetro. Sigue por la Carretera a Sta. Lucía desde el cruce con la calle San Pascual al lado del Mercado de Mesuca (con cota igual a 896 msnm) hasta el próximo cruce de estas mismas con cota igual a 930 msnm.

PROGRESIVA (m)	COTA (msnm)	UBICACIÓN
223,86 *	896	3) Carretera a Sta. Lucía - Calle San Pascual
521,61	910	8) Carretera a Sta. Lucía
786,79	920	9) Carretera a Sta. Lucía
1035,33	930	10) Carretera a Sta. Lucía (fin tubería / válvula)

* Esta longitud está referida desde la estación de bombeo hasta este punto a lo largo de la tubería

Tabla 4.4 Red de la zona alta: tramo secundario

De esta información se calcula la diferencia de cota máxima para la red de:

$$p_e / \gamma = 982 \text{ m} - 850 \text{ m} = 132 \text{ m}$$

4.3.1.2. Red de Zona Baja

Las características de esta red son las siguientes:

- Descarga de 3 pulgadas: cota de 850 msnm (punto 1 de la tabla 4.4).
- Hierro galvanizado en toda su extensión.
- Sale de la estación de bombeo con cota de 850 msnm hasta la cota 892 msnm (punto 2 de la tabla 4.4) que pasa a ser el punto de mayor cota de esta línea.

PROGRESIVA (m)	COTA (msnm)	UBICACIÓN
0,00	850	1) E/B Vegas de Petare
136,24	891	2) Bomba de Gasolina (Carretera Petare Sta. Lucía)
436,66	884	3) Carretera a Sta. Lucía (división antes de la reparación en 2")
725,01	867	4) Carretera a Sta. Lucía con calle El Carmen
954,93	858	5) Carretera a Sta. Lucía (fin reparación 2½")
1101,01	853	6) Carretera a Sta. Lucía - Vuelta La Horquilla
1371,28	841	7) Carretera a Sta. Lucía (fin de la tubería)

Tabla 4.5 Red de la zona baja: tramo de menor cota

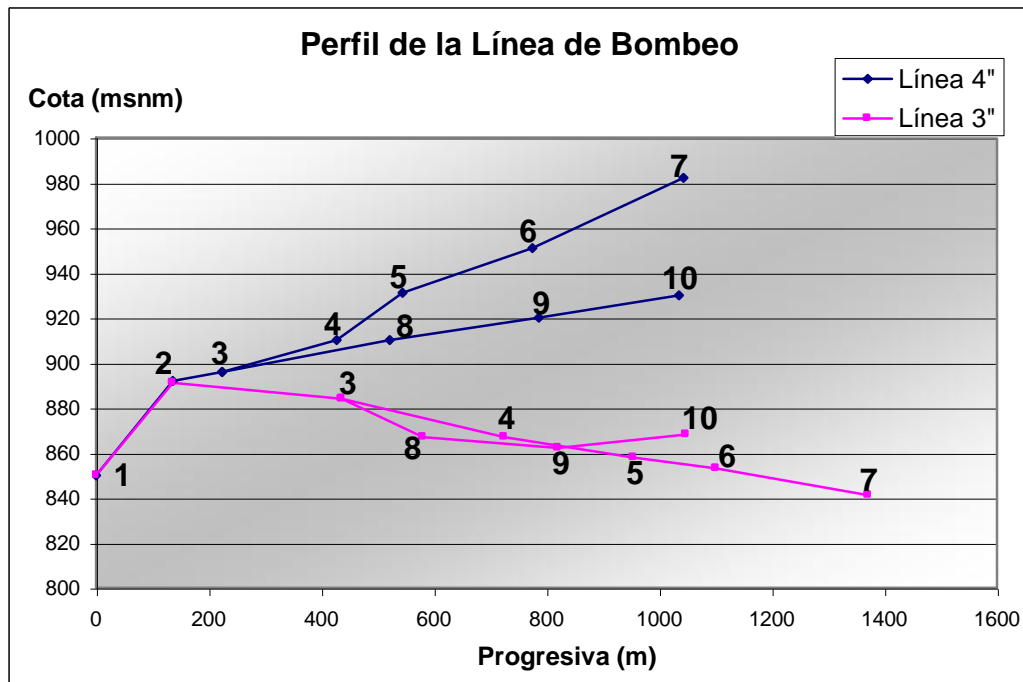
- Menor cota que alcanza la red: 841 msnm (punto 7 de la tabla 4.4).
- Otro tramo de importancia: 3 pulgadas de diámetro.

PROGRESIVA (m)	COTA (msnm)	UBICACIÓN
473.28 *	884	3) Carretera a Sta. Lucía (división antes de la reparación en 2")
617.43	867	8) Calle La Ceiba (al nivel de la tanquilla)
857.58	862	9) Calle La Ceiba (división tubería / reducción a 2")
1084.01	868	10) Calle Los Manolos con calle Unión (fin tubería)

* Esta longitud está referida desde la estación de bombeo hasta este punto a lo largo de la tubería

Tabla 4.6 Red de la zona alta: otro tramo de importancia

La gráfica que sigue muestra los puntos antes descritos para cada línea que sale de la estación de bombeo, equivalente a la progresiva de los tramos principales de la red de distribución:



Gráfica 4.3 Progresiva de los tramos principales de la red de distribución

Observando la gráfica 4.3 y los valores de cotas antes mencionados se nota que la presión hidrostática del punto 7 con respecto a la estación de bombeo es negativa, lo que representa una situación de pérdida de energía y dinero que debe ser modificada. La diferencia de cota es de -9 m.c.a.

4.3.2. Cálculo de la población actual abastecida por la estación de bombeo

4.3.2.1. Breve historia de las parroquias y municipios

Como ya se mencionó, la zona abastecida por la estación de bombeo es una fracción de la Parroquia Petare.

Antiguamente, la zona metropolitana estaba conformada por el Distrito Sucre; éste, a su vez, estaba conformado por las Parroquias Leoncio Martínez, Petare, Baruta, Chacao y El Hatillo. Los datos poblacionales de este distrito obtenidos en el Instituto Nacional de Estadística (anteriormente llamado OCEI) son los siguientes:

PARROQUIA	Área (Ha)	1950	1961	1971	1981
Leoncio Martínez	2.300	16.930	44.412	59.211	63.346
Petare	14.100	20.053	82.723	229.614	396.489
Baruta	8.600	8.233	47.049	121.527	203.565
Chacao	1.300	25.788	64.006	78.528	72.703
El Hatillo	8.100	4.850	5.584	11.231	30.392

Tabla 4.7 Datos de población del INE

A partir de este año, estas parroquias se convirtieron en Municipios, exceptuando al actual Municipio Sucre que quedó conformado con las antiguas Parroquias Leoncio Martínez y Petare (ver esquema de la Fig. 4.4):

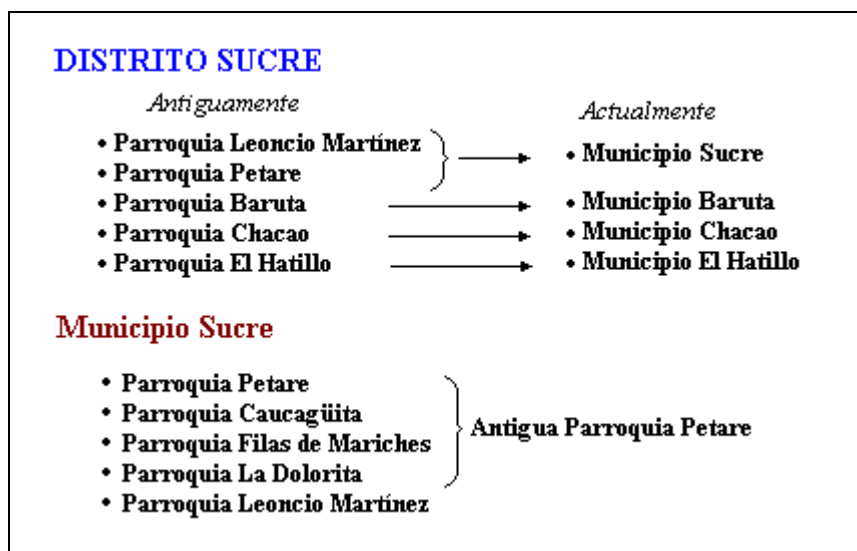


Figura 4.4 Transformación de las Parroquias en Municipios

Las áreas de estas zonas son las siguientes:

Antes	En la Actualidad	Área	
		(m ²)	(ha)
Antigua Parroquia Petare	Parroquia Fila de Mariches	30.500.000	3.050
	Parroquia Caucagüita	55.000.750	5.500
	Parroquia La Dolorita	12.250.000	1.225
	Parroquia Petare	44.021.875	4.402
Parroquia Leoncio Martínez	Parroquia Leoncio Martínez	22.978.125	2.298
	MUNICIPIO SUCRE	164.750.000	16.475

Tabla 4.8 Áreas del Municipio Sucre

Los datos de población de la Parroquia Petare actuales que suministra el INE son los siguientes:

Municipios y Parroquias	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
Municipio Sucre	533,239	557,677	582,591	607,948	633,746	659,978	686,657
Parroquia Petare	361,050	376,662	392,591	408,320	424,313	440,390	456,539
Parroquia Caucagüita	41,973	44,481	47,081	49,769	52,548	55,417	58,381
Parroquia F. de Mariches	21,973	23,806	26,105	28,586	31,265	34,155	37,276

Capítulo 4: Situación Actual de la Estación de Bombeo

Parroquia La Dolorita	45,122	47,911	50,810	53,814	56,928	60,153	63,492
Parroquia L. Martínez	63,409	64,817	66,165	67,459	68,692	69,863	70,969

Municipios y Parroquias	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Municipio Sucre	713,712	741,141	768,928	796,930	826,683	856,436
Parroquia Petare	472,706	488,869	505,001	520,982	537,232	553,482
Parroquia Caucagüita	61,430	64,566	67,788	71,086	74,761	78,436
Parroquia F. de Mariches	40,628	44,232	48,102	52,253	57,126	61,999
Parroquia La Dolorita	66,937	70,490	74,150	77,908	82,122	86,336
Parroquia L. Martínez	72,011	72,984	73,887	74,701	75,442	76,183

Tabla 4.9 Población del Municipio Sucre según el INE

4.3.2.2. Proyección de la población de la Parroquia Petare por el Método Aritmético o Lineal

De acuerdo a la ecuación (3.3), para el caso de la Parroquia Petare, se tiene:

Pob(2002)* : población en el año 2002 ; $t_2 = 2002$

Pob(1990)* : población en el año 1990 ; $t_1 = 1990$

* P₁ y P₂: suministrados por el INE.

Entonces,

$$k_p = \frac{\text{Pob}(2002) - \text{Pob}(1990)}{t_2 - t_1}$$

$$k_p = \frac{553482\text{hab} - 361050\text{hab}}{2002 - 1990}$$

$$k_p = 16036 \frac{\text{hab}}{\text{año}}$$

De acuerdo a este método se obtienen los siguientes resultados:

Año	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Habitantes	553482	569518	585554	601590	617626	633662

2008	2009	2010	2011	2012	2017	2020	2025
649698	665734	681770	697806	713842	794022	842.130	922310

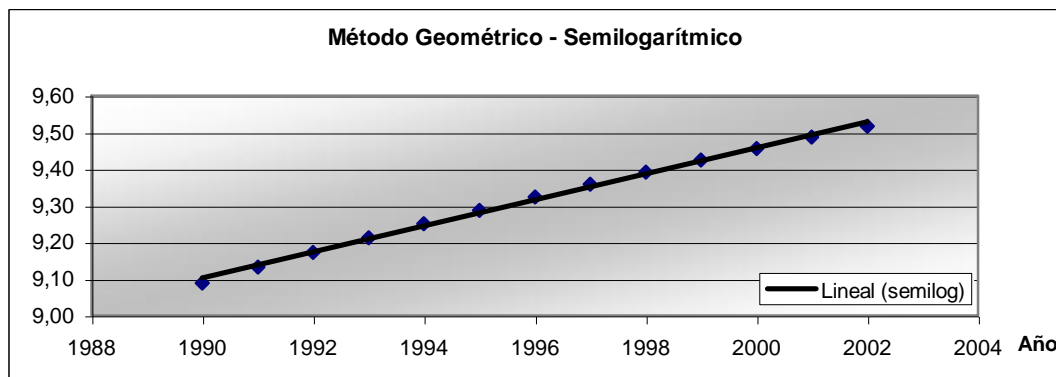
Tabla 4.10 Resultados por el método lineal

4.3.2.3. Proyección de la población de la Parroquia Petare por el Método Geométrico

Este método supone que la tasa de incremento es proporcional a la población, de acuerdo a la ecuación (3.4). Se debe hallar el valor de k_e para realizar la estimación de población por este método.

Para calcular el valor de k_e se grafica la data poblacional que se tiene de la Parroquia en papel semilogarítmico. Luego se ajusta una la línea recta a la data y se calcula la pendiente, que representa el valor de k_e .

Esta gráfica es la que sigue a continuación:



Gráfica 4.4 Método geométrico

La pendiente de la recta se calcula como sigue:

$$k_e = \frac{\Delta P_{ob}}{\Delta t} = \frac{9.45 - 9.16}{2000 - 1992}$$

$$k_e = 0.03625$$

Despejando el término P_{ob} de la ecuación (3.5) resulta la relación siguiente

$$P_{ob} = e^{\frac{\ln(P_{ob_c} + k_e \cdot \Delta t)}{k_e}}$$

de donde se obtienen los siguientes resultados de población para cada año:

Año	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Habitantes	553.482	573.196	593.613	614.758	636.655	659.333

2008	2009	2010	2011	2012	2017	2020	2025
682.818	707.140	732.328	758.413	785.428	935.638	1.039.224	1.237.971

Tabla 4.11 Resultados por el método geométrico

4.3.2.4. Proyección de la población de la Parroquia Petare por el Método Parabólico

Para realizar la proyección de la población según este método se asume un comportamiento de la misma de acuerdo a la ecuación de una parábola de segundo grado. Esta suposición es válida para este tipo de zonas porque su tasa de crecimiento no presenta disminuciones a lo largo de su historia.

Para hallar los coeficientes que definen la ecuación de una parábola de segundo grado, se utiliza la data histórica de la zona y, mediante un programa de cálculo (MathCAD), se obtienen los siguientes valores:

$$c_1 = 99315314.531$$

$$c_2 = -115169.662$$

$$c_3 = 32.886$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación (3.7) se obtiene la siguiente estimación de población:

Año	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Habitantes	554.328	570.868	587.474	604.146	620.883	637.687

2008	2009	2010	2011	2012	2017	2020	2025
654.556	671.491	688.491	705.558	722.690	809.337	862.115	951.394

Tabla 4.12 Resultados por el método parabólico

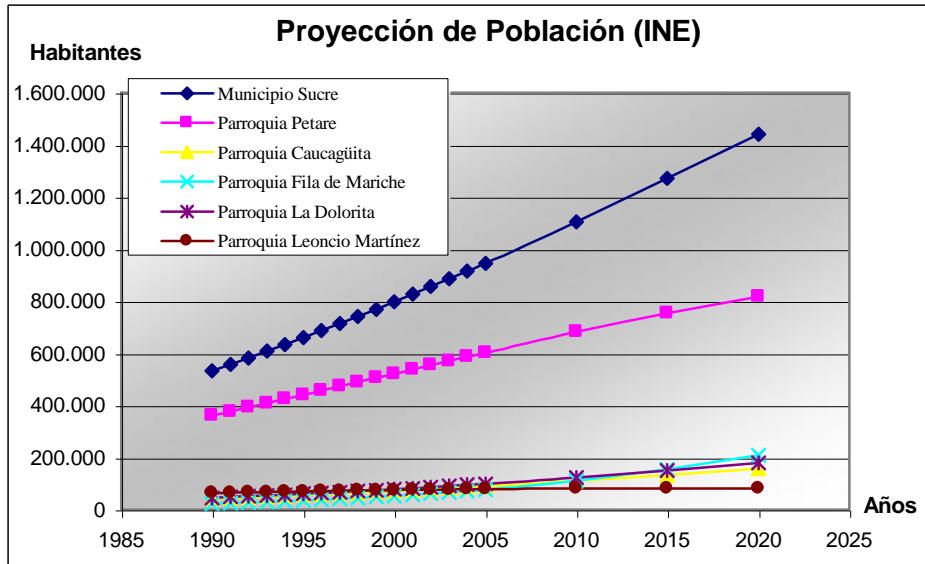
4.3.2.5. Proyección de la población de la Parroquia Petare Suministrada por el Instituto Nacional de Estadística (INE)

La proyección poblacional que hace el INE del Municipio Sucre y sus Parroquias es la siguiente:

Municipios y Parroquias	2002	2003	2004	2005	2010	2015	2020
Municipio Sucre	856,436	886,189	915,942	945,694	1,104,646	1,270,646	1,440,507
Parroquia Petare	553,482	569,732	585,982	602,231	680,989	753,605	816,223
Parroquia Caucagüita	78,436	82,111	85,786	89,461	110,167	132,802	156,714
Parroquia F. de Mariches	61,999	66,872	71,745	76,620	109,740	153,431	208,245
Parroquia La Dolorita	86,336	90,550	94,764	98,977	123,020	149,642	178,148
Parroquia L. Martínez	76,183	76,924	77,665	78,405	80,578	81,166	81,177

Tabla 4.13 Proyección de población según el INE

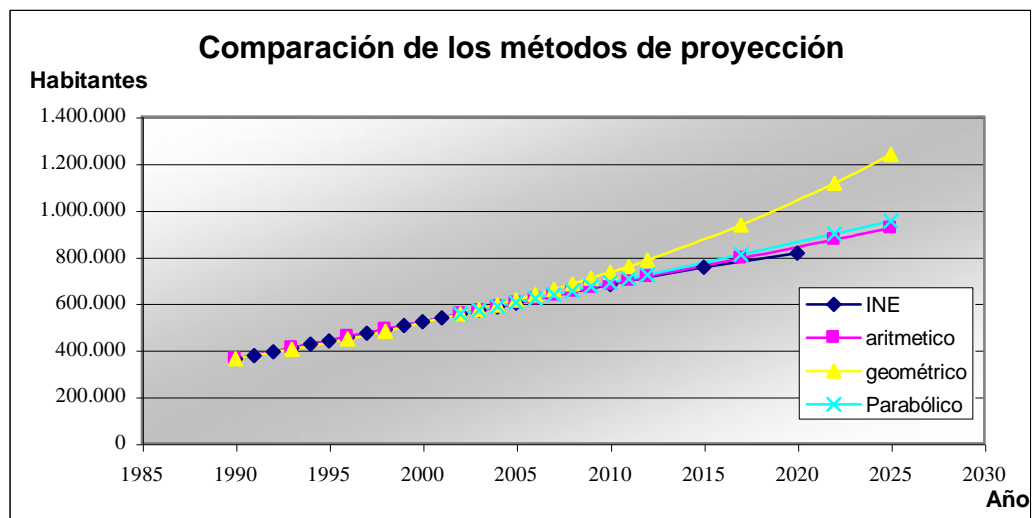
En las gráficas correspondientes que siguen a continuación se pueden notar las tendencias del crecimiento poblacional de las Parroquias y el Municipio en general, de acuerdo a las estimaciones del INE:



Gráfica 4.5 Proyección de la población del Municipio Sucre según el INE

4.3.2.6. Comparación de los Métodos Utilizados

La siguiente representación muestra una comparación gráfica de los resultados obtenidos por los diferentes métodos matemáticos utilizados en la estimación de la población de la Parroquia Petare hasta el año 2025:



Gráfica 4.6 Proyecciones de la población de la Parroquia Petare

De la gráfica 4.6 se observa que los resultados obtenidos por los métodos aritmético y parabólico son muy cercanos entre sí y con respecto a las proyecciones del INE, a diferencia del método geométrico que arroja resultados muy altos debido a que el período de estimación es relativamente largo. Tomando en cuenta que los estudios que realiza el INE se basan en data estadística de la zona e involucra información adicional en el cálculo, se considera que los resultados obtenidos por los métodos aritmético y parabólico son los que se ajustan mejor a la realidad.

Para este estudio en particular se seleccionó el método parabólico. Este se considera el más adecuado ya que la población proyectada para el final del período de diseño es ligeramente superior al resto, dando un margen de seguridad conveniente en el cálculo del caudal requerido para esa fecha.

4.3.2.7. Determinación de la Población Actual Surtida por la Estación de Bombeo

Para la estimación de la población se tomaron en cuenta los siguientes elementos:

- Se utilizaron datos del año 1990 obtenidos en el INE.
- Información basada en grupos poblacionales de alrededor de 200 personas ubicados en zonas específicas denominadas *segmentos*.
- Plano de la zona en estudio dividida en los mencionados segmentos, suministrado por el INE (apéndice 4).
- Se calcularon las áreas respectivas a cada segmento mediante el uso de un programa de dibujo asistido por computador.
- Se determinó qué áreas de la Parroquia Petare se están surtiendo, con el apoyo del personal de IMAS, con los planos respectivos y las visitas al sitio, obteniéndose así un plano con la zona abastecida.

Capítulo 4: Situación Actual de la Estación de Bombeo

- Se superpusieron ambos planos y se determinó qué porcentajes de las áreas de cada segmento coinciden con la zona de abastecimiento. Esto se puede ver mejor en la siguiente tabla:

Segmentos N°	Total Habitantes	Area total (m ²)	Área servida (m ²)	% segmento servido por el bombeo	Densidad Población (hab/m ²)	Habitantes servidos por segmento
288	807	28.375	25.240	88.95	0.0284	718
289	421	18.341	10.326	56.30	0.0230	237
290	562	100.504	52.526	41.82	0.0056	294
291	346	7.066	3.151	44.59	0.0490	154
292	907	20.607	2.761	13.40	0.0440	122
293	933	14.031	0	0.00	0.0665	0
294	788	12.065	9.443	78.27	0.0653	617
295	907	49.425	21.840	44.19	0.0184	401
296	526	10.087	2.595	25.73	0.0521	135
363	899	19.473	2.492	12.80	0.0462	115
364	763	12.466	12.029	96.49	0.0612	736
365	621	19.293	19.293	100.00	0.0322	621
366	889	13.609	13.609	100.00	0.0653	889
367	1.012	20.383	20.383	100.00	0.0496	1.012
368	1.011	30.661	28.486	92.91	0.0330	939
372	790	12.016	757	6.30	0.0657	50
373	964	14.164	14.164	100.00	0.0681	964
374	874	13.318	10.998	82.58	0.0656	722
375	703	14.780	197	1.33	0.0476	9
383	806	17.975	4.048	22.52	0.0448	182
Totales:	15.529	448.639	254.338	-	-	8.916

Tabla 4.14 Datos de los segmentos (INE)

Para el cálculo de una población que se encuentra dentro de otra de mayor tamaño y con datos censales, se aplica el concepto de densidad de población, es decir:

$$\text{Densidad}_{\text{población}} = \frac{\text{N}^{\circ}_{\text{de Habitantes}}}{\text{Área}_{\text{que ocupan}}}$$

Con esta relación se hace posible la estimación de una porción de la población que habita una zona determinada, pero tomando en cuenta las proporciones

de estas zonas entre sí. En este caso, la zona en estudio es una fracción de la Parroquia Petare.

La cantidad de habitantes que se encontraba dentro de la zona de influencia de la estación para el año 1990 es la siguiente:

$$\text{Población}^* (1990) = 8.916 \text{ habitantes}$$

El área total de abastecimiento se obtuvo mediante el programa de dibujo AutoCAD, calculándolo de acuerdo a las delimitaciones establecidas en el IMAS. Este corresponde a:

$$A = 254.338 \text{ m}^2$$

Con estos datos se calcula la densidad de población en ese área como sigue:

$$\text{Densidad}^* (1990) = \text{Población}^* (1990) / \text{Área}$$

$$\text{Densidad}^* (1990) = 8.916 \text{ hab} / 254.338 \text{ m}^2$$

$$\text{Densidad}^* (1990) = 0,03633 \text{ hab/m}^2$$

La densidad de población de la Parroquia Petare para ese año era:

$$\text{Densidad Petare (1990)} = \text{Población Petare (1990)} / \text{Área}$$

$$\text{Densidad Petare (1990)} = 361.050 \text{ hab} / 44.021.875 \text{ m}^2$$

$$\text{Densidad Petare (1990)} = 0,0082016 \text{ hab/m}^2$$

Estas dos densidades deberían ser ligeramente similares porque se trata de la misma zona. Sin embargo, se puede notar que la diferencia es considerable y esto hace que el cálculo mediante la densidad de las zonas sea inaceptable.

Para corroborar lo anterior se aplica el mismo cálculo para el año 2002 con los siguientes resultados:

$$\text{Densidad Petare (2002)} = \text{Población Petare (2002)} / \text{Área}$$

$$\text{Densidad Petare (2002)} = 553.482 \text{ hab} / 44.021.875 \text{ m}^2$$

$$\text{Densidad Petare (2002)} = 0,012573 \text{ hab/m}^2$$

Si se utiliza esta densidad en el cálculo de la población en estudio para el año 2002 ocurre lo siguiente:

$$\text{Población}^* (2002) = \text{Densidad Petare (2002)} \times \text{Área}$$

$$\text{Población}^* (2002) = 0,012573 \text{ hab/m}^2 \times 254.338 \text{ m}^2$$

$$\text{Población}^* (2002) = 3.198 \text{ habitantes}$$

De aquí se concluye, que utilizar la densidad de la Parroquia para la estimación de una población que ocupa apenas un 1 % de su territorio arroja resultados fuera de la realidad. Esto es obvio, ya que la supuesta población actual es mucho menor que la población que habitaba en esa misma zona para el año 1990, es decir:

$$\text{Pob}^* (2002) < \text{Pob}^* (1990)$$

resultado que escapa de la realidad de nuestras zonas populares.

Esta zona se encuentra en una situación muy similar al resto de la parroquia en aspectos como el topográfico, clase social, calidad de vida, grupos de edad, entre otras, lo que determina un crecimiento poblacional de la zona en estudio muy similar al de la Parroquia en general. Debido a esto, se considera que la relación de población calculada para el año 1990, se ha mantenido prácticamente igual hasta la fecha, por lo que se puede calcular la población equivalente para este año de la siguiente manera:

$$\text{Relación (1990)} = \text{Población}^*(1990) / \text{Población Petare (1990)}$$

$$\text{Relación (1990)} = 8.858 / 361.050$$

$$\text{Relación (1990)} = 0,02453$$

$$\text{Población}^* (2002) = \text{Relación}(1990) \times \text{Población Petare (2002)}$$

$$\text{Población}^* (2002) = 0,02453 \times 553.482 \text{ habitantes}$$

$$\text{Población}^* (2002) = 13.577 \text{ habitantes}$$

Por lo tanto, este cálculo se considera adecuado como estimación de la población que surte actualmente de agua la estación Vega de Petare.

* Datos de población según el criterio de la relación constante de población

4.3.3. Estimación de la Rugosidad Actual de las Tuberías

La rugosidad absoluta inicial (tubería nueva) de cada tipo de tubería se seleccionó tomando el valor más alto de la tabla en el apéndice 5, como valor de diseño recomendado:

$$\varepsilon_{hg(\text{inicia})} = 0.152\text{mm} \quad \text{Hierro Galvanizado}$$

$$\varepsilon_{hfd(\text{inicia})} = 0.260\text{mm} \quad \text{Hierro Fundido Dúctil}$$

La rugosidad de las tuberías aumenta en función de muchos factores que pueden influir en mayor o menor grado en este aumento, de acuerdo a las características particulares del sistema. En el caso del sistema de tuberías en estudio, este aumento está asociado principalmente a factores como el tipo de tubería metálica

sin revestimiento, al crecimiento orgánico o fangos y depósitos calcáreos provocados por las acciones fisicoquímicas del tipo de agua. Aunque algunos de estos factores pueden tener poco efectos, se toman en consideración para la estimación de la rugosidad en un momento dado.

Considerando este aumento de la rugosidad como una función lineal con respecto al tiempo, como lo demostraron amplias investigaciones experimentales, se calcula la rugosidad actual de la tubería tomando en cuenta su tiempo de vida y seleccionando de la tabla 3.1 el valor de α de acuerdo a las características del agua.

Las características del agua del bombeo se ajustan al grupo N° 1 de la tabla 3.1, según información suministrada por los ingenieros químicos del Instituto, ya que ésta proviene de la planta de tratamiento de la estación 2-5 del sistema Tuy II. Se describe esta agua como poco mineralizada, no agresiva, con poco contenido de minerales y de materia orgánica.

Se selecciona un valor alto de α por la tendencia del agua hacia el grupo 2. Por lo tanto, el valor del incremento por envejecimiento de la tubería es:

$$\alpha := .055 \frac{\text{mm}}{\text{yr}}$$

Esta red de tuberías tiene aproximadamente 20 años de servicio. Tomando en cuenta estos años de servicio, mediante la ecuación (3.22), se obtienen las rugosidades actuales para ambos tipos de tuberías con los siguientes resultados:

$$\varepsilon_{hg} = 1.252\text{mm}$$

$$\varepsilon_{hfd} = 1.36\text{mm}$$

4.3.4. Característica del Sistema

Los puntos de operación del sistema presentan variaciones a lo largo del día en función del consumo que se le exija a la red. La ubicación exacta de los puntos se hace mediante las mediciones de presión de un manómetro en la descarga de las bombas y con las curvas características de las bombas.

Para hallar la altura dinámica total se deben tener las especificaciones de todos los elementos que conforman la red (las longitudes exactas de cada tubo, la cantidad y tipos de válvulas, accesorios como codos y otras piezas para cambios de dirección de las tuberías, entre otras) o con mediciones de caudal y presión en los puntos apropiados.

Las características de la red de distribución que se conocen son las longitudes y los diámetros de los tramos principales de tuberías, así como la rugosidad estimada en el punto 4.3.3. Existe gran cantidad de tomas menores que simplemente se consideran como gastos de la red en los distintos nodos de los tramos principales.

Por estos motivos y por la dificultad de determinar en sitio las características exactas de la red, se obtiene la curva del sistema para cada línea de bombeo utilizando el punto de operación de las bombas y los datos de cotas conocidos.

El punto de operación de una bomba coincide con un punto de la curva del sistema al que se bombea, ya que corresponde al punto de operación del sistema mismo. Considerando que el sistema se comporta como una parábola de segundo grado, se obtiene la curva del sistema con el punto de operación, la presión en la succión y la diferencia de cotas, todos estos datos conocidos.

Simplificando la ecuación (3.32), se obtiene la siguiente igualdad:

$$H(Q) = \frac{P_{II} - P_I}{\gamma} + \frac{V_{II}^2 - V_I^2}{2g} + z_{II} - z_I + K \cdot Q^2$$

donde:

P_{II} : presión en el punto más alto de la red

P_I : presión en la succión de la bomba

V_I : velocidad media del flujo en la succión

V_{II} : velocidad media del flujo en el punto más desfavorable

z_{II} : cota del punto más alto de la red

z_I : cota de la estación de bombeo

γ : peso específico relativo del agua

K : constante de la curva de pérdidas

El valor de K se obtiene de la siguiente manera:

$$K = \frac{P_{des} - \left(\frac{P_{II} - P_I}{\gamma} + \frac{V_{II}^2 - V_I^2}{2g} + z_{II} - z_I \right)}{(Q_{bombeo})^2}$$

donde:

P_{des} : presión en la descarga de la bomba

Q_{bombeo} : caudal que envía la bomba

La presión en el punto más desfavorable de la red de la zona alta debe ser la presión mínima requerida para la alimentación de una vivienda. La norma en Venezuela exige un mínimo de 20 m.c.a. para el abastecimiento de una vivienda.

La presión en la succión de las bombas varía en función de la presión del Alimentador Este, tomando en cuenta que éstas succionan directamente de la tubería del alimentador.

Las velocidades en los puntos I y II dependerán del caudal y del diámetro de la tubería, ajustándose estos valores para los diferentes puntos de operación que va a presentar cada bomba, en el caso de la succión, y del caudal que llegue al punto más desfavorable, en el caso del punto II.

En el caso de la red de la zona alta, se puede estimar la curva del sistema en un momento dado, con un valor de presión en el manómetro de succión de 20 metros y la presión en el manómetro de descarga de las bombas 1 y 4 (ambas operando) de 160 metros. La diferencia de cotas es de 132 metros. La velocidad en la succión se supone del caudal medio para cada bomba, en este caso, para un caudal de $45 \text{ m}^3/\text{hr}$ la velocidad media es igual a $1,542 \text{ m/s}$. La velocidad en el punto II se supone para un caudal de $10 \text{ m}^3/\text{hr}$ y es igual a $0,338 \text{ m/s}$. Entonces, se obtiene el valor de K como sigue:

$$K = \frac{160\text{m} - \left[10\text{m} - 30\text{m} + \frac{\left(0,338\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 - \left(1,542\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 9,81\frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 132\text{m} \right]}{\left(95\frac{\text{m}^3}{\text{hr}}\right)^2}$$

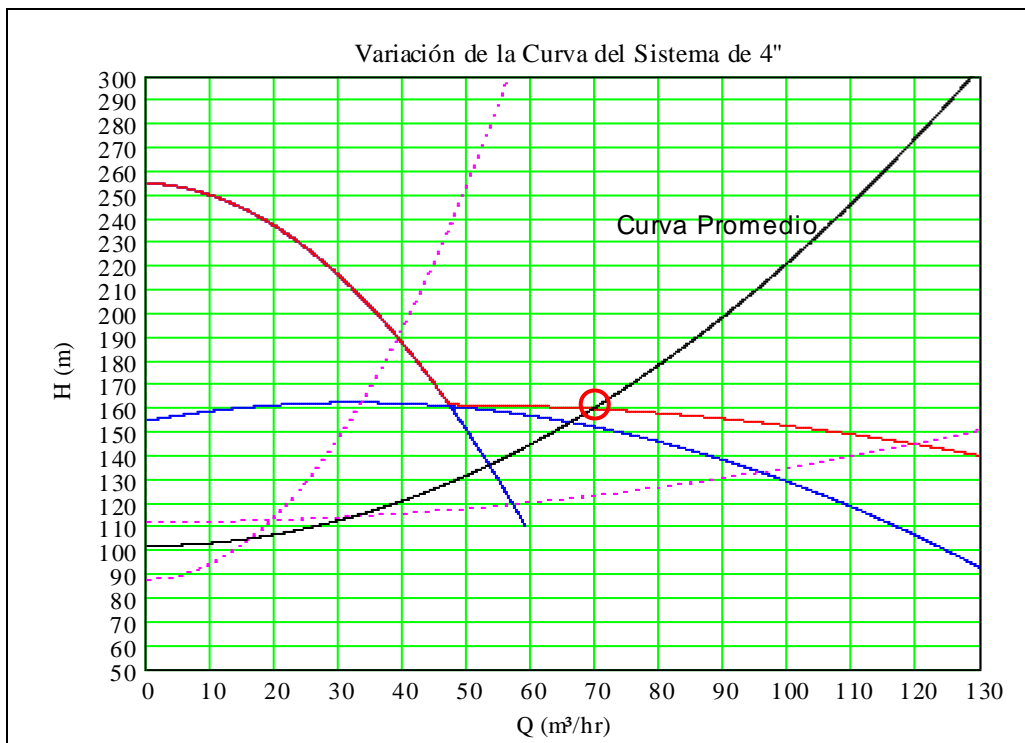
$$K = 0,00533 \frac{\text{m}}{\left(\frac{\text{m}^3}{\text{hr}}\right)^2}$$

Con este valor se determina gráficamente la curva característica del sistema utilizando las mediciones y datos a los que se tiene acceso en la estación. La ecuación que describe el comportamiento del sistema para ese instante es:

$$H(Q) = 10\text{m} - 30\text{m} + \frac{\left(0.338\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 - \left(1.542\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 9.81\frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 132\text{m} + 0.00533Q^2$$

$$H(Q) = 111.885\text{m} + 0.00533Q^2$$

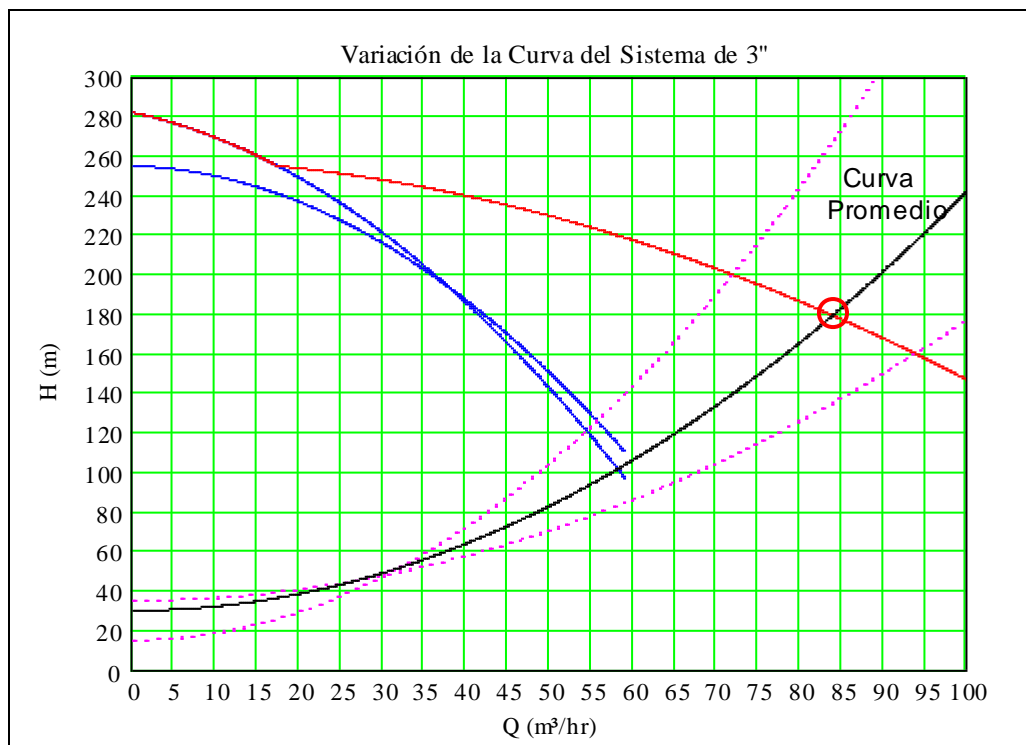
De esta manera, con los registros de las presiones de succión y descarga de las bombas se obtuvieron las curvas siguientes para la red de 4 pulgadas (ver animación en archivos anexos):



Gráfica 4.7 Curva del sistema de la zona alta

Las curvas punteadas representan las curvas en los extremos de la red de la zona alta, en términos de caudal y presión, de acuerdo a los registros que se tienen del último año. La curva en negro representa la característica del sistema promedio que tiene la red (el círculo en rojo indica el punto de operación promedio).

