

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**REDISEÑO DE ESTACIÓN DE BOMBEO DE
REFUERZO**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Bachilleres:

Álvarez B., Alonso J.

Borges C., Orangel

Para Optar al Título
de Ingeniero Mecánico

Caracas, 2003

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

REDISEÑO DE ESTACIÓN DE BOMBEO DE REFUERZO

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Ingeniero José L. Perera

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Cesar Aguirre

Ing. Ernesto J. Infante P.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Bachilleres:

Álvarez B., Alonso J

Borges , Orangel

Para Optar al Título
de Ingeniero Mecánico

Caracas, 2003

Caracas, Diciembre de 2003

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres Alonso J. Álvarez B., Orangel Borges C., titulado:

“REDISEÑO DE ESTACIÓN DE BOMBEO DE REFUERZO”

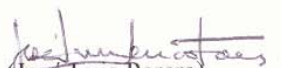
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.



Prof. (Cesar Ferrer)
Jurado



Prof. (Rodolfo Grullón)
Jurado



Prof. (José Luis Perera)
Tutor Académico

RESÚMEN

ÁLVAREZ B. Alonso J. y BORGES C. Orangel

“Rediseño de Estación de Bombeo de Refuerzo”

Tutor Académico: Profesor Ingeniero José Luis Perera

Tutores Industriales: Ingenieros: Ernesto j. Infante P. Cesar Aguirre

Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2003.199 p.

Palabras Claves: Abastecimiento, Bombeo, Población, Rediseño,

En el presente trabajo especial de grado se realizó el estudio para rediseñar la estación de bombeo Yaguara II, ubicada en la localidad de la Yaguara, Distrito Capital, con el objeto de aumentar su eficiencia en la distribución y abastecimiento de agua para la Urbanización Colinas de Vista Alegre y el Barrio Sucre. Para la realización de este trabajo se estimó la población actual beneficiada por la estación como también se realizaron proyecciones de crecimiento de población para el año 2025 y con esto considerar el consumo diario de agua de la población de las zonas antes mencionadas, también se efectuó un levantamiento de la situación actual de la estación tanto de los equipos instalados, mantenimiento realizado a la estación, consumo eléctrico e infraestructura y se determinó el comportamiento de la red de distribución.

Después de este estudio se desarrolló, entonces, un proyecto que solucione los problemas de abastecimiento de agua de la población beneficiada, tomando en cuenta el crecimiento de la población durante 25 años, el aumento de las pérdidas de carga por fricción durante el periodo de diseño y el ahorro de energía eléctrica entre otros. Se determinaron las características del múltiple de succión y descarga, el número de unidades de bombeo necesarias para cumplir con la demanda, las instalaciones eléctricas y se comprobaron los efectos de golpe de ariete para el caso de cierre instantáneo de válvula y finalmente se determinó una propuesta económica asociada a la inversión necesaria para realizar el proyecto.

DEDICATORIA

A la Santísima Trinidad.

A mi madre y mi padre quienes me apoyaron y en todo momento durante la carrera y quienes son y serán ejemplo a seguir por siempre.

A mis hermanos Juan de Dios y mi hermana Samantha quienes estuvieron apoyándome siempre.

A mi novia Roselynn quien siempre estuvo a mi lado apoyándome durante la carrera y el desarrollo de este trabajo.

A todos mis amigos y en especial a Marco y Estefanía.

Orangel Borges Cabrices.

DEDICATORIA

A Dios y a la Virgen por haber iluminado el camino de la esperanza.

A mis padres: Alonso Alvarez y Mercedes de Alvarez, mi orgullo y las personas que han contribuido en mi formación con su orientación y apoyo incondicional.

A mis hermanos: Elisa, Yosileydi y Luis por permanecer siempre unidos. Mi sobrinita Azyeli por regalarle una sonrisa a nuestras vidas

A mis familiares: abuelos, tíos y primos por estar siempre unidos como una gran familia. En especial a mi tío George y mi tía madrina Nalad.

A mis casi hermanos: Aquiles Leandro, Erwin Felce, Javier Franco, Ana, José Córdova, Luisito, Daniel, Germán, José Alfredo, Marcos Suárez y Carlos Báez. Por todas las anécdotas vividas.

A mis compañeros: Orangel Borges, Marcos Ponce, Estefanía López, Leonardo Montilla, Daniel Estévez, Luis Suárez, Leonardo González, Ferdinando Del Guidice, Erick Rodríguez, Mario Alonso y Roger Briceño.

A mis amigos de bachillerato: Nelson, Ernesto, Gustavo, Carlos, Marialbis, Malvi, Verónica, Paúl, Jorge, Asdrúbal, Edgar, Enrique y Emilio por permanecer siempre en contacto.

A mis amigos: José Macuare, Jhonny Hernández y Eulices Salazar.

A la Luna por estar iluminando las noches de oscuridad y regalarme una sonrisa día a día.

A todos que en una u otra forma colaboraron en la realización de esta meta.

Alonso Alvarez

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela, por ofrecernos la posibilidad de estudiar para optar al título de Ingenieros Mecánicos y contribuir a nuestra evolución integral.

A nuestro Tutor Académico, Profesor Ingeniero: José Luis Perera, por la gran ayuda brindada, por su orientación, empeño y apoyo incondicional, por dedicarnos parte de su tiempo y por su aporte para la realización de este proyecto. Mil gracias

A los Ingenieros de Ingeniería C.A.U. Tutor Industrial: Cesar Aguirre, Ernesto Infante y demás Integrantes de la empresa. Mil gracias.

A los profesores: Pedro Lecue, Rodolfo Grullón, Pedro Cadenas, Crisanto Villalobos, Orangel Borges (padre). Mil gracias

A nuestros amigos, en especial Estefanía López y Marcos Ponce, por su ayuda, apoyo incondicional y su aporte en la realización de este proyecto.

A Cesar Orta por su colaboración brindada.

A la familia Gómez, en especial a Rebeca Gómez por ser de grandiosa ayuda en la realización de este trabajo. Mil gracias

A todos nuestros más sincero agradecimiento.

RESÚMEN	I
ÍNDICE DE CUADROS	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	XIV
GLOSARIO DE TÉRMINOS	XV
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I	3
CAPÍTULO II	5
2.1. ANTECEDENTES	5
2.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
2.3. OBJETIVOS Y ALCANCES	6
2.3.1. <i>Objetivo general</i>	6
2.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	7
2.3.3. <i>Alcances</i>	7
CAPÍTULO III	8
3.1. PROYECCIÓN DE POBLACIÓN	8
3.1.1. <i>Métodos para realizar proyecciones</i>	8
3.1.1.1. Extrapolación mediante proporciones aritméticas de aumento de la población (Método Lineal)	9
3.1.1.2. Extrapolación mediante proporciones geométricas de aumento de la población	10
3.1.1.3. Extrapolación mediante parábolas (Método Parabólico)	11
3.1.1.4. Extrapolación parabólica de datos transformados.....	12
3.1.1.5. Método demográfico.....	12
3.1.2. <i>Cálculo de las proyecciones de la población</i>	13
3.2. PRINCIPIOS DE MECÁNICA DE FLUIDOS APLICADOS A LOS SISTEMAS DE BOMBEO.....	14

3.2.1. Ecuación de continuidad.....	14
3.2.2. Flujo de fluidos viscosos.....	16
3.2.3. Flujo turbulento.....	16
3.2.4. Flujo laminar.....	17
3.2.5. Ecuación de la energía (Ecuación de Bernoulli).....	18
3.2.6. Pérdidas en sistemas de tuberías.....	19
3.2.7. Envejecimiento de la tubería.....	22
3.2.8. Cavitación.....	24
3.2.9. Régimen Permanente.....	29
3.2.9.1. Principio de energía.....	30
3.2.9.2. Análisis de redes de tuberías.....	33
3.2.10. Régimen transitorio.....	36
3.2.10.1. Descripción matemática del régimen permanente.....	38
3.2.10.2. Métodos simplificados para el cálculo del golpe de ariete... 43	
3.2.10.3 Método de Allievi.....	44
3.2.10.4. Método gráfico de Bergeron y Schnyder.....	45
3.2.10.5 Método Gráfico Mejorado.....	46
3.2.10.6. Reflexión de la onda de perturbación en confluencias.....	48
3.3. CRITERIOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA.....	49
3.3.1. Consumo de agua.....	50
3.3.2. Factores que afectan el consumo.....	51
3.3.2.1. Tipo de comunidad.....	51
3.3.2.2. Factores económicos- sociales.....	52
3.3.2.3. Factores Metereológicos.....	53
3.3.3. Variaciones periódicas de los consumos e influencia sobre las diferentes partes del sistema.....	53
3.3.3.1. Consumo medio diario.....	54
3.3.3.2. Consumo máximo diario.....	55
3.3.3.3. Consumo máximo horario.....	55
3.3.3.4. Factor para el caso de incendios.....	56

3.3.4 <i>Redes de distribución</i>	57
3.3.4.1 Tipos de redes.....	57
3.4 ESTACIÓN DE BOMBEO.....	58
3.4.1. <i>Bombas y los parámetros a tomar en cuenta para su selección.</i> 58	
3.4.2. <i>Válvulas y accesorios en las estaciones de bombeo</i>	64
3.4.2.1. Clasificación de las válvulas según su función.....	64
3.4.3. <i>Motores eléctricos</i>	67
3.4.3.1. Características que definen un motor.....	67
3.4.3.2. Motor eléctrico de inducción rotor jaula de ardilla	68
CAPÍTULO IV.....	70
4.1. UBICACIÓN DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO	70
4.2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	70
4.2.1 <i>Edificación de la estación</i>	70
4.2.2. <i>Grupo de Bombas</i>	72
4.2.3. <i>Tuberías en la estación</i>	73
4.2.3.1. Tuberías de succión	73
4.2.3.2. Tubería de descarga	73
4.2.4. <i>Arreglo actual de las bombas</i>	73
4.2.4.1. Arreglo de los Grupos 1 y 2.....	74
4.2.4.2. Arreglo de los Grupo 1 y 3 y de los Grupos 2 y 3.....	74
4.2.5. <i>Motores eléctricos</i>	75
4.3. DESCRIPCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE LA ZONA DE INFLUENCIA.....	76
4.3.1. <i>Descripción del sistema</i>	76
4.4. ESTIMACIÓN DE LA RUGOSIDAD ACTUAL DE LAS TUBERÍAS.....	78
4.5. CURVA CARACTERÍSTICA DEL SISTEMA	79
4.6. GASTOS DE CONSUMO	83
4.7. CONSUMO ELÉCTRICO	86
4.8. COSTOS ASOCIADOS AL MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS ELECTROMECAÑICOS.....	88
4.9. ANÁLISIS GENERAL DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO. 88	
4.9.1. <i>Edificación de la estación</i>	88

4.9.2. Grupos de bombeo instalados	91
4.9.3 Comportamiento hidráulico	93
4.10. CÁLCULO DE LA POBLACIÓN ABASTECIDA POR LA ESTACIÓN DE BOMBEO ..	96
4.10.1. Población actual	96
4.10.1.1. Proyección de la Población del Barrio Sucre y de la Urbanización Colinas de Vista Alegre por el Método Aritmético (Método Lineal)	98
4.10.1.2. Proyección de la población del Barrio Sucre y de la Urbanización Colinas de Vista Alegre por el método de las proporciones geométricas (Método Geométrico)	100
4.10.1.3. Proyección de la Población del Barrio Sucre por el método de extrapolación mediante parábolas (Método Parabólico)	102
4.10.1.4. Proyección de la población del Barrio Sucre por el método de la extrapolación parabólica de datos transformados	103
4.10.1.5. Comparación de los métodos utilizados para la proyección de la población	103
CAPÍTULO V	105
5.1 ZONA ABASTECIDA	105
5.2 DETERMINACIÓN DE LA POBLACIÓN A SER ABASTECIDA	106
5.3 CÁLCULO DEL CAUDAL PROMEDIO	108
5.4 PERIODO DE DISEÑO	110
5.5 UBICACIÓN DEL NUEVO SISTEMA	111
5.6 RANGO DE VELOCIDADES RECOMENDADAS PARA EL FLUIDO	112
CAPÍTULO VI	113
6.1 OBJETIVO GENERAL	113
6.2. CÁLCULO DEL CAUDAL DE DISEÑO	113
6.2.1. Consumo máximo diario	114
6.2.2. Consumo máximo horario	114
6.2.3. Consumo en caso de incendio	114
6.2.4. Caudal de diseño	115

6.3. DETERMINACIÓN DE LAS UNIDADES Y ETAPAS DE LOS EQUIPOS DE BOMBEO	115
6.3.1. <i>Número de unidades de bombeo</i>	115
6.3.2. <i>Determinación del número de etapas</i>	118
6.4. DISEÑO DEL SISTEMA DE SUCCIÓN Y DESCARGA DE LA ESTACIÓN.....	120
6.4.1. <i>Diámetros en los sistemas de succión y descarga</i>	121
6.4.1.1. Diámetro en el múltiple de succión.....	122
6.4.1.2. Diámetro del múltiple de descarga.....	123
6.4.1.3. Diámetro de los tramos individuales en la succión de cada bomba	123
6.4.1.4. Diámetro de los tramos individuales en la descarga de cada bomba	123
6.4.2. <i>Resultados de la selección de diámetros para las tuberías de succión y descarga</i>	124
6.5. DETERMINACIÓN DE LA CARACTERÍSTICA DEL SISTEMA	125
6.5.1. <i>Curva Característica del Sistema</i>	125
6.5.2. <i>Determinación de las bombas</i>	125
6.5.3. <i>Pérdidas en la Estación de Bombeo</i>	127
6.5.4. <i>Cálculo para evitar la cavitación en las bombas</i>	131
6.5.5. <i>Determinación de las líneas piezométricas</i>	133
6.6. ESTIMACIÓN DE LOS TRANSITORIOS HIDRÁULICOS	135
6.6.1. <i>Golpe de ariete por falla en el suministro eléctrico de los grupos motobomba</i>	135
6.6.2. <i>Desconexión de los motores eléctricos en régimen permanente en el año 2025</i>	136
6.6.3. <i>Golpe de ariete por cierre de válvula durante la operación en régimen permanente</i>	141
6.7. SELECCIÓN DE VÁLVULAS	144
6.8. ESPECIFICACIONES DE LAS TUBERÍAS.....	147
6.9. SELECCIÓN DE LOS MOTORES	148
6.9.1. <i>Potencia de los motores</i>	148