Las curvas que describen el comportamiento del sistema de la red de la zona baja, se comportan de manera similar que en el caso de la red de 4 pulgadas. La gráfica es la siguiente:



Gráfica 4.8 Curva del sistema de la zona baja

Para la red de la zona baja, la curva del sistema es diferente porque la altura estática que debe superar el bombeo es significativamente menor en relación a la altura dinámica total. La mayor resistencia que vencen las bombas en este caso la ejercen las pérdidas por fricción generadas a lo largo de la tubería debido al caudal que ésta es obligada a conducir, tomando en cuenta que el diámetro es de 3 pulgadas.

4.3.5. Gastos de Consumo

Los valores de caudal que salen de la estación de bombeo Vegas de Petare se calcularon mediante los registros de presión medidos en la descarga de las bombas en un período de un año y con las curvas características de las mismas.

BOMBA	CAUDAL (m ³ /hr)		
	Mínimo	Máximo	Promedio
1	40	52	45
2	36	44	37
3	37	46	38
4	0	80	40
Total	113	222	160

Tabla 4.15 Caudales manejados por cada bomba

Para la línea de 3 pulgadas (bombas 2 y 3) se tiene:

- Caudal promedio: 75 m³/hr de agua
- Velocidad media asociada: 4,57 m/s, desde la descarga hasta los primeros 137 metros, donde empieza a haber consumo.

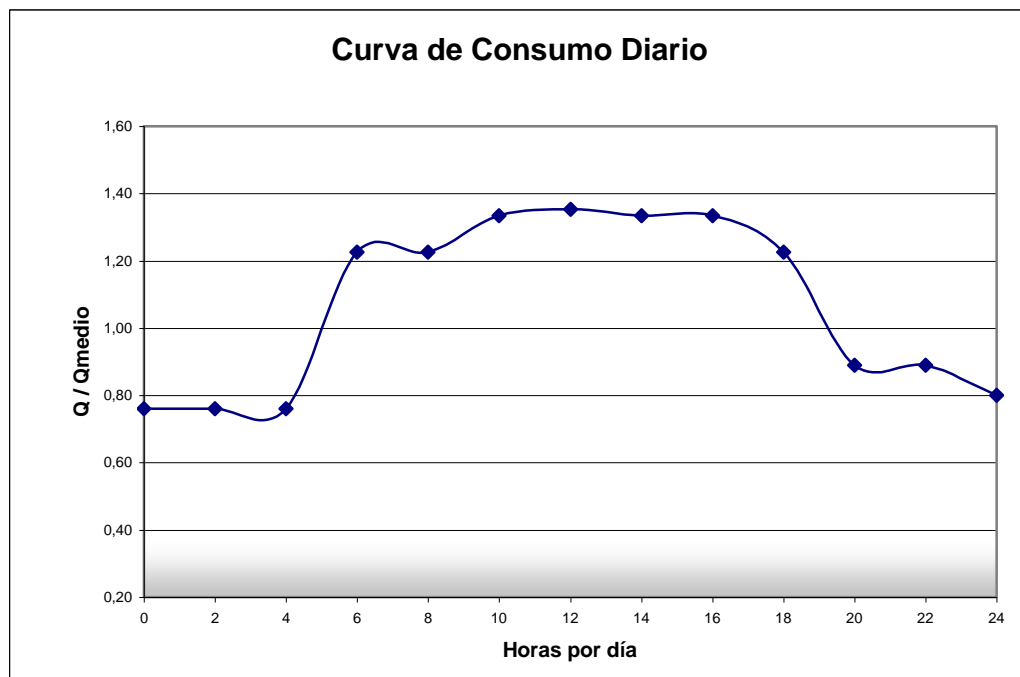
Para la zona alta, línea de 4 pulgadas (bombas 1 y 4) la situación es la siguiente:

- Gasto promedio: 85 m³/hr
- Velocidad en los primeros 137 metros de tubería: 2,91 m/s.

El flujo volumétrico promedio bombeado por la estación es de 160 m³/hr de agua.

En el apéndice 14 se pueden observar los registros de presión de las tuberías de la estación en un día específico, incluyendo los consumos de corriente eléctrica de cada motor, y la diferencia de presiones en el filtro instalado en la tubería del alimentador.

Con tales registros y con las curvas de las bombas correspondientes, se puede realizar la curva representativa de los consumos de la zona con respecto al caudal medio determinado, como se observa en la siguiente gráfica:



Gráfica 4.9 Curva Representativa de los Consumos Registrados de la Zona

Esta curva varía a lo largo del año dependiendo del grado de sequía en la zona, por lo que el caudal máximo del día de máximo consumo representa el caudal máximo diario asignado a esta población.

Las velocidades asociadas a estos caudales para cada tubería de distribución es la siguiente:

Diámetro de la tubería (pulgadas)	VELOCIDAD (m/s)		
	Mínima	Máxima	Promedio
3	4,45	5,48	4,57
4	1,37	4,52	2,19

Tabla 4.16 Velocidades del flujo en la descarga de la E/B

El diámetro de las tuberías disminuye por efecto del depósito de incrustaciones y óxidos a lo largo de la pared interna de éstas, aunado al hecho de que permanezcan sin agua por períodos relativamente largos. En el caso del sistema de tuberías en estudio prácticamente se ha mantenido en funcionamiento desde su instalación hasta el presente. Cabe destacar que las paradas regulares (lunes y jueves) se deben a la actual y creciente crisis de escasez de agua presente en el embalse de Camatagua.

Este caudal bombeado no es distribuido solamente a viviendas debido a que existen comercios e instalaciones que tienen un consumo de agua. Por ejemplo, la estación de gasolina utiliza agua del bombeo para su servicio de auto-lavado con un consumo constante. El Mercado Mesuca es otra zona en la que hay gasto por concepto de comercios.

El caudal medio actual que bombea la estación es igual a 44,44 litros por segundo (160 m³/hr). El porcentaje de este caudal que es demandado directamente por los habitantes se llama caudal residencial, y la otra fracción corresponde al consumo de actividades diferentes al consumo residencial llamado caudal comercial (bomba de gasolina, comercios varios, etc.).

Tomando en cuenta que esta población es menor de 20.000 personas, se utiliza una dotación mínima de 200 litros por persona por día, de acuerdo a la tabla 3.3 según las Normas INOS. Por lo tanto, el caudal medio consumido directamente por los habitantes de la zona, o caudal residencial, de acuerdo a la ecuación (3.60) es aproximadamente igual a:

$$Q_{\text{resid}} = \text{Población} \cdot \text{Dotación}$$

$$Q_{\text{resid}} = 13.577 \text{ hab} \cdot 200 \text{ litros/día/hab} \cdot 24 \text{ hr/día}$$

$$Q_{\text{resid}} = 31,43 \text{ litros/seg}$$

El caudal asociado a otras actividades o caudal comercial es entonces:

$$Q_{\text{comerc}} = Q_{\text{medio}} - Q_{\text{resid}}$$

$$Q_{\text{comerc}} = (44,44 - 31,43) \text{ litros/seg}$$

$$Q_{\text{comerc}} = 13,0 \text{ litros/seg}$$

Este caudal es consumido por comercios y otras actividades diferentes a la demanda de agua de la población que habita en esta zona, como son establecimientos públicos y locales comerciales, y representa más del 25 por ciento del caudal bombeado.

4.4. CONSUMO ELÉCTRICO

El consumo eléctrico está regido por la demanda de agua en la red de tuberías de acuerdo a los caudales exigidos a cada bomba durante su funcionamiento. Este gasto o consumo de agua se traduce en corriente absorbida de la red eléctrica por cada uno de los motores acoplados a las bombas.

Cada bomba funciona con un motor trifásico de inducción rotor jaula de ardilla. Estos motores operan normalmente con el bobinado del estator en triángulo, por lo que la tensión por cada fase (220 voltios) es la misma que en la alimentación.

Los valores de la corriente consumida por cada motor son medidos y registrados directamente en la estación de bombeo cada 2 horas, por el operador de guardia.

El factor de potencia en motores de este tipo varía de acuerdo a la carga aplicada en el eje. La tendencia de la curva del factor de potencia (gráfica 3.1) es a valores entre 0.8 y 0.9, dependiendo de la marca y modelo, cuando la carga aplicada es cercana al valor de la carga nominal.

En este caso particular, los valores de $\cos\phi$ se encuentran en un rango entre 0.82 y 0.92, de acuerdo al cálculo realizado con los datos de corriente y tensión comparadas con los datos de altura y caudal de cada bomba. Cabe destacar que al realizar este cálculo se incluyeron las pérdidas eléctricas y mecánicas producidas en el motor y en el acople tomando un valor aproximado del 20% de la energía eléctrica absorbida de la red.

El consumo eléctrico mensual medido en kWhr de los cuatro grupos moto–bomba se calcula con la potencia eléctrica promedio que requiere cada uno. Según esto se obtienen los siguientes valores:

GRUPO	POTENCIA		Consumo mensual (kWh)	Costo mensual* (MMBs.)
	hp	kW		
1	56.4	42.07	31.306	1,163
2	63.0	46.95	34.917	1,297
3	52.7	39.32	29.250	1,086
4	60.5	45.08	33.528	1,245
TOTAL	232,555	173,416	129.028	4,792

* Costo mensual con tarifa 07 referida a Servicio General 4 (37,14 Bs./kWh)

Tabla 4.17 Consumo eléctrico mensual del equipo de bombeo

El costo mensual equivalente representa el costo de operación por concepto de consumo eléctrico de acuerdo a la tarifa correspondiente a la Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N° 37.415 de fecha 03 de abril de 2002. Actualmente, debido a las características socio-económicas referentes a la estación, estos costos por energía eléctrica no son asumidos directamente por el Instituto sino a través de la Alcaldía.

4.5. COSTOS POR MANTENIMIENTO ELECTROMECAÁNICO DE LA ESTACIÓN

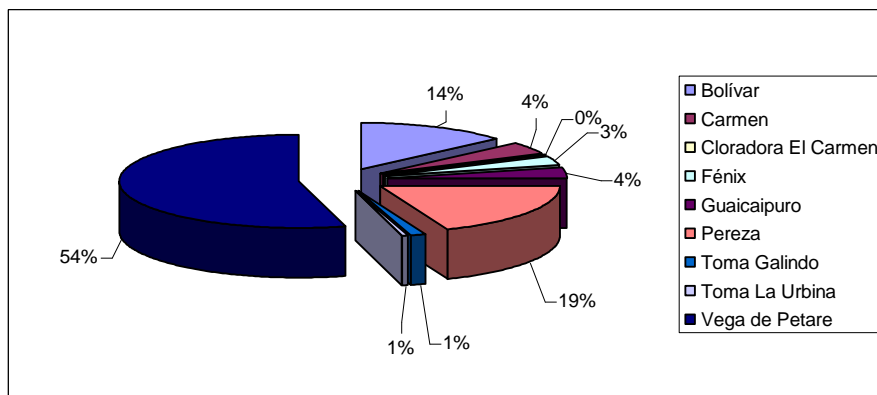
Los registros que se tienen actualmente de los costos asociados a la estación de bombeo Vega de Petare son de los años 1998 y 1999. Sin embargo, al observar estos datos y compararlos con el resto de las estaciones que opera el IMAS es evidente la situación precaria y en mal estado en que se encuentran estos equipos por el gran consumo económico que representan en el presupuesto.

Para el segundo semestre del año 1998, los costos de las estaciones fueron los siguientes:

ESTACIONES	COSTO EN Bs.
Bolívar	1.132.364,64
Carmen	355.575,84
Cloradora El Carmen	21.000,00
Fénix	254.055,32
Guaicaipuro	311.750,00
Pereza	1.570.370,09
Toma Galindo	120.458,99
Toma La Urbina	43.767,00
Vega de Petare	4.501.507,00
TOTAL =	8.310.848,88

Tabla 4.18 Costos por mantenimiento de las E/B del IMAS en el año 1998

La gráfica con valores porcentuales es la siguiente:



Gráfica 4.10 Costos porcentuales por mantenimiento de las E/B del IMAS en el año 1998

La cantidad de inspecciones realizadas por la cuadrilla de electromecánica IMAS 30 para el año de 1998 a la estación Vega de Petare fue 89 de un total de 589. El total de inspecciones realizadas por esta cuadrilla a las diferentes zonas representó un costo de Bs. 20.277.357,37 para ese año.

Capítulo 4: Situación Actual de la Estación de Bombeo

Por su parte, la cuadrilla de electromecánica IMAS 25 realizó 99 inspecciones a la E/B Vega de Petare de un total de 685 inspecciones realizadas en todo el año 1998. Este total de inspecciones representó un total de Bs. 26.340.958,82 por concepto de esta cuadrilla.

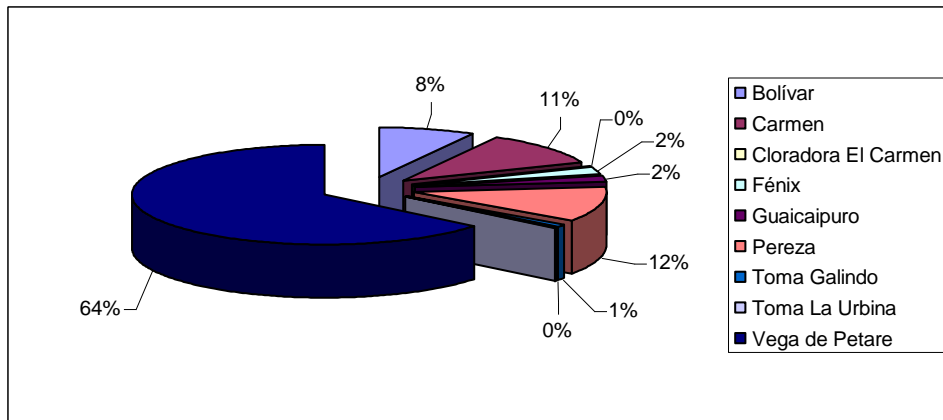
Para este año, en la estación de bombeo se presentaron 82 fallas mecánicas que representaron un costo de Bs. 2.672.647,00. Este mantenimiento, tanto preventivo como correctivo, lo realizó la cuadrilla IMAS 25.

Por otra parte, el mantenimiento realizado al sistema de control y potencia eléctrico lo realizó la cuadrilla IMAS 30. Esto representó un costo de Bs. 1.828.860,00 para un total de 31 fallas eléctricas.

Para el año 1999 se tienen los siguientes datos de los costos asociados a las distintas estaciones y tomas del IMAS:

ESTACIONES	COSTO EN Bs.
Bolívar	1.343.101,78
Carmen	1.841.577,98
Cloradora El Carmen	33.106,12
Fénix	387.251,57
Guaicaipuro	335.902,24
Pereza	1.954.319,34
Toma Galindo	124.709,90
Toma La Urbina	49.212,98
Vega de Petare	10.879.426,88
TOTAL =	16.948.608,79

Tabla 4.19 Costos por mantenimiento de las E/B del IMAS en el año 1999



Gráfica 4.11 Costos porcentuales por mantenimiento de las E/B del IMAS en el año 1999

Durante este mismo de 1999 se produjeron en los tres primeros meses 27 fallas, de las cuales 24 de éstas las presentó el grupo 4 y sólo 3 fallas el grupo 3. Esto representó un costo por mantenimiento de Bs. 1.845.855,73.

Los costos actuales asociados a la estación no han sido organizados de la manera como fueron expuestos anteriormente. Sin embargo, el comportamiento de la estación no ha cambiado en los últimos 3 años. Se debe considerar además, que los costos deben ser mayores para la fecha actual por la devaluación de la moneda local, lo que implica un incremento aproximado del doble o más para costos de materiales y equipos. En el caso del costo por cuadrillas movilizadas el costo debió aumentar en un 50%.

4.6. ANÁLISIS GENERAL DE LA ESTACIÓN ACTUAL

4.6.1. Obra Civil

La estructura civil de la estación de bombeo se encuentra en un estado bastante deteriorado. El piso, las paredes, los frisos, el cableado en general, el área del sistema de control y potencia eléctrico, etc., todos estos elementos se encuentran bastante destruidos por el tiempo que tienen, como principal agente de deterioro.



Ilustración 4.1 Fachada de la E/B Vegas de Petare

Las bases de concreto de los grupos moto-bomba están en avanzado estado de deterioro al igual que el piso de toda la estructura en general. En estas bases hay unos canales para dirigir el agua que se pierde por efecto de la humedad en las empaquetaduras, y éstos están deteriorados.

Este deterioro aunado al de las carcasas y empaquetaduras hace que el agua se derrame acelerando el proceso de oxidación de las bases metálicas, dañando el friso de las paredes y el piso.



Ilustración 4.2 Detalle de la carcasa deteriorada de una de las bombas



Ilustración 4.3 Detalle del deterioro de las bases de los grupos



Ilustración 4.4 Detalle del deterioro de las bases metálicas

El tanque de almacenamiento de agua tiene años fuera de servicio por un derrame de gasolina que ocurrió hace años en la estación de gasolina que está arriba del cerro aledaño a la estación. Este tanque fue diseñado junto con la estación para abastecer a un número de personas mucho menor al que se surte actualmente. Su función principal es mantener constante la presión en la succión de las bombas y servir como compensador de las caídas de caudal en el sistema de aducción que lo alimenta. Para el caudal que manejan las bombas actualmente este tanque resulta muy pequeño, pudiendo ser vaciado en menos de una hora, en los momentos de mayor demanda. Estos son los motivos por los que el estanque ha sido dejado de lado en la operación del bombeo.

4.6.2. Equipo de Bombeo

Las conexiones de los tubos, tanto en la succión como en la descarga, así como la selección de las bombas y demás equipos, fueron realizadas en momentos en que las necesidades de consumo así lo requirieron. Por este motivo, el diseño general de este sistema de bombeo está fuera de los parámetros de rendimiento y ahorro de energía y dinero a los que debe estar sometida cualquier estación de bombeo.

Cada uno de los cuatro grupos moto-bomba se detiene con frecuencia por motivos de mantenimiento o fallas que presentan. Estas paradas pueden durar cierto tiempo por la dificultad de obtener los repuestos necesarios (cojinetes y sellos principalmente).

Las bombas 1 y 4 que impulsan el agua por la tubería de 4 pulgadas presentan una situación particular con respecto a las presiones de bombeo. Se puede observar en las gráficas 4.1 y 4.7, que cuando la presión en la descarga de las bombas es superior a los 162 metros, sólo la bomba 1 (WKL 50/5 etapas) se encuentra bombeando agua. Esto se debe a que la bomba 4 (MOVI 65/2 etapas) no le agrega al fluido suficiente presión para vencer, en la válvula de retención, la presión ejercida

por el líquido del otro lado de ésta. Esta situación ha generado múltiples paradas por mantenimiento y reparación del grupo 4, tanto por fallas eléctricas como por fallas mecánicas, lo que representa altos costos por concepto de mantenimiento así como bajo rendimiento.

Otra causa de la constante falla de los grupos 3 y 4 es la desalineación entre el eje del motor y el de la bomba producto de errores durante el montaje de los mismos. Esto produce un desbalance en la rotación generando vibraciones y gran cantidad de calor por la fuerza de fricción en los rodamientos, acortando considerablemente la vida de los éstos y resultando en paradas inesperadas de las bombas.

El punto de operación de las bombas varía en función de la hora, del día de la semana y del mes (si es época de lluvias o de sequía) de acuerdo a las demandas que presenta la zona. Estos puntos de operación representan un consumo eléctrico diferente dependiendo del caudal suministrado y del rendimiento de la bomba para dicho caudal.

Utilizando la estadística de las presiones registradas por los operadores, se tiene un rango de los rendimientos con que trabaja cada bomba, de acuerdo a la información suministrada por el fabricante. Estos rendimientos son los siguientes, tomando los valores de caudal mínimo, máximo y promedio que maneja cada bomba:

BOMBA	RENDIMIENTO (%)		
	Caudal Mínimo	Caudal Máximo	Caudal Promedio
1	68	64	66
2	66	61	65
3	68	66	68
4	0	70	55

Tabla 4.20 Rendimientos de las bombas

4.6.3. Comportamiento Hidráulico

El aumento de la rugosidad absoluta de las tuberías de la red, desde su condición inicial a lo largo de 20 años de servicio, fue el siguiente:

- Hierro Fundido Dúctil: aumentó 8 veces.
- Hierro Galvanizado: aumentó 5 veces.

Asociado a los valores de rugosidad, los coeficientes de fricción calculados para el caudal promedio de cada red (según la fórmula de Swami, ecuación 20), son los siguientes:

- Condición inicial de las tuberías: $f_{hg} = 0,02405$ (hierro galvanizado)
 $f_{hfd} = 0,02575$ (hierro fundido dúctil)
- Condición actual de las tuberías: $f_{hg} = 0,04539$ (hierro galvanizado)
 $f_{hfd} = 0,04224$ (hierro fundido dúctil)

El aumento del factor de fricción aumentó en:

- Hierro Fundido Dúctil: aumentó 1,9 veces.
- Hierro Galvanizado: aumentó 1,6 veces.

En el caso de tuberías pequeñas este aumento del factor de fricción tiene un efecto significativo en el comportamiento general de la red. Sin embargo, con estas condiciones el sistema de tuberías se mantiene apto para continuar operando en la distribución del líquido.

El cálculo que se realizó de ambos sistemas de tuberías está basado en el análisis de redes de acuerdo al método característico o método lineal. Como resultado de este proceso de análisis se pudieron determinar ciertos aspectos importantes con respecto al sistema de tuberías que existe para la distribución de esta estación de bombeo:

La presión estática que debe vencer un equipo de bombeo es igual a la columna de agua en el sistema de tuberías que ejerce presión en contra del flujo que viene de las bombas. Esta columna de agua es igual a la diferencia de cotas entre el punto más alto de la red y la estación de bombeo (específicamente la cota de las bombas).

Con respecto al sistema de tuberías de la zona alta (bombas 1 y 4), la red presenta variaciones de la presión estática en función de las características de consumo en los tramos más bajos del conjunto de red y de las condiciones de operación de la estación.

La diferencia de cotas más alta entre la red y la estación de bombeo es:

$$\Delta z = \text{cota tanquilla 37} - \text{cota E/B Vegas de Petare}$$

$$\Delta z = 982 \text{ m} - 850 \text{ m}$$

$$\Delta z = 132$$

La carga estática que vencen las bombas es igual a:

$$H_e = \Delta z - \text{Presión succión} + 20 \text{ metros}$$

Los 20 metros se refieren a la presión mínima por norma que debe satisfacer el sistema de abastecimiento de agua en una vivienda.

La carga estática dependerá entonces de la presión en la tubería de succión que varía a lo largo del día, en función de la demanda que tenga el Alimentador Este. Es decir:

$$H_e (P_s) = 152 \text{ m} - P_s$$

Los días lunes y jueves el bombeo es detenido por regulaciones rutinarias. Cuando se producen estos paros relativamente prolongados de las bombas, disminuye la columna de agua en la tubería. Al día siguiente (martes y viernes respectivamente) el sistema de tuberías se encuentra vacío porque el agua fue consumida principalmente en las zonas bajas, hasta que llega a 45 metros por encima de la estación ya que no hay tomas hasta este.

Esto hace que la presión estática sea igual a 45 metros de columna de agua por la existencia de válvulas check que impiden que fluya en dirección contraria; este valor que va aumentando a medida que se va llenando nuevamente la red después de ser encendidas las bombas.

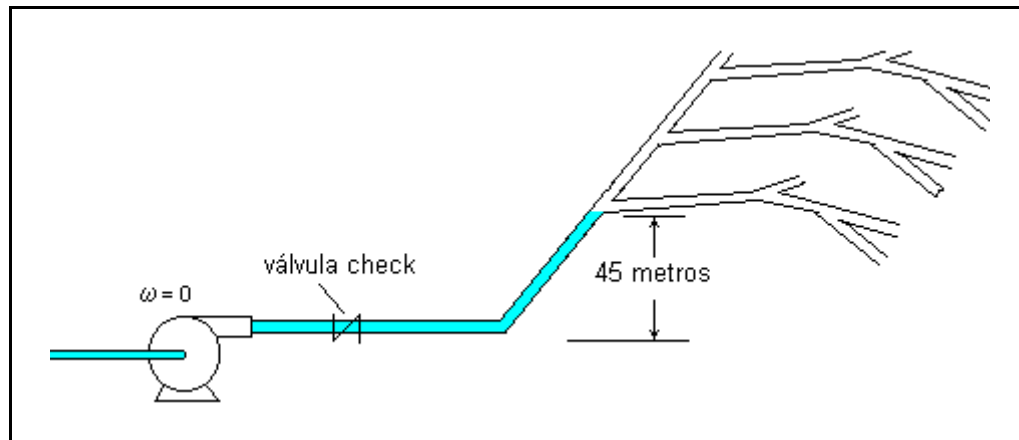


Figura 4.5 Columna de agua remanente en los días de parada

Este proceso de aumento de la presión estática es gradual a medida que se van llenando los tramos más bajos de tuberías y a medida que el consumo va disminuyendo en estas zonas. Esta disminución en el consumo de las zonas más bajas

es equivalente al aumento de las pérdidas producto del cierre de válvulas en los tramos con menor cota de la red.

Basándose en este hecho, se hace posible determinar que el fluido alcanza las zonas más altas del sistema de tuberías cuando el consumo ha disminuido en los tramos inferiores, tal como lo demuestran los cálculos realizados del análisis de red con el método lineal.

Este análisis de red se realizó en una hoja dinámica (MathCAD) con el fin de calcular los caudales de tránsito en los tramos principales de la red. Se puede observar que variando el porcentaje de pérdidas en los tramos inferiores se hace posible que el punto de mayor cota reciba el servicio de agua (ver cálculos en el apéndice 6). Este porcentaje de pérdidas se refiere a la disminución gradual en el consumo en las partes bajas, evidencia del cierre de gran cantidad de válvulas en las viviendas. Caso contrario, se observan valores de caudal negativos indicando dirección contraria del flujo; es decir, que si hubiese un tanque en el punto más alto el agua se estuviese devolviendo; o si la tubería está llena de agua, esta se devuelve hacia las zonas más bajas.

Al final de la tarde, se observa el punto de operación de las bombas con menos caudal y, por supuesto, mayor presión en la descarga. Esto se debe a que el consumo en los tramos inferiores ha disminuido (al igual que en la mayor parte de la ciudad) en las horas de la noche y empieza a haber consumo en las partes altas de la red. Esta disminución en el consumo hace que la presión aumente en las tuberías, tal como se observa en los registros de presión de la estación, referidos a la presión en la succión, es decir, en el Alimentador Este. De ahí que la curva del sistema difiere cada hora del día, como se puede apreciar en las gráficas 4.7 y 4.8.

Con respecto a la red de tuberías de la zona baja (bombas 2 y 3), la diferencia de cotas entre el punto más alto de la red y la estación de bombeo es igual a la cota de la estación de gasolina menos la cota de la estación; esto es:

$$\Delta Z = \text{cota estación gasolina} - \text{cota E/B Vegas de Petare}$$

$$\Delta Z = 892 \text{ m} - 850 \text{ m}$$

$$\Delta Z = 42 \text{ metros}$$

La carga estática total se calcula de la misma manera que para la red de la zona alta, es decir:

$$H_e = \Delta Z - \text{Presión succión} + 20 \text{ metros}$$

$$H_e = 52 \text{ m} - P_s$$

Tomando en cuenta que durante la operación de las bombas la presión en la succión varía en un rango entre 20 y 50 metros, de acuerdo a los registros, se calcula que la altura estática varía en un rango entre:

$$H_e = 52\text{m} - 20\text{m} = 32 \text{ m}$$

$$H_e = 52\text{m} - 50\text{m} = 2 \text{ m}$$

Por lo tanto, observando la gráfica 4.8, se comprueba entonces que la presión de trabajo de las bombas se debe primordialmente a la sumatoria de las pérdidas por fricción que se producen a lo largo de la red, tomando en cuenta que el caudal en la salida de las bombas y el envejecimiento de las tuberías afectan sensiblemente las pérdidas de carga para un diámetro pequeño.

Como ya se mencionó, el punto más bajo al que surte esta red se encuentra en una cota por debajo de la estación, exactamente 9 metros. Esto significa que se le

está introduciendo energía de más al sistema cuando existen alternativas de ahorro como realizar la conexión de esta red con el Alimentador Este en el tramo que pasa cercano a este lugar.

4.6.4. Consumo Eléctrico

El alto consumo de energía eléctrica que presenta la estación de bombeo es injustificado cuando existen opciones de operación de mayor ahorro de energía. El equivalente en costo por concepto de consumo eléctrico demuestra la gran cantidad de energía que se está desperdiciando en este sistema.

Los motores eléctricos de la estación operan con un factor de potencia muy cercano al valor nominal. Pero, a pesar de esto, el consumo eléctrico sigue siendo alto en relación a la implementación de otros planes de operación más económicos.

4.6.5. Costos Asociados a la Estación

Es notable el gran porcentaje de costos por mantenimiento asociados a la estación de bombeo Vegas de Petare, con respecto a las demás estaciones y tomas de las que se encarga el IMAS y esto se debe a la alta frecuencia de paros por fallas de equipos.

Por lo tanto, los motivos técnicos y económicos expuestos en este capítulo justifican una remodelación y reestructuración de la estación de bombeo de tal manera que se ajuste a las necesidades de la población y que a la vez genere beneficios debido al ahorro energético.

CAPÍTULO 5

CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE LA NUEVA ESTACIÓN

5.1. DETERMINACIÓN DE LA ZONA A SER ABASTECIDA POR LA ESTACIÓN

Como se puede observar en la gráfica 4.3, la zona baja que se surte por el bombeo se encuentra ubicada, en su mayoría, por debajo de la cota 880 msnm. Por este motivo, esta zona se va a independizar gradualmente del bombeo ya que puede ser abastecida directamente por el Alimentador Este.

El proceso de conexión de esta zona con el Alimentador Este se va a realizar en varias etapas sucesivas:

- La primera etapa de este proceso es la instalación de un tramo de tubería de 6 pulgadas que se va a empalmar con el Alimentador Este en la calle La Planada hasta el cruce con la 2ª Calle El Carmen.
- En este punto se va a empalmar una tubería de 4 pulgadas hasta la Calle El Carmen.
- Se va a instalar otra conexión con el Alimentador a esta parte de la red, directamente desde la calle El Carmen para mejorar el abastecimiento de agua en esta zona.

Se tiene planificado realizar esta instalación en conjunto con la reestructuración de la estación de bombeo. Por lo tanto, esta zona que va a quedar eliminada del bombeo.

Las subsiguientes etapas del proceso de conexión de la zona baja con el Alimentador Este serán realizadas a partir del año 2003 en adelante. Con un margen de tiempo adecuado, se va utilizar la proyección de población de toda esta zona hasta el año 2005. La población estimada para ese año va a ser considerada en el diseño de la estación, específicamente, en el gasto requerido por la red.

De acuerdo a lo anterior, para el año 2006 se tiene proyectada la completa eliminación del bombeo de la zona baja, exceptuando la parte más cercana a la estación de gasolina que deberá seguir conectada al bombeo, ya que la presión del Alimentador Este no es suficiente para alcanzar cotas por encima de los 880 msnm.

El área a ser eliminada es de aproximadamente 108.103 m². Por lo tanto, el área correspondiente a la zona proyectada para ser abastecida por la estación a partir del año 2005 es igual a:

$$A_{2006} = 254.338 \text{ m}^2 - 108.103 \text{ m}^2$$

$$A_{2006} = 146.235 \text{ m}^2$$

Esta área representa el 60 por ciento de la zona abastecida actualmente, y la zona baja representa el 40 por ciento.

5.2. DETERMINACIÓN DE LA POBLACIÓN A SER ABASTECIDA POR LA ESTACIÓN DURANTE EL PERÍODO DE DISEÑO

Como fue mencionado anteriormente, la zona a ser abastecida por la estación va a cambiar al cabo de unos años. Por lo tanto, la población que será surtida del bombeo va a variar en función de los cambios que se hagan en las interconexiones en la red y del crecimiento poblacional asociado al año que se estudie.

La proyección de la población a ser abastecida se calcula de acuerdo al criterio de la sección 4.3.2.7 (referido a la relación de población constante), tomando en cuenta la relación de población de la proyección de la Parroquia Petare (por el método parabólico), con respecto a la zona del bombeo, y multiplicando este valor por la diferencia porcentual del área.

Por ejemplo, para el año 2006 el cálculo sería el siguiente:

$$\text{Pob}_{\text{bombeo}}(2006) = \text{Pob}_{\text{Petare}}(2006) \cdot \text{Relación}(2002) \cdot (146.235 \text{ m}^2 / 254.338 \text{ m}^2)$$

$$\text{Pob}_{\text{bombeo}}(2006) = 620.883 \text{ hab} \cdot 0,02453 \cdot (0.57)$$

$$\text{Pob}_{\text{bombeo}}(2006) = 8.757 \text{ hab.}$$

De esta manera, la población a ser abastecida, proyectada por cada tres años, durante todo el período de diseño será como se muestra en la siguiente tabla:

AÑO	ÁREA ABASTECIDA (m²)	POBLACIÓN PETARE (habitantes)	POBLACIÓN ABASTECIDA (habitantes)
2002	254.338	554.328	13.598
2003	254.338	570.868	14.003
2004	254.338	587.474	14.411
2005	254.338	604.146	14.820
2006	146.235	620.883	8.757
2007	146.235	637.687	8.994
2008	146.235	654.556	9.232
2009	146.235	671.491	9.471
2010	146.235	688.491	9.710
2011	146.235	705.558	9.951
2012	146.235	722.690	10.193
2013	146.235	739.822	10.434
2014	146.235	756.954	10.676
2015	146.235	774.080	10.918
2016	146.235	791.218	11.159
2017	146.235	809.337	11.415
2018	146.235	827.456	11.670
2019	146.235	845.575	11.926
2020	146.235	862.115	12.159

Tabla 5.1 Proyección de la población que será surtida por la E/B Vegas de Petare

Para el final del período de diseño de la estación, año 2.020, la población servida por el bombeo será de 12.159 habitantes.

Observando estos valores se nota que la variación de la población servida para el final del período de diseño es menor que para el año 2.005. Esto se traduce en un cambio en el caudal bombeado por la estación a lo largo de su vida útil.

Por tal motivo, se deben tomar en cuenta como años desfavorables el 2.005 y el 2.020, para establecer los parámetros de diseño con respecto a la población que va a ser abastecida por el bombeo y, por lo tanto, el caudal requerido por esa población. Se toma el año 2005 puesto que, es para esa fecha que se va a eliminar por completo la zona baja del caudal surtido por la estación de bombeo. El año 2.020 es considerado como el más desfavorable después de haber independizado la zona baja del bombeo, y se toma en cuenta, también, por otro factor como lo es el aumento de la rugosidad en las tuberías.

5.3. CÁLCULO DEL CAUDAL MEDIO

De acuerdo a la estimación del caudal comercial establecida en la sección 4.3.5 y a la dotación asignada (200 l/p/d) se calcula el caudal medio consumido en la red de distribución como sigue a continuación:

$$Q_{\text{medio}} = (\text{Población} \cdot \text{Dotación}) + Q_{\text{comerc}}$$

Los resultados de caudal medio, obtenidos a lo largo del período de diseño, de acuerdo a los datos de población de la tabla 5.1, y en intervalos de tres años, son los siguientes:

AÑO	Población (habitantes)	Dotación (litros/per/día)	Caudal medio	
			(litros/seg)	(m ³ /hr)
2002	13.598	200	44,48	160,11
2003	14.003	200	45,42	163,49
2004	14.411	200	46,36	166,89
2005	14.820	200	47,30	170,30
2006	8.757	200	26,77	96,37
2007	8.994	200	27,32	98,35
2008	9.232	200	27,87	100,33
2009	9.471	200	28,42	102,32
2010	9.710	200	28,98	104,32
2011	9.951	200	29,53	106,33
2012	10.193	200	30,09	108,34
2013	10.434	200	30,65	110,35
2014	10.676	200	31,21	112,37
2015	10.918	200	31,77	114,38
2016	11.159	200	32,33	116,39
2017	11.415	200	32,92	118,52
2018	11.670	200	33,51	120,65
2019	11.926	200	34,11	122,78
2020	12.159	200	34,65	124,73

Tabla 5.2 Caudal medio que surtirá la estación estimado a lo largo del período de diseño

Utilizando el año 2005 como el de mayor consumo, se toma el caudal medio calculado para este año como el caudal a partir del cual se hará el diseño de la estación de bombeo; este es igual a 47,3 litros por segundo. Luego, se comprueba el diseño para las condiciones de operación en el año 2020, es decir, para el bombeo de la zona alta únicamente con su caudal máximo diario correspondiente.

5.4. PERÍODO DE DISEÑO

El sistema de bombeo de agua se proyectará de modo de atender las necesidades de una parte de la comunidad del Municipio Sucre, durante un período de 17 años, tiempo durante el cual, el sistema será altamente eficiente por la capacidad en la conducción del gasto necesitado.

Para cada uno de los componentes del sistema de abastecimiento de agua se indica el período de diseño aconsejable:

- Estación de Bombeo: se entiende por estación de bombeo a los edificios, equipos, bombas, motores, accesorios, etc.
 - *Bombas y Motores*: con la durabilidad relativamente corta y cuya vida se acorta en muchos casos por razones de un mantenimiento deficiente, conviene asignarles períodos de diseño entre 10 y 15 años.
 - *Instalaciones y Edificios*: serán diseñados tomando en cuenta las posibilidades de ampliaciones futuras y con un período de diseño de 20 a 25 años.
- Líneas de aducción: en general, un período de diseño aconsejable está entre 20 y 30 años, para tuberías de acero.
- Redes de distribución: las redes de distribución deben diseñarse para el completo desarrollo del área que sirven. Generalmente se estiman períodos de diseño de 20 a 25 años.
- Obras y demás equipos y accesorios que conformen el sistema: se les asignará períodos de diseño de acuerdo a su función y ubicación respecto a los componentes del sistema que los contiene.

5.5. UBICACIÓN DE LA NUEVA ESTACIÓN DE BOMBEO

La actual estación de bombeo se encuentra ubicada como se muestra en el siguiente diagrama, al igual que la nueva ubicación que se tiene proyectada:

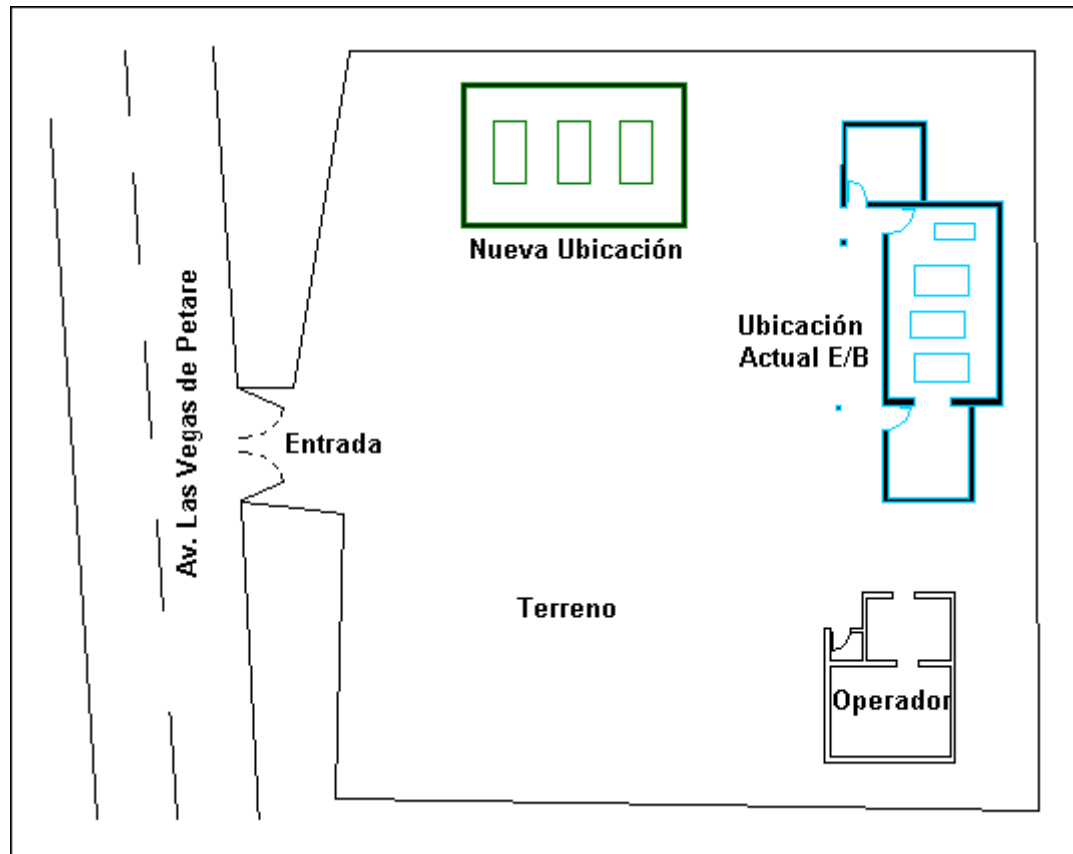


Figura 5.1 Nueva ubicación de la estación de bombeo

La nueva estación de bombeo se instalará en el mismo terreno en el que se encuentra actualmente, pero en otra ubicación tal como se observa en el diagrama anterior. El área destinada para este fin es el que se muestra en las siguientes imágenes:



Ilustración 5.1 Terreno destinado para la nueva estación de bombeo



Ilustración 5.2 Terreno destinado para la nueva estación de bombeo

Se elige esta nueva ubicación para mejorar la distribución de las estructuras con respecto al área, de tal manera que se pueda aprovechar mejor el terreno disponible. Más específicamente, se tiene proyectada la construcción de nuevas estructuras con la finalidad de prestar servicios de atención al público y cobros tarifarios.

5.6 RANGO DE VELOCIDADES DEL FLUIDO RECOMENDADAS EN LA SUCCIÓN Y EN LA DESCARGA

Las velocidades en la succión y en la descarga de estaciones de bombeo deben estar entre un rango de velocidades recomendadas, siendo estos rangos producto de la experiencia en este tipo de instalaciones. Sin embargo, estas velocidades pueden salirse de estos rangos dependiendo de cada caso en particular.

Las velocidades en la succión generalmente están comprendidas entre 1 m/s y 2,5 m/s, ó al menos deben ser superiores a 0,5 m/s, siendo ésta última la velocidad mínima recomendada para que no exista deposición en las tuberías. Se puede tomar 1,5 m/s como un valor medio representativo.

Las velocidades en la descarga son más elevadas, y pueden alcanzar el doble de estos valores, generalmente están comprendidas entre 2 m/s y 4 m/s. Las tuberías de descarga de gran extensión deben ser medidas por un criterio económico, eligiéndose el diámetro comercial más ventajoso. Para líneas de descarga cortas, o para las tuberías inmediatas de las bombas, se admiten velocidades más elevadas.

CAPÍTULO 6

DISEÑO DE LA NUEVA ESTACIÓN

6.1. CONCEPTO GENERAL

El objetivo más importante a tomar en cuenta en el diseño de la estación de bombeo es la de satisfacer las demandas de agua que se presenten en la zona a lo largo del período de diseño. Para lograr esto, se debe tomar en consideración la experiencia en otros sistemas de acueductos, producto de muchos años de estudio y que se reflejan en la normativa existente que se refiere a este tipo de proyectos.

Esta normativa especifica las condiciones del abastecimiento referentes a los caudales máximos diarios y horarios así como el tipo y cantidad de habitantes al que se abastece, factores importantes en la determinación y asignación de las dotaciones.

6.2. CÁLCULO DEL CAUDAL DE DISEÑO

Como se especificó en las bases del diseño el caudal medio (Q_m) a partir del cual se hará el diseño de la Estación de Bombeo, es de 47,3 l/s. Este sistema de bombeo, al igual que el actual, será directo contra la red de distribución debido a que ya existe tal infraestructura.

6.2.1. Consumo Máximo Diario

Para calcular el consumo máximo diario se utiliza la ecuación (3.61), con un valor de $K_1 = 1,2$. Entonces, el consumo máximo diario es:

$$Q_{\text{máx-diaro}} = 1,2 \cdot 47,3 \text{ l/s}$$

$$Q_{\text{máx-diaro}} = 56,76 \text{ l/s} = 204,3 \text{ m}^3/\text{hr}$$

6.2.2. Consumo Máximo Horario

Con respecto al consumo máximo horario, el valor de K_2 se obtiene de la ecuación (3.63), por tratarse de un grupo poblacional entre 1.000 y 100.000 habitantes, como lo especifican las normas del INOS (ver aparte 3.3.3.2). Este valor se calcula como sigue a continuación:

$$K_2 = [275 - (0,75 \cdot 14,82)] / 100$$

$$K_2 = 2,64$$

El consumo máximo horario es entonces igual a:

$$Q_{\text{máx-horario}} = 2,64 \cdot 47,3 \text{ l/s}$$

$$Q_{\text{máx-horario}} = 124,87 \text{ l/s}$$

6.2.3. Consumo en Caso de Ocurrencia de Incendio

Adicionalmente, se considera en el cálculo la condición para el caso de ocurrencia de incendio, determinándose un valor $K_3 = 180\%$ del caudal medio más el gasto requerido para el incendio, de acuerdo a la norma INOS (aparte 3.3.3.3). Por tratarse de una zona residencial y comercial, el caudal para el incendio es de 16 l/s. Por lo tanto, el caudal referido a esta condición es:

$$Q_I = 1,8 \cdot 47,3 \text{ l/s} + 16 \text{ l/s}$$

$$Q_I = 101,14 \text{ l/s}$$

6.2.4. Caudal de Diseño

El caudal de diseño a ser utilizado es el del consumo máximo diario (56,76 l/s) para el período más crítico estimado en el diseño (año 2005), siendo satisfactorio ya que se prevé la disposición de un grupo motobomba adicional al requerido que podría atender las condiciones de consumo máximo horario y de ocurrencia de incendio.

El caudal de diseño (año 2005) está conformado por el caudal requerido por la zona alta más el caudal requerido en la zona baja. La relación de estas zonas determina el caudal para cada una, como se observa a continuación:

$$Q_{\text{zona baja}} = 40 \% \text{ de } Q_{\text{diseño}} = 0.40 \cdot 56,76$$

$$Q_{\text{zona baja}} = 22,7 \text{ l/s} = 81,7 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$Q_{\text{zona alta}} = 60 \% \text{ de } Q_{\text{diseño}} = 0.60 \cdot 56,76$$

$$Q_{\text{zona alta}} = 34,06 \text{ l/s} = 122,6 \text{ m}^3/\text{hr}$$

6.3. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE BOMBEO Y ETAPAS

6.3.1. Determinación del Número de Unidades

Un criterio para determinar el número de unidades de bombeo es el del número específico de vueltas en la succión el cual se basa en datos estadísticos que describen las capacidades de la succión y las características de una primera bomba dada. Con esta descripción se puede seleccionar el número de unidades de acuerdo a las características disponibles en la succión. En este caso, la presión mínima en la succión es suficientemente alta y no se produce cavitación en la gran mayoría de las bombas centrífugas comerciales.

Entonces, para determinar el número de unidades de bombeo se utiliza un criterio práctico y tomando en cuenta las variaciones en la demanda, el cambio en la curva del sistema y, por lo tanto, en el punto de operación de la siguiente manera:

- Para un caudal mínimo entre el 30 y el 50 por ciento del caudal medio (en el año más desfavorable) se estima la operación de una sola bomba. Este caudal mínimo, definido para el consumo en las horas de menor demanda (generalmente en la noche), es igual a:

$$Q_{\text{mín}} = 0.3 \cdot 47,3 \text{ l/s}$$

$$Q_{\text{mín}} = 18,9 \text{ l/s}$$

- Para el caudal medio (47,3 l/s) se especifica la operación de dos bombas en paralelo con el fin de suplir esta exigencia del sistema.
- Para el caudal máximo diario (56,76 l/s) se especifica la utilización de dos bombas en paralelo.
- Para el caso de ocurrencia de incendio (101 l/s) se permite la utilización de un grupo motobomba adicional, en paralelo a los dos que suplen el caudal medio. Esta bomba adicional corresponde al equipo alterno que debe incluirse para los casos en que falle uno de los otros dos grupos, o en caso de mantenimiento.

Cabe destacar que el caudal máximo diario corresponde al día de máximo consumo del año más desfavorable, y la constante de diseño (K_1), con que se calcula este valor, se ha relacionado con el caudal medio de acuerdo a las estadísticas locales.

Adicionalmente, el funcionamiento de las tres bombas al mismo tiempo, va a ocurrir en casos excepcionales mas no en condiciones normales. El caso más crítico se puede dar el día de máximo consumo, del año más desfavorable, aunado a la ocurrencia de un incendio. Para esta situación se pondrían en funcionamiento los tres grupos al mismo tiempo.

Por estos motivos, la especificación de dos unidades de bombeo más una adicional de reserva, todas con características idénticas, hace que se satisfagan condiciones de seguridad y flexibilidad importantes en este tipo de instalaciones.

Con la utilización de dos bombas en condiciones normales de funcionamiento y con una bomba adicional, para casos de emergencia, se tiene una capacidad instalada, con respecto al caudal de diseño, igual a:

Capacidad instalada = 2 bombas (caudal diseño) + 1 bomba (emergencia)

Capacidad instalada = 100 % + 50%

Capacidad instalada = 150 %

6.3.2. Determinación del Número de Etapas

Para la determinación del número de etapas se siguió la siguiente secuencia de cálculos con los datos de presión y caudal de cada bomba iguales a 230 m.c.a. y 28 l/s respectivamente:

- Con el ábaco del apéndice 18 se obtuvo el n_q para el máximo rendimiento correspondiente al caudal que manejará cada bomba, es decir:

$$Q = \frac{207 \text{ m}^3}{2 \text{ hr}} = 28.75 \frac{\text{L}}{\text{s}} \quad \Rightarrow \quad n_q = 0.732$$

- De la ecuación (3.77) se despeja el término de velocidad angular y se calcula la velocidad de giro de la bomba:

$$\omega := \frac{Nq \cdot (g \cdot H)^{0.75}}{\sqrt{Q}} \quad \omega = 1413 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad N = 2 \cdot \pi \cdot \omega = 532672 \frac{\text{rev}}{\text{min}}$$

- Tomando en cuenta que la velocidad es excesivamente elevada para el valor de máximo rendimiento, se calculó el n_q para una velocidad de 3500 rpm (ecuación 3.77):

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{3500}{\text{min}} = 366.5 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad \Rightarrow \quad n_q = \frac{\omega \cdot \sqrt{Q}}{(g \cdot H)^{0.75}} = 0.19 \quad \Rightarrow \quad \eta = 0.61$$

- Para conseguir un mejor rendimiento se tomó otro valor de n_q aumentado así el número de etapas:

$$n_q = 0.366 \quad \Rightarrow \quad \eta = 0.70 \quad \Rightarrow \quad H = \left(\frac{\omega \cdot \sqrt{Q}}{N_q} \right)^{\frac{4}{3}} \cdot g^{-1} = 95.88\text{m}$$

$$N^{\circ}\text{etapas} = \frac{230\text{m}}{95.88\text{m}} = 2.399 \quad \Rightarrow \quad N^{\circ}\text{etapas} = 3$$

- Se realizó nuevamente el cálculo para una mejor eficiencia:

$$n_q = 0.53 \quad \Rightarrow \quad \eta = 0.74 \quad \Rightarrow \quad H = \left(\frac{\omega \cdot \sqrt{Q}}{N_q} \right)^{\frac{4}{3}} \cdot g^{-1} = 58.52\text{m}$$

$$N^{\circ}\text{etapas} = \frac{230\text{m}}{58.52\text{m}} = 3.93 \quad \Rightarrow \quad N^{\circ}\text{etapas} = 4$$

- Se considera este valor de rendimiento y número de etapas como satisfactorio ya que la mayoría de las bombas comerciales para este tipo de sistemas operan en este rango.

6.4. DISEÑO DEL SISTEMA DE SUCCIÓN Y DE DESCARGA

En el siguiente diagrama se puede observar la distribución de tuberías, accesorios y bombas que van a conformar la nueva estación de bombeo.

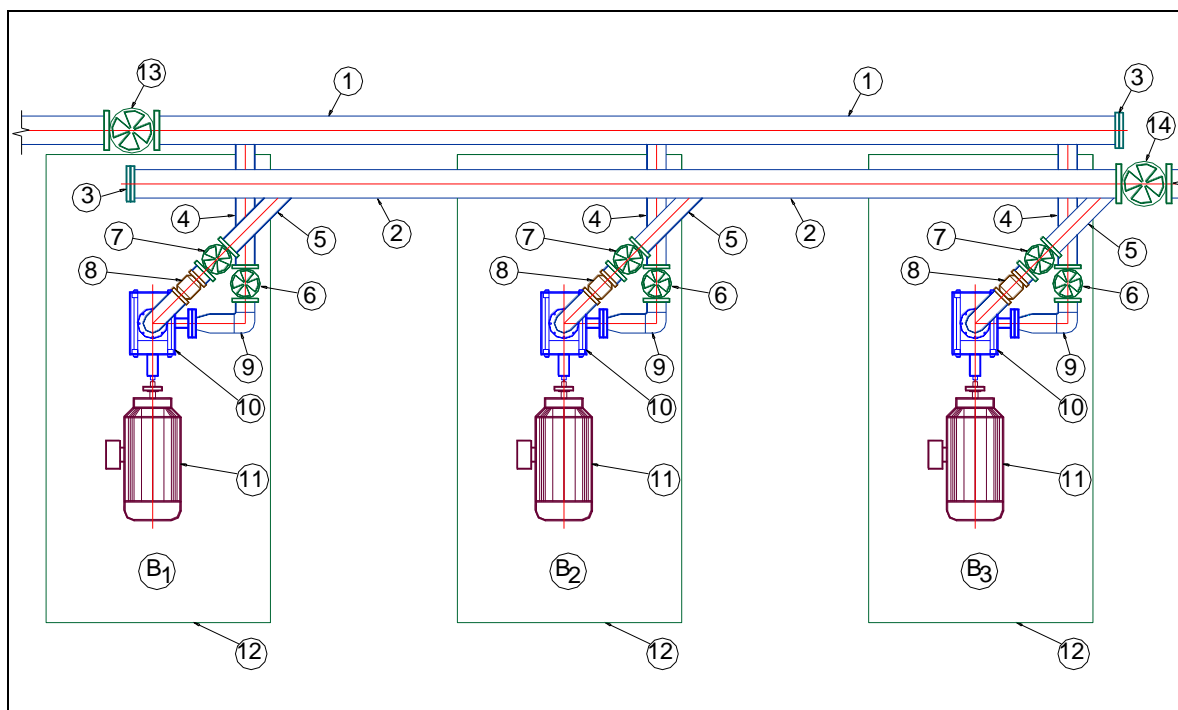


Figura 6.1 Esquema general de la estación de bombeo

1	Tubería de succión / distribuidora (múltiple de succión)
2	Tubería de descarga / recolectora (múltiple de descarga)
3	Brida ciega y contrabrida
4	Tubería de succión de cada bomba
5	Tubería de descarga de cada bomba
6	Válvula de paso succión (válvula compuerta)
7	Válvula de paso descarga (válvula compuerta)
8	Válvula de retención (válvula check)
9	Codo 90°
10	Bomba
11	Motor eléctrico (motor trifásico de inducción)
12	Fundación
13	Válvula de reparación múltiple succión (válvula compuerta)
14	Válvula de reparación múltiple descarga (válvula compuerta)

Tabla 6.1 Referencias del esquema general de la figura (6.1)

Los múltiples de succión y descarga se diseñan con el mismo diámetro en toda su extensión, y no del tipo telescópico, tomando en consideración que la altura estática y las pérdidas de energía en la red de distribución superan ampliamente las que se producen en estos tramos. Adicionalmente, las fluctuaciones constantes en el consumo de agua y, por lo tanto, en el punto de operación de las bombas, hacen que estos cambios en el caudal ejerzan un efecto despreciable de pérdidas en estos sectores.

Para la selección de los diámetros de cada tramo de tubería en la estación de bombeo se utilizan criterios hidráulicos y económicos adoptando la mejor solución que cumpla con los parámetros establecidos para cada aspecto.

6.4.1. Diámetros en los Sistemas de Succión y Descarga

De acuerdo con la ecuación (3.10) se tiene la relación:

$$V = \frac{Q}{A}$$

donde:

V: velocidad media del flujo

Q: caudal que pasa por el conducto

A: área de la sección transversal ($A = 0,25 \cdot \pi \cdot \text{Diámetro}^2$)

Utilizando el valor del caudal de diseño (56,76 l/s) y los diámetros internos estandarizados para tubería nueva de hierro galvanizado, considerando un aumento lineal de la rugosidad absoluta, se realizó la siguiente tabla:

Diámetro Nominal (pulgadas)	Diámetro Interno (pulgadas)	Área Sección Transversal (cm ²)	Velocidad Media (m/s)
3	3,068	47,694	11,9
3½	3,548	63,786	8,9

4	4,026	82,131	6,91
5	5,047	129,07	4,4
6	6,065	186,388	3,05
8	7,981	322,754	1,76
10	10,020	508,736	1,12

Tabla 6.2 Velocidad media para diámetros tentativos en múltiple de succión y descarga

Estas velocidades están referidas a la tubería del múltiple de succión y al múltiple de descarga, ya que se está calculando con el caudal de diseño antes mencionado.

En la selección del diámetro de los tramos individuales de succión y descarga de cada bomba se realiza una tabla similar a la anterior pero tomando en cuenta que el caudal para este caso es la mitad del caudal de diseño, es decir, 28,38 litros por segundo. Los resultados son los siguientes:

Diámetro Nominal (pulgadas)	Diámetro Interno (pulgadas)	Área Sección Transversal (cm²)	Velocidad Media (m/s)
3	3,068	47,694	5,95
3½	3,548	63,786	4,45
4	4,026	82,131	3,46
5	5,047	129,07	2,2
6	6,065	186,388	1,52
8	7,981	322,754	0,88
10	10,020	508,736	0,56

Tabla 6.3 Velocidad media para diámetros tentativos en tramos individuales de succión y descarga

6.4.1.1. Diámetro del Múltiple de Succión

Para seleccionar el diámetro del múltiple de succión D_1 se debe tener en cuenta el rango de velocidades en la succión de las bombas, recomendado en las consideraciones para el diseño, que oscila entre 1 y 2,5 m/s.

De acuerdo a esta consideración y con los resultados de la tabla 6.2, se determinó el diámetro más adecuado para la tubería de succión distribuidora igual a 8 pulgadas cuya velocidad media es 1,76 metros por segundo, ya que para 6 pulgadas la velocidad en la succión está por encima del rango recomendado, y para 10 pulgadas los costos aumentan innecesariamente.

6.4.1.2. Diámetro del Múltiple de Descarga

Para determinar el diámetro más apropiado en el múltiple de descarga o D_2 , se utiliza la tabla 6.2 tomando en consideración el rango de velocidades recomendado para este caso, que oscila entre 2 y 4 m/s.

El diámetro más adecuado para este tramo de tubería es de 6 pulgadas con una velocidad de 3,05 metros por segundo. Para un diámetro comercial menor, la velocidad es muy alta, y por encima los costos son más elevados.

6.4.1.3. Diámetro de los Tramos Individuales en la Succión de cada Bomba

De acuerdo a los resultados de la tabla 6.3, se puede determinar el diámetro para las tuberías de succión individuales de cada bomba D_4 , siendo el más adecuado de 5 pulgadas con una velocidad de 2,2 m/s que se encuentra dentro de los rangos recomendables para tuberías en esta ubicación.

6.4.1.4. Diámetro de los Tramos Individuales en la Descarga de cada Bomba

El diámetro D_5 de la tubería de descarga individual para cada bomba se selecciona de la tabla 6.3 el de 4 pulgadas como el más apropiado porque cumple con las restricciones de velocidad del flujo en la descarga con 3,46 m/s.

6.4.2. Verificación de las Velocidades en las Tuberías de Succión y Descarga para el año 2020

La selección de los diámetros D_1 y D_4 es válida tanto para el caudal de diseño como para el caudal máximo diario correspondiente a la población en el año 2020, tal como se explica a continuación.

El caudal medio calculado para el año 2020 es 34,65 l/s (ver tabla 5.2), y el caudal máximo diario, de acuerdo a la ecuación (3.61) es igual a:

$$Q_{\text{máx-diario}(2020)} = 1,2 \cdot 34,65 \text{ l/s}$$

$$Q_{\text{máx-diario}(2020)} = 41,58 \text{ l/s} = 149,7 \text{ m}^3/\text{hr}$$

La velocidad media asociada a este caudal (41,58 l/s), para el caso del diámetro D_1 de 8 pulgadas, y la velocidad media asociada a la mitad de éste (17,11 l/s) para el caso del diámetro D_4 de 5 pulgadas, de acuerdo a la ecuación (3.10), corresponden a:

Diámetro Nominal (pulgadas)	Diámetro Interno (pulgadas)	Área Sección Transversal (cm ²)	Velocidad Media (m/s)
5	5,047	129,07	1,61
8	7,981	322,754	1,29

Tabla 6.4 Velocidad media en el sistema de succión para el año 2020

Se constata entonces que estos valores de velocidad se encuentran dentro del rango recomendado entre 1 y 2,5 m/s.

Las velocidades en el sistema de descarga en el año 2.020, asociadas a los caudales de tránsito por estos tramos, se calcularon de la misma manera que para el cálculo de los diámetros en la succión. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Diámetro Nominal (pulgadas)	Diámetro Interno (pulgadas)	Área Sección Transversal (cm²)	Velocidad Media (m/s)
4	4,026	82,131	2,53
6	6,065	186,388	2,23

Tabla 6.5 Velocidad media en el sistema de descarga para el año 2020

Las velocidades media del flujo en las tuberías de 4 y 6 pulgadas se encuentran dentro del rango recomendado para conducciones en la descarga.

Este rango de velocidades es producto de la experiencia y no determina una regla al respecto ya que cada caso posee condiciones particulares. Sin embargo, en esta selección de diámetros se prueba que las velocidades medias en cada tramo de tubería se encuentran dentro de estos rangos.

El agua que bombea la estación Vegas de Petare proviene de la Estación 2-5 (La Guairita), específicamente de la Planta de Tratamiento; por lo tanto, el efecto de sedimentación por bajas velocidades, en caso de que éstas ocurran, será bastante atenuado.

6.4.3. Resultados de la Selección de Diámetros

En resumen, los diámetros seleccionados para cada tramo de tubería en la estación de bombeo se pueden observar en la siguiente tabla, que incluye además el número de Reynolds Re (ecuación 3.12):

Tramo de tubería	Diámetro (pulgadas)	Caudal (l/s)	Velocidad Media (m/s)	Nº de Reynolds Re
D ₁	8	56,76	1,76	393.707
		41,58	1,29	288.413
D ₂	6	56,76	3,05	518.083
		41,58	2,23	379.526
D ₄	5	28,38	2,2	311.291
		20,79	1,61	228.039
D ₅	4	28,38	3,46	390.235
		20,79	2,53	285.870

Tabla 6.6 Diámetros en el sistema de succión y descarga de la estación

Para el cálculo del número de Reynolds se toma la viscosidad cinemática del agua igual a $0,9055 \text{ m}^2/\text{s}$ correspondiente a la temperatura de 25° C . En todos los casos, se verifica que el flujo es turbulento ya que Re es mayor que el $Re_{\text{crít}} = 2.000$ (tuberías con paredes ásperas).

6.5. DETERMINACIÓN DE LA CARACTERÍSTICA DEL SISTEMA

6.5.1. Pérdidas por Fricción en la Estación de Bombeo

Las pérdidas por fricción para el sistema de tuberías y accesorios en la estación de bombeo se calcularon de acuerdo al diagrama presentado en la siguiente figura:

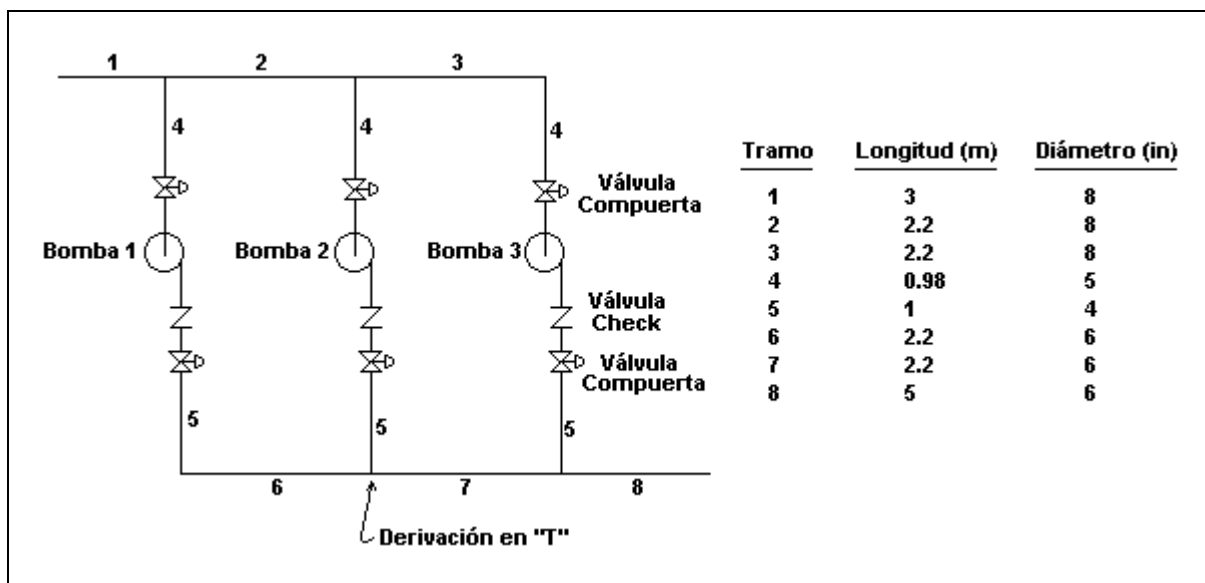
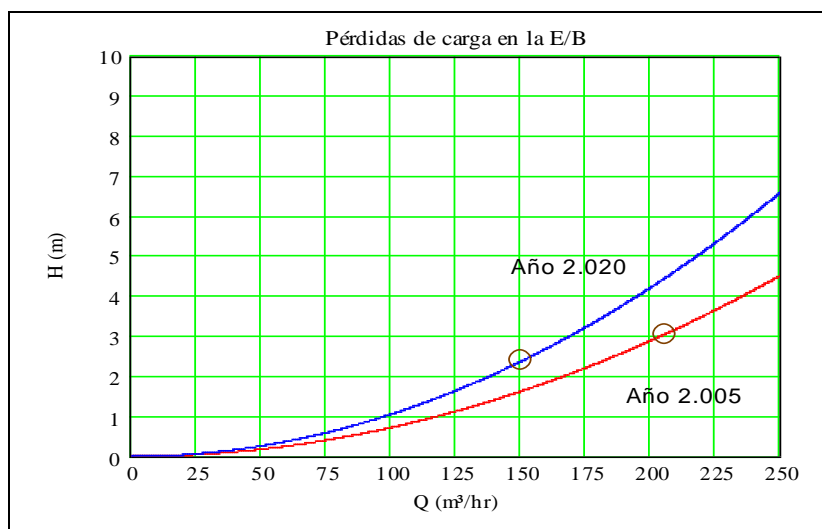


Figura 6.2 Detalles del sistema de tuberías en la estación

El cálculo de pérdidas de carga en la estación de bombeo se realizó para tubería nueva de hierro galvanizado por el método de Swami, considerando los caudales de tránsito en cada tubería de acuerdo a los gastos estimados para los años 2005 y 2020.