6.9.2. <i>Especificaciones de los motores</i>	149
6.10. INSTALACIONES ELÉCTRICAS	150
6.10.1. <i>Sistemas de potencia y control de los motores</i>	150
6.11. TABLA DE CABLEADO	152
CAPITULO VII	154
7.1. PRESUPUESTO.....	154
CONCLUSIONES	158
RECOMENDACIONES	160
BIBLIOGRAFÍA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
DOCUMENTOS LEGALES.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
PÁGINAS WEB	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 3.1 Características del agua y su relación con α	22
Cuadro 3.2 Causas y Consecuencias de la Cavitación	27
Cuadro 3.3 Materiales de las tuberías	41
Cuadro 3.4 Consumos mínimos permisibles según las normas INOS	49
Cuadro 3.5 Consumos per cápita de acuerdo al tipo de vivienda	50
Cuadro 3.6 Velocidades sincrónicas para 60 hz.	65
Cuadro 4.1 Especificaciones técnicas de las bombas actuales	70
Cuadro 4.2 Especificaciones técnicas de los motores actuales	74
Cuadro 4.3 Caudales mínimo, máximo y promedio de las bombas	82
Cuadro 4.4 Velocidad del flujo en la descarga de la estación de bombeo	83
Cuadro 4.5 Rendimientos de las bombas	91
Cuadro 4.6 Proyección de población por Municipio y Parroquia.	94
Cuadro 4.7 Censos de la Urbanización Colinas de Vista Alegre	95
Cuadro 4.8 Proyección de la población de la Urb. C de Vista Alegre y Barrio Sucre por el Método Lineal	97
Cuadro 4.9 Proyección de la población de la Urb. C de Vista Alegre y Barrio Sucre por el Método Geométrico	99
Cuadro 4.10 Proyección de la población del Barrio Sucre por el Método Parabólico	100
Cuadro 4.11 Proyección de la población del Barrio Sucre por el Método de Extrapolación Parabólica de Datos transformados	101
Cuadro 5.1 Proyección de la población de Barrio Sucre y de la Urb. Colinas de Vista Alegre	105
Cuadro 5.2 Proyección de la población de la Urb. C. de V. Alegre, dotación y caudal medio	107
Cuadro 5.3 Proyección de la población del barrio Sucre, dotación y	

caudal medio	108
Cuadro 6.1 Referencias de la distribución de la estación de bombeo	118
Cuadro 6.2 Velocidad media para diámetros tentativos en el múltiple de succión y descarga	119
Cuadro 6.3 Velocidad media para diámetros tentativo en los tramos individuales de succión y descarga	119
Cuadro 6.4 Resultados de la selección de las tuberías	121
Cuadro 6.5 Diámetros y longitudes de las tuberías de la E /B	123
Cuadro 7.1 Lista de precios de todos los equipos y materiales para la nueva estación	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Velocidad media en dirección axial del conducto	12
Figura 3.2 Cambios de área en la sección transversal de un conducto	14
Figura 3.3 Conducto con un flujo estacionario	16
Figura 3.4 Esquema general de un sistema de bombeo	30
Figura 3.5 Recta positiva de Bergeron	43
Figura 3.6 Recta Positiva de Bergeron, Lugar Geométrico de los puntos	44
Figura 3.7 Transmisión de ondas de perturbación en una derivación	46
Figura 4.1 Distribución actual de la estación de bombeo Yaguara II	69
Figura 4.2 Red de distribución de la zona abastecida	75
Figura 4.3 Estación de Bombeo Yaguara II	87
Figura 4.4 Todos los grupos que conforman la E/B Yaguara II	88
Figura 4.5 Estado de deterioro de las fundaciones de los grupos moto- bombas	88
Figura 4.6 Fugas que presentan las bombas de la estación	89
Figura 6.1 Distribución de la estación de bombeo	117
Figura 6.2 Detalles de la distribución de la E/B	122
Figura 6.3 Sistema de Succión de la E/B Yaguara II	126
Figura 6.4 Circuito de control de motores trifásicos de inducción	149

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 4.1 Arreglo de los grupos 1 y 2 en paralelo	72
Gráfica 4.2 Arreglo de los grupos 1 y 3 y de los grupos 2 y 3	73
Gráfica 4.3 Sistema equivalente entre dos bombas WKL 50 trabajando en paralelo	80
Gráfica 4.4 Sistema equivalente bomba WKL 40 y WKL 50 trabajando en paralelo	81
Gráfica 4.4 Representación del Consumo Diario para los grupos principales	83
Gráfica 4.5 Representación del Consumo Diario funcionando el grupo de emergencia	84
Gráfica 4.6 Proyecciones del Barrio Sucre	102
Gráfica 4.7 Proyecciones de la Urb. Colinas de Vista Alegre	102
Gráfica 6.1 Funcionamiento del sistema durante el periodo de diseño	129
Gráfica 6.2 Línea piezométrica del sistema de la Ubr. Colinas de Vista Alegre	130
Gráfica 6.3 Línea piezométrica del sistema Barrio Sucre	131

GLOSARIO DE TÉRMINOS

a :	Velocidad de propagación de ondas de perturbación
A :	Área
C :	Factor de colocación de la tubería
c_1, c_2, c_3 :	Constantes de una ecuación cuadrática
$\cos \Phi$:	Factor de potencia
d :	Diámetro nominal
e :	Espesor
e_c :	Espesor del concreto
e_e :	Espesor equivalente
e_1, e_2 :	Valores inicial y final de la energía específica
E :	Módulo de elasticidad del líquido
E_c :	Módulo de elasticidad del material de un conducto
E_r :	Relación entre el módulo de elasticidad del concreto y el acero
E_m :	Emigración entre la fecha inicial y final del período de proyección
E_1, E_2 :	Valores iniciales y finales de la energía específica
f :	Factor de fricción
f_A :	Factor de fricción actual
ft :	Pies ("feet" en ingles)
g :	Aceleración de la gravedad
h :	Altura piezométrica
hab. :	Habitantes
hf :	Pérdida de carga por efectos viscosos
hs :	Pérdida de carga totales del lado de la succión
H :	Altura
H_a :	Valor extremo de sobrepresión
H_e :	Carga estática que vencen la bombas
H_0 :	Carga de presión en la condición inicial
hr :	Hora
I :	Momento de inercia

I_L :	Corriente de línea
in :	Pulgadas (“inches” en ingles)
INE :	Instituto Nacional de Estadística
INCAU :	Ingeniería C.A.U.C.A.
INOS :	Instituto Nacional de Obras Sanitarias
k :	Coefficiente de pérdida localizada de energía
K :	Constante de curva de pérdida
K_0 :	Promedio anual de crecimiento de población
K_1 :	Relación entre el consumo medio diario y consumo máximo diario
K_2 :	Relación entre el consumo medio diario y consumo máximo horario
K_3 :	Relación entre el consumo medio diario y consumo en caso de incendio
L :	Longitud
L :	Trabajo específico
l/s :	Litros por segundos
m :	Masa
m_b :	Pendiente de la recta de Bergeron
M :	Torque mecánico
m.c.a. :	Metros de columna de agua
m.s.n.m. :	Metros sobre el nivel del mar
N :	Velocidad de rotación de la bomba
N_0 :	Velocidad de rotación
N_p :	Intervalo transcurrido entre los dos censos, en años
N :	Nacimientos entre la fecha inicial y final de periodo
NPSH :	Carga neta de succión positiva
NPSH _d :	Carga neta de succión positiva disponible
NPSH _r :	Carga neta de succión positiva requerida
N_q :	Número específico de vueltas
OCEI :	Oficina Central de Estadística e Información