Como resultado de los cálculos realizados (ver apéndice 8), se obtuvieron las curvas de pérdidas por fricción para los años en estudio tal como se observa en la siguiente gráfica:



Gráfica 6.1 Curva de pérdidas en sistema de succión y descarga

Para el caudal de diseño del año 2005 de 205 m³/hr se generan pérdidas por fricción, en el sistema de succión y descarga en la estación de bombeo, iguales a 3,05 metros; y para el año 2020 con un caudal máximo diario de 149 m³/hr se pierden por fricción 2,39 metros de columna de agua.

6.5.2. Rugosidad de las Tuberías de la Red de Distribución

La estimación de la rugosidad de las tuberías de la red se realizó de acuerdo a la suposición del crecimiento lineal de la rugosidad (punto 3.2.6 referente al envejecimiento de tuberías), considerando que las condiciones de operación que pueden afectar este cálculo (tal como las propiedades físico químicas del agua) se mantienen igual que en el presente.

De acuerdo a esto, suponiendo un aumento lineal de la rugosidad absoluta de 0,055 milímetros por año, para los dos tipos de material de las tuberías (hierro fundido dúctil y hierro galvanizado), se tienen los siguientes valores:

Año	Rugosidad Absoluta (mm)	
	Hierro fundido dúctil	Hierro galvanizado
2005	1,525	1,417
2010	1,800	1,692
2015	2,075	1,967
2020	2,350	2,242

Tabla 6.7 Rugosidad absoluta de las tuberías de la red de distribución

La rugosidad absoluta prevista para el año 2020 de ambos tipos de tubería, representa un aumento de más de 9 veces el valor de la rugosidad absoluta inicial. Esto equivale a un aumento del factor de fricción, calculado según la ecuación (3.20), de 2 veces para el caso del hierro fundido dúctil y de 2,4 veces la de hierro galvanizado.

6.5.3. Curva Característica del Sistema

La característica del sistema depende fundamentalmente de la configuración de la red de distribución. Las tuberías que conforman actualmente la red de distribución fueron diseñadas para un número de habitantes menor al que va a ser surtido en el año 2020, y el valor de la rugosidad de éstas corresponde al de tuberías con 20 años de servicio aproximadamente.

Tomando estas consideraciones, se decidió realizar la estimación de la característica del sistema de acuerdo a varias alternativas con respecto a la configuración de la red, a saber:

- Opción A: estimar la curva característica del sistema con la red de distribución actual, es decir, sin ninguna modificación desde la estación de bombeo (Fig.6.3).

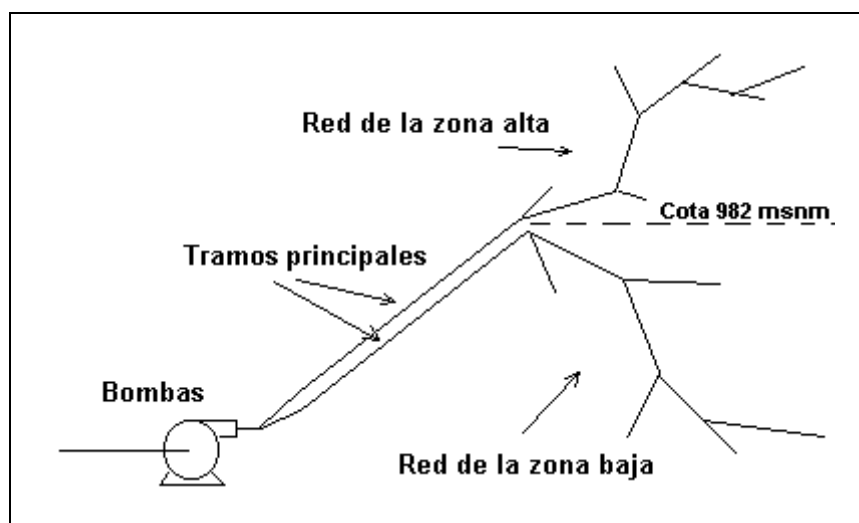


Figura 6.3 Red de distribución actual

- Opción B: estimar la curva característica del sistema con la red de distribución actual, pero realizando la conexión del tramo principal de la red de la zona alta con una tubería adicional en paralelo (Fig.6.4). Esta tubería constituye el ramal principal que conduce el agua desde la estación de bombeo hasta la estación de gasolina (punto 2 de la tabla

4.3). Sólo se considera en este caso la red de la zona alta puesto que la zona baja se va a independizar de la estación y no se justificarían los costos.

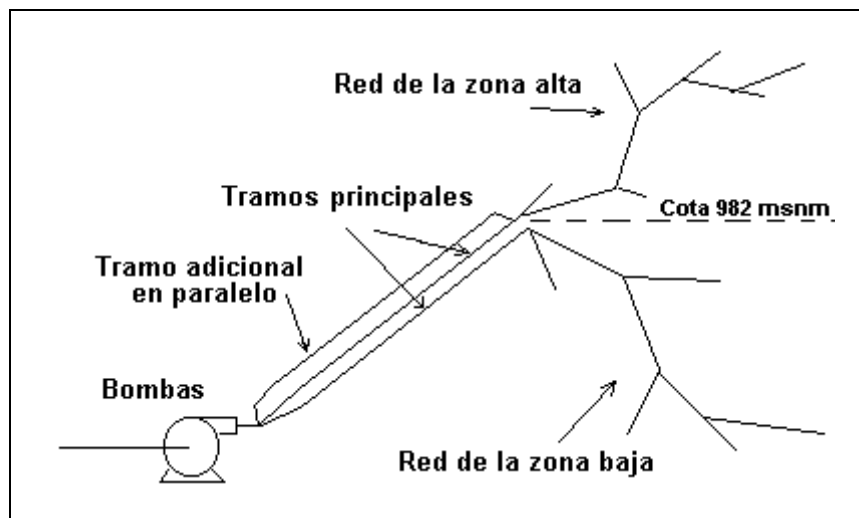


Figura 6.4 Red de distribución agregando tramo en paralelo a la red zona alta

- Opción C: estimar la curva característica del sistema con la red de distribución actual, sustituyendo los tramos principales de las redes de la zona alta y la baja por una sola tubería (Fig.6.5).

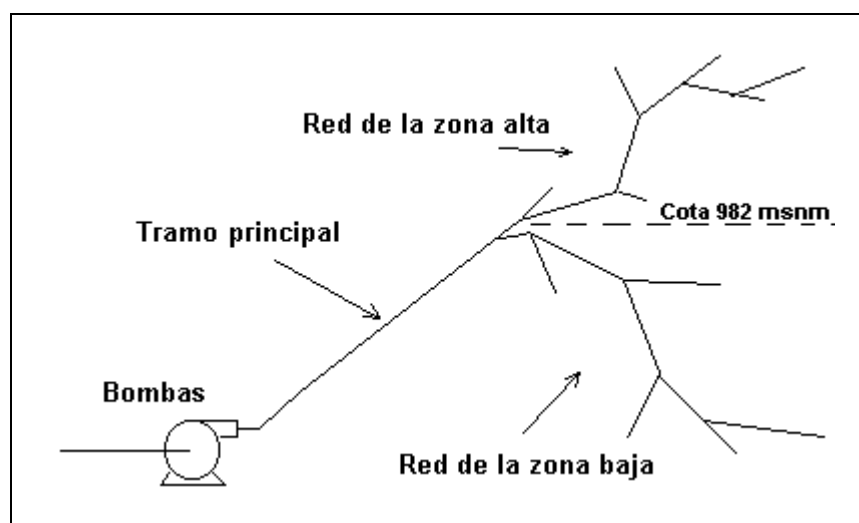


Figura 6.5 Red de distribución sustituyendo los tramos principales

En cada alternativa se presentan requerimientos de presión diferentes que conllevan a seleccionar equipos de bombeo con diferentes capacidades, reflejándose luego en mayor o menor costo.

En el cálculo de cada alternativa se tendrán dos sistemas de red:

- El primero está representado por la red de la zona alta y la zona baja hasta el año 2005.
- El segundo será igual a la red de la zona alta, a partir del año 2.006 hasta el año 2.020.

Para estas dos condiciones de operación que tendrán los equipos de bombeo se realizó el análisis de red para cada alternativa, calculando las capacidades de los equipos de bombeo. Luego, se selecciona la alternativa con menores requerimientos y que genere menores costos de inversión.

6.5.3.1. Curvas del Sistema - Opción A

Con el análisis de red que se realizó en la hoja dinámica de MathCAD, se determinaron varios puntos pertenecientes a cada red de tuberías (zona alta y zona baja) para el año 2.005 y el año 2.020 (ver apéndice 9).

Para cada caso, se tomó en cuenta el cambio de la rugosidad absoluta, la presión mínima en la succión proveniente del Alimentador Este (según la estadística de registros del IMAS) y el diámetro de la tubería de descarga aguas arriba.

Considerando el aumento de la rugosidad absoluta y tomando la presión en la succión de 20 m.c.a., se calcularon las presiones y caudales asociados a la red tomando en cuenta los tramos principales para el año 2.005, con las soluciones que se muestran en el apéndice 9. Los resultados son los siguientes:

Red de la zona baja. Tubería principal 3 pulgadas. Año 2.005				
Altura (m)	181	210	250	300
Caudal (m ³ /hr)	68,38	73,41	78,47	83,80

Red de la zona alta. Tubería principal 4 pulgadas. Año 2.005				
Altura (m)	180	210	250	300
Caudal (m ³ /hr)	88,45	99,23	111,75	125,5

Tabla 6.8 Curva del sistema de la red en el año 2005. Opción A

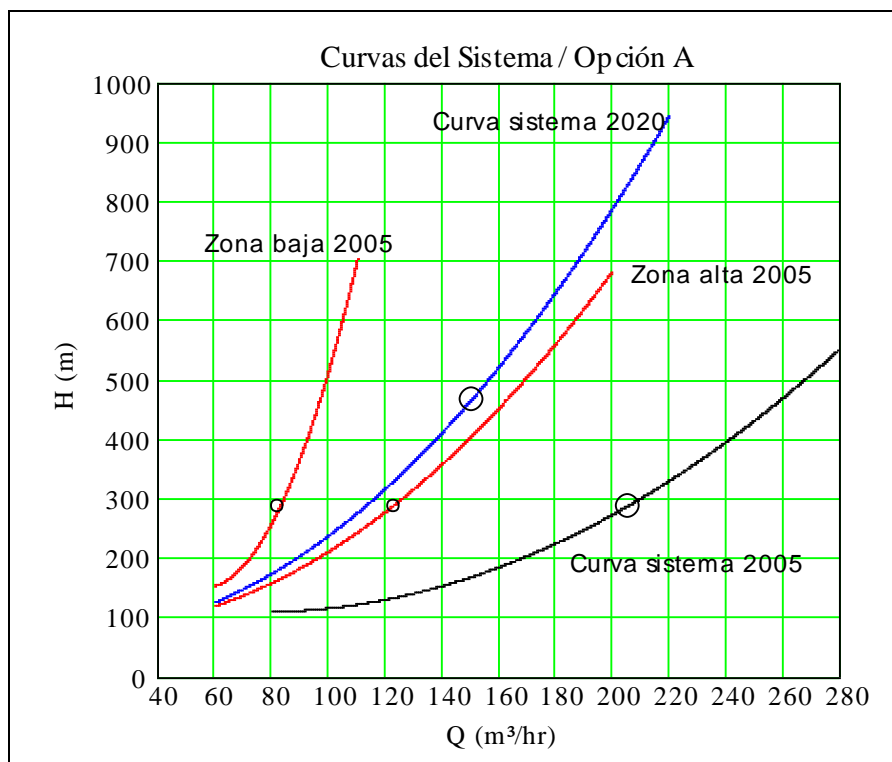
Como ya se mencionó, se tiene proyectado que la zona baja sea independizada del bombeo de la estación Vegas de Petare y se interconecte directamente con el Alimentador Este. De esta manera, para el año 2.020, final del período de diseño, sólo va a estar conectado a la estación de bombeo el sistema de tuberías que surte la parte alta del Barrio Unión, Subida El Carpintero, etc.

Con esta acotación, se muestran los resultados del análisis de esa red para el año 2.020 considerando la rugosidad para esa fecha, mediante el mismo procedimiento anterior con los siguientes resultados:

Red de la zona alta. Tubería principal 4 pulgadas. Año 2.020				
Altura (m)	180	210	250	300
Caudal (m ³ /hr)	103,29	119,51	137,41	156,76

Tabla 6.9 Curva del sistema de la red en el año 2020. Opción A

Graficando las curvas (gráfica 6.2) se pueden observar las presiones requeridas por el sistema para poder surtir el caudal estimado para los años 2005 y 2020 (años críticos). Para el caudal de diseño de cada red se tienen presiones muy elevadas considerando que, un buen porcentaje de éstas son debidas a pérdidas por fricción en la tubería.



Gráfica 6.2 Curvas del sistema en los años 2005 y 2020. Opción A

Los puntos de operación son los siguientes:

- Año 2005:
 - $Q = 205 \text{ m}^3/\text{hr}$
 - $H = 288 \text{ m.c.a.}$

- Año 2020:
 - $Q = 150 \text{ m}^3/\text{hr}$
 - $H = 467 \text{ m.c.a.}$

Para el año 2005 se cumple con los requerimientos de caudal de cada zona con $80 \text{ m}^3/\text{hr}$ para la zona baja y $123 \text{ m}^3/\text{hr}$ para la zona baja.

Capacidad del Equipo de Bombeo – Opción A

Para el cálculo de la potencia requerida en el eje de la bomba se tomó en cuenta lo siguiente:

- Punto de operación de la curva del sistema del año 2020.
- Rendimiento de 70 por ciento.
- Peso específico del agua $9780 \text{ kg}/(\text{ms})^2$ (25° C).
- Se considera la operación dos bombas en paralelo.

Utilizando la ecuación (3.67) se obtiene lo siguiente:

$$P_b = \frac{9780 \cdot \frac{\text{kg}}{(\text{m}\cdot\text{s})^2} \cdot \frac{150 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}}{2} \cdot 467 \cdot \text{m}}{0.7}$$

$$P_b = 182.29 \text{ hp}$$

La potencia que tendrán los motores eléctricos se calcula según la ecuación (3.79). Para este caso, se consideró el rendimiento mecánico igual a 85 por ciento. Por lo tanto, la capacidad de cada motor eléctrico es igual a:

$$P_o = \frac{182.286 \text{ hp}}{0.85}$$

$$P_o = 214.45 \text{ hp}$$

6.5.3.2. Curvas del Sistema - Opción B

En esta alternativa, se consideró la colocación de una tubería en paralelo con el tramo principal de la red de la zona alta, desde la estación de bombeo hasta la estación de gasolina, lo que representa 137 metros de tubería adicional (ver Fig. 6.4). Para el cálculo se supuso una tubería de hierro galvanizado nueva de 5 pulgadas de diámetro.

El análisis de red se realizó de la misma manera que la opción A, incluyendo el método de Hardy-Cross para las tuberías en paralelo del tramo principal (ver apéndice 10). Los cálculos arrojaron los siguientes resultados de las redes de la zona alta y baja para el año 2005 y la red de la zona alta para el año 2020:

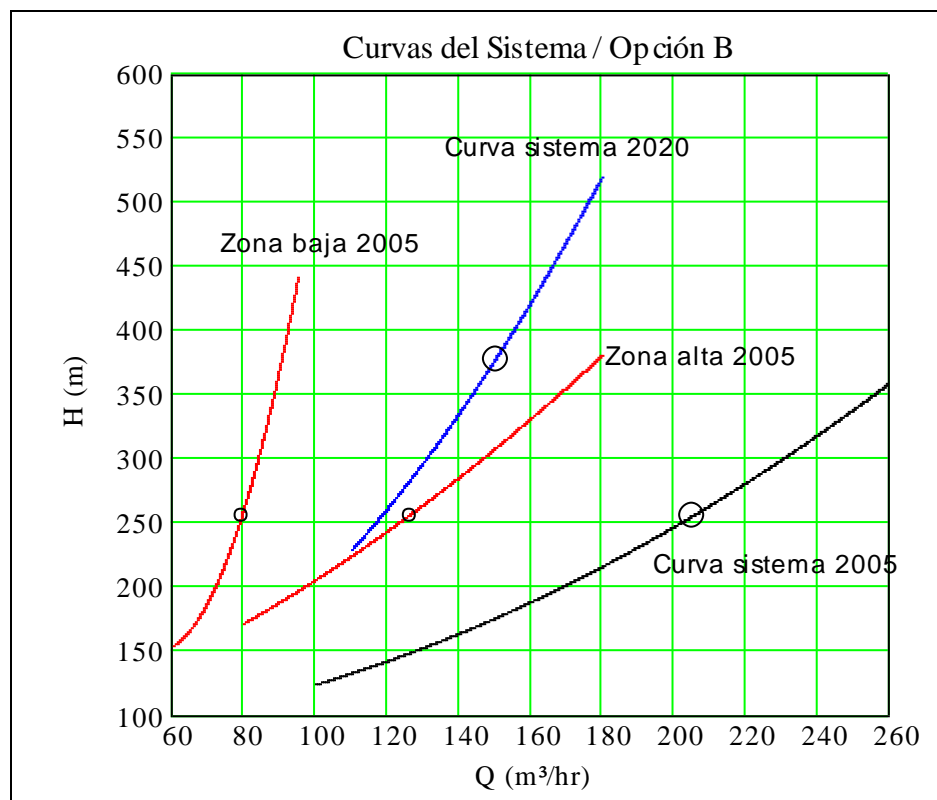
Red de la zona baja. Tubería principal 3 pulgadas. Año 2.005				
Altura (m)	180	210	250	300
Caudal (m ³ /hr)	68,38	73,41	78,47	83,80

Red de la zona alta. Tuberías principales en paralelo de 4 y 5 pulgadas. Año 2.005				
Altura (m)	180	210	250	300
Caudal (m ³ /hr)	85,13	102,35	126,16	146,43

Red de la zona alta. Tuberías principales en paralelo de 4 y 5 pulgadas. Año 2.020				
Altura (m)	180	210	250	300
Caudal (m ³ /hr)	92,80	103,70	116,54	130,73

Tabla 6.10 Curvas del sistema de la red en los años 2005 y 2020. Opción B

Las gráficas correspondientes a estas curvas son las siguientes:



Gráfica 6.3 Curvas del sistema en los años 2005 y 2020. Opción B

Los puntos de operación son:

- Año 2005:
 - $Q = 205 \text{ m}^3/\text{hr}$
 - $H = 255 \text{ m.c.a.}$

- Año 2020:
 - $Q = 150 \text{ m}^3/\text{hr}$
 - $H = 378 \text{ m.c.a.}$

Capacidad del Equipo de Bombeo – Opción B

Con las mismas consideraciones que en la opción A, se calculó la potencia requerida por la bomba, de acuerdo a la ecuación (3.67):

$$P_b = \frac{9780 \cdot \frac{\text{kg}}{(\text{m}\cdot\text{s})^2} \cdot \frac{150 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}}{2} \cdot 378 \cdot \text{m}}{0.7}$$

$$P_b = 147.55\text{hp}$$

La capacidad de los motores eléctricos para cumplir con los requerimientos de las bombas será entonces (ecuación 3.79):

$$P_o = \frac{147.55\text{hp}}{0.85}$$

$$P_o = 173.58\text{hp}$$

6.5.3.3. Curvas del Sistema - Opción C

En este caso, ambas tuberías principales de cada red fueron sustituidas por una sola tubería desde la estación de bombeo hasta la estación de gasolina con una longitud de 137 metros (ver Fig. 6.5).

El análisis de red se realizó considerando la tubería de hierro galvanizado de 6 pulgadas de diámetro (ver apéndice 11).

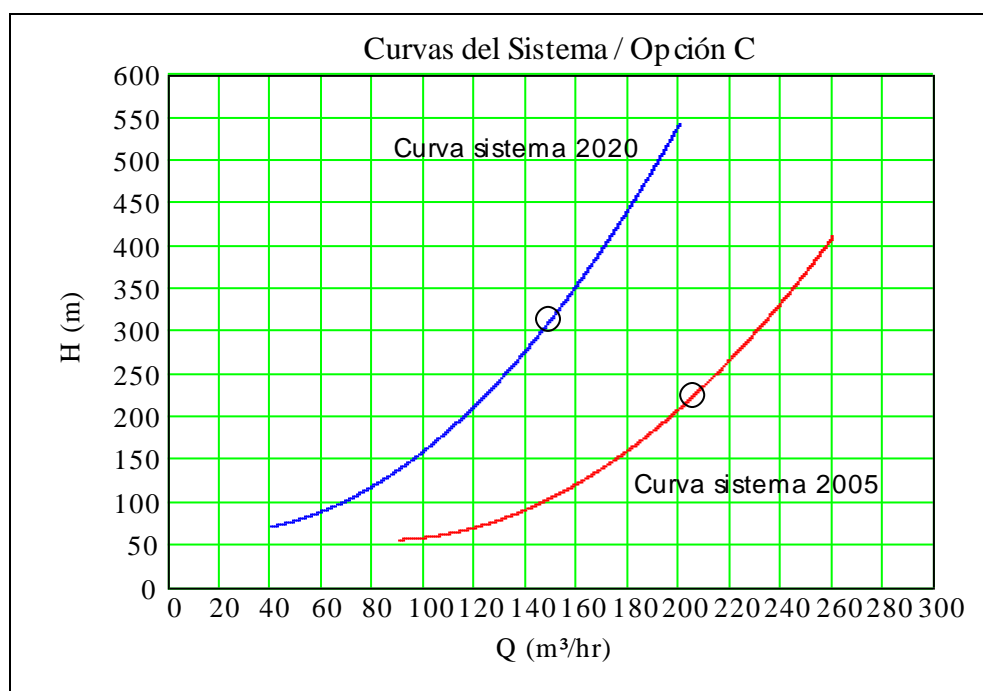
Los resultados correspondientes a la curva del sistema equivalente al sistema de tuberías son los siguientes:

Red de la zona baja y la zona alta. Tubería principal 6 pulgadas. Año 2.005				
Altura (m)	180	210	250	300
Caudal (m ³ /hr)	188,1	200,2	214,0	230,0

Red de la zona alta. Tubería principal 6 pulgadas. Año 2.020				
Altura (m)	180	210	250	300
Caudal (m ³ /hr)	107,7	118,6	131,5	145,8

Tabla 6.11 Curvas del sistema de la red en los años 2005 y 2020. Opción C

Las curvas se pueden observar en el siguiente gráfico:



Gráfica 6.4 Curvas del sistema en los años 2005 y 2020. Opción C

Los puntos de operación en este caso son los siguientes:

- Año 2005:
 - $Q = 205 \text{ m}^3/\text{hr}$
 - $H = 224 \text{ m.c.a.}$

- Año 2020:
 - $Q = 150 \text{ m}^3/\text{hr}$
 - $H = 318 \text{ m.c.a.}$

Capacidad del Equipo de Bombeo – Opción C

La potencia en el eje de cada bomba se calcula con las mismas consideraciones que en los dos casos anteriores (ecuación 3.67); ésta será igual a:

$$P_b = \frac{9780 \cdot \frac{\text{kg}}{(\text{m}\cdot\text{s})^2} \cdot \frac{150 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}}{2} \cdot 312 \cdot \text{m}}{0.7}$$

$$P_b = 121.78\text{hp}$$

La capacidad de los motores eléctricos será en este caso igual a (ecuación 3.79):

$$P_o = \frac{121.78\text{hp}}{0.8}$$

$$P_o = 143.28\text{hp}$$

6.5.3.1. Selección de la alternativa más conveniente

Los cálculos realizados en cada opción referidos a la capacidad de los equipos, se resumen en la siguiente tabla:

OPCIÓN	CAPACIDAD DE LAS BOMBAS	CAPACIDAD DE LOS MOTORES
A	182 hp	225 hp
B	148 hp	182 hp
C	122 hp	143 hp

Tabla 6.12 Capacidad del equipo necesario en cada opción

En la opción A, las pérdidas por fricción representan más del 200 por ciento de la altura estática del sistema de 132 m.c.a., lo cual se debe evitar si existen otras alternativas de ahorro de energía como la conexión de tramos adicionales que disminuyan las pérdidas por fricción en tramos importantes, o la sustitución de estos tramos por tuberías nuevas de mayor diámetro.

Esta elevada pérdida de energía se refleja en los requerimientos del equipo de bombeo para cumplir con las necesidades de agua de la población. La potencia de los motores eléctricos en la opción A es de 215 caballos de fuerza, lo que representa una inversión relativamente alta para este sistema.

En la opción B se observa una disminución de las pérdidas por fricción con respecto a la opción A, por lo que disminuyen los requerimientos de los equipos y por consiguiente, los costos asociados a éstos. La capacidad de cada motor eléctrico debe ser de al menos 174 caballos de fuerza.

Sin embargo, se puede notar que la opción C presenta puntos de operación con menores requerimientos entre las tres alternativas, con una capacidad de los motores eléctricos de 122 caballos de fuerza como mínimo.

Las ventajas de la solución propuesta en la alternativa C con respecto a las otras dos A y B, son las siguientes:

- Se puede realizar la instalación de la tubería sin necesidad de interrumpir el servicio, sino tan sólo en las etapas finales cuando se conecte a cada red de distribución.
- Los costos relacionados con la instalación de esta tubería son similares a los costos de instalación del tramo en paralelo de la opción B, con la salvedad de los costos por el diámetro de la tubería.
- A lo largo del nuevo tramo de la opción C se mantendrá la velocidad media del flujo calculada en el múltiple de descarga ya que ambas tuberías son de 6 pulgadas.

De acuerdo a este análisis, se pudo determinar que cambiando las tuberías que salen de la estación de bombeo Vegas de Petare hasta la estación de gasolina (donde se inician las derivaciones de la red), por una sola tubería de 6 pulgadas de diámetro, se disminuyen las pérdidas por fricción considerablemente y, por consiguiente, el equipo de bombeo necesario es de menor capacidad y, por supuesto, de menor costo.

Por tales motivos, se selecciona la opción “C” como la más adecuada para la solución del sistema de tuberías de la estación de bombeo Vegas de Petare.

6.6. DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS

6.6.1. Selección de las Bombas

Las bombas a ser seleccionadas deben cumplir con las especificaciones de caudal y presión que se calcularon anteriormente, tal como se muestra a continuación:

	AÑO 2.005		AÑO 2.020
	Zona Baja	Zona Alta	Zona Alta
Presión (m)	224	224	318
Caudal (m³/hr)	80	125	150

Tabla 6.13 Requerimientos de presión y caudal del sistema

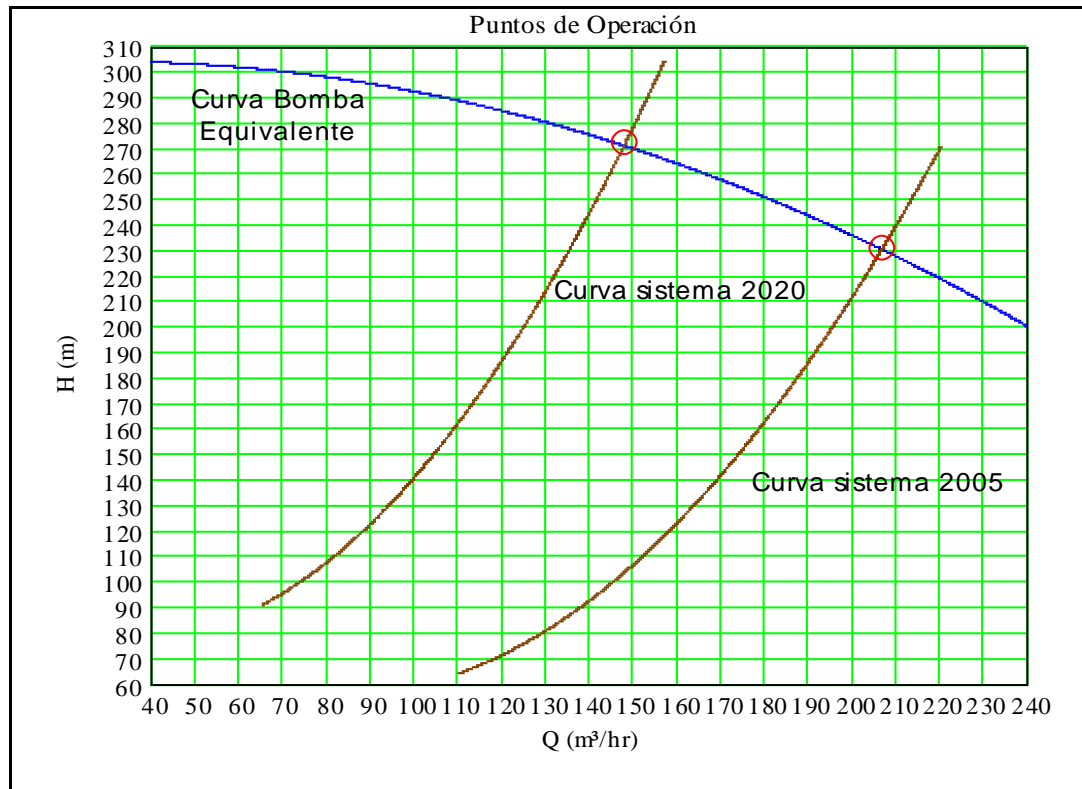
En función de estos requerimientos de presión y caudal se seleccionaron las bombas que mejor se adaptan a estas condiciones. Las especificaciones del tipo de bomba seleccionada son las siguientes:

- Marca: KSB (generalmente utilizada en el IMAS)
- Modelo: bomba centrífuga WK 80 (curvas características en el apéndice 1)
- Etapas: 4
- Velocidad de giro: 3500 RPM

En la gráfica 6.5 se muestra el punto de operación de dos bombas en paralelo y el sistema conformado por la red de la zona alta y la zona baja, para el año 2.005.

Tal como se observa en la gráfica 6.5, el compromiso entre la bomba equivalente (resultante de 2 bombas en paralelo) y la curva del sistema (ambas redes más las pérdidas en la succión y descarga de las bombas) cumple con los requerimientos estimados:

- Año 2005:
 - $Q = Q_{\text{zona alta}} + Q_{\text{zona baja}} = (125 + 82) \text{ m}^3/\text{hr} = 207 \text{ m}^3/\text{hr}$
 - $H = 230 \text{ m.c.a.}$
- Año 2020:
 - $Q = 150 \text{ m}^3/\text{hr}$
 - $H = 270 \text{ m.c.a.}$



Gráfica 6.5 Puntos de operación de 2 bombas y sistema. Años 2005 y 2020

6.6.2. Cálculo Para Evitar la Cavitación en las Bombas

Para evitar que se produzca el fenómeno de cavitación en cualquiera de las bombas, se determinó la presión mínima que debe haber en el Alimentador Este, de tal manera que la presión en la succión de las bombas cumpla con el valor del NPSH máximo que da el fabricante de las mismas.

De la ecuación (3.70) se obtiene la siguiente relación, considerando que la diferencia de cotas entre el Alimentador y la succión de las bombas es igual a cero, se despeja el término de presión en la succión p_s/γ y se determina de la siguiente manera:

$$\text{NPSH} \leq \frac{p_s + p_a - p_v}{\gamma} - \Delta z - h_s$$

$$\frac{p_s}{\gamma} \geq \text{NPSH} + \frac{p_v - p_a}{\gamma} + \Delta z + h_s$$

donde $p_v = 0.4593 \text{ psi} = 3.167 \text{ Pa}$ (a la temperatura de 25°C)
 $p_a = 91.440 \text{ Pa} = 9,35 \text{ m}$
 $\Delta z = 0 \text{ m}$
 $\text{NPSH} = 9 \text{ m}$
 $h_s = 0.852 \text{ m}$ (cálculos en el apéndice 12)

La sumatoria de las pérdidas se realizó desde el manómetro ubicado en el Alimentador hasta la succión de la bomba 3, considerando que las bombas 2 y 3 están funcionando con el máximo caudal dado por el fabricante de $130 \text{ m}^3/\text{hr}$ cada una. Se considera el cálculo para la bomba 3 ya que es la condición más desfavorable de pérdida que se puede dar en el sistema de succión (ver Fig. 6.2).

Entonces, para evitar la cavitación en cualquiera de las bombas tomando la condición más desfavorable, la presión absoluta en el Alimentador debe ser mayor o igual que:

$$\frac{p_s}{\gamma} \geq 9\text{m} + \frac{3167\text{Pa} - 91440\text{Pa}}{9780 \frac{\text{kg}}{(\text{m}\cdot\text{s})^2}} + 0\text{m} + 0.852\text{m}$$

$$\frac{p_s}{\gamma} \geq 0.826\text{m}$$

Este valor está referido a la presión manométrica en el Alimentador, por lo que representa la presión mínima que debe marcar el manómetro para evitar la cavitación de cualquiera de las bombas. La presión atmosférica está referida a la altitud de 850 m.s.n.m. y es igual a 13,3 psi, según la tabla del apéndice 13.

Si la presión en el Alimentador es de 20 m.c.a., el cálculo del NPSH disponible se hace mediante la ecuación:

$$NPSH_d = \frac{P_s + P_a - P_v}{\gamma} - \Delta z - h_s$$

$$NPSH_d = 20\text{m} + 9.35\text{m} - 0.324\text{m} + 0\text{m} + 0.852\text{m}$$

$$NPSH_d = 29.88\text{m}$$

En este caso, se consideraron las pérdidas para el máximo caudal que podrían manejar las bombas, y se verifica para la bomba 3 por ser la más vulnerable a la cavitación de acuerdo a la geometría del sistema de succión.

El valor de NPSH máximo que ofrece el fabricante para esta bomba es de 9 metros de columna de agua. Por lo tanto, se verifica que para una presión en el Alimentador de 20 m.c.a. no se produce cavitación en ninguna de las bombas ya que:

$$NPSH_{\text{disponible}} > NPSH_{\text{requerido}}$$

Para calcular la presión mínima en cualquier otra condición de operación, se deben considerar las pérdidas desde la ubicación del manómetro en la tubería del Alimentador hasta la succión de la bomba en estudio y verificar que se cumpla la relación anterior con el procedimiento antes expuesto.

6.6.3. Alternativas de Ahorro de Energía

Tal como se observa en la gráfica 4.9, el consumo de agua varía a lo largo del día. Esta variación se traduce en mayor o menor consumo de potencia asociado al caudal demandado por la red. Como es notorio en la gráfica, el consumo disminuye en ciertas horas, lo que podría representar un ahorro energético con respecto al consumo eléctrico de los motores.

Se presentan dos alternativas de ahorro de energía referentes a la variación del gasto que será bombeado en la futura estación.

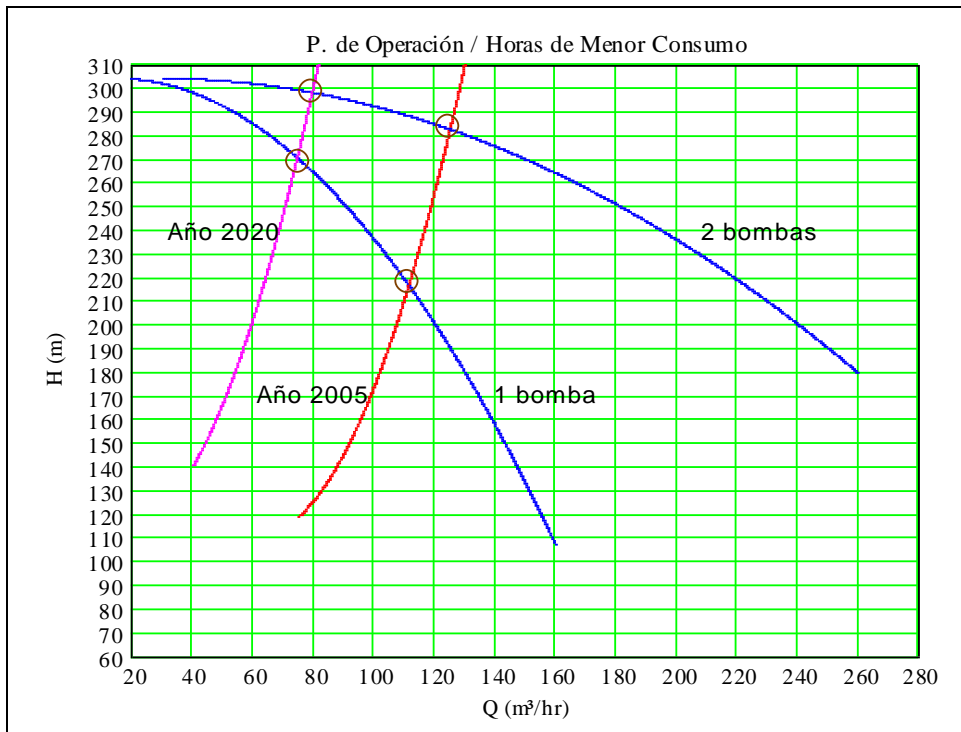
6.6.3.1. Suspensión de un Equipo en las Horas de Menor Consumo

Tomando en consideración que el caudal puede disminuir en horas de la noche por debajo del 50 por ciento del caudal medio diario, se realiza la suspensión de uno de los grupos moto-bomba con el fin de ahorrar energía y aumentar el tiempo de vida de los equipos. Un ejemplo aproximado de este comportamiento es el mostrado en la gráfica 6.6.

En ambos casos se observa una disminución del caudal relativamente pequeña y, por el contrario, una reducción considerable de la presión hidráulica entregada por el equipo, e igualmente disminuye la potencia absorbida de la red eléctrica.

El punto de operación del sistema en el año 2005, para el caso de la gráfica 6.6, con dos bombas en funcionamiento, indica un caudal de tránsito de 124 m³/hr. La potencia eléctrica asociada a ambas bombas se obtiene de las ecuaciones (3.67), (3.79) y (3.80) como sigue:

$$P_e = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta \cdot \eta_{mec} \cdot \eta_{mot}}$$



Gráfica 6.6 Desconexión de una bomba en horas de menor consumo

donde

P_e : potencia eléctrica consumida por los motores

γ : peso específico del agua

Q : caudal

H : altura

η : rendimiento de la bomba

η_{mec} : rendimiento mecánico (acoples)

η_{mot} : rendimiento de los motores

La potencia eléctrica de entrada en este caso será igual a:

$$P_e = \frac{9780 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}^2} \cdot 124 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \cdot 284\text{m}}{0.74 \cdot 0.85 \cdot 0.9}$$

$$P_e = 168.9\text{kW} = 226.5\text{hp}$$

Si se detiene cualquiera de las bombas, se obtiene la potencia de entrada de la misma manera que en el caso anterior resultando lo siguiente:

$$Pe = \frac{9780 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^2} \cdot 111 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \cdot 218\text{m}}{0.73 \cdot 0.85 \cdot 0.9}$$

$$Pe = 117.8\text{kW} = 158\text{hp}$$

De esta forma se obtiene una disminución de la potencia requerida de más del 30 por ciento con respecto al uso de dos bombas, sin afectar notablemente el requerimiento de caudal.

Referido al comportamiento de la gráfica 4.9, se realizó la curva de consumo mostrada en la gráfica 6.7, tomando en cuenta lo siguiente:

- El caudal medio corresponde al caudal medio del año 2005 = 47,3 l/s.
- Cuando la presión en la descarga de las bombas alcanza 270 m.c.a. se produce la desconexión de uno de los grupos.

En tabla siguiente se puede notar el ahorro de energía y dinero si se utiliza esta opción de operación:

Operación	Costo Diario	Costo Mensual	Costo Anual
Sin Regulación	195.661 Bs.	5,870 MM Bs.	51,850 MM Bs.
Desconexión 1 bomba	178.174 Bs.	5,345 MM Bs.	47,216 MM Bs.
Ahorro en costo	17.487 Bs.	0,525 MM Bs.	4,634 MM Bs.

Tabla 6.14 Costos asociados al consumo eléctrico de los motores

6.6.3.2. Variación de la velocidad de los grupos moto-bomba

En este sistema de tuberías las pérdidas por fricción representan un porcentaje bastante alto de la presión estática, llegando incluso al 200 por ciento en el caso del día de máximo consumo diario del año 2020.

Estas pérdidas podrían minimizarse implementando un nuevo diseño del sistema de tuberías, ajustando los diámetros de acuerdo al gasto requerido en cada tramo y con los valores iniciales de la rugosidad absoluta, ya que las tuberías estarían nuevas. Sin embargo, esta posibilidad está fuera del proyecto de mejoramiento de la estación de bombeo Vegas de Petare.

Por tales motivos, se presenta la necesidad de buscar alternativas que permitan mejorar el funcionamiento de los equipos sin disminuir la capacidad del sistema de bombeo y que, al mismo tiempo, proporcionen el mayor ahorro posible de energía y por consiguiente, mayor ahorro de dinero.

Como una alternativa viable en la conducción del agua que cumpla con las pautas anteriores, se incluye en la operación de la estación de bombeo un controlador de velocidad variable o variador de velocidad para motores asíncronos.

De acuerdo a las leyes de semejanza (ecuaciones 3.73, 3.74, 3.75 y 3.76), suponiendo que el diámetro del rodete y la densidad del agua permanecen constantes, se obtienen las siguientes simplificaciones:

$$\frac{Q}{Q_o} = \frac{N}{N_o} = \alpha_v$$

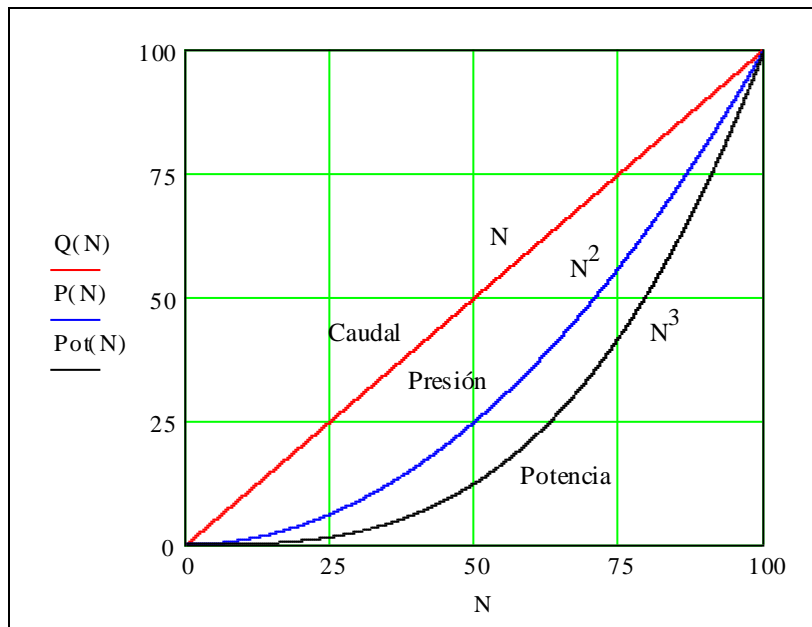
$$\frac{H}{H_o} = (\alpha_v)^2$$

$$\frac{P}{P_o} = (\alpha_v)^3$$

$$\frac{T}{T_o} = (\alpha_v)^2$$

donde N_o : velocidad en la condición inicial de la bomba
 N : velocidad en la condición deseada de la bomba
 α_v : relación de velocidades
 Q, H, P, T : caudal, presión, potencia y torque para una velocidad N
 Q_o, H_o, P_o, T_o : caudal, presión, potencia y torque para una velocidad N_o

De estas relaciones se puede deducir lo siguiente: si disminuye la velocidad de la bomba, en la misma proporción disminuye el caudal para un punto homólogo, disminuyendo el par y la presión en relación cuadrática, y la potencia en relación cúbica (gráfica 6.7).



Gráfica 6.7 Caudal, presión y potencia en función de la velocidad

Si disminuye la velocidad en un 50 por ciento, se obtiene una reducción del caudal bombeado de igual proporción, es decir, la mitad del caudal inicial tal como se observa en

la gráfica 6.7. Sin embargo, la disminución de la potencia requerida por la bomba alcanza un valor igual al 12,5 por ciento del valor de potencia inicial.

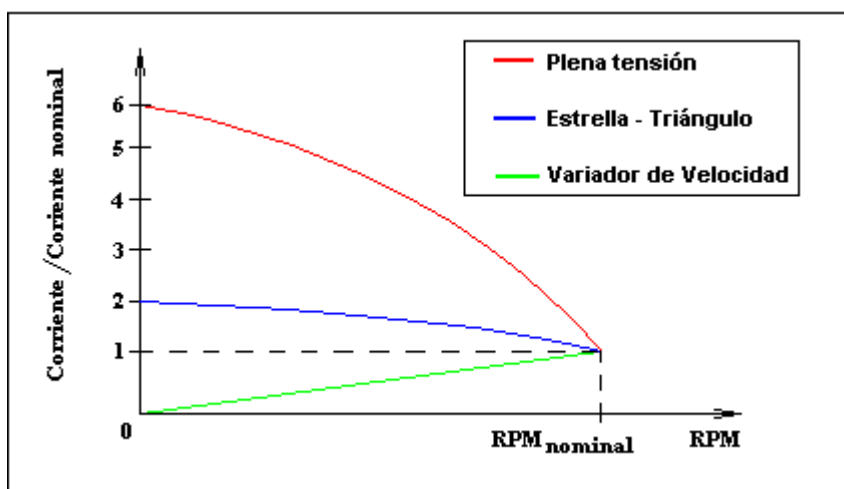
Por lo tanto, aplicando las leyes de semejanza para cambios en la velocidad de las bombas se obtiene una disminución bastante considerable del consumo eléctrico asociado a la potencia requerida por el sistema de abastecimiento, en función de la demanda de agua.

La curva del sistema presenta variaciones considerables de caudal a lo largo del día y a lo largo del año, dependiendo principalmente de la hora y de si es época de lluvias o de sequía, tal como lo demuestran los registros de las ciudades más importantes del país (referencia [1]). En función de estas variables, la demanda de agua se incrementa o decrementa para efectos del bombeo, siguiendo un comportamiento en muchos casos, predecible.

De acuerdo a lo anterior, se hace factible la implementación de un variador de velocidad para los motores eléctricos que hacen girar a las bombas.

Con este dispositivo se obtienen, además, las siguientes ventajas:

- Arranque gradual de los motores que trae como consecuencia lo siguiente:
 - Aumento de la vida de los motores debido a la eliminación de la aceleración brusca en el arranque disminuyendo así las sollicitaciones torsionales en los elementos rotatorios.
 - Aumento de la vida de los motores debido a la disminución de la corriente de arranque, que en arranque a plena tensión es aproximadamente igual a 6 u 8 veces la corriente nominal y en arranque en estrella-triángulo es aproximadamente igual a 2 veces la corriente nominal. En el caso del arranque con el variador se tiene un aumento gradual de la corriente a medida que se incrementa la velocidad de giro (ver gráfica 6.8).



Gráfica 6.8 Comportamiento de la corriente de arranque con varios métodos

El paso de una corriente por encima de la corriente nominal a través de los conductores del motor durante el proceso de arranque, incide en la vida útil de los aislamientos del motor. A pesar de que el efecto es muy pequeño en una arrancada, los efectos a mediano y largo plazo son mucho más notorios. Esto trae como consecuencia un elevado costo en el mantenimiento de este tipo de motores.

- Aumento de la confiabilidad de los motores ya que es menos probable que ocurran fallas en los mismos.
 - Con el arranque gradual de los motores se alivia la red eléctrica de la brusca exigencia de corriente de los métodos de arranque comunes.
- Protección de sobrecarga: en el caso en que la corriente sea mayor que un valor predeterminado durante un tiempo estipulado se detienen los motores para evitar daños en los aislamientos.
 - Protección de desbalance de fases: cuando se produce una caída de tensión de más del 5 por ciento en una de las fases la corriente en los conductores del rotor aumenta considerablemente. Esto trae como consecuencia un aumento del calor generado en estos conductores igual al cuadrado del aumento de la corriente por lo

que los aislamientos sufren consecuencias permanentes. El variador tiene protección contra este tipo de situaciones.

- Desaceleración controlada del motor: la disminución gradual de la velocidad de los motores puede ser controlada en un intervalo de tiempo deseado. Esto trae como consecuencia la disminución de los efectos transitorios o golpe de ariete durante la parada de los grupos moto-bomba y sustituye la válvula de control tradicional.

Se calculó el consumo eléctrico de los motores suponiendo un comportamiento de la demanda de agua similar al mostrado en la gráfica 4.9. Esta estimación se realizó para el día de máximo consumo diario del año 2005 con la operación de dos bombas en paralelo. De esta manera se pudo realizar una comparación entre:

- a) El uso permanente de los dos grupos moto-bomba.
- b) La desconexión uno de éstos.
- c) El uso de un variador de velocidad con ambos grupos en funcionamiento.

Calculando la potencia eléctrica de acuerdo a las ecuaciones (3.67), (3.79) y (3.80) se obtuvieron, para cada caso, los siguientes valores de consumo eléctrico en kilovatios por hora:

HORA	CONSUMO (kW-hr)		
	(a)	(b)	(c)
0	368,444	244,103	271,064
2	368,444	244,103	271,493
4	368,444	244,103	303,192
6	484,236	484,236	358,052
8	484,236	484,236	422,660
10	489,373	489,373	475,610

12	489,277	489,277	475,610
14	489,373	489,373	475,610
16	489,373	489,373	440,167
18	484,236	484,236	386,477
20	413,697	413,697	336,724
22	413,697	413,697	298,981
24	383,258	244,529	274,924
TOTALES	5726,093	5214,341	4790,571

Tabla 6.15 Consumo eléctrico diario de los motores en cada alternativa

Los costos equivalentes de cada alternativa se muestran a continuación de acuerdo a la tarifa de la Gaceta Oficial correspondiente (ver sección 4.4):

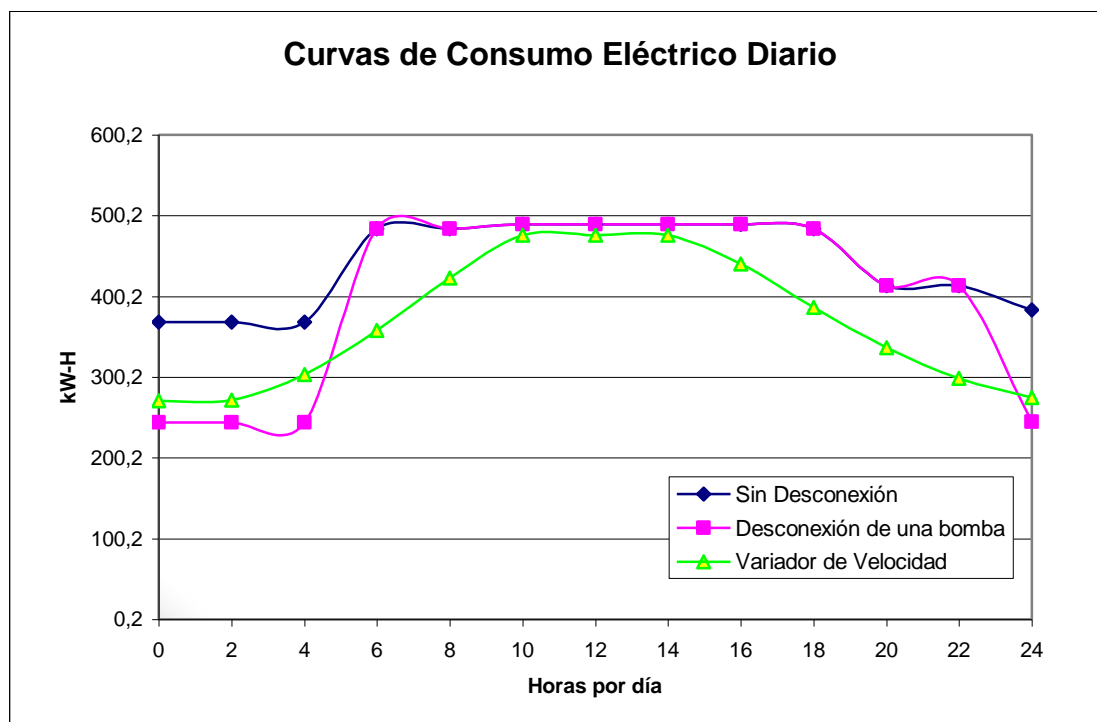
PERÍODO	COSTO EQUIVALENTE		
	(a)	(b)	(c)
DIARIO	195.660 Bs.	178174 Bs.	163693 Bs.
MENSUAL	5,870 MM Bs.	5,345 MM Bs.	4,911 MM Bs.
ANUAL	51,850 MM Bs.	47,216 MM Bs.	43,379 MM Bs.

Tabla 6.16 Costos por consumo eléctrico de los motores en cada alternativa

El ahorro anual aproximado en costos de operación por concepto de energía eléctrica, de acuerdo a la suposición de consumo promedio de agua, para las alternativas (b) y (c) con respecto a la alternativa (a) es el siguiente:

- Opción (b): Ahorro = 135.614 kW-hr = 4,634 MM Bs./año
- Opción (c): Ahorro = 247.913 kW-hr = 8,471 MM Bs./año

La curva de consumo diario de energía eléctrica correspondiente es la mostrada en la gráfica 6.9, en la cual, el área debajo de cada curva representa el costo diario de cada alternativa de operación.



Gráfica 6.9 Ejemplo del consumo eléctrico de los motores en día promedio

6.7. ESTIMACIÓN DE LOS TRANSITORIOS HIDRÁULICOS

Los efectos del golpe de ariete se calcularon para los casos más desfavorables de ocurrencia de estas perturbaciones del régimen permanente. Tales casos derivan de fallas de suministro de energía eléctrica en los motores que impulsan las bombas, así como el cierre de válvulas.

Los efectos de golpe de ariete ocasionados debido a fallas inesperadas o paros de emergencia de los motores eléctricos se calcularon para el año 2005 y para el año 2020. Para cada caso se estimaron las depresiones generadas en la tubería de descarga producto del cambio de la característica de las bombas al disminuir la velocidad de giro de los motores eléctricos. Se toma el punto de operación para el caudal máximo diario en cada año, cuando la velocidad del flujo es más alta.

El cierre instantáneo de la válvula ubicada al final de la tubería de 6 pulgadas (en la derivación de las redes de la zona alta y la zona baja) durante la operación de las bombas en régimen permanente genera el máximo cambio en la presión en esta sección de la tubería y en dicho dispositivo.

6.7.1. Golpe de Ariete por Falla en el Suministro Eléctrico de los Grupos Motobomba

El cálculo se realizó para el punto de operación correspondiente al caudal máximo diario en los años 2005 y 2020. Para cada caso se realizaron las simplificaciones necesarias del sistema de tal manera que facilitaran las estimaciones de los efectos transitorios. Se determinó la posibilidad de ocurrencia de la separación de líquido por la vaporización del agua en la descarga de las bombas.

6.7.1.1. Desconexión de los Motores Eléctricos en Régimen Permanente en el Año 2005

Los cambios en la configuración del sistema que se realizaron para estimar los efectos de las perturbaciones producto de la parada inesperada de los grupos motobomba, obedecen a las siguientes consideraciones:

- a) Simplificación de las redes de la zona alta y la zona baja como un solo tramo de tubería para cada red, en cuyos extremos se encuentra ubicado un tanque (figura 6.6).

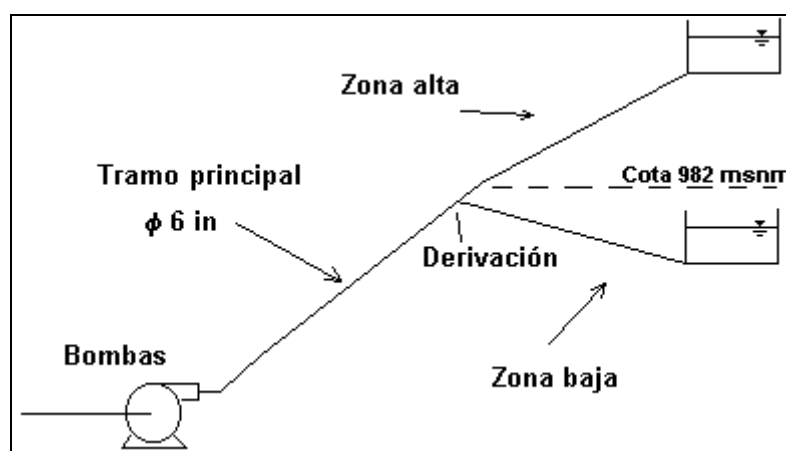


Figura 6.6 Simplificación de la red de distribución / año 2005

En este caso, se considera la inexistencia de las derivaciones en las tuberías principales, que pudieran atenuar el efecto de las perturbaciones originadas en la estación de bombeo. Este es el caso más desfavorable ya que no se producen compensaciones en la formación de las depresiones en la descarga de las bombas. Estas compensaciones vienen dadas por las ondas reflejadas en dichas derivaciones (ver sección 3.2.9.6). Adicionalmente, se está despreciando la disipación progresiva de las perturbaciones a medida que éstas alcanzan los diferentes puntos de la red.

Lógicamente, esta situación es ideal pero permite verificar con amplio margen de seguridad que no se alcanza en ningún momento una presión absoluta menor que la

presión de vapor en la descarga de las bombas, de tal manera que no se produce la separación de líquido en este punto.

- b) Atenuación de los efectos transitorios debido a la onda reflejada en la bifurcación de los dos tramos principales. La onda reflejada representa un porcentaje de la onda que llega al nodo desde la estación de bombeo, de acuerdo a la ecuación (3.56).
- c) Operación de dos bombas al mismo tiempo, con la salvedad de que los valores de potencia e inercia se refieren a una unidad de bombeo. La curva de la bomba equivalente corresponde a la suma de dos bombas en paralelo. Sin embargo, para efectos de la potencia y del momento de inercia en el cálculo de la desaceleración del par (ecuaciones 3.53 y 3.54) se deben utilizar los valores de un solo grupo motobomba.

Con las consideraciones anteriores se realizó la estimación del comportamiento de las perturbaciones en la sección de tubería adyacente a la descarga de las bombas mediante el método gráfico mejorado (referencia [12]). Para ello se realizaron los siguientes cálculos:

- Celeridad de las ondas en cada tramo:

El cálculo se realiza mediante la ecuación (3.39) donde:

$$E = 2 \cdot 10^8 \text{ kgf/m}^2 \text{ para el agua}$$

$$E_c := \begin{pmatrix} 1.687 \cdot 10^{10} \\ 0.98 \cdot 10^{10} \\ 1.687 \cdot 10^{10} \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \text{ para cada tramo}$$

$$\rho = 996.94 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad D = \begin{pmatrix} 6.065 \\ 4.50 \\ 3.50 \end{pmatrix} \text{ in} \quad e = \begin{pmatrix} 0.28 \text{ in} \\ 3 \text{ mm} \\ 0.216 \text{ in} \end{pmatrix}$$

$$C = 1$$

Por lo tanto, el valor de la celeridad de las ondas en cada tramo es igual a:

$$a = \begin{pmatrix} 1253 \\ 1079 \\ 1300 \end{pmatrix} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- Para las condiciones en régimen permanente se tiene:

$$Q_o = 207 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \quad \eta_{\text{mecánico}} = 0.85$$

$$H_o = 230\text{m} \quad N = 3500\text{rpm}$$

$$P_{\text{bomba}} = 120\text{hp}$$

$$P_{\text{motor}} = \frac{P_{\text{bomba}}}{(\eta_{\text{mecánico}})}$$

$$P_{\text{motor}} = \frac{120}{0.85}\text{hp} \quad P_{\text{motor}} = 143\text{hp} \quad P_{\text{motor}} = 106,6\text{kW}$$

$$\omega = n \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \quad \omega = 3500\text{rpm} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \quad \omega = 366,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Torque (M) :

$$M = \frac{P}{\omega} \quad M = \frac{106600\text{W}}{366,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}} \quad M = 290,86\text{N} \cdot \text{m} \quad M = 291\text{N} \cdot \text{m}$$

El momento de inercia del conjunto en rotación se estimó mediante un software que se basa en los ábacos de Koelle utilizando la potencia, el caudal y la presión en régimen permanente. El valor del momento de inercia de masa estimado es el siguiente:

$$I = \frac{W \cdot R^2}{g} \quad I = 0,70\text{Kg} \cdot \text{m}^2 = 0,70\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$$

De la ecuación (3.54) se obtiene el siguiente término y se le asigna la variable J:

$$J = \frac{60 \cdot \Delta t}{I \cdot 2\pi}$$

Se define un intervalo de tiempo igual al tiempo de fase del primer tramo (6 pulgadas):

$$\Delta t = \frac{L_{6in}}{a_{6in}} = \frac{138m}{1253 \frac{m}{s}} = 0.109s$$

Por lo tanto, el valor de J es igual a:

$$J = \frac{60 \cdot (0,109)}{(0,70) \cdot 2\pi} = 1.487$$

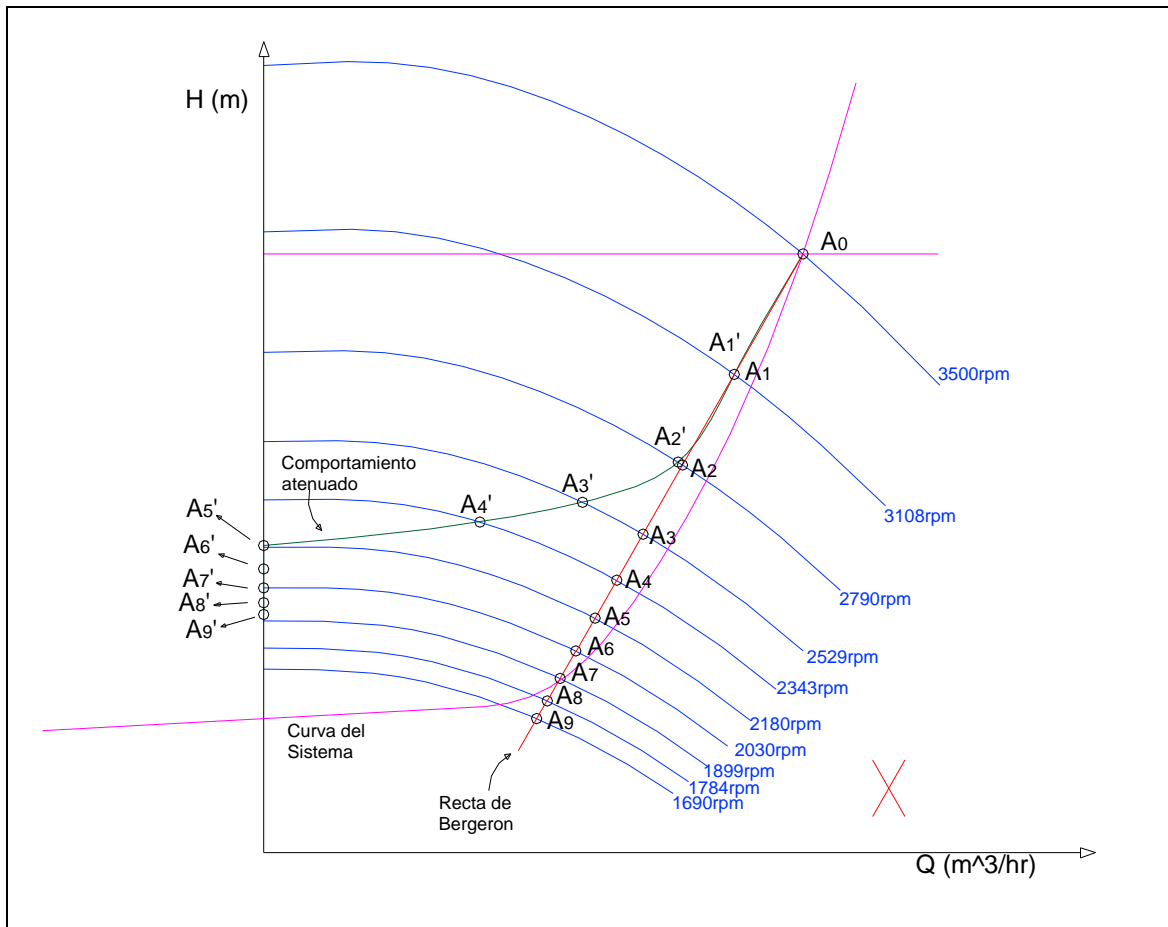
La ecuación (3.54) es entonces igual a:

$$N_i = -\left(\frac{M_i + M_{i-1}}{2}\right) \cdot J + N_{i-1}$$

Con esta ecuación se supone un valor cualquiera del par en el siguiente intervalo de tiempo y se calcula la velocidad correspondiente. Con la curva de la bomba para esa velocidad se recalcula el valor del par mediante la ecuación (3.68) y se vuelve a calcular la velocidad correspondiente. El cálculo se repite hasta obtener el resultado deseado.

Con este procedimiento se obtiene un punto en la recta de Bergeron por lo que debe realizarse para cada punto que se desee hallar para el cálculo de la depresión en la descarga de las bombas.

El procedimiento detallado y los cálculos realizados se pueden observar en el apéndice 15. La solución obtenida se observa en la siguiente gráfica:

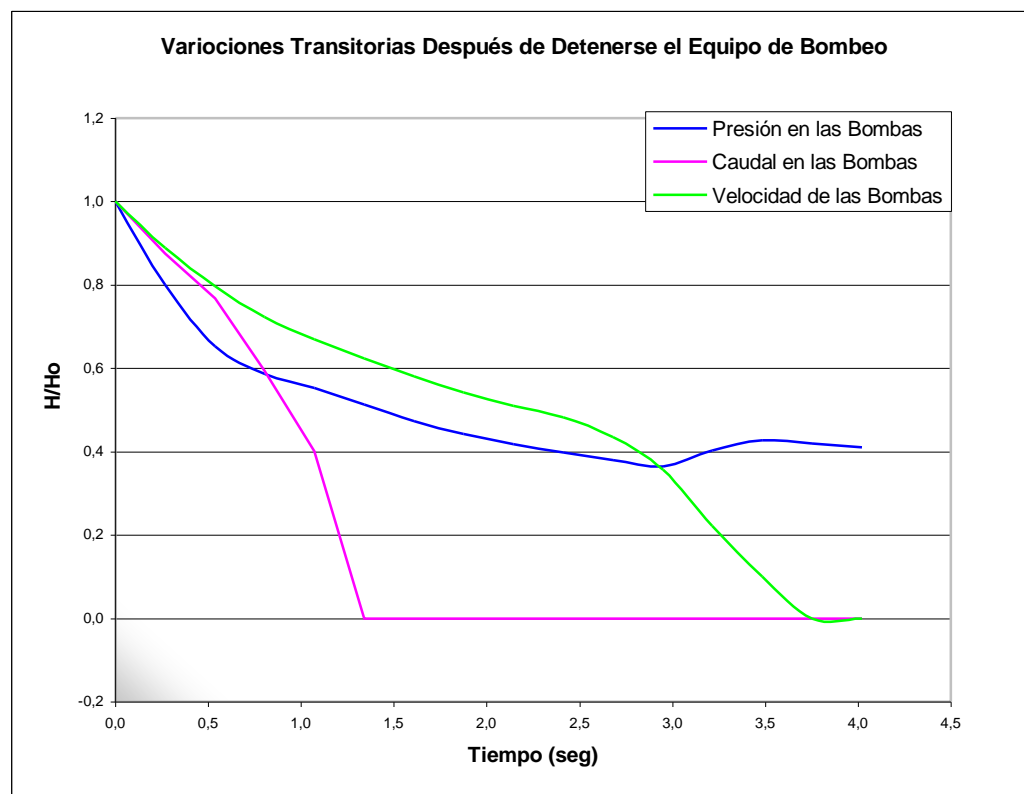


Gráfica 6.10 Disipación de la depresión por efecto de la onda reflejada en la derivación

Los puntos de la línea en color rojo (recta de Bergeron) corresponden al comportamiento de las perturbaciones en la descarga de las bombas sin que haya ondas reflejadas que las atenúen. Debido a la asunción de que la bifurcación considerada para este caso (punto *b* de las consideraciones) genera reflexión de las ondas transmitidas desde las bombas, se observa que el comportamiento de las perturbaciones en la descarga de las bombas se atenúa tal como lo indican los puntos equivalentes en la curva de color verde.

Tomando en cuenta que las ondas transmitidas hasta los tanques que luego se reflejan y regresan a la descarga de las bombas atenúan aún más la depresión en esta sección, se verifica que no se producen depresiones por debajo de la presión de vapor.

Las variaciones con respecto al tiempo de la presión y el caudal en las bombas, así como la velocidad de giro de éstas, se pueden observar en la siguiente gráfica:



Gráfica 6.11 Variación de las variables de interés por efecto de la detención de los grupos

6.7.1.2. Desconexión de los Motores Eléctricos en Régimen Permanente en el Año 2020

En este caso se realizaron algunas consideraciones que facilitaron el cálculo de las perturbaciones en la descarga de las bombas para el año 2020 con el punto de operación correspondiente al caudal máximo diario para ese año. Los cambios en la configuración del sistema son los siguientes:

- a) Simplificación de la red de la zona alta como un solo tramo de tubería, en cuyo extremo se encuentra ubicado un tanque (figura 6.7).