p :	Presión
p_a :	Presión barométrica
p_e :	Presión de estática
p_s :	Presión de succión
p_v :	Presión de vapor
P_b :	Potencia que recibe la bomba
P_e :	Potencia eléctrica
P_n :	Población al final del período, población proyectada
$Pob.$:	Población
P_0 :	Potencia neta en el eje del motor
P_u :	Potencia útil
P_{tp} :	Población se cree habrá en t_p años
P_1, P_2 :	Población de los dos últimos censos realizados en un sector
$P_e/\gamma + Z$:	Carga o altura piezométrica
Q :	Caudal
$Q_{asociado}$:	Caudal asociado a otros factores
$Q_{comercial}$:	Caudal referido al consumo por comercios
$Q_{diseño}$:	Caudal de diseño
Q_i :	Caudal en el tramo i
Q_l :	Caudal para el caso de ocurrencia de incendio
Q_m :	Caudal medio diario
$Q_{m\acute{a}x-diario}$:	Caudal máximo diario
$Q_{m\acute{a}x-horario}$:	Caudal máximo horario
Q_{res} :	Caudal referido al consumo residencial
r :	Factor de transmisión de onda de perturbación
r :	Ritmo anual de aumento de población
Re :	Número de Reynolds
$Re_{critico}$:	Número de Reynolds crítico
s :	Factor de reflexión de onda de perturbación
t :	Tiempo en años
t_c :	Tiempo de fase o tiempo crítico

t_p :	Periodo para el cual se desea hacer la estimación de la población
viv :	Vivienda
V :	Velocidad media del flujo
V_L :	Tensión de línea
V_0 :	Velocidad relacionada con el régimen permanente
W :	Peso del conjunto de giro
${}_1W_2$:	Trabajo efectuado en el sistema
X :	Población en miles de habitantes
Z :	Posición relativa en sentido vertical
α :	Coefficiente de proporcionalidad para el envejecimiento de tuberías
γ :	Peso específico relativo del agua
ε :	Rugosidad inicial de la tubería
$\varepsilon_{inicial}$:	Rugosidad inicial de la tubería
ξ, τ_c :	Parámetros que describen factores transitorios de una conducción
η :	Eficiencia o rendimiento
η_{mec} :	Rendimiento mecánico de transmisión
η_{mot} :	Rendimiento del motor
μ :	Relación de Poisson
σ :	Índice de Thoma
ρ :	Densidad del líquido
ν :	Viscosidad cinemática
ω :	Velocidad de rotación
ΔZ :	Diferencia de cotas entre dos puntos

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de este trabajo especial de grado tiene como finalidad realizar un estudio técnico económico de la estación de bombeo Yaguara II, la misma está a cargo de la compañía Ingeniería C.A.U. contratista esta de HIDROCAPITAL. La situación actual de la estación es de baja eficiencia en el suministro de agua debido al mal estado en que se encuentran los equipos electromecánicos a lo que se suman los elevados costos de mantenimientos y consumo eléctrico y baja presión en la succión, esto trae como consecuencia que el abastecimiento de agua se vea interrumpido dos días por semana aproximadamente. Lo expuesto anteriormente justifica el desarrollo de este trabajo con la finalidad de mejorar el servicio de suministro de agua y disminuir los costos de operación de la estación.

El aumento progresivo la población en la zona de influencia de la estación ha originado que la demanda de agua también aumente y la estación no cumpla con los requerimientos de consumo, afectando directamente la calidad de vida de la población y el desarrollo social en la zona.

Este trabajo se fundamenta en la necesidad de garantizar un suministro eficiente de agua para las poblaciones beneficiadas por la estación, para ello se realiza un estudio completo del estado actual de la estación. Este estudio involucra el estado de los equipos de bombeo, motores, sistema de tuberías tanto de succión como de descarga y de distribución, instalaciones eléctricas, capacidad de bombeo e infraestructura de la estación. El estudio del sistema de distribución se realizo con el motivo de determinar las posibilidades de garantizar el servicio de agua a la población en un periodo de 25 años.

Con el objetivo de garantizar un suministro eficiente se tomaron en cuenta el crecimiento continuo de la población y las necesidades de la misma y en base a esto se seleccionaron los equipos electromecánicos que cumplen con los requerimientos para el abastecimiento.

CAPÍTULO I

IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA

Reseña histórica

En 1989, se inicia un programa de modernización del Estado venezolano, el cual persigue como objetivo fundamental, mejorar la calidad del servicio de abastecimiento de agua potable y de recolección, tratamiento y deposición de aguas residuales; así como aumentar su cobertura bajo un esquema institucional, administrativo y financiero sano, en forma tal de suministrar un servicio que cubra las necesidades de la población del país, a un costo razonable.

Es así, cuando en Abril del año 1991 es fundada la empresa Hidrológica de la Región Capital, Hidrocapital C.A., Sus objetivos son: la administración, operación, mantenimiento, ampliación y rehabilitación de los sistemas de distribución de agua potable y de los sistemas de recolección de aguas servidas en el Distrito Capital y en los Estados Miranda y Vargas. Hidrocapital opera como una empresa adscrita al Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales bajo los lineamientos de Hidroven, casa matriz del sector agua potable y saneamiento.

Hidrocapital, para cumplir sus objetivos, tiene empresas contratadas, entre las cuales se encuentra la empresa Ingeniería C.A.U., ubicada en el Estanque el Pinar, Cota 905. Esta empresa esta a cargo de 80 estaciones de bombeo en La Gran Caracas.

La empresa Ingeniería C.A.U. fue fundada en el año 1987, teniendo como meta fundamental desarrollarse en el área de diseño, montaje, mantenimiento, rehabilitación y operación de instalaciones electromecánicas. Los objetivos de la empresa es la prestación de servicio en el ámbito de

proyectos de electromecánica, realizar el mantenimiento electromecánico de estaciones de bombeo y realizar proyectos destinados a la disminución del consumo eléctrico y costos de mantenimiento, entre otros.

CAPÍTULO II

DEFINICIÓN DEL PROYECTO

2.1. Antecedentes

La ciudad de Caracas y sus adyacencias se surte de fuentes de agua que están en cotas más bajas que la de la ciudad, por lo cual se requieren grandes estaciones de bombeo para impulsar 170.000 l/s aproximadamente, desde la cota 200 m.s.n.m. hasta cotas que superan 1080 m.s.n.m., para esto se cuenta con los acueductos TUY I, TUYII, TUY III. Por otro lado, para surtir a las zonas altas dentro de la ciudad hay que instalar estaciones de bombeo que posibiliten la elevación del agua hasta cotas mayores a los 1500 m.s.n.m. Es por esto que la ciudad de Caracas cuenta con 149 estaciones de bombeo aproximadamente. Esta gran cantidad de estaciones de bombeo se debe a que de estos acueductos se surte la ciudad de Caracas y sus adyacencias, es decir la Gran Caracas.

Entre estas estaciones se encuentra la estación de bombeo YAGUARA II, en la cota 1003 m.s.n.m. Esta conformada por tres unidades marca BBC y succiona el líquido del acueducto Metropolitano TUY III. Esta estación de bombeo fue diseñada con cuatro unidades de las cuales se instalaron solo tres. Actualmente esta estación bombea contra la red. Fue diseñada en la década de los ochenta y puesta en servicio en el año 1994, deteriorándose progresivamente, lo que ha ocasionado un abastecimiento deficiente en la zona.