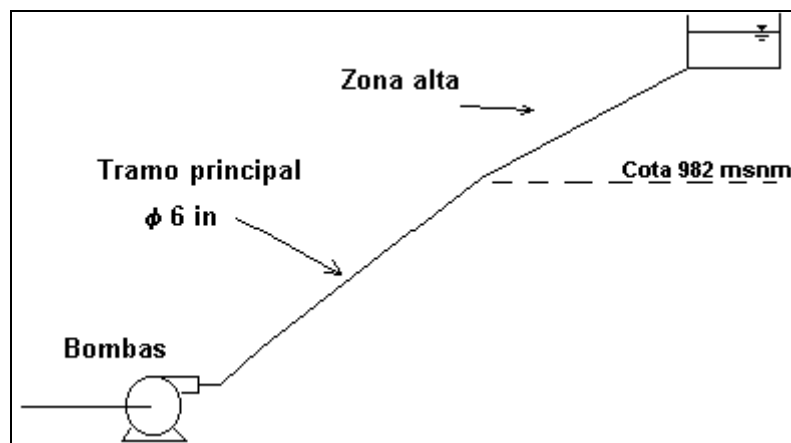
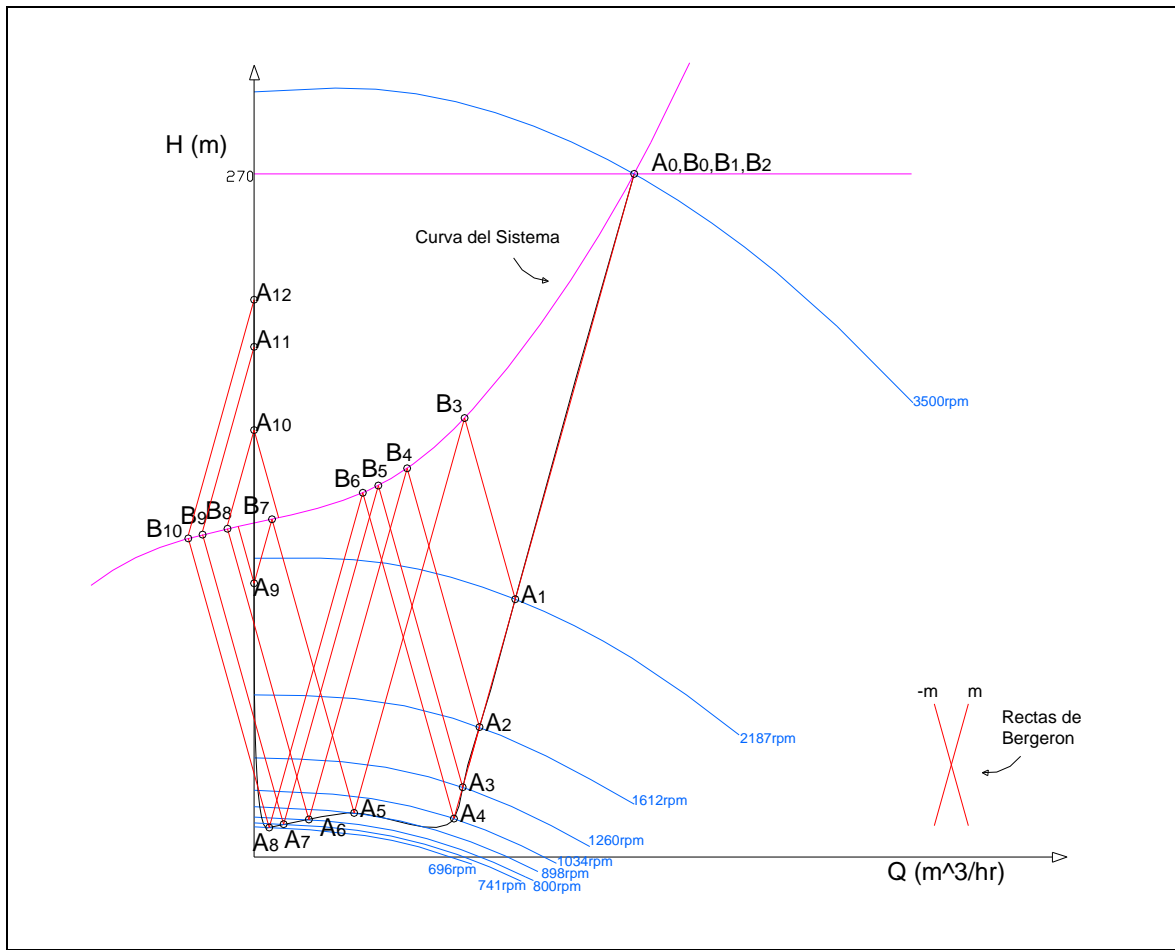


Figura 6.7 Simplificación de la red de distribución / año 2020

De la misma manera que en el caso anterior (sección 6.7.1.1), esta simplificación supone que no se generan ondas reflejadas de importancia que atenúen los efectos de depresión en la descarga de las bombas, generándose resultados con un margen de seguridad aceptable.

- b) Operación de las bombas en paralelo (2 unidades) con las mismas consideraciones que en el caso anterior.

El procedimiento utilizado es el mismo que en el caso de la sección 6.7.1.1. Los resultados obtenidos provienen de los cálculos mostrados en el apéndice 15 y se pueden observar en la siguiente gráfica:



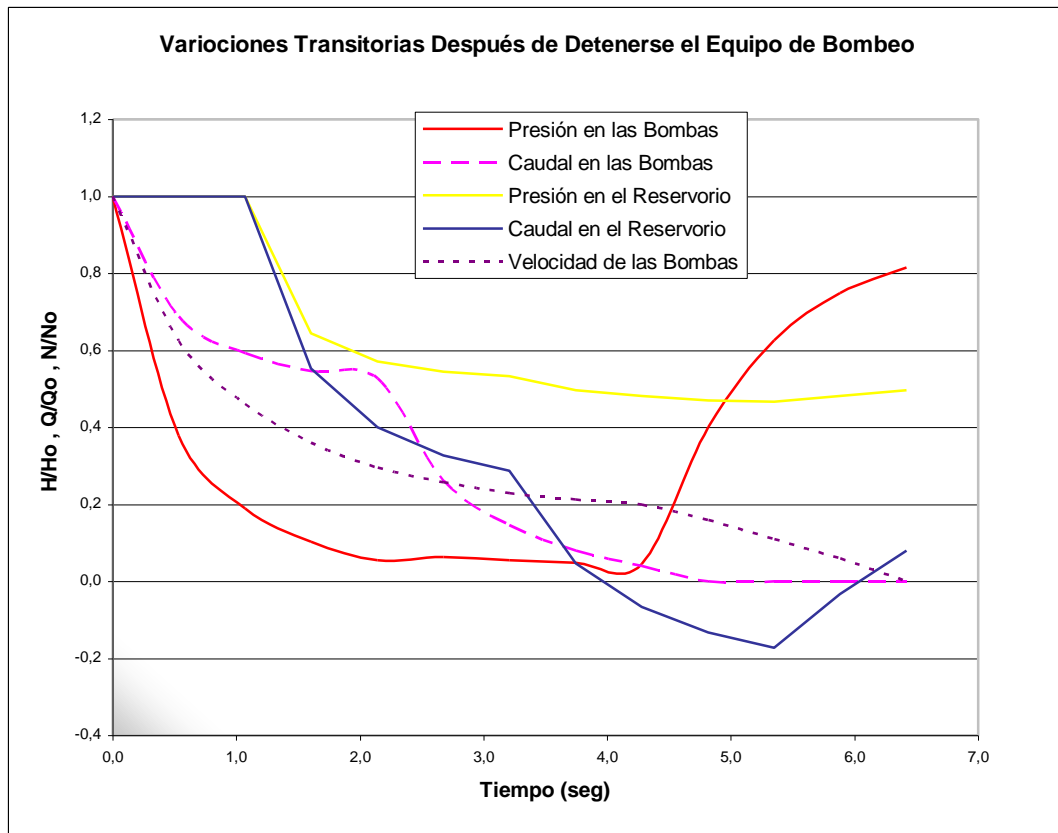
Gráfica 6.12 Variación de caudal y presión por desconexión accidental de los grupos

En esta gráfica se puede apreciar el comportamiento de las presiones en la descarga de las bombas y en el reservorio designadas con las letras A y B respectivamente. Las presiones en los puntos A_1 , A_2 , A_3 y A_4 van disminuyendo linealmente hasta que el tiempo transcurrido es igual a $2L/a$ correspondiente al punto A_4 . Los siguientes valores de presión correspondientes a los puntos A_i están afectados por la onda reflejada desde el reservorio, lo que disminuye el efecto de depresión generado inicialmente en las bombas.

Entre los intervalos de tiempo 8 y 9 (puntos A_8 y A_9) el caudal se reduce a cero en la descarga de las bombas. La interpretación física de este comportamiento corresponde al tiempo de detención del fluido en esta sección por efecto del cierre inmediato del dispositivo obstructor en la válvula de retención ubicada en dicha posición.

A partir de ese momento, los siguientes puntos que representan los cambios en la presión en esta sección se mantendrán sobre la línea de caudal igual a cero hasta que las perturbaciones se vayan atenuando, y finalmente se detienen en el punto de presión estática ($H = 132$ m.c.a. y $Q = 0$ m³/hr).

La gráfica siguiente muestra el comportamiento de las variables de interés en el momento en que ocurre la falla por desconexión de los motores:



Gráfica 6.13 Variación de las variables de interés por efecto de la detención de los grupos

La presión de vapor para el agua a 77 °F es igual a 0,323 m.c.a. (presión absoluta). La presión mínima en la descarga de las bombas que se observa en las gráficas alcanza el valor de 11,6 m.c.a. Se verifica entonces que el fluido en ningún momento alcanza la presión de vapor.

6.7.1.3. Golpe de Ariete por Cierre de Válvula Durante la Operación en Régimen Permanente

Para este caso, se considera el cierre instantáneo de la válvula de reparación ubicada en la tanquilla adyacente a la estación de gasolina donde se bifurca la tubería principal de 6 pulgadas hacia la zona alta y la zona baja. Ésta es una válvula tipo compuerta cuya función es la de aislar la red por motivos de reparación e instalaciones eventuales.

El cálculo de golpe de ariete en este tipo de situaciones se estima con bastante precisión mediante el método de Allievi, para cierre instantáneo de la válvula de reparación.

La sobrepresión está asociada en este caso, al cierre instantáneo (igual o menor que el tiempo de fase, ecuación 3.50) de la válvula de reparación aguas abajo, de tal manera que no se producen compensaciones de ondas reflejadas que puedan atenuar el efecto de sobrepresión que se genera en la válvula. Esto trae como consecuencia que se produzca la máxima presión posible debido a este fenómeno.

Conocidos la longitud del tramo ($L = 138\text{m}$) y la celeridad de las ondas en éste ($a = 1253 \text{ m/s}$), el tiempo crítico se calcula con la ecuación 3.50 como sigue:

$$t_c = 2 \cdot \frac{138\text{m}}{1253 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

$$t_c = 0.22\text{s}$$

De acuerdo a la ecuación (3.49) se puede calcular este valor de la sobrepresión con una velocidad media del flujo igual a $V_o = 3,15 \text{ m/s}$. Entonces, la sobrepresión en la válvula para esta situación es igual a:

$$H_a = \frac{1253 \cdot \frac{m}{s} \cdot 3.15 \cdot \frac{m}{s}}{9.807 \frac{m}{s^2}}$$

$$H_a = 402.5m$$

La presión en la válvula en régimen permanente es igual a:

$$H_v = H_{bomba} - \Delta z - h_f$$

$$H_v = 230m - 42m - 8,51m$$

$$H_v = 179,5 m$$

La presión máxima en la válvula asociada a este fenómeno es igual a:

$$H_{m\acute{a}x} = 179,5m + 402,5m$$

$$H_{m\acute{a}x} = 582 \text{ m.c.a.}$$

Este valor de máxima presión se debe al cierre de la válvula en un tiempo menor o igual al tiempo crítico, que en este caso es igual a 0,22 segundos lo que implica una velocidad en el cierre considerablemente elevada. Esto hace que sea bastante difícil lograr este valor de presión en la sección adyacente a la válvula.

Adicionalmente, la ocurrencia de esta situación del cierre de válvula accidental es bastante complicada debido al control que se tiene en el Instituto con respecto a la manipulación de las válvulas en todo el sistema de distribución de agua.

6.8. SELECCIÓN DE VÁLVULAS

La selección de las válvulas se llevó a cabo de acuerdo a la función que deben cumplir, a las condiciones de flujo más severas a las que estarán sometidas y a las dimensiones de las tuberías en las que serán instaladas.

Tomando en cuenta que el material de las tuberías en la estación de bombeo será de hierro galvanizado y por lo tanto sus extremos son bridados, el tipo de unión de las válvulas debe ser brida – brida.

- Válvula de reparación del múltiple de succión (referencia 13 de la Fig. 6.1): esta válvula estará sometida a la presión máxima en el alimentador en esta zona. Asumiendo un factor de seguridad adecuado (1,2) se considera esta presión igual a $1,2 \cdot 50 \text{ metros} = 60 \text{ metros}$.

Tipo:	Compuerta
Vástago:	Ascendente
Instalación:	Horizontal
Diámetro:	8 pulgadas
Material del cuerpo:	Acero fundido
Presión nominal:	$\geq 60 \text{ m (85 psi)}$
Extremos:	Unión brida – brida

- Válvula de reparación del múltiple de descarga (referencia 14 de la Fig. 6.1): la presión máxima que tendrá que soportar esta válvula corresponde a la diferencia de cotas entre el punto más alta de la red y la estación de bombeo, suponiendo que entre estos dos puntos la tubería se encuentra completamente llena de agua.

Tipo:	Compuerta
Vástago:	Ascendente
Instalación:	Horizontal
Diámetro:	6 pulgadas
Material del cuerpo:	Acero fundido

Presión nominal:	≥ 132 m (188 psi)
Extremos:	Unión brida – brida

- Válvula de reparación en los tramos individuales de succión de cada bomba (referencia 6 de la Fig. 6.1): la condición de operación de estas válvulas es la misma que en el caso de válvula de reparación “13”.

Tipo:	Compuerta
Vástago:	Ascendente
Instalación:	Horizontal
Diámetro:	5 pulgadas
Material del cuerpo:	Acero fundido
Presión nominal:	≥ 60 m (85 psi)
Extremos:	Unión brida – brida

- Válvula de reparación en los tramos individuales de descarga de cada bomba (referencia 7 de la Fig. 6.1): la presión máxima a la que estará sometida esta válvula será igual a la columna de líquido correspondiente al día de máximo consumo diario en el año 2020, es decir, 270 metros o 384 psi. Cabe destacar que esta condición se presenta en la válvula correspondiente al grupo que no esté en operación ese día.

Tipo:	Compuerta
Vástago:	Ascendente
Instalación:	Horizontal
Diámetro:	4 pulgadas
Material del cuerpo:	Acero fundido
Presión nominal:	≥ 270 m (384 psi)
Extremos:	Unión brida – brida

- Válvula de retención o válvula check (referencia 8 de la Fig. 6.1): estas válvulas estarán sometidas a la misma presión máxima que en el caso de las válvulas en los tramos individuales en la descarga de las bombas, es decir, 270 m.c.a.

Tipo:	Check oscilante (swing)
Instalación:	Horizontal
Diámetro:	4 pulgadas
Material del cuerpo:	Acero fundido
Presión nominal:	≥ 270 m (384 psi)
Extremos:	Unión brida – brida

6.9. ESPECIFICACIONES DE LAS TUBERÍAS

- Múltiple de succión:

Material:	Hierro galvanizado
Diámetro nominal:	8 pulgadas
Diámetro exterior:	8,625 pulgadas
Diámetro interior:	8,125 pulgadas
Espesor:	0,25 pulgadas

- Múltiple de descarga:

Material:	Hierro galvanizado
Diámetro nominal:	6 pulgadas
Diámetro exterior:	6,625 pulgadas
Diámetro interior:	6,065 pulgadas
Espesor:	0,28 pulgadas

- Tubería individual de succión:

Material:	Hierro galvanizado
Diámetro nominal:	5 pulgadas
Diámetro exterior:	5,563 pulgadas

- | | |
|--------------------|----------------|
| Diámetro interior: | 5,047 pulgadas |
| Espesor: | 0,258 pulgadas |
- Tubería individual de descarga:

Material:	Hierro galvanizado
Diámetro nominal:	4 pulgadas
Diámetro exterior:	4,50 pulgadas
Diámetro interior:	4,026 pulgadas
Espesor:	0,237 pulgadas
 - Tubería principal de la red de distribución:

Material:	Hierro galvanizado
Diámetro nominal:	6 pulgadas
Diámetro exterior:	6,625 pulgadas
Diámetro interior:	6,065 pulgadas
Espesor:	0,28 pulgadas

6.10. SELECCIÓN DE LOS MOTORES

6.10.1. Potencia de los Motores

Para el cálculo y selección de los motores se considera principalmente la potencia requerida en el eje de la bomba y el rendimiento mecánico referente a las pérdidas en la transmisión entre el motor y la bomba.

Con las características hidráulicas de la bomba seleccionada se realiza el cálculo de la potencia requerida por la bomba mediante la ecuación (3.67), como sigue a continuación:

$$P_b = \frac{9780 \frac{\text{kg}}{(\text{m}\cdot\text{s})^2} \cdot 103 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \cdot 230\text{m}}{0.74} = 116.6\text{hp}$$

El rendimiento mecánico del acople define finalmente la capacidad del motor eléctrico requerido para cumplir con el compromiso de la bomba y el sistema, tal como se observa a continuación (mediante la ecuación 3.79):

$$P_o = \frac{116.6\text{hp}}{0.85} = 137\text{hp}$$

6.10.2. Especificaciones de los Motores

Marca	Leroy Somer
Tipo	Eléctrico Trifásico de Inducción Rotor jaula de ardilla
Número de polos	2
Frecuencia	60 Hz
Tensión	230 / 460 Voltios
Intensidad nominal	185 Amp.
Potencia nominal	150 hp
Factor de potencia	0,9
Velocidad mecánica	3550 RPM
Par mecánico nominal	300 N.m
Rendimiento	95 %
Aislamiento	Clase F
Forma constructiva	B3, alta disipación
Frame	280 MC
Acoplamiento	Directo a la bomba

6.11. INSTALACIONES ELÉCTRICAS

Esta sección se basa en el diseño general de los sistemas de control y potencia de los motores trifásicos de inducción de las bombas, de acuerdo a las normas establecidas al respecto.

6.11.1. Sistemas de Potencia y de Control de los Motores

6.11.1.1. Motores Operando sin Variador de Velocidad

Para motores con las características mencionadas en la sección 6.10.2, el sistema de potencia eléctrico debe cumplir básicamente con el siguiente esquema, de acuerdo al Código Eléctrico Nacional:

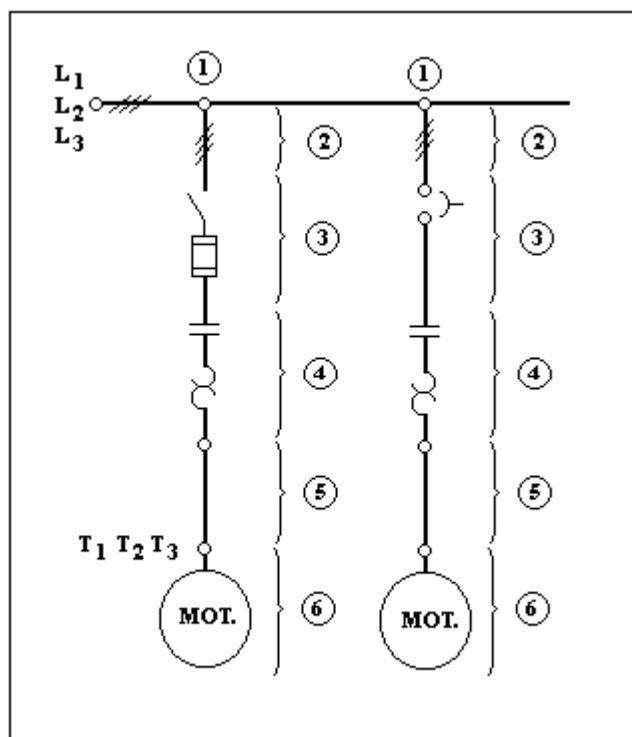


Figura 6.8. Diagrama unifilar del circuito de potencia

- donde:
- (1) Fuente de alimentación trifásica (acometida eléctrica)
 - (2) Alimentador del arrancador
 - (3) Elemento de desconexión manual con protección ramal
 - (4) Arrancador (contactor o contactores; relé de protección de sobrecarga)
 - (5) Alimentador del motor
 - (6) Motor trifásico de inducción rotor jaula de ardilla

En el Código Eléctrico Nacional se especifica para motores trifásicos de inducción de 150 hp las siguientes características:

- Capacidad: 150 hp
- Arrancador: NEMA # 5
- Amperaje de placa: 184 Amp. (corriente nominal)
- Corriente para protección de corto circuito (protección ramal):
 - Fusible: 600 Amp.
 - Interruptor automático: 400 Amp.
- Aislamiento de los conductores: Tw (hasta 60° C)
- Calibre de los conductores: Tw AWG # 300, sección transversal 152 mm²
- Diámetro del conduit: 2 ½ pulgada
- Longitud máxima de los conductores para una caída de tensión de 2 por ciento: 440 pies = 134 metros

El arranque de los motores más conveniente para el caso en que no se utilice variador de velocidad en los motores es por el método a tensión reducida con el sistema estrella – triángulo con transición abierta.

Para al arranque de los motores con este método se calculó la capacidad de los contactores, la corriente y la tensión de acuerdo al esquema del apéndice (16) , con los siguientes resultados:

- Tensión de línea: $V_L = 460$ Vol.
- Corriente de línea: $I_L = 184$ Vol.
- Tensión de fase en arranque en estrella = $(1/\sqrt{3}).V_L = 266$ Vol.
- Corriente de fase en arranque en estrella = $(2).I_N = 368$ A
- Par de arranque en estrella: $M = M_N = 300$ N.m
- Capacidad del contactor de línea: $1M = (1/\sqrt{3}).P_N = 87$ hp
- Capacidad del contactor de triángulo: $2M = (1/\sqrt{3}).P_N = 87$ hp
- Capacidad del contactor de arranque: $S = (1/3).P_N = 50$ hp

El esquema general del sistema de control es el siguiente:

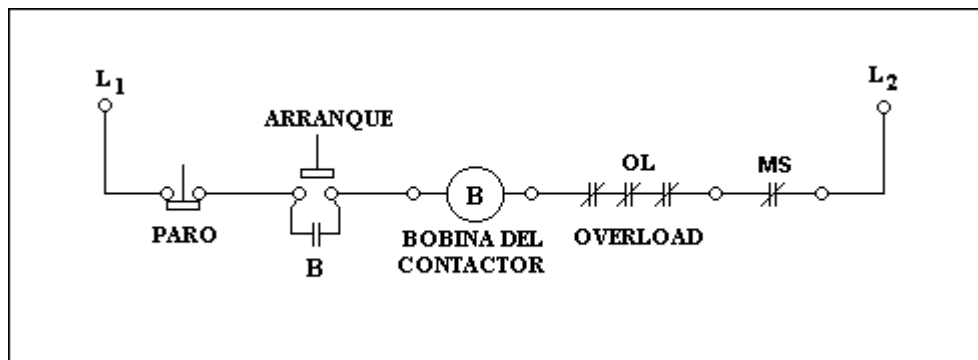


Figura 6.9. Circuito de control de motores trifásicos de inducción

La tensión del circuito la determina la tensión especificada en la bobina del contactor. Las protecciones en este caso corresponden a los relés de sobrecarga OL y al control de marcha en seco MS para evitar que los motores funcionen cuando la tubería se encuentre sin agua.

6.11.1.2. Motores Operando con Variador de Velocidad

El sistema de potencia y control de los motores que operen con un variador de velocidad depende de las especificaciones que da el fabricante al respecto. El esquema de conexión se puede observar en el apéndice 17. Se puede realizar la conexión con contactor de línea o sin éste.

CAPÍTULO 7

EVALUACIÓN ECONÓMICA

7.1. PRESUPUESTO

Para tener un estimado del costo de la inversión necesaria para llevar a cabo este proyecto se realizó un presupuesto general que incluye las partidas más importantes. El presupuesto fue realizado según la Comisión Permanente de Normas para Estructuras de Edificios del Ministerio del Desarrollo Urbano 2000-92 (Normas Covenin).

Este presupuesto tentativo corresponde básicamente a la construcción y equipamiento de la futura estación de bombeo Vegas de Petare. La descripción general de cada partida está detallada en el apéndice 19. Una breve descripción de cada capítulo del presupuesto se muestra a continuación.

7.1.1. Breve Descripción de Capítulos

7.1.1.1. Obras Preparatorias para Estructuras

Corresponde a las obras previas necesarias para llevar a cabo la construcción de las estructuras. Esta etapa incluye básicamente la preparación del sitio en el que se va a construir, realizando la compactación de relleno y la construcción de base de piedra picada.

Costo estimado = Bs. 111.682,94

7.1.1.2. Infraestructura de Concreto

Este capítulo del presupuesto corresponde a la construcción de la losa de fundación tipo maciza sobre la que se apoyará la estructura que conforma la estación de bombeo. Los detalles sobre esta losa se pueden observar en el plano anexo correspondiente.

Costo estimado = Bs. 2.592.500,00

7.1.1.3. Súper Estructura de Concreto

Se incluye la construcción de la losa nervada para el techo de la estación, las columnas rectangulares, dintel, cunetas y el transporte de los materiales. Los detalles sobre estas partes de la infraestructura se pueden observar en el plano anexo correspondiente.

Costo estimado = Bs. 5.544.670,72

7.1.1.4. Encofrados

Consiste en el encofrado de madera que debe realizarse para la construcción de losas, fundaciones, columnas, dintel, etc. Puede ser encofrado para acabado limpio y para acabado corriente.

Costo estimado = Bs. 489.801,32

7.1.1.5. Armadura de Refuerzo

Este capítulo incluye el suministro, transporte, preparación y colocación de acero de refuerzo utilizando cabilla. Los detalles sobre estas partes de la infraestructura se pueden observar en el plano anexo correspondiente.

Costo estimado = Bs. 2.085.400,00

7.1.1.6. Albañilería

Corresponde a la construcción de los revestimientos interior y exterior del techo y paredes de la estación. Los detalles sobre estas partes de la infraestructura se pueden observar en el plano anexo correspondiente.

Costo estimado = Bs. 2.079.949,23

7.1.1.7. Impermeabilización

Se debe realizar la impermeabilización del techo de la estación para evitar filtraciones de agua que afecten la infraestructura y los equipos. Se supuso una impermeabilización con membrana asfáltica reforzada con velo de poliéster.

Costo estimado = Bs. 643.648,40

7.1.1.8. Herrería

Corresponde al suministro y colocación de rejas fijas de perfiles de hierro para las ventanas de la estación así como el suministro, transporte y colocación de la puerta corredera de perfiles de hierro y de la viga que servirá para el polipasto o trolley en la instalación de los motores. Los detalles sobre estas partes de la infraestructura se pueden observar en el plano anexo correspondiente.

Costo estimado = Bs. 836.500,00

7.1.1.9. Acabado con Pinturas

Incluye Pinturas de caucho para el interior de la estación y esmalte para las rejas de las ventanas y puerta.

Costo estimado = Bs. 122.678,97

7.1.1.10. Instalaciones Eléctricas

Este capítulo corresponde a los elementos que conforman el sistema de alumbrado de la estación y se incluyen los cables, las tuberías correspondientes a los conduit de éstos, los cajetines para el medidor de consumo para estas partes del sistema eléctrico, interruptores y protectores termo-magnéticos.

Costo estimado = Bs. 2.815.194,62

7.1.1.11. Instalaciones Electromecánicas

Se incluyen los equipos de bombeo, los motores eléctricos, los acoples, bases metálicas de sujeción de los grupos moto–bomba, soportes de material deformable para las bases metálicas de los grupos (absorbedores de vibraciones), sistema de control y potencia eléctricos que incluyen los dispositivos necesarios para el encendido de los motores en estrella – triángulo (para el motor adicional de emergencia), variadores de velocidad para motores trifásicos de inducción (dos unidades), sistema de tuberías para la succión y descarga de las bombas, accesorios del sistema de tuberías, válvulas de compuerta y retención. Los detalles sobre estas partes de la infraestructura se pueden observar en el plano anexo correspondiente y las partidas correspondientes en el apéndice 19.

Costo estimado = Bs. 109.232.750,00

7.1.1.12. Obras de Servicios y Varios

Abarca el suministro e instalación de la tubería de 6 pulgadas de hierro galvanizado correspondiente al tramo principal de la red. También incluye la reubicación de la tubería de 10 pulgadas y filtro existentes del Alimentador del que se surte la estación, entres otras.

Costo estimado = Bs. 13.570.000,00

7.1.2. Total de la Inversión

CAPÍTULO	TOTALES (Bs.)	(%)
1. Obras Preparatorias para Estructuras	111.682,94	0,08
2. Infraestructura de Concreto	2.592.500,00	1,85
3. Súper Estructura de Concreto	5.544.670,72	3,96
4. Encofrados	489.801,32	0,35
5. Armadura de Refuerzo	2.085.400,00	1,49
6. Albañilería	2.079.949,23	1,48
7. Impermeabilización	643.648,40	0,46
8. Herrería	836.500,00	0,60
9. Acabado con Pinturas	122.678,97	0,09
10. Instalaciones Eléctricas	2.815.194,62	2,01
11. Instalaciones Electromecánicas	109.232.750,00	77,95
12. Obras de Servicios y Varios	13.570.000,00	9,68
TOTAL OBRA Bs.	140.124.776,2	

Tabla 7.1 Totales de cada capítulo y total de la inversión

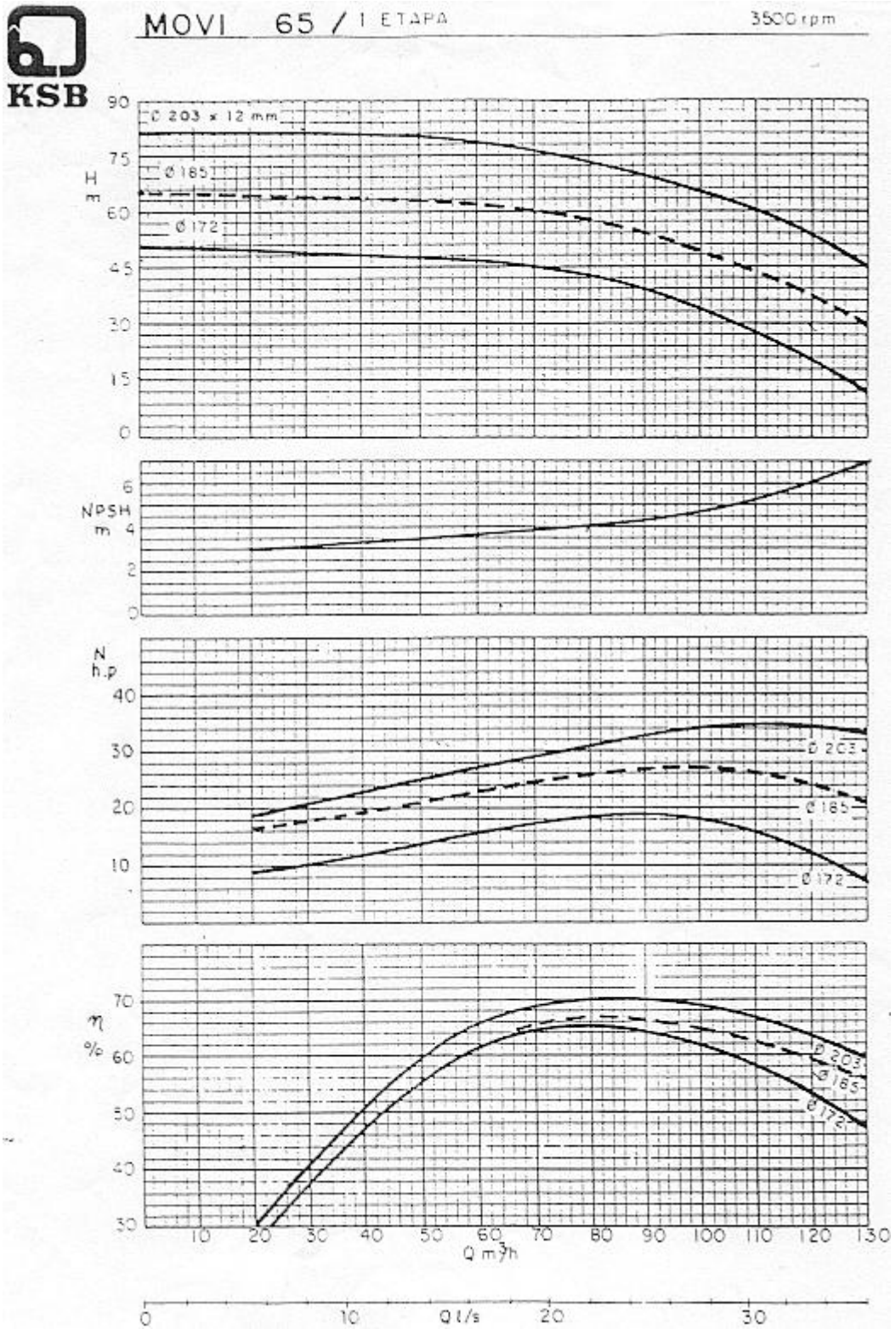
CONCLUSIONES

- ★ La falta de información (data técnica, poblacional, estadística) con respecto a las zonas populares en nuestro país, retrasa y dificulta el desarrollo de proyectos sociales.
- ★ Una estimación bastante aproximada de las necesidades de una población en relación al consumo de agua en un período determinado es de suma importancia en el diseño los sistemas de abastecimientos de agua.
- ★ El equipo de bombeo seleccionado se ajusta a los requerimientos hidráulicos, mecánicos, eléctricos y económicos de acuerdo a los cálculos realizados en el diseño de la estación.
- ★ La implementación de alternativas que ofrezcan ahorro de energía en estaciones de bombeo sin que se afecte la calidad del servicio debe estar presente en ese tipo de instalaciones.
- ★ El variador de velocidad facilita un mejor funcionamiento de la estación de bombeo aumentando la vida útil de los equipos y disminuyendo el consumo energético, ajustándose a las variaciones del consumo de agua en la red de distribución.
- ★ Los proyectos de abastecimientos de agua deben contemplar aumentos de la demanda por encima de los valores previstos inicialmente, es decir, se debe considerar un factor de seguridad con respecto a la proyección estimada.
- ★ La propuesta realizada en este trabajo sugiere la instalación de tres grupos moto-bomba (dos en operación y uno en caso de emergencia y mantenimiento), la instalación y uso de dos variadores de velocidad (uno para cada motor en operación) y la instalación de una tubería de 6 pulgadas como tramo principal de la red de distribución.

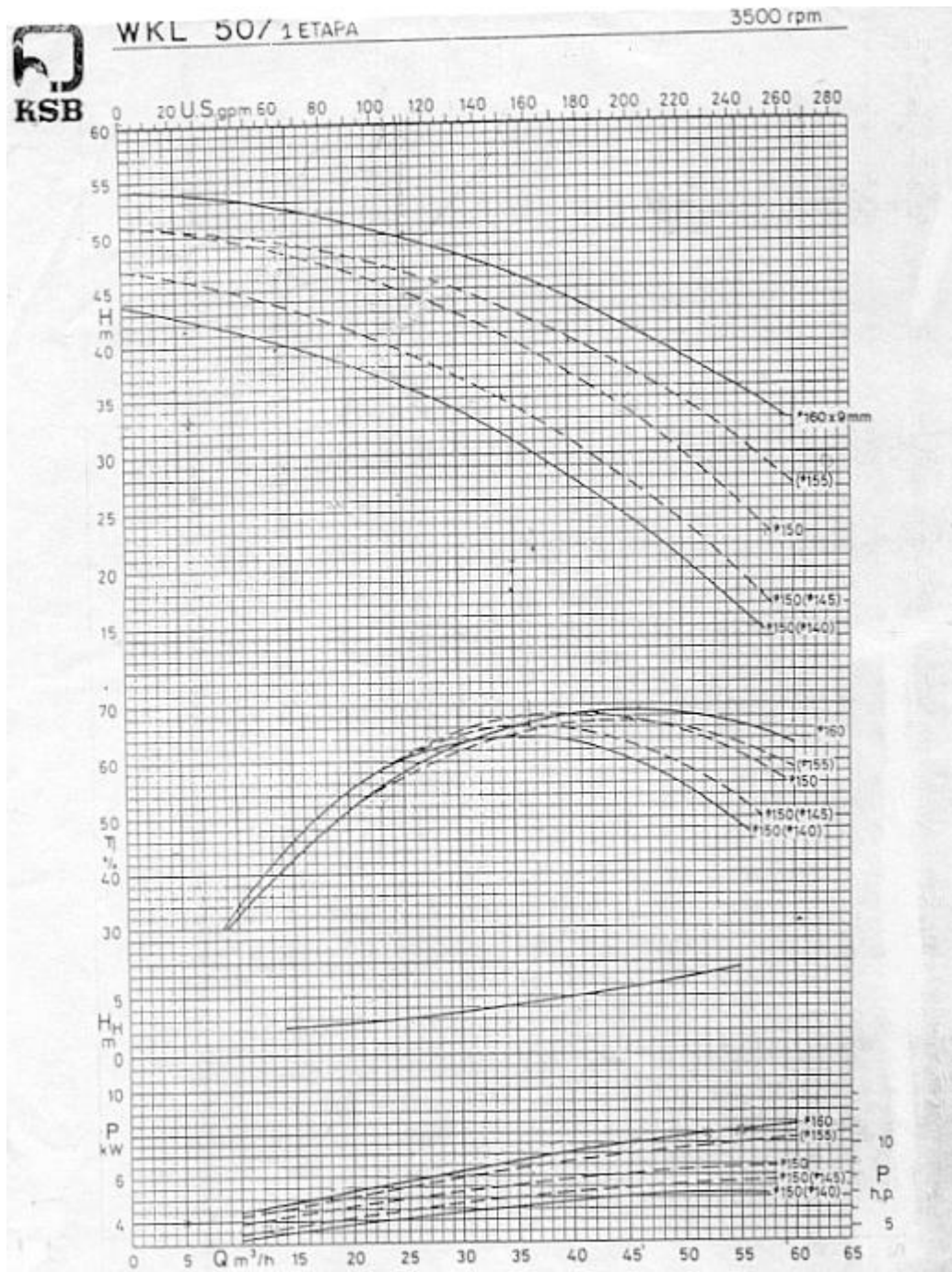
RECOMENDACIONES

- Se debe mejorar y aumentar la data existente respecto a los sistemas de abastecimiento de agua y estimaciones de población de las zonas populares, de tal manera que no sea un obstáculo en el desarrollo de proyectos sociales.
- No escatimar esfuerzos en lograr satisfacer las necesidades de una población ya que esto permite aumentar las posibilidades de desarrollo y bienestar social.
- Es muy recomendable el análisis preciso de las variaciones del consumo de una red de distribución en el diseño y selección del equipo de bombeo evitando así sobredimensionamientos o, por el contrario, proyectos insuficientes en su objetivo.
- Para lograr un buen funcionamiento del equipo seleccionado se debe trabajar en conjunto con el personal de instalación y el fabricante, de manera que se cubran aspectos técnicos del montaje.
- Se recomienda realizar investigaciones y pruebas específicas sobre la aplicación de los variadores de velocidad como método de ahorro de energía y mejoramiento de procesos.
- Se deben considerar con más ahínco las alternativas de ahorro de energía en los proyectos de ingeniería debido a la importancia de este tema en la realidad energética del nuevo milenio.