2.2. Planteamiento del problema

La estación de bombeo YAGUARA II se encuentra ubicada en la avenida principal de la Yaguara y actualmente abastece a los barrios San Rafael, Los Piñas, calle G y la urbanización Colinas de Vista Alegre. No

funciona de forma permanente por problemas de presión en la succión y el suministro para las zonas altas es muy deficiente por la gran demanda del sector. La estación YAGUARA II recibe agua de una tubería de 34" que luego se reduce a una tubería de 18" proveniente de la red del sistema Tuy III, a una presión de succión de 20 m.c.a y una presión de descarga de 140 m.c.a. Consta de tres equipos de bombeo.

Las bombas son centrífugas horizontales de alta presión de tres etapas, marca KSB, modelo WKL 50. El caudal es de 20 l/s aproximadamente por bomba. Los motores son eléctricos, marca BBC, de 57.5 hp y velocidad nominal de 3500 rpm.

Los costos de mantenimiento son muy elevados porque la vida útil de los equipos electromecánicos ya llegó al límite, lo cual origina un funcionamiento deficiente. Por tal motivo, se requiere el análisis de la situación actual de la estación para diseñar una nueva estación que cumpla con los requerimientos de la zona. Como una solución se plantea el diseño de una estación en la misma infraestructura, tomando en cuenta equipos de hidráulica, instrumentación, equipos electromecánicos, tiempo de obra, costos asociados, demanda. Para ello lo cual sería necesario una gran inversión pero con beneficios a mediano y largo plazo.

2.3. Objetivos y alcances

2.3.1. Objetivo general

- Rediseñar la estación de bombeo YAGUARA II

2.3.2. Objetivos específicos

- Establecer y evaluar las condiciones actuales de operación de la estación YAGUARA II para su rediseño.
- Realizar el estudio de la demanda del sistema.
- Determinar todos los aspectos hidráulicos, mecánicos y eléctricos a emplear en la nueva estación de bombeo.
- Determinar y analizar los costos asociados a la obra.

2.3.3. Alcances

- Establecer de la hidráulica del sistema de succión y del sistema de impulsión.
- Determinación de la estación de bombeo mecánica, eléctrica e hidráulicamente así como la determinación de su ubicación.
- Especificar las bases de diseño mediante la determinación de la población equivalente que se va a satisfacer durante un periodo de veinte años.
- Determinar y analizar todos los aspectos hidráulicos y mecánicos referentes al sistema de tuberías.
- Determinación de la línea piezométrica.
- Estudio económico para la justificación de la selección de los equipos de la estación.

CAPÍTULO III

FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1. Proyección de población

El estudio de la población proporciona una información de interés para las taras de planificación, especialmente administrativas, en sectores como sanidad, educación, vivienda, seguridad social, empleo y conservación del medio ambiente. Estos estudios también proporcionan datos necesarios para formular políticas gubernamentales de población, para modificar tendencias demográficas y conseguir objetivos económicos y sociales.

Las proyecciones de población constituyen uno de los aspectos más importantes en la planificación de las actividades económicas y sociales de un país. 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 totalmente exactos, por existir variaciones inesperadas por el efecto de un repentino cambio en el comportamiento de las variables demográficas.

3.1.1. Métodos para realizar proyecciones

Para calcular la población futura se pueden usar los siguientes métodos:

3.1.1.1. Extrapolación mediante proporciones aritméticas de aumento de la población (Método Lineal)

El método más sencillo de extrapolación consiste en calcular la cifra media anual de aumento de la población entre un censo y el siguiente y añadir una cantidad igual por cada año transcurrido después del último censo. La población que aumenta en proporción aritmética obedece a la siguiente fórmula:

$$P_n = P_2 + K_0 * t_p \quad (3.1)$$

donde:

P_n = Población al final del período, población proyectada

p_2 = Población del último censo realizado

t_p = Período para el cual se desea hacer la estimación, en años

K_0 = Promedio anual de crecimiento de población

$$K_0 = \frac{P_2 - P_1}{N_p} \quad (3.2)$$

donde P_1 y P_2 son las cifras de población según el primero y el segundo censo, respectivamente N_p es el intervalo transcurrido entre los censos, en años.[11]

Hay que señalar que el aumento numérico constante de una población en desarrollo significa en realidad un ritmo decreciente del aumento en relación con la importancia numérica de la población.

3.1.1.2. Extrapolación mediante proporciones geométricas de aumento de la población

La extrapolación geométrica corresponde a la hipótesis de que la población aumenta constantemente en una cifra proporcional a su importancia numérica cambiante. En este caso, el cálculo se realiza de la misma manera que cuando se calcula el interés compuesto. La población que aumenta en proporción geométrica obedece a la siguiente fórmula:

$$P_n = P_2 * (1 + r)^{t_p} \quad (3.3)$$

donde:

P_2 = Población del último censo realizado

t_p = Período para el cual se desea hacer la estimación, en años

r = Ritmo anual de aumento de población

P_n = Población al final del período o población proyectada

Si el ritmo de aumento se tiene que determinar comparando resultados de censos, es posible encontrarlo aplicando la fórmula:

$$(1 + r) = \sqrt[N_p]{\frac{P_2}{P_1}} \quad (3.4)$$

donde P_1 y P_2 son las cifras de población según el primero y el segundo censo, respectivamente, y N_p es el intervalo transcurrido entre los dos censos, en años.[11]

Así, para realizar una extrapolación geométrica del ritmo de aumento indicado por la comparación entre la cifra del último censo y la del censo anterior, a partir de la fecha del último censo en adelante, la fórmula es:

$$P_n = P_2 * \left(\sqrt[n_p]{\frac{P_2}{P_1}} \right)^{t_p} \quad (3.5)$$

donde t_p es el tiempo transcurrido después del censo hasta la fecha actual.[11]

3.1.1.3. Extrapolación mediante parábolas (Método Parabólico)

El método de extrapolación más usado que emplea los resultados de tres o más censos es la extrapolación por parábolas de segundo y tercer grado. Una parábola de segundo grado puede calcularse de los resultados de tres censos; este tipo de curva no sólo es sensible al ritmo medio de crecimiento, sino también al aumento o disminución de la velocidad observada en ese ritmo. Una parábola de tercer grado, que es posible mediante los resultados de cuatro censos, no sólo toma en cuenta el aumento o disminución de la velocidad en el ritmo de crecimiento, sino también el ímpetu variable del aumento o disminución de la velocidad.

La curva parabólica de segundo grado se define por la fórmula:

$$P_p = a + b * t_p + c * t_p^2 \quad (3.6)$$

donde t_p es el intervalo cronológico en años medido desde cualquier fecha determinada, por ejemplo, una de las fechas de los censos. P_{tp} es la población que se cree que habrá t_p años después de la fecha fijada y a , b y c son constantes que pueden calcularse resolviendo la ecuación citada para cada una de las tres fechas censales.