Apéndice 1. Curvas Características de las Bombas



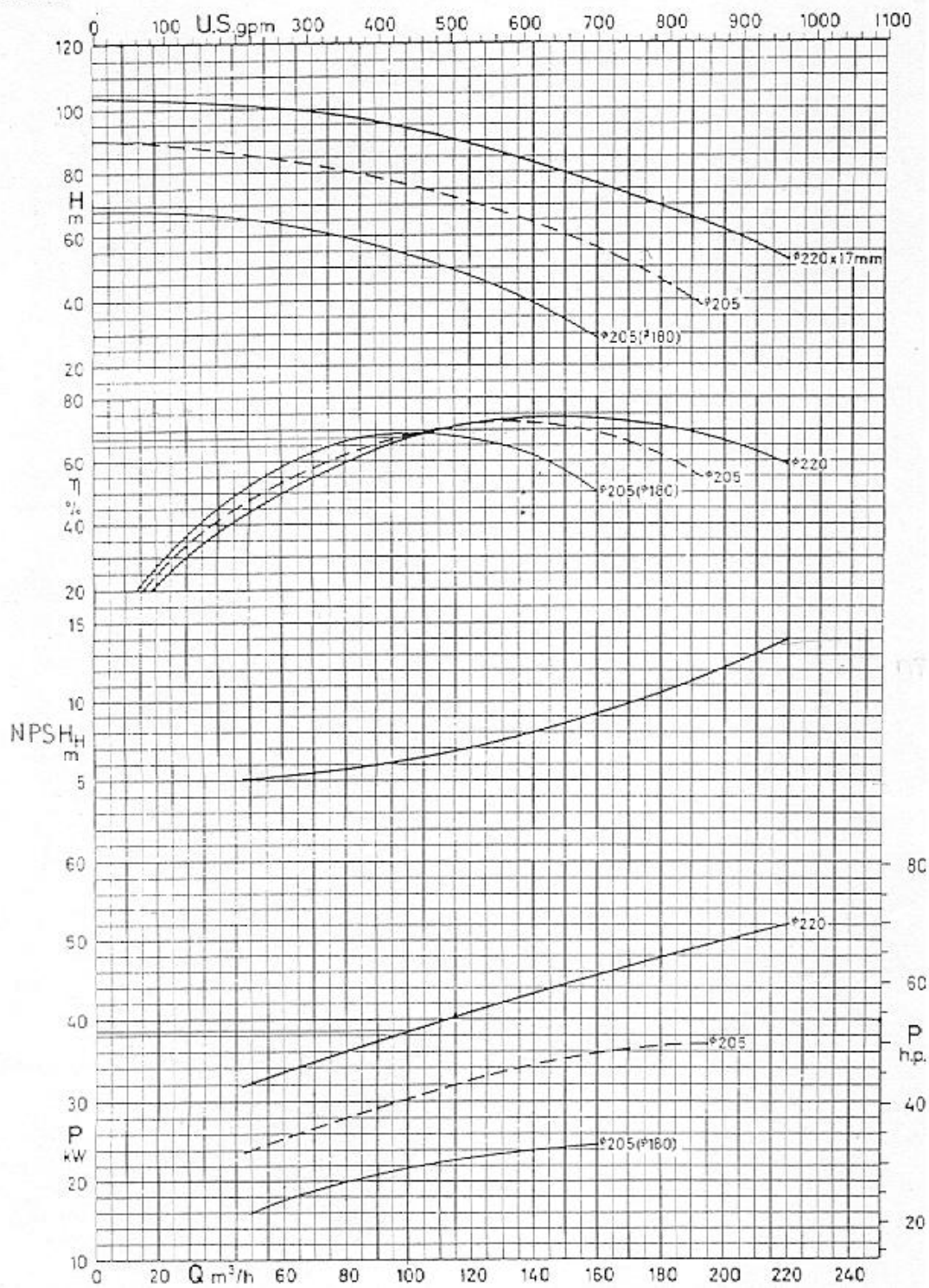
Apéndice





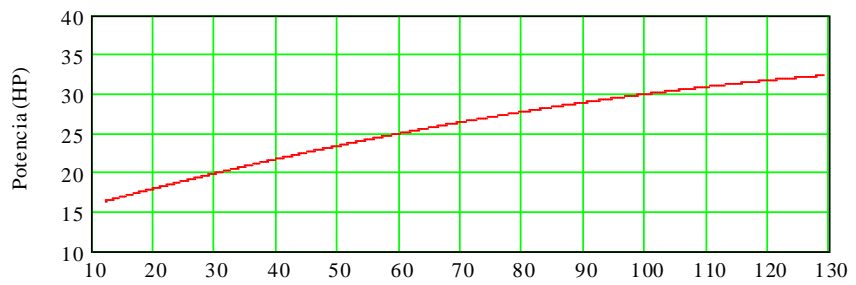
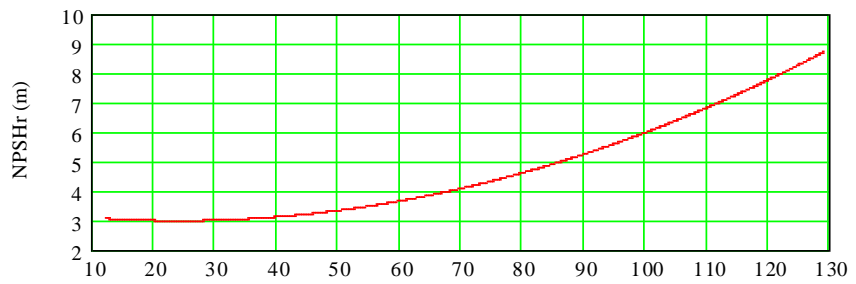
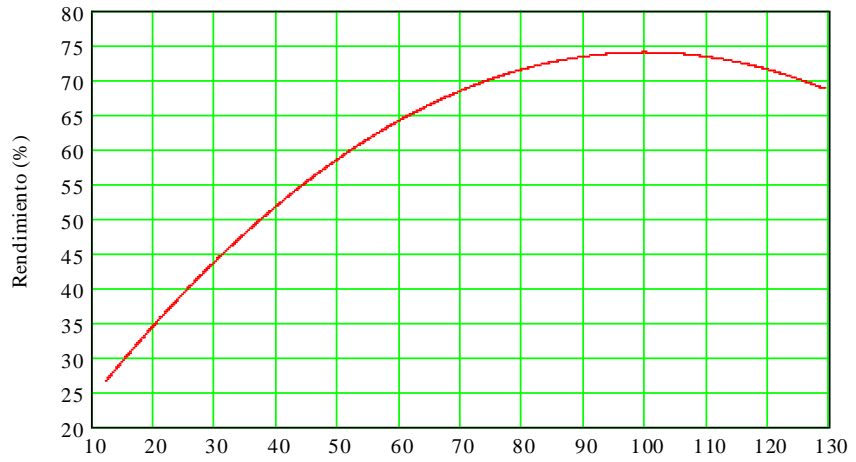
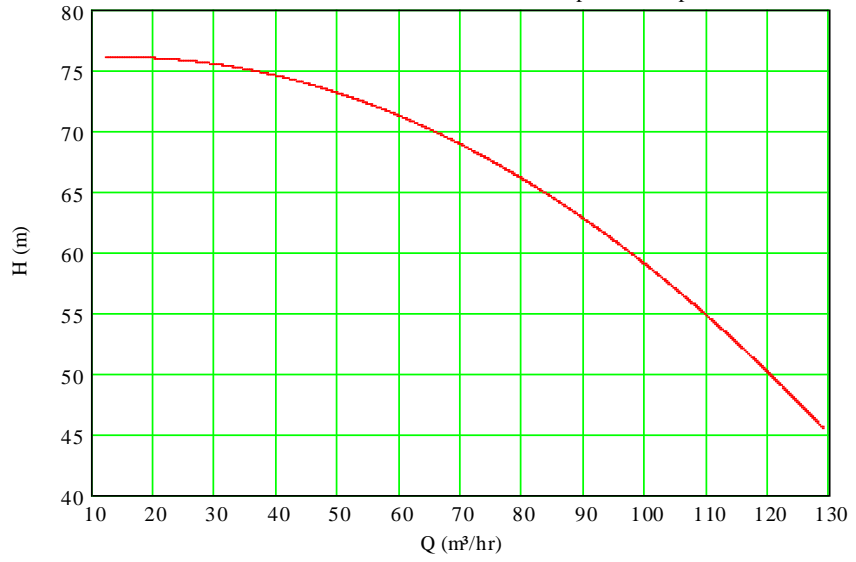
WKL 80/1ETAPA

3500 rpm



Apéndice

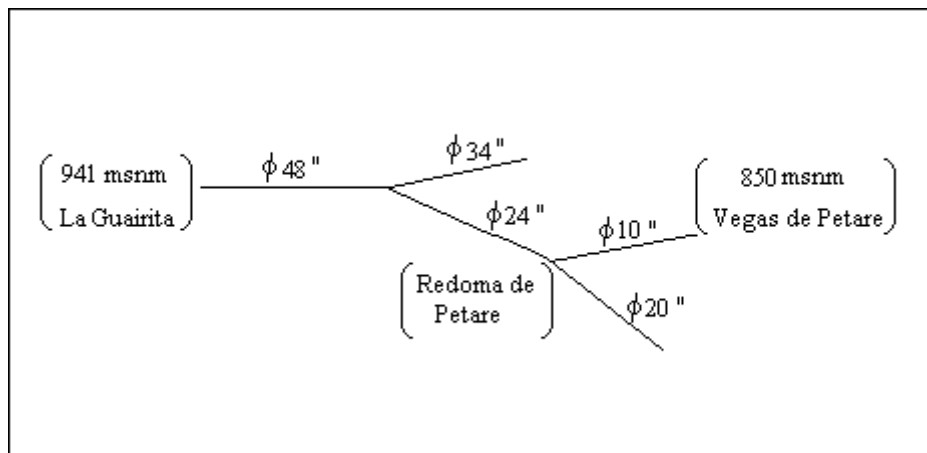
Bomba KSB WK80 198mm/ 1 etapa / 3500 rpm



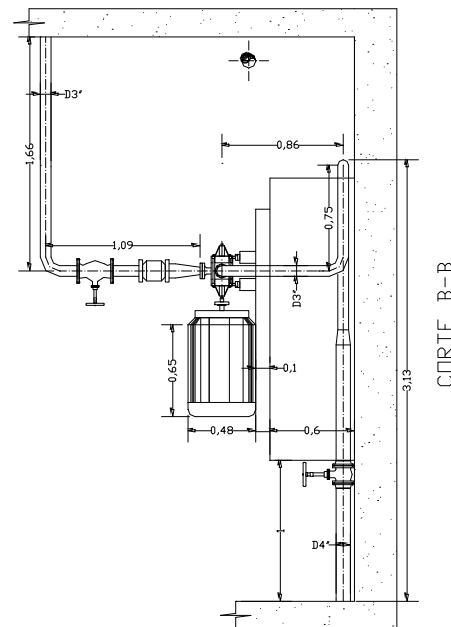
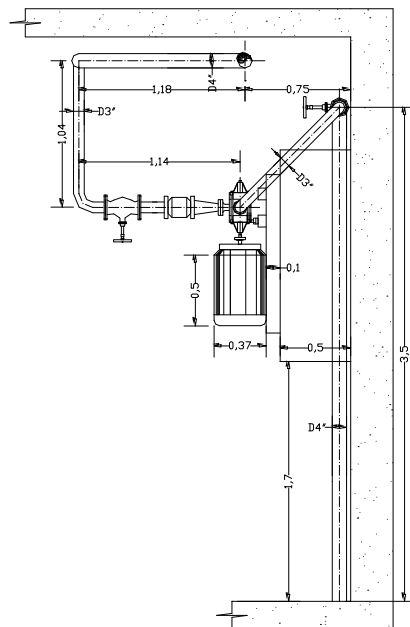
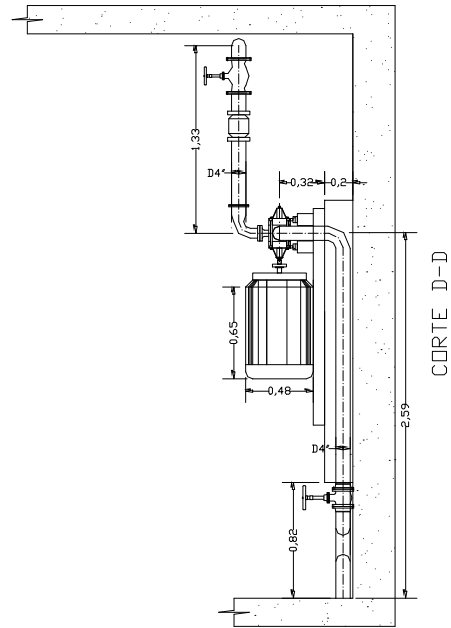
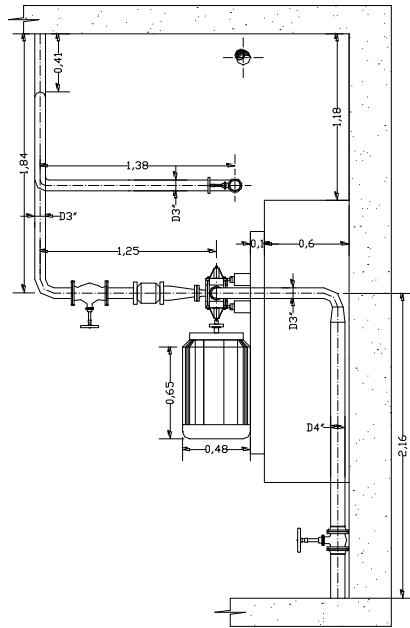
Apéndice 2. Niveles de Servicio en el Acueducto Metropolitano

NIVELES	DESDE (msnm)	HASTA (msnm)	COTA REBOSE ESTANQUE
0	820	860	885
1	860	905	930
2	905	940	965
3	940	990	1015
4	990	1040	1065
5	1040	1090	1115
6	1090	1140	1165
7	1140	1190	1215
8	1190	1240	1265
9	1240	1290	1315
10	1290	1340	1365

Recorrido Gral. del Alimentador Este (Estación 2-5, La Guairita / Sist. Tuy III) hasta la Estación de Bombeo Vegas de Petare

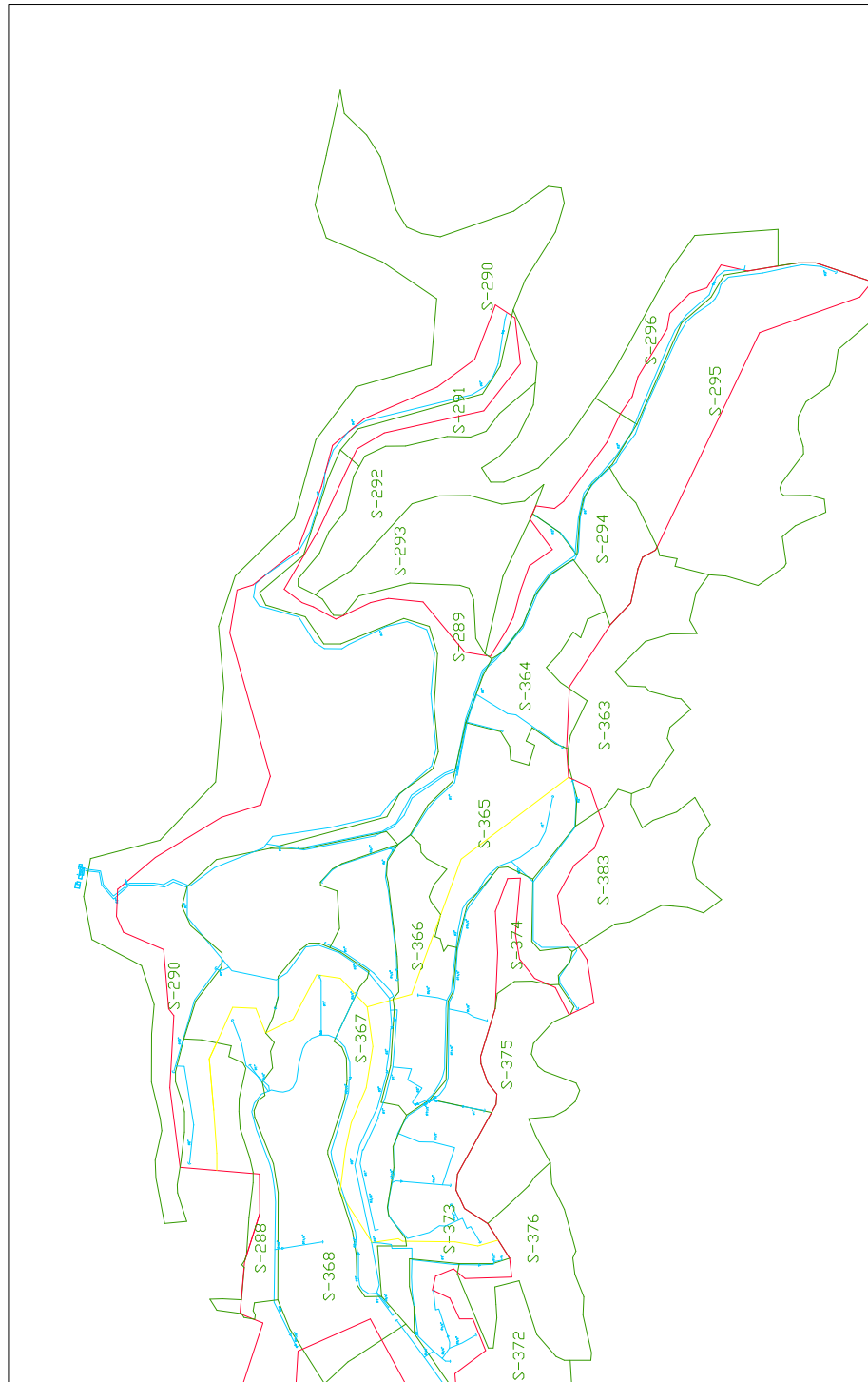


Apéndice 3. Cortes de la figura 4.1



Unidades en metros

Apéndice 4. Zona Servida Por El Bombeo De La Estación



Azul: red de tuberías Verde: delimitaciones de cada segmento (S - xxx)
Rojo: delimitaciones de la zona abastecida por la estación

Apéndice 5. Rugosidad de las Tuberías de Hierro Fundido Dúctil y Hierro Galvanizado

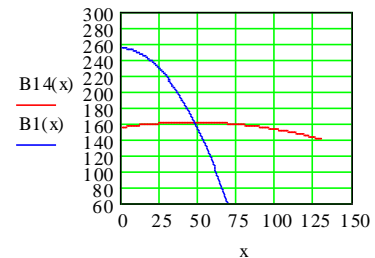
Fuente De Investigación	Rugosidad		Referencia Bibliográfica
	Hierro Fundido Dúctil	Hierro Galvanizado	
P. Lamount (1981)	VM: 0,226 mm VDR: 0,250 mm	0,102 mm 0m125 mm	Tub. A Pres.
Hydraulic Institute Engineer Data Book	0,259 mm	0,152 mm	Cameron
H. Richter (1954) / H. Morris	-	0,10 – 0,15 mm	Tablas Hidraul
F. Colebrook	Nueva: 0,25 – 1,00 mm Muchos años de servicio: 1,0 – 1,5 mm		

Apéndice 6. Análisis de Red de la Zona Alta – E/B Vegas de Petare

Bomba 1: $\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 51 \\ -0.025 \\ -7.91 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix} \cdot 5$ $B1(w) := a + b \cdot w + c \cdot w \cdot |w|$

Bombas 1 y 4: $\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 155.126 \\ 0.279 \\ -3.045 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix}$ $B14(w) := a + b \cdot w + c \cdot w \cdot |w|$ $x := 0..130$

Rugosidad actual de las tuberías de hierro fundido dúctil: $\varepsilon := 0.004462$ ft



Tramos principales

$Long := (223.7 \ 812 \ 31 \ 437.6 \ 54.72 \ 306.6 \ 184.1 \ 604)^T$ m Longitud de los tramos ppales

$d := (4 \ 4 \ 4 \ 4 \ 3 \ 4 \ 4 \ 3)^T$ in Diámetros de los tramos ppales $D := \frac{d}{12}$

Apéndice

Caso 1: consumo en horas diurnas

Presión en la succión $P_s := 30$ metros

$Q := (109 \ 57 \ 51 \ 29 \ 15 \ 14 \ 22 \ 10)^T$ $\frac{m^3}{hr}$ Caudales iniciales

Consumo asignado al nodo entre el tramo 6 y 7 (tubería 1 pulgadas en la Subida El Carpintero): $10 \frac{m^3}{hr}$

$\Sigma K := (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1)^T$ Sumatoria de pérdidas en los tramos ppales $i := 0..7$

Número de Reynolds asociado al caudal en cada tramo: $R_i := 15377 \frac{|Q_i|}{d_i}$ Tagua = 25°C

Factor de fricción por Swami: $f_i := \frac{0.25}{\log \left[\frac{\varepsilon}{3.7 D_i} + \frac{5.74}{(R_i)^{0.9}} \right]^2}$

Valor de la constante de pérdidas de cada tramo $K_i := \left(f_i \frac{Long_i \cdot 3.28}{D_i} + \Sigma K_i \right) \cdot \frac{1}{(d_i)^4} \cdot 0.01532$

Método de las características o método lineal

w := 10

Given

1 $Q_1 + Q_2 = Q_0$

2 $Q_2 = Q_3 + Q_6$

3 $Q_3 = Q_4 + Q_5$

4 $Q_6 = Q_7 + Q_8$

5 $K_1 \cdot (Q_1)^2 - K_2 \cdot (Q_2)^2 - K_3 \cdot (Q_3)^2 - K_4 \cdot (Q_4)^2 = 54$

6 $K_3 \cdot (Q_3)^2 + K_5 \cdot (Q_5)^2 - K_6 \cdot (Q_6)^2 - K_7 \cdot (Q_7)^2 = 0$

7 $K_1 \cdot (Q_1)^2 - K_2 \cdot (Q_2)^2 - K_6 \cdot (Q_6)^2 - K_7 \cdot (Q_7)^2 = 54$

8 $B14(Q_0) - K_0 \cdot (Q_0)^2 - K_2 \cdot (Q_2)^2 - K_3 \cdot (Q_3)^2 - K_5 \cdot (Q_5)^2 = 100 - P_s$

$Q := \text{Find}(Q_0, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7)$

Solución:

$$Q = \begin{pmatrix} 108.596 \\ 57.611 \\ 50.985 \\ 29.499 \\ 15.38 \\ 14.119 \\ 21.486 \\ 11.2 \end{pmatrix} \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

Caudales de tránsito en cada tramo.

$$B14(Q_0) = 149.5 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

Presión en la descarga de las bombas 1 y 4

$$Q_0 = 108.6 \text{ m}$$

Caudal bombeado por las bombas 1 y 4

Caso 2 consumo en horas nocturnas

Presión en la succión $P_s := 48$ metros

$$Q := (44 \ 16 \ 28 \ 15 \ 3 \ 11 \ 13 \ 8)^T \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \text{ Caudales iniciales}$$

Consumo asignado al nodo entre el tramo 6 y 7 (tubería 1 pulgadas en la Subida El Carpintero) $Q_8 := 5 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$

$$\Sigma K := (1 \ 10000 \ 1000 \ 1000 \ 10000 \ 1000 \ 1000 \ 500)^T \text{ Sumatoria de pérdidas en los tramos } i := 0..7$$

$$\text{Número de Reynolds asociado al caudal en cada tramo: } R_i := 15377 \frac{|Q_i|}{d_i} \text{ Tagua} = 25^\circ\text{C}$$

$$\text{Factor de fricción por Swami: } f_i := \frac{0.25}{\log \left[\frac{\epsilon}{3.7 D_i} + \frac{5.74}{(R_i)^{0.9}} \right]^2}$$

$$\text{Valor de la constante de pérdidas de cada tramo } K_i := \left(f_i \cdot \frac{\text{Long}_i \cdot 3.28}{D_i} + \Sigma K_i \right) \cdot \frac{1}{(d_i)^4} \cdot 0.01532$$

Método de las características o método lineal

w := 10

Given

$$1 \quad Q_1 + Q_2 = Q_0$$

$$2 \quad Q_2 = Q_3 + Q_6$$

$$3 \quad Q_3 = Q_4 + Q_5$$

$$4 \quad Q_6 = Q_7 + Q_8$$

$$5 \quad K_1 \cdot (Q_1)^2 - K_2 \cdot (Q_2)^2 - K_3 \cdot (Q_3)^2 - K_4 \cdot (Q_4)^2 = 69$$

$$6 \quad K_3 \cdot (Q_3)^2 + K_5 \cdot (Q_5)^2 - K_6 \cdot (Q_6)^2 - K_7 \cdot (Q_7)^2 = 4$$

$$7 \quad K_1 \cdot (Q_1)^2 - K_2 \cdot (Q_2)^2 - K_6 \cdot (Q_6)^2 - K_7 \cdot (Q_7)^2 = 86$$

$$8 \quad B1(Q_0) - K_0 \cdot (Q_0)^2 - K_2 \cdot (Q_2)^2 - K_3 \cdot (Q_3)^2 - K_5 \cdot (Q_5)^2 = 138 - P_s$$

$$Q := \text{Find}(Q_0, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7)$$

Solución:

$$Q = \begin{pmatrix} 43.813 \\ 15.812 \\ 28.001 \\ 15.051 \\ 3.417 \\ 11.634 \\ 12.95 \\ 7.908 \end{pmatrix} \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \quad \text{Caudales de tránsito en cada tramo.}$$

$$B1(Q_0) = 173.6 \quad \text{m} \quad \text{Presión en la descarga de la bomba 1}$$

$$Q_0 = 43.8 \quad \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \quad \text{Caudal bombeado por la bomba 1}$$

En este caso, el cálculo se realiza sólo con la bomba 1 puesto que para presiones en la descarga mayores a 162 metros, la bomba 4 no ejerce ningún efecto sobre el sistema de bombeo.

Apéndice 7. Análisis de Red de la Zona Baja – E/B Vegas de Petare

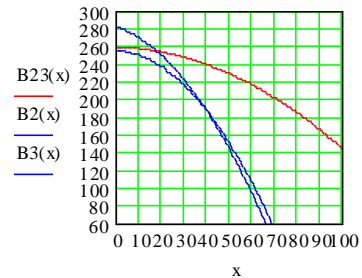
$B2(x) := 259.2 - 0.057x - 0.011x^2$ Bombas 2 y 3:

$B2(w) := 282 - 0.897w - 0.038w^2$

$B3(w) := 255 - 0.124w - 0.04w^2$

$x := 0..100$

Rugosidad actual de las tuberías de hierro galvanizado: $\epsilon := 0.004108$ ft



Tramos principales

$Long := (217 \ 206 \ 334 \ 330 \ 271 \ 64 \ 80 \ 240 \ 226)^T$ m Longitud de los tramos ppales

$d := (3 \ 3 \ 3 \ 2.5 \ 2 \ 3 \ 3 \ 3 \ 2)^T$ in Diámetros de los tramos ppales $D := \frac{d}{12}$

Caso 1: bombas 2 y 3 operando en paralelo

Presión en la succión $P_s := 25$ metros

$Q := (69 \ 54 \ 26 \ 10 \ 1 \ 29 \ 19 \ 7 \ 2)^T$ $\frac{m^3}{hr}$ Caudales iniciales

Consumos asignados en los nodos repectivos como simplificación de ciertos tramos:

$$\begin{pmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \\ Q_d \\ Q_e \\ Q_f \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 25 \\ 18 \\ 8 \\ 5 \\ 15 \\ 1 \end{pmatrix} \frac{m^3}{hr}$$

$\Sigma K := (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1)^T$ Sumatoria de pérdidas en los tramos ppales

$i := 0..8$

Número de Reynolds asociado al caudal en cada tramo: $R_i := 15377 \frac{|Q_i|}{d_i}$ Tagua = 25°C

Factor de fricción por Swami: $f_i := \frac{0.25}{\log \left[\frac{\epsilon}{3.7D_i} + \frac{5.74}{(R_i)^{0.9}} \right]^2}$

Valor de la constante de pérdidas de cada tramo $K_i := \left(f_i \cdot \frac{Long_i \cdot 3.28}{D_i} + \Sigma K_i \right) \cdot \frac{1}{(d_i)^4} \cdot 0.01532$

Método de las características o método lineal

w := 10

Given

$$1 \quad Q_0 = Q_1 + Q_a$$

$$2 \quad Q_1 = Q_2 + Q_5$$

$$3 \quad Q_2 = Q_3 + Q_b$$

$$4 \quad Q_3 = Q_4 + Q_c$$

$$5 \quad Q_5 = Q_6 + Q_d$$

$$6 \quad Q_6 = Q_7 + Q_e$$

$$7 \quad Q_7 = Q_8 + Q_f$$

$$8 \quad B23(Q_0) - K_0 \cdot (Q_0)^2 - K_1 \cdot (Q_1)^2 - K_2 \cdot (Q_2)^2 - K_3 \cdot (Q_3)^2 - K_4 \cdot (Q_4)^2 = 1 - P_s$$

$$9 \quad K_4 \cdot (Q_4)^2 + K_3 \cdot (Q_3)^2 + K_2 \cdot (Q_2)^2 - K_5 \cdot (Q_5)^2 - K_6 \cdot (Q_6)^2 - K_7 \cdot (Q_7)^2 - K_8 \cdot (Q_8)^2 = 27$$

$$Q := \text{Find}(Q_0, Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7, Q_8)$$

Solución:

$$Q = \begin{pmatrix} 73.227 \\ 48.227 \\ 26.348 \\ 8.348 \\ 0.348 \\ 21.879 \\ 16.879 \\ 1.879 \\ 0.879 \end{pmatrix}$$

$\frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$

Caudales de tránsito en cada tramo.

$$B23(Q_0) = 196$$

$\frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$

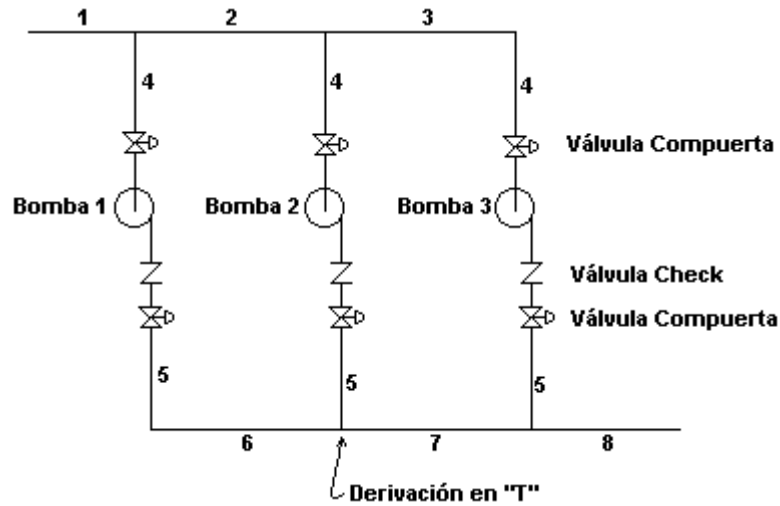
Presión en la descarga de las bombas 2 y 3

$$Q_0 = 73.2 \quad \text{m}$$

Caudal bombeado por las bombas 2 y 3

Apéndice 8. Pérdidas en la Succión y en la Descarga de las Bombas / Futura

Estación



$Lo := \begin{pmatrix} 3.00 \\ 2.20 \\ 2.20 \\ 0.98 \\ 1.00 \\ 2.20 \\ 2.20 \\ 5.00 \end{pmatrix} \text{ m}$	L/D	Accesorio
	20	"T" estándar (flujo directo)
	8	Válvula de Compuerta
	50	Válvula de Retención (swing)
	30	Codo estándar 90°

$$\epsilon := 0.152 \frac{\text{mm}}{\text{ft}} + 0.055 \frac{\text{mm}}{\text{yr}} \cdot \frac{3\text{yr}}{\text{ft}}$$

$\epsilon = \blacksquare$

Hierro Galvanizado

$$d := \begin{pmatrix} 8 \\ 8 \\ 8 \\ 5 \\ 4 \\ 6 \\ 6 \\ 6 \end{pmatrix} \text{ in} \quad Le := \frac{Lo}{m} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 20d_4 + 8 \cdot d_4 + 30d_4 \\ 30d_5 + 50d_5 + 8 \cdot d_5 + 20d_5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot m^{-1} \quad Le = \blacksquare \quad Q := \begin{pmatrix} 260 \\ 260 \\ 130 \\ 130 \\ 130 \\ 130 \\ 260 \\ 260 \end{pmatrix}$$

$$D := \frac{d}{\text{ft}} \quad d := \frac{d}{\text{in}}$$

Apéndice

$$i := 1..8 \quad R_i := 15377 \frac{|Q_i|}{d_i} \quad f_i := \frac{0.25}{\log \left[\frac{\varepsilon}{3.7D_i} + \frac{5.74}{(R_i)^{0.9}} \right]^2}$$

$$K_i := f_i \cdot \frac{Le_i \cdot 3.28}{D_i} \cdot \frac{1}{(d_i)^4} \cdot 0.01532 \quad H(Q) := K \cdot Q^2$$

$$Q := 0..250$$

$$H(Q)_1$$

$$H(Q)_2 + H(Q)_4 + H(Q)_5$$

$$H\left(\frac{Q}{2}\right)_2 + H\left(\frac{Q}{2}\right)_4 + H\left(\frac{Q}{2}\right)_5$$

$$H(Q)_1 + H\left(\frac{Q}{2}\right)_2 + H\left(\frac{Q}{2}\right)_4 + H\left(\frac{Q}{2}\right)_5$$

$$H(Q)_1 + H\left(\frac{Q}{2}\right)_2 + H\left(\frac{Q}{2}\right)_4 + H\left(\frac{Q}{2}\right)_5 + H(Q)_7 + H(Q)_8$$



Q

$$hf_{2bombas}(Q) := H(Q)_1 + H\left(\frac{Q}{2}\right)_2 + H\left(\frac{Q}{2}\right)_4 + H\left(\frac{Q}{2}\right)_5 + H(Q)_7 + H(Q)_8$$

$$a := \text{regress} \left[\begin{pmatrix} 0 \\ 100 \\ 200 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ hf_{2bombas}(100) \\ hf_{2bombas}(200) \end{pmatrix}, 2 \right]_6 \quad a = \blacksquare \quad hf(Q) := a \cdot Q^2$$

Pérdidas en el año 2005 para el caudal máximo diario: $h_f = K \cdot Q^2$ $K = 0.000072$

Para $Q=62.11$ litros/s \Rightarrow pérdida=3.628 metros 2 bombas en paralelo

Pérdidas en el año 2020 para el caudal máximo diario: $h_f = K \cdot Q^2$ $K = 0.00010$

Para $Q=44.4$ litros/s \Rightarrow pérdida=2.685 metros 2 bombas en paralelo

Apéndice 9. Análisis de Red / Opción A: la red permanece como está actualmente.