La curva parabólica de tercer grado se define mediante la fórmula:

$$P_p = a + b * t_p + c * t_p^2 + d * t_p^3 \quad (3.7)$$

El cálculo de estas constantes requiere cuatro ecuaciones independientes, que deben resolver para las fechas de los cuatro censos.[11]

3.1.1.4. Extrapolación parabólica de datos transformados

La tendencia de las parábolas después de varios años de proyección es a acusar un ascenso o descenso cada vez más pronunciada. En muchos casos, este defecto puede modificarse aplicando la extrapolación parabólica a los logaritmos de las cantidades, en lugar de aplicarla a las cifras en sí. La extrapolación de logaritmos implica una proyección de ritmos cambiantes de crecimiento en vez de cantidades absolutas cambiantes.[11]

La curva parabólica de segundo y tercer grado con datos transformados se define mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Log}.P_p = a + b * t_p + c * t_p^2 \quad (3.8)$$

$$\text{Log}.P_p = a + b * t_p + c * t_p^2 + d * t_p^3 \quad (3.10)$$

3.1.1.5. Método demográfico

El movimiento de la población tiene tres componentes: nacimientos, defunciones y migración. A medida que las personas nacen, mueren o cambian de residencia, puede variar el número total de la misma en una zona. El método fundamental para calcular el cambio numérico de la población a través del tiempo consiste en utilizar la ecuación compensadora.[11]

La ecuación compensadora se define mediante la siguiente fórmula:

$$P_{tp} = P_0 + (N - D) + (I_m - E_m) \quad (3.11)$$

donde:

D = Defunciones entre la fecha inicial y final del período de proyección

E_m = Emigración (o emigración interna) entre la fecha inicial y final del período

I_m = Inmigración (o migración interna) entre la fecha inicial y final del período

N = nacimientos entre la fecha inicial y final del período

3.1.2. Cálculo de las proyecciones de la población

Se debe saber que antes de elegir cualquiera de los métodos antes señalados se deben tomar en cuenta algunos criterios tanto para elegir el método adecuado como para el planteamiento de la hipótesis, a saber:

a-. Se debe conocer el tipo de información disponible: calidad, cobertura, consistencia interna y actualidad de la misma. En países como Venezuela, no se cuenta con buenos registros de las estadísticas vitales. Esto no 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 o 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 puede 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 al 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 si se requiere dicho método.

3.2. Principios de mecánica de fluidos aplicados a los sistemas de bombeo

3.2.1. Ecuación de continuidad

En la mecánica de fluidos, la ley de conservación de la masa se expresa mediante la ecuación de 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 efectos de este trabajo, la ecuación de continuidad sólo será analizada para el flujo de líquido incompresible en tuberías consideradas inelásticas. Sólo se considerarán los cambios en las propiedades del flujo y del fluido en la dirección principal del movimiento (método unidimensional de análisis). Para caracterizar cinemáticamente el régimen en una sección particular de la tubería, se hará referencia a su velocidad media V y a un valor único ρ , representativo de la densidad del fluido en tal sección ver figura 3.1. Entonces se tiene:

$$V = f(x) \quad (3.12)$$

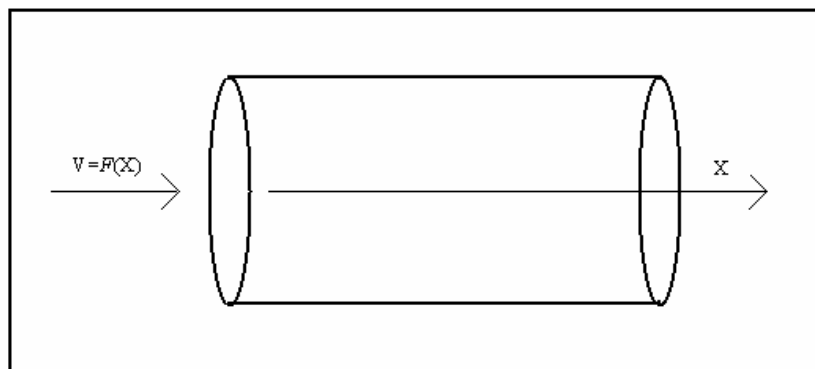


Figura 3.1 Velocidad media en dirección axial del conducto

A partir de la ecuación 3.12 y considerando que el flujo es permanente, unidimensional, y el fluido considerado incompresible, se tiene la ecuación de continuidad en términos de derivadas ordinarias:

$$\frac{d(AV)}{dx} = \frac{dQ}{dx} = 0 \quad (3.13)$$

Integrando, nos queda:

$$AV = Q = \text{Constante}$$

siendo Q el caudal que pasa por la sección transversal de un conducto (A) por unidad de tiempo.

La ecuación de continuidad es un caso especial de la ley física general de la conservación de la masa de fluido por unidad de tiempo que atraviesa cualquier sección de un conducto que permanece constante.

Aplicando la ecuación de continuidad a un conducto con diferentes áreas transversales (figura 3.2) nos queda:

$$V_1 * A_1 = V_2 * A_2 = V_3 * A_3 = V_n * A_n \quad (3.14)$$

que es la forma más conocida de la ecuación de continuidad en la hidráulica aplicada.

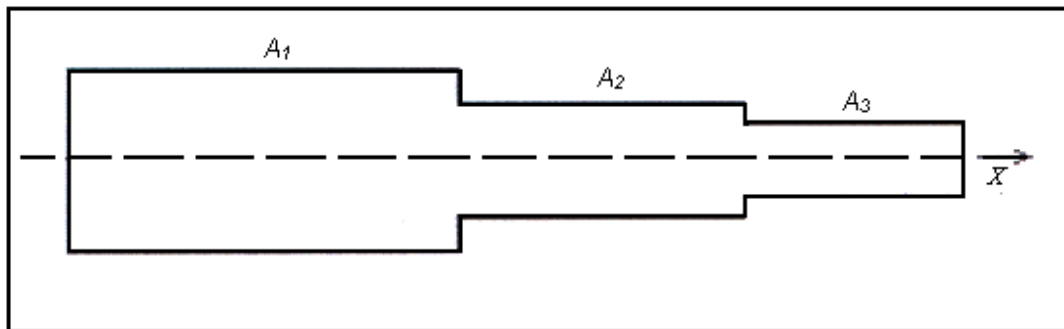


Figura 3.2 Cambios de área en la sección transversal de un conducto

3.2.2. Flujo de fluidos viscosos

La viscosidad es la propiedad por la que un fluido se resiste a la alteración de su forma. El efecto de la viscosidad es predominante en la determinación de algunos fenómenos de flujo de fluidos, como la fricción superficial, la resistencia al avance debido a la forma de un cuerpo y el comportamiento al deslizamiento sobre la superficie de un sólido.

Los flujos viscosos incluyen una amplia clase de 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 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. Flujo turbulento

Para flujo turbulento, el movimiento de fluidos se caracteriza por velocidades y presiones locales que varían de manera irregular.

El régimen de flujo depende de tres parámetros físicos 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. Si dicha escala de longitud es lo bastante grande, una perturbación de flujo podría aumentar y el flujo podría volverse turbulento. El segundo parámetro es una escala de velocidad tal como un promedio espacial de la velocidad y el tercer parámetro es la viscosidad cinemática; si la velocidad es bastante pequeña, el flujo puede ser turbulento.

Los tres parámetros pueden combinarse en uno solo para predecir el régimen de flujo, esta cantidad es el número de Reynolds, el cual se define como:

$$R_e = \frac{V * L}{\nu} \quad (3.15)$$

donde L y V son una longitud y una velocidad característica y ν es la viscosidad cinemática. Si $R_e > 2000$ el flujo es turbulento.[10]

3.2.4. Flujo laminar

En este tipo de flujo, la resistencia se debe sólo a fuerzas viscosas, de modo que es independiente de la aspereza de la superficie del tubo o sea

$\tau_0 = \mu * \frac{dU}{dy}$. Si se aplica esta ecuación a la del movimiento y al factor de

fricción da $f = 64 / R_e$. Para un flujo laminar, el número de Reynolds no debe exceder el número de Reynolds crítico el cual es de 2000, entonces $R_e > R_e$

crit.