El cálculo se realizó de la misma manera que en los casos de los apéndices 6 y 7, con la salvedad de la rugosidad absoluta en función del tiempo en estudio. Los cálculos se pueden verificar en el archivo anexo “Opción A.mcd”.

Red de tuberías de la Zona Alta: consumo en horas diurnas / Año 2005

Solución:

Caudales de tránsito en cada tramo.

$$Q_a = \frac{m^3}{hr}$$

$$Q_0 = \frac{m^3}{hr}$$

Caudal requerido de las bombas

$$Q \left(\frac{m^3}{hr} \right) \quad H(m)$$

$$\begin{pmatrix} 88.45 \\ 99.23 \\ 111.75 \\ 125.5 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 180 \\ 210 \\ 250 \\ 300 \end{pmatrix}$$

Red de tuberías de la Zona Baja: consumo en horas diurnas / Año 2005

Solución:

Caudales de tránsito en cada tramo.

$$Q = \frac{m^3}{hr}$$

$$Q_0 = \frac{m^3}{hr}$$

Caudal requerido de las bombas

$$Q \left(\frac{m^3}{hr} \right) \quad H(m)$$

$$\begin{pmatrix} 68.379 \\ 73.406 \\ 78.465 \\ 83.80 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 180 \\ 210 \\ 250 \\ 300 \end{pmatrix}$$

Red de tuberías de la Zona Alta: consumo en horas diurnas / Año 2020

Solución:

Caudales de tránsito en cada tramo.

$$\begin{array}{l}
 Q_a = \begin{pmatrix} 81.737 \\ 91.5 \\ 102.98 \\ 115.64 \end{pmatrix} \frac{m^3}{hr} \\
 Q_0 = 146 \frac{m^3}{hr}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \\
 \text{Caudal requerido de las bombas}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 Q \left(\frac{m^3}{hr} \right) \quad H(m) \\
 \begin{pmatrix} 180 \\ 210 \\ 250 \\ 300 \end{pmatrix}
 \end{array}$$

Apéndice 10. Análisis de Red / Opción B: conexión del tramo [0] de la red de la zona alta con una tubería adicional en paralelo.

El cálculo se realizó de la misma manera que en los casos de los apéndices 6 y 7, con la salvedad de la rugosidad absoluta en función del tiempo en estudio y la inclusión de la tubería en paralelo. La solución en este caso incluye el método de Hardy-Cross. Los cálculos se pueden verificar en el archivo anexo “Opción B.mcd”.

Red de tuberías de la Zona Alta: consumo en horas diurnas / Año 2005

Solución:

$$\begin{array}{l}
 Q_a = \begin{pmatrix} 85.292 \\ 85.292 \\ 40.398 \\ 21.172 \\ 35.842 \\ -14.669 \\ 19.225 \\ 6.994 \\ 44.895 \end{pmatrix} \frac{m^3}{hr} \\
 Q_0 = 146 \frac{m^3}{hr}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \\
 \text{Caudal requerido de las bombas}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 Q \left(\frac{m^3}{hr} \right) \quad H(m) \\
 \begin{pmatrix} 180 \\ 210 \\ 250 \\ 300 \end{pmatrix}
 \end{array}$$

Red de tuberías de la Zona Baja: consumo en horas diurnas / Año 2005

Solución:

$Q_a = \begin{pmatrix} 130.725 \\ 130.725 \\ 79.487 \\ 48.877 \\ 26.537 \\ 22.34 \\ 30.61 \\ 20.617 \\ 51.237 \end{pmatrix}$	Caudales de tránsito en cada tramo.	$\frac{m^3}{hr}$	$Q \left(\frac{m^3}{hr} \right) \quad H(m)$	
			$\begin{pmatrix} 92.8 \\ 103.7 \\ 116.54 \\ 130.73 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 180 \\ 210 \\ 250 \\ 300 \end{pmatrix}$	
		$Q_0 = 131$	$\frac{m^3}{hr}$	Caudal requerido de las bombas

Tramo adicional por el Método de Hardy-Cross

$$q := \begin{pmatrix} C_0 \\ C_1 \end{pmatrix} \leftarrow \begin{pmatrix} Q_0 \\ Q_0 \end{pmatrix} \cdot 0.5$$

$$d \leftarrow \begin{pmatrix} d_a \\ d_0 \end{pmatrix}$$

for j ∈ 1..10

for i ∈ 0..1

$$R_i \leftarrow 15377 \frac{|C_i|}{d_i}$$

$$f_i \leftarrow \frac{0.25}{\log \left[\frac{\varepsilon_i \cdot 12}{3.7 d_i} + \frac{5.74}{(R_i)^{0.9}} \right]^2}$$

$$K_i \leftarrow \left(f_i \cdot \frac{L_a \cdot 3.28}{d_i} + 0 \right) \cdot \frac{1}{(d_i)^4} \cdot 0.01532$$

$$\Delta Q \leftarrow \frac{-K_0 \cdot C_0 \cdot |C_0| + K_1 \cdot C_1 \cdot |C_1|}{2 \cdot (K_0 \cdot |C_0| + K_1 \cdot |C_1|)}$$

$$C \leftarrow \begin{pmatrix} C_0 + \Delta Q \\ C_1 - \Delta Q \end{pmatrix}$$

$$K_e \leftarrow \frac{20}{\left(\sqrt{\frac{20}{K_0}} + \sqrt{\frac{20}{K_1}} \right)^2}$$

$$\begin{pmatrix} K_e \\ C_0 \\ C_1 \end{pmatrix}$$

Apéndice 11. Análisis de Red / Opción C: instalación de tubería de 6 pulgadas para ambas redes

El cálculo se realizó de la misma manera que en los casos de los apéndices 6 y 7, con la salvedad de la rugosidad absoluta en función del tiempo en estudio y el cambio en la configuración en la red de distribución. Los cálculos se pueden verificar en el archivo anexo “Opción C.mcd”.

Red de tuberías: consumo en horas diurnas / Año 2005

$$\begin{array}{l}
 \left(\begin{array}{c} 230.354 \\ 143.354 \\ 89.17 \\ 50.226 \\ 27.352 \\ 22.875 \\ 38.944 \\ 20.268 \\ 54.184 \end{array} \right) \\
 \text{Qa} = \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \text{Caudales de tránsito en cada tramo.} \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \text{Caudal requerido de las bombas}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 Q \left(\frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \right) \text{ H(m)} \\
 \left(\begin{array}{c} 188.1 \\ 200.2 \\ 214 \\ 230 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} 180 \\ 210 \\ 250 \\ 300 \end{array} \right)
 \end{array}$$

Red de tuberías: consumo en horas diurnas / Año 2020

Solución:

$$\begin{array}{l}
 \left(\begin{array}{c} 117.554 \\ 97.554 \\ 59.197 \\ 26.393 \\ 14.339 \\ 12.054 \\ 32.804 \\ 7.912 \\ 38.357 \end{array} \right) \\
 \text{Qa} = \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \text{Caudales de tránsito en cada tramo.} \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \text{Caudal requerido de las bombas}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 Q \left(\frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \right) \text{ H(m)} \\
 \left(\begin{array}{c} 117.6 \\ 128.8 \\ 141.8 \\ 156.3 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} 180 \\ 210 \\ 250 \\ 300 \end{array} \right)
 \end{array}$$

Apéndice 12. Cálculo Para Evitar Cavitación en las Bombas

Cálculo de la presión mínima en el alimentador para evitar cavitación en las bomba

Pérdidas de carga desde el Alimentador hasta la succión de las bombas

El caso más desfavorable es cuando operen las bombas 2 y 3 con el caudal máximo dado por el fabricante de 130 m³/hr cada bomba. La bomba más susceptible a cavitación es la número 3:

$$Q := 260 \quad Q := \begin{pmatrix} Q \\ Q \\ \frac{Q}{2} \\ \frac{Q}{2} \end{pmatrix} \quad \text{Caudal de los tramos del esquema de la figura 6.2}$$

$$\Sigma P_{tu1_E} := K_1(Q_1)^2 + K_2(Q_2)^2 + K_3(Q_3)^2 + K_4(Q_4)^2 \quad \Sigma P_{tu1_E} = 0.852$$

$$NPSH \leq \frac{P_s + P_a - P_v}{\gamma} - \Delta z - h_s$$

$$\frac{P_s}{\gamma} \geq NPSH + \frac{P_v - P_a}{\gamma} + \Delta z + h_s$$

$$\frac{P_s}{\gamma} \geq 9\text{m} + \frac{3167\text{Pa} - 9144\text{Pa}}{9780 \frac{\text{kg}}{(\text{m}\cdot\text{s})^2}} + 0\text{m} + 0.852\text{m}$$

$$\frac{P_s}{\gamma} \geq 0.826\text{m}$$

Apéndice 13. Presiones Atmosféricas y Barométricas Aproximadas a Diferentes Altitudes

Approximate Atmospheric Pressures and Barometer Readings at Different Altitudes							
Altitude		Barometer		Atmospheric pressure lb/in ²	Equivalent head of water (75°F) Feet	Boiling point of water	
Feet	Meters	Inches of mercury	Mm of mercury			°F	°C
-1000	-304.8	31.02	787.9	15.2	35.2	213.8	101.0
-500	-152.4	30.47	773.9	15.0	34.7	212.9	100.5
0	0	29.921	760.0	14.7	34.0	212.0	100.0
500	152.4	29.38	746.3	14.4	33.4	211.1	99.5
1000	304.8	28.86	733.1	14.2	32.8	210.2	99.0
1500	457.2	28.33	719.6	13.9	32.2	209.3	98.5
2000	609.6	27.82	706.6	13.7	31.6	208.4	98.0
2500	762.0	27.31	693.7	13.4	31.0	207.4	97.4
3000	914.4	26.81	681.0	13.2	30.5	206.5	96.9
3500	1066.8	26.32	668.5	12.9	29.9	205.6	96.4
4000	1219.2	25.84	656.3	12.7	29.4	204.7	95.9
4500	1371.6	25.36	644.1	12.4	28.8	203.8	95.4
5000	1524.0	24.89	632.2	12.2	28.3	202.9	94.9
5500	1676.4	24.43	620.5	12.0	27.8	201.9	94.4
6000	1828.8	23.98	609.1	11.8	27.3	201.0	93.9
6500	1981.2	23.53	597.7	11.6	26.7	200.1	93.4
7000	2133.6	23.09	586.5	11.3	26.2	199.2	92.9
7500	2286.0	22.65	575.3	11.1	25.7	198.3	92.4
8000	2438.4	22.22	564.4	10.9	25.2	197.4	91.9
8500	2590.8	21.80	553.7	10.7	24.8	196.5	91.4
9000	2743.2	21.38	543.1	10.5	24.3	195.5	90.9
9500	2895.6	20.98	532.9	10.3	23.8	194.6	90.3
10000	3048.0	20.58	522.7	10.1	23.4	193.7	89.8
15000	4572.0	16.88	428.8	8.3	19.1	164	84.4
20000	6096	13.75	349.3	6.7	15.2	—	—
30000	9144	8.88	225.6	4.4	10.2	—	—
40000	12192	5.54	140.7	2.7	6.3	—	—
50000	15240	3.44	87.4	1.7	3.9	—	—

Apéndice 14. Control Diario de la E/B Vegas de Petare



INSTITUTO AUTÓNOMO MUNICIPAL DE
AGUAS Y ACUEDUCTOS
DEL MUNICIPIO AUTÓNOMO SUCRE DEL ESTADO MIRANDA



CONTROL DIARIO E/B

OPERADOR DE GUARDIA: Denis Chirinos

FECHA	HORA	PRESION SUCCION	PRESION DESCARGA				AMPERAJE				FILTRO ENTRADA Y SALIDA	OBSERVACIONES	
			E1	E2	B3	B4	B1	B2	B3	B4			
5-11-2002	08:00	30	160	180	180	160	-	110	140	125	125	E=35 S=33	
"	10:00	30	160	180	180	160	-	110	140	125	125	E=35 S=33	
"	12:00	30	160	180	180	160	-	110	140	125	125	E=35 S=33	
"	02:00	28	155	180	180	155	-	110	140	125	125	E=32 S=30	
"	04:00	31	170	185	185	170	-	110	140	125	125	E=34 S=31	
"	06:00	31	170	185	185	170	-	110	140	125	125	E=34 S=31	
"	08:00	31	170	185	185	170	-	110	140	125	125	E=34 S=31	
"	10:00	35	180	190	190	180	-	110	140	125	125	E=40 S=38	
"	12:00	40	185	195	195	185	-	110	140	120	120	E=47 S=45	
6-11-2002	02:00	45	190	200	200	190	-	110	140	120	120	E=52 S=50	
"	04:00	45	190	200	200	190	-	110	140	120	120	E=52 S=50	
"	06:00	40	185	195	195	185	-	110	140	120	120	E=46 S=44	

X 7 = FUERA DE SERVICIO
X 8 = EN SERVICIO
D = DISPONIBLE
OPERADOR DE SALIDA _____

X E2 = SIN ENERGIA EN EB
X 41 = PROBLEMAS EN LA RED
M = MANTENIMIENTO
OPERADOR DE ENTRADA _____

F M = FALLA MECANICA
FE = FALLA ELECTRICA EN LA ESTACION
SS = BAJA SUCCION

Apéndice 15. Cálculo de Golpe de Ariete

Caso 1: desconexión de los motores / año 2005

Condiciones en regimen permanente:

$$Q_o = 207 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \quad \eta_{\text{mecánico}} = 0.85$$

$$H_o = 230\text{m} \quad N = 3500\text{rpm}$$

$$P_{\text{bomba}} = 120\text{hp}$$

$$P_{\text{motor}} = \frac{P_{\text{bomba}}}{(\eta_{\text{mecánico}})}$$

$$P_{\text{motor}} = \frac{120}{0.85}\text{hp} \quad P_{\text{motor}} = 143\text{hp} \quad P_{\text{motor}} = 106,6\text{kW}$$

$$\omega = n \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \quad \omega = 3500\text{rpm} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \quad \omega = 366,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Torque (M) :

$$M = \frac{P}{\omega} \quad M = \frac{106600\text{W}}{366,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}} \quad M = 290,86\text{N}\cdot\text{m} \quad M = 291\text{N}\cdot\text{m}$$

Momento de inercia I :

$$I = \frac{W \cdot R^2}{g} \quad I = 0,70\text{Kg}\cdot\text{m}^2 = 0,70\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^2$$

$$\frac{M_i + M_{i-1}}{2} = - \left[I \cdot \frac{(2\pi)}{60} \right] \cdot \frac{(N_i - N_{i-1})}{\Delta t}$$

$$J = \frac{60 \Delta t}{I \cdot 2\pi} \quad \Delta t = 0,109\text{s} \quad J = \frac{60(0,109)}{(0,70) \cdot 2\pi} = 1,487 \quad J_1 = 1,487$$

$$N_i = - \left(\frac{M_i + M_{i-1}}{2} \right) \cdot J + N_{i-1}$$

Apéndice

Punto A₁

1º Iteración:

$$\Rightarrow \text{supongo: } M_1 = 150\text{N}\cdot\text{m} \quad \Rightarrow \quad N_1 = -\left(\frac{150 + 291}{2}\right) \cdot 1,487 + 3500 \quad \Rightarrow \quad N_1 = 3172\text{rpm}$$

$$N_1 = 3172\text{rpm} \quad \text{Con la curva de la bomba } \beta = 0,82 \Rightarrow P = 105,1\text{hp} \Rightarrow M = \frac{78374}{332,2} \quad M = 235,9\text{N}\cdot\text{m}$$

$$\beta_{\text{num}} = \frac{235,9}{291} \Rightarrow \beta_{\text{num}} = 0,82 \Rightarrow N_1(\text{nueva}) = 3108\text{rpm}$$

2º Iteración:

$$N_1 = 3108\text{rpm} \quad \text{Con la curva de la bomba } \beta = 0,79 \Rightarrow P = 98,9\text{hp} \Rightarrow M = \frac{73717}{325,5} \quad M = 226,5\text{N}\cdot\text{m}$$

$$\Rightarrow \beta_{\text{num}} = 0,79 \Rightarrow N_1(\text{nueva}) = 3115\text{rpm}$$

se utiliza el valor de la 1º iteración para el valor de N (3108 rpm) y se desprecia los calculos realizados en la iteración 2º, debido a que el error es muy pequeño, no supera el 1%

Punto A₂

1º Iteración:

$$\Rightarrow \text{supongo: } M_2 = 100\text{N}\cdot\text{m} \Rightarrow N_2 = -\left(\frac{100 + 226,5}{2}\right) \cdot 1,487 + 3108 \Rightarrow N_2 = 2858\text{rpm}$$

$$N_2 = 2858\text{rpm} \quad \text{Con la curva de la bomba } \beta = 0,66 \Rightarrow P = 76,9\text{hp} \Rightarrow M = \frac{57329}{299,3} \quad M = 191,5\text{N}\cdot\text{m}$$

$$\Rightarrow \beta_{\text{num}} = 0,66 \Rightarrow N_2(\text{nueva}) = 2790\text{rpm}$$

2º Iteración:

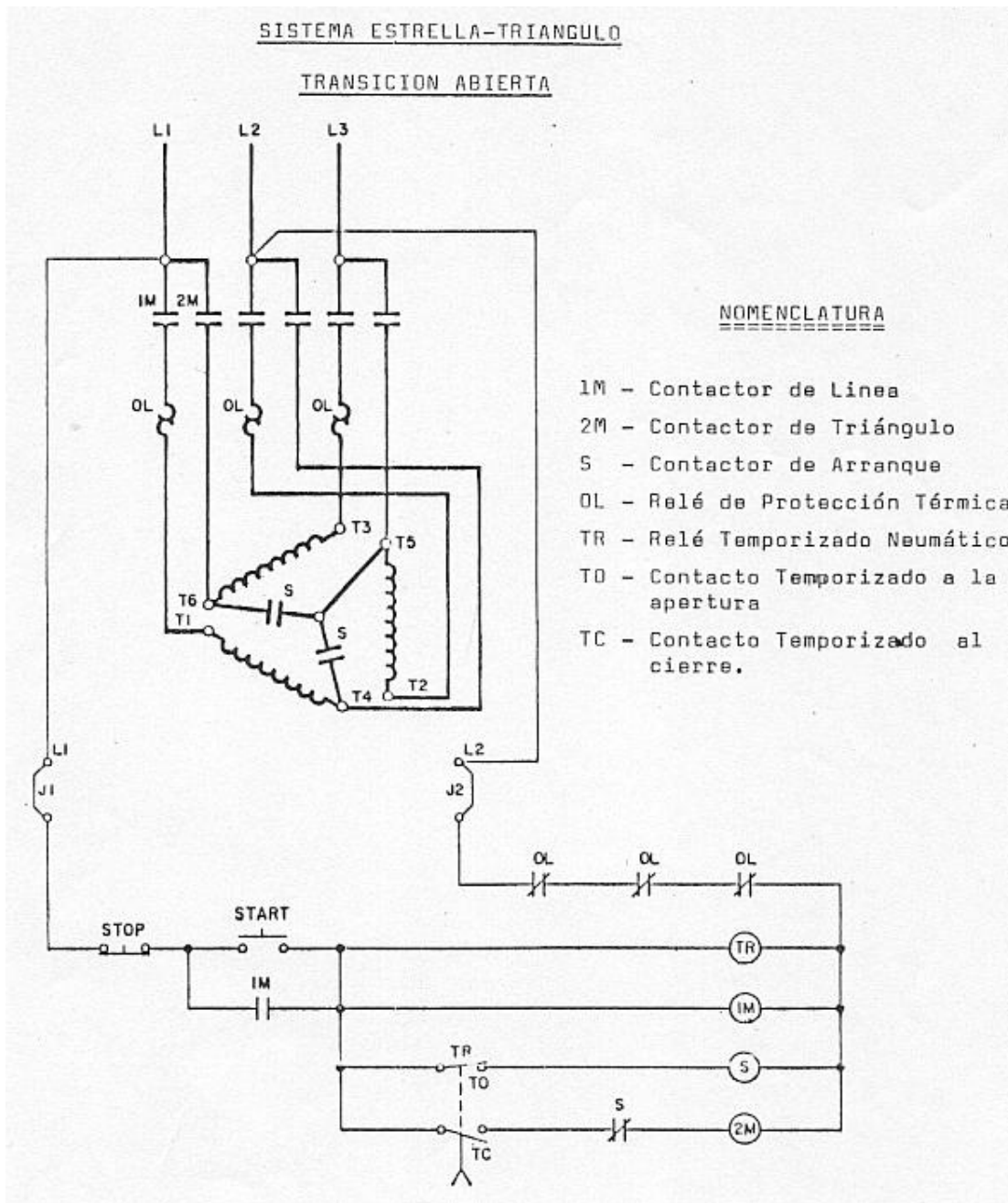
$$N_2 = 2790\text{rpm} \quad \text{Con la curva de la bomba } \beta = 0,63 \Rightarrow P = 71,5\text{hp} \Rightarrow M = \frac{53333}{292,2} \quad M = 182,5\text{N}\cdot\text{m}$$

$$\Rightarrow \beta_{\text{num}} = 0,63 \Rightarrow N_2(\text{nueva}) = 2796\text{rpm}$$

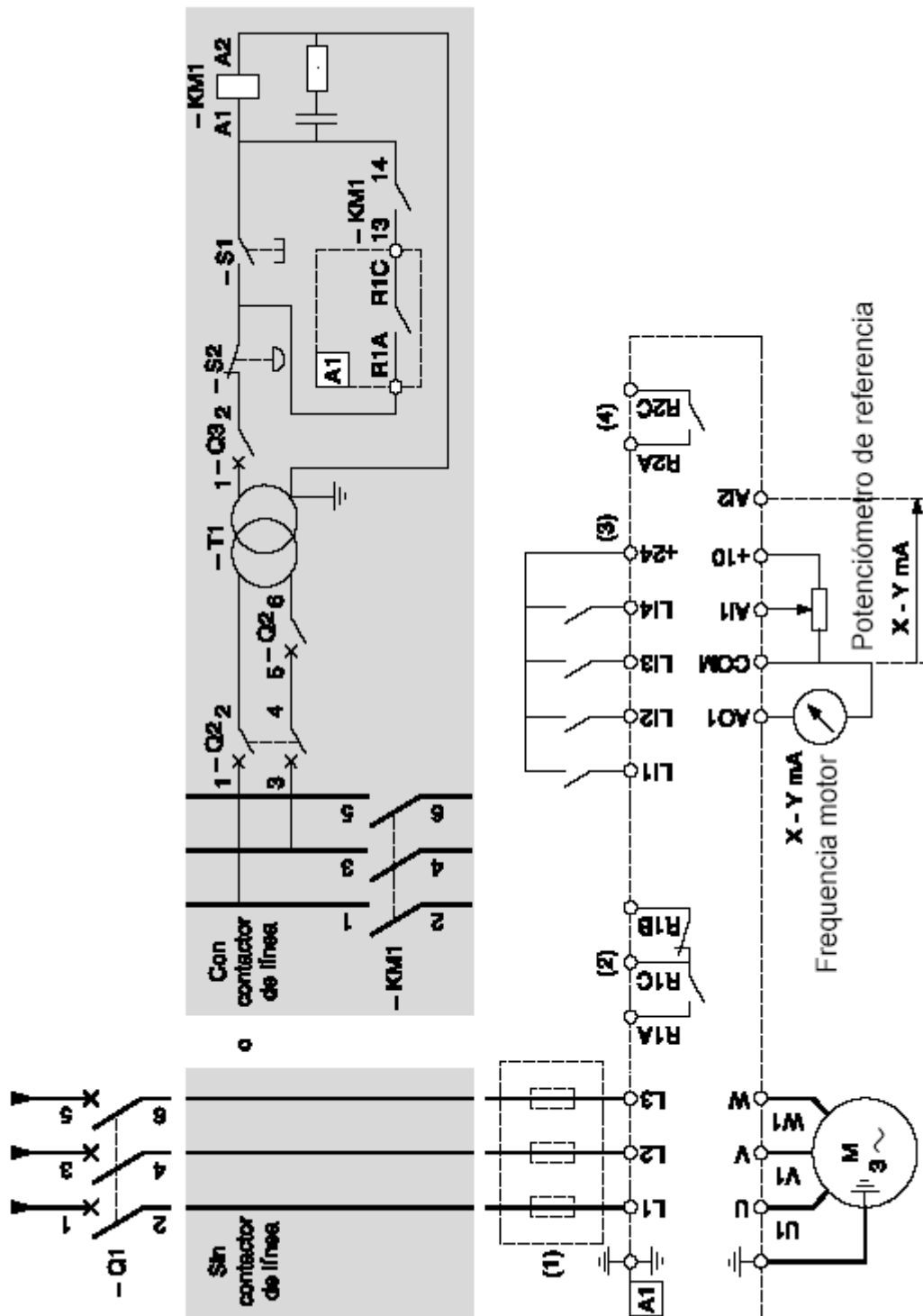
se utiliza el valor de la 1º iteración para el valor de N (2790 rpm) y se desprecia los calculos realizados en la iteración 2º, debido a que el error es muy pequeño, no supera el 1%

Nota: el resto de los cálculos se encuentran en el archivo anexo “golpe de ariete 2.mcd”

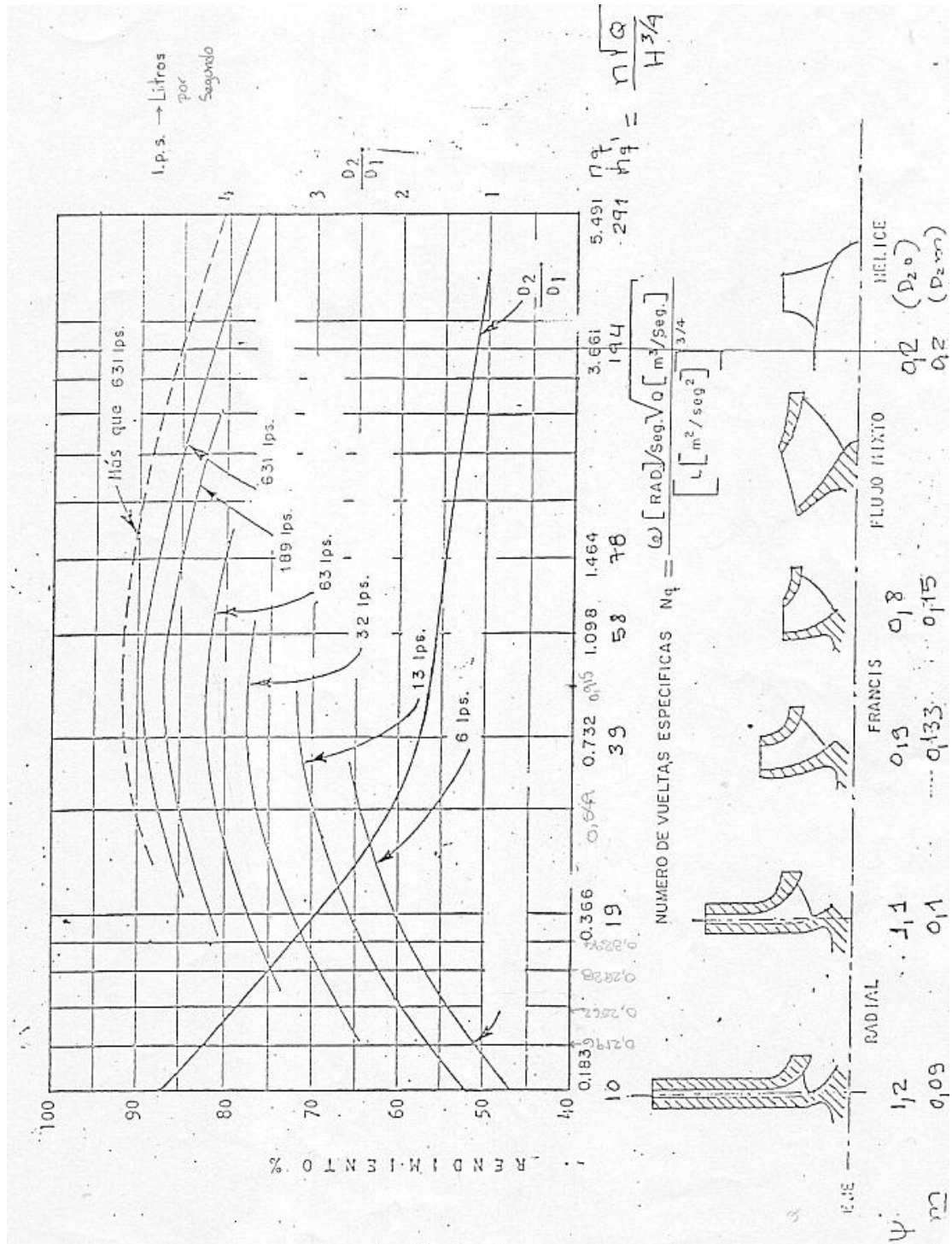
Apéndice 16. Arranque a Tensión Reducida en Estrella – Triángulo



Apéndice 17. Conexión de motor trifásico de inducción con un variador de velocidad “Altivar 38” de Telemecanique.



Apéndice 18. Ábaco de Rendimiento como Función de la Velocidad Específica.



Apéndice 19. Presupuesto para llevar a cabo la construcción y el equipamiento de la estación de bombeo Vegas de Petare.

BIBLIOGRAFÍA

TEXTOS

- [1] Arocha R., Simón. (1997). *Abastecimientos de Agua* (3º Edición). Venezuela.: Editorial Innovación Tecnológica.
- [2] Beer, Ferdinand P., y Jonhston Jr., E. R. (1997). *Mecánica Vectorial para Ingenieros*. (6ª Edición). México: Editorial Mc Graw Hill
- [3] CRANE. (1992). *Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías*. México: Editorial Mc Graw Hill.
- [4] INE. (2000). *Venezuela: Estimaciones y Proyecciones de Población 1950 – 2035*. Caracas, Venezuela: Instituto Nacional de Estadística.
- [5] INOS. (1976). *Especificaciones de Construcción de Obras de Acueductos y Alcantarillados*. Venezuela: Instituto Nacional de Obras Sanitarias.
- [6] Karassik, Igor J., y Carter, Roy. (1975). *Bombas Centrífugas Selección, Operación y Mantenimiento*. (2ª Edición). México: Editorial Continental.
- [7] Karassik, Igor J. (1983). *Manual de Bombas. Diseño, Aplicación, Especificaciones, Operación y Mantenimiento*. México: Editorial Mc Graw Hill.
- [8] Kosow, I. L. (1982). *Control de Máquinas Eléctricas*. España: Editorial Reverté.
- [9] McGhee, Terence J. (1999). *Abastecimiento de Agua y Alcantarillado. Ingeniería Ambiental*. (6ª Edición). Santa Fe de Bogotá, Colombia: Editorial Mc Graw Hill.

- [10] Méndez, Manuel Vicente. (1995). *Tuberías a Presión*. Caracas, Venezuela: Fondo Polar – UCAB.
- [11] Naciones Unidas. (1961). *Métodos de Cálculo de la Población Total para Fechas Corrientes*. Estudios de Población n° 10. Nueva York, U.S.A.
- [12] Parmakian, John. (1963). *Waterhammer Análisis*. New York, U.S.A.: Dover Publications Inc.
- [13] Potter, M., y Wiggert, D. (1.998). *Mecánica de Fluidos*. (2° Edición). México: Editorial Prentice Hall.
- [14] Saldarriaga, Juan G. (1998). *Hidráulica de Tuberías*. Bogotá, Colombia: Editorial Mc Graw Hill.
- [15] Streeter, Victor L., y Wylie, E. (1999). *Mecánica de Fluidos*. (9° Edición). Colombia: Editorial Mc Graw Hill.
- [16] Westaway, C.R., y Loomis, A.W. (1981). *Cameron Hydraulic Data*. (16ª Edición). U.S.A.: Ingersoll-Rand.

TESIS

- Clemente M., Francisco J. y Fernández A., Marielisa (2001). Diseño de Estación de Bombeo de una Comunidad Urbana. Tesis de Pregrado. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

DOCUMENTOS LEGALES

Tarifas Eléctricas. (2002). Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela
Nº 37.415 de fecha 03 de abril de 2002.

PÁGINAS WEB

Buscadores: www.Google.com, www.altavista.com, www.yahoo.com. Todas las páginas relacionadas con temas de estaciones de bombeo, sistemas de abastecimiento de agua e hidráulica de tuberías.

Accionamiento de Motores. (2003).

Disponible en: <http://www.acivol.com>

Chapter 17 Watterharmmer. (2003).

Disponible en: <http://x-stream.fortunecity.com/laras/63/id35.htm>

Design of Sewage Pumping Stations by John Zoeller. (2002).

Disponible en: <http://www.zoeller.com>

Especificaciones Técnicas Tuberías. (2002).

Disponible en: <http://www.aereocivil.gov.co>

Glossary-Pipe, Fitting & Valves Part 1. (2002).

Disponible en: <http://www.acehardware.com/PRC/Glossary>

Hierro o Acero y Manufactura. (2002).

Disponible en: <http://www.venexport.com>

Osburn steel Galvanizad & Black Iron Pipe. (2002).

Disponible en: <http://www.osburnassociales.com/steel.htm>

Presupuesto Casa Tipo. (2003).

Disponible en: <http://www.grc.com.ve/casa/prescasa.htm>

Standar Specif for Pipe, Steel, Black and hot diped. (2002).

Disponible en: <http://www.astm.org>

Tipos de Arranque de Motores. (2003).

Disponible en: <http://www.lafacu.com>

Tribunal Supremo de Justicia. (2003).

Disponible en: <http://www.tsj.gov.ve>

Tubería. (2003).

Disponible en: <http://www.grc.com.ve/azules/b041.htm>

Watterhammer Applet. Calculations, Equations, Formulas. (2003).

Disponible en: <http://www.lmnoeng.com/waterhammer.htm>