3.2.5. Ecuación de la energía (Ecuación de Bernoulli)

En un conducto con flujo estacionario como el mostrado en la figura 3.3

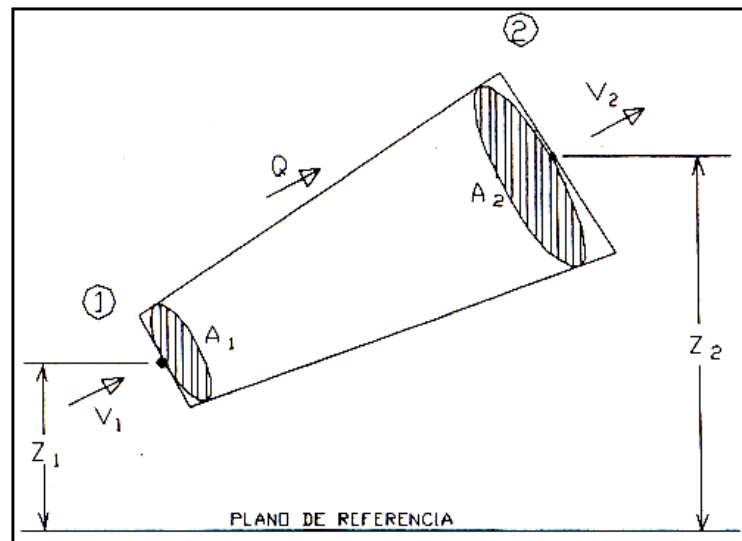


Figura 3.3 Conducto con un flujo estacionario

La energía hidráulica total H en un punto cualquiera se expresa como:

$$H = Z + \frac{V^2}{2 * g} + \frac{P}{\gamma} \quad (3.16)$$

donde:

$\frac{P}{\gamma}$ es la carga o presión estática

$\frac{V^2}{2 * g}$ es la carga dinámica o energía cinética

Z es la elevación o energía potencial

Entre dos puntos cualesquiera 1 y 2, la carga total varía según las pérdidas de energía que ocurren en el trayecto. De esta manera, de la ecuación 3.16 se tiene:

$$Z_1 + \frac{V_1^2}{2 * g} + \frac{P_1}{\gamma} = Z_2 + \frac{V_2^2}{2 * g} + \frac{P_2}{\gamma} + h_{f1-2} \quad (3.17)$$

donde h_{f1-2} es la pérdida de energía entre los puntos 1 y 2.

La suma de los dos términos $\frac{P}{\gamma} + Z$ se denomina carga piezométrica y la suma de los tres términos es la carga total. Otro término comúnmente utilizado es la presión P_e referido como presión estática y la suma de los dos términos se denomina presión total P_r o presión de estancamiento.

3.2.6. Pérdidas en sistemas de tuberías

Las pérdidas de carga en tuberías se dividen en dos tipos; pérdidas de superficie en el contacto del fluido con la tubería (capa límite), rozamiento de unas capas de fluido con otras (régimen laminar) o de las partículas de fluido entre sí (régimen turbulento). El segundo tipo son las pérdidas de forma, que tienen lugar en las transiciones (estrechamientos o expansiones de la corriente), codos, válvulas y en toda clase de accesorios de tubería.

En la ecuación de Bernoulli se introduce el término h_f donde este término es la altura correspondiente a la pérdida de carga por fricción por efecto de la viscosidad.

Es sólo en el siglo pasado cuando se fórmula una teoría más o menos general y racional de la resistencia hidráulica, mediante las contribuciones de Blasius, Colebrook y Prandtl entre otros, para expresar las pérdidas de energía por fricción de contorno de acuerdo con esas teorías. Se ha utilizado con frecuencia la ecuación de Darcy – Weisbach [10], propuesta en el siglo

pasado y que tiene el mérito de incorporar en su estrechura matemática un coeficiente de fricción adimensional:

$$h_f = f * \frac{L}{d} * \frac{V^2}{2 * g} \quad (3.18)$$

donde:

f = Coeficiente de fricción

L = Longitud del tramo de tubería asociado con la pérdida de energía señalada

d = Diámetro interno

V = Velocidad media del flujo

g = gravedad

Para flujo laminar (Reynolds < 2000), la rugosidad o condición inicial 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 $f = 64/R_e$.

Para flujo turbulento el factor de fricción se encuentra afectado por la rugosidad de las partes interiores de la tubería y éste puede ser determinado por métodos numéricos con la ecuación implícita desarrollada por C. F. Colebrook (1939) [10]:

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

donde:

R_e = Número de Reynolds, adimensional

f = Factor de fricción

ε = Rugosidad absoluta de la tubería

d = Diámetro interior de la tubería

En razón de la estrechura matemática de la ecuación anterior, un tanto complicada, para facilitar su uso se han desarrollado recursos gráficos, tal como el diagrama de Moody, o la expresión propuesta por Swami como una aproximación de la ecuación de C. F. Colebrook [10]:

$$f = \frac{0.25}{\left[\text{Log} \left(\frac{\varepsilon}{3.7 * d} + \frac{5.74}{R^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (3.20)$$

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. Se configura así, dentro del campo de flujo una zona confinada y de estrechura cinemática compleja, en cuyo interior el movimiento de los elementos de flujo se mantiene en virtud de la energía que le transfiere la circulación principal. Además, el acentuado estado de esfuerzos cortantes en la superficie de separación genera vórtices que se difunden en los próximos a la alteración geométrica y que induce una intensa turbulencia.

Las pérdidas menores o localizadas se expresan en términos de un coeficiente de pérdida K , definido por:

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

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 proyectos:

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

3.2.7. Envejecimiento de la tubería

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. Esta alteración puede reducir la capacidad hidráulica del elemento de conducción,

principalmente por el incremento del coeficiente de fricción y/o por la disminución del área neta de flujo.

Los principales factores que afectan la capacidad hidráulica de un conducto son entre otros, la sedimentación, crecimientos orgánicos, depósitos minerales, corrosión y tuberculización. La corrosión es un Término que se utiliza para designar el deterioro interno o externo de la tubería. Los factores que determinan la corrosión interna de las tuberías son 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 simplifican el crecimiento de la rugosidad con un comportamiento lineal, según el cual, la rugosidad ε al cabo de Taños, puede expresarse como [10]:

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

donde:

$\varepsilon_{inicial}$ = Rugosidad inicial de la tubería

α = Coeficiente de proporcionalidad

t = Tiempo en años

Para la estimación del coeficiente de proporcionalidad que aparece en la ecuación anterior, Levin supone una relación entre α y las características del agua las cuales se resumen en el siguiente cuadro:

Grupo	Características del Agua	Valores de α (mm/año)		
		Mínimo	Medio	Máximo
1	Aguas poco mineralizadas, no agresivas, con poco contenido de minerales y 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	Aguas muy corrosivas (PH muy bajo), contenido de cloruros y sulfatos menores a 150 mg/L y hierro superiores 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, residuos sólidos superior a 2000 mg/L	0.600	0.700	1.000

Cuadro 3.1 Características del agua y su relación con α [10]

3.2.8. Cavitación

La presión de una tubería que transporta líquidos se reduce a medida que aumenta la cota del eje de la misma, o bien cuando reproducen alteraciones en sus condiciones de contorno que originen incrementos sensibles de la velocidad del agua. También la configuración del flujo en ciertos tipos de bombas y turbinas y de algunos dispositivos accesorios de las conducciones, puede ir acompañada de una sensible disminución local de la presión. En estas situaciones, si se alcanza la presión de vapor del líquido a una temperatura a la cual se verifica el flujo, se originan cavidades saturadas de vapor. 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. Aquellas que

entren en contacto con un contorno de la tubería o con algunas de las partes de algún dispositivo que en ella se encuentre instalado, determinarán vibraciones, ruido y esfuerzos de impacto de gran magnitud, que afectan el comportamiento de obras civiles y/o de los componentes mecánicos.

En la hidráulica, este complejo fenómeno se denomina cavitación, y constituye una definición importante en la determinación altimétrica de las tuberías, y en la selección de válvulas, medidores de flujo, piezas especiales y unidades de bombeo, que muchas veces forman parte de los sistemas de conducción de líquidos a presión.

La cavitación es capaz de acabar con superficies hechas con los materiales más resistentes, tales como el acero, concreto y las fibras epóxicas. En caso de paredes o pisos de concreto, la acción destructiva se hace sentir sobre el constituyente menos resistente, esto es, el aglomerante o ligante. La erosión alrededor de las partículas de agregado aumentan la rugosidad de las paredes y las condiciones para la cavitación se pueden tornar más críticas. Las partículas terminan por saltar y el fenómeno erosivo tiene la tendencia a progresar aguas abajo, encontrando situaciones favorables y pudiendo alcanzar proporciones muy importantes y causar la destrucción completa del contorno que confina el flujo.

En general el proceso de deterioro no puede ser instantáneo, más bien es progresivo, diferenciándose de un período inicial donde el material se fatiga debido a las continuas implosiones de las burbujas de vapor, hasta cuando 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 multiplicaran los puntos potenciales creadores de bajas presiones y por ende se ampliará la zona de influencia destructiva del fenómeno.

La cavitación en una bomba puede ser detectada por el ruido que se produce dentro de la carcasa, así como, por la formación de profundas perforaciones y erosión general sobre el lado inferior de los vanos cerca de la entrada del impulsor. Cuando una bomba esta cavitando debido a problemas en el sistema, la cavitación puede ser reducida en algunas ocasiones permitiendo la entrada de una pequeña cantidad de aire en el lado de la bomba o también estrangulando la válvula de descarga de la misma.

La cavitación normalmente ocurre en el impulsor de una bomba centrífuga y los daños causados por la misma pueden inutilizar el impulsor en tan sólo 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 burbujas de vapor.

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

- Cavitación incipiente: corresponde a la aparición de la cavitación. El ruido que la acompaña proviene de un débil burbujeo intermitente y no han de esperarse daños por vibración o erosión de las partes del dispositivo expuestos 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 erosión en los contornos sólidos debido al impacto de las cavidades condensadas sobre tales contornos. Las vibraciones y el ruido alcanzan niveles considerablemente superiores a los correspondientes a la cavitación crítica.
- Estrangulamiento por cavitación: condición en la cual la presión de vapor prevalece en toda la región de flujo adyacente a la salida del dispositivo y por lo tanto, una disminución de la presión del líquido aguas debajo de esa región no produce aumento de caudal. En esta situación se dice que el flujo está estrangulado y los daños se producen generalmente aguas abajo del dispositivo cuyo funcionamiento hidráulico determina la cavitación.

La cavitación también se puede clasificar en:

- Cavitación general: ocurre cuando la presión media del sistema alcanza la presión de saturación.
- Cavitación local: causados por obstrucciones.
- Cavitación transitoria: Causadas por arranques bruscos, aumento de rpm, etc.
- Cavitación permanente: es la más peligrosa ya que produce el desgaste continuo sobre las partes mecánicas.

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

- Energía total y presión del flujo de aproximación, H y P_1 , respectivamente.

- Presión aguas abajo, P_2 .
- Presión de vapor del líquido a temperatura del flujo, P_v .
- Características hidromecánicas de los dispositivos y geometría de las piezas especiales.
- Densidad del líquido, ρ .

Los índices más utilizados para caracterizar la cavitación son [10]:

$$\sigma = \frac{P_2 - P_v}{P_1 - P_{21}} \quad (3.23)$$

$$\sigma = \frac{P_2 - P_v}{P_1 + \rho^* \frac{V^2}{2} - P_2} \quad (3.24)$$

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

$$\sigma = \frac{P - P_v}{\rho^* \frac{V^2}{2}} \quad (3.25)$$

donde σ es el índice de cavitación del flujo, P es la presión absoluta en el sitio de interés, en kgf / m^2 , ρ es la densidad del agua, en $\text{Kg} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4$ y V es la velocidad promedio del flujo en el sitio de interés, en m / s [10].

En el mencionado índice, el numerador representa a las fuerzas que resisten la desorganización en la continuidad del flujo, mientras que el denominador es representativo de aquellas que promueven el rompimiento del orden.

Cuando se aceptan índices de cavitación muy bajos en la descarga (caudal que produce los menores índices de cavitación) de 0.13 y 0.14 respectivamente, debe darse especial atención a las tolerancias permitidas en el acabado de las superficies aguas arriba del aireador. Sin embargo se han observado daños significativos cuando el índice de cavitación de flujo es menor de 0.20. Daños menores han ocurrido para índices mayores de 0.20, pero la extensión de los daños no ha requerido reparación. Por lo tanto, desde el punto de vista de diseño, el primer aireador debe ser ubicado en áreas donde el flujo tenga índices de cavitación mayor o cercano a 0.20.

La cavitación en muchas oportunidades se produce por el mal diseño de la tubería de succión. Otras causas y consecuencias se muestran en el cuadro 3.2:

CAUSAS	CONSECUENCIAS
Aumento de la altura de succión.	Ruidos y vibraciones debido a los choques bruscos de las burbujas de vapor
Disminución de la presión atmosférica	Disminución de la carga y eficiencia
Aumento de la temperatura del líquido	Desgaste del impulsor
Excesiva pérdida de carga en la succión	Reducción del rendimiento

Cuadro 3.2 Causas y Consecuencias de la Cavitación

3.2.9. 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. Se puede decir también que el régimen es permanente si en cualquier punto del espacio por donde circula el fluido no varían con el tiempo las características de éste, en particular su velocidad y su presión.

3.2.9.1. Principio de energía

Muchos problemas que implican movimiento de fluidos obligan a utilizar la primera ley de la termodinámica, a menudo llamada ecuación de energía, para relacionar cantidades de interés. Esta ecuación regularmente es usada para la ecuación de Bernoulli no es aplicable; esto sucede siempre que no es posible desprestigiar los efectos de la viscosidad, como en el flujo a través de un sistema de tuberías o en un canal abierto.

La primera ley de la termodinámica define un sistema con cambio de estado, entre un punto inicial (1) a otro final (2), como:

$${}_1Q_2 = E_2 - E_1 + {}_1W_2 \quad (3.26)$$

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:

$$\frac{E_2 - E_1}{\dot{m}} = \frac{W}{\dot{m}} \quad (3.27)$$

lo que es igual a:

$$e_2 - e_1 = L \quad (3.28)$$

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

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

$$L = e_s - e_e \quad (3.29)$$

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

$$L = \left(U_s + P_s * V_s + g * Z_s + \frac{V_s^2}{2} \right) - \left(U_e + P_e * V_e + g * Z_e + \frac{V_e^2}{2} \right) \quad (3.30)$$

Esta ecuación describe el comportamiento de una turbomáquina sin variación de la 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:

$$L = \frac{P_s - P_e}{\rho} + g * (Z_s - Z_e) + \frac{V_s^2 - V_e^2}{2} \quad (3.31)$$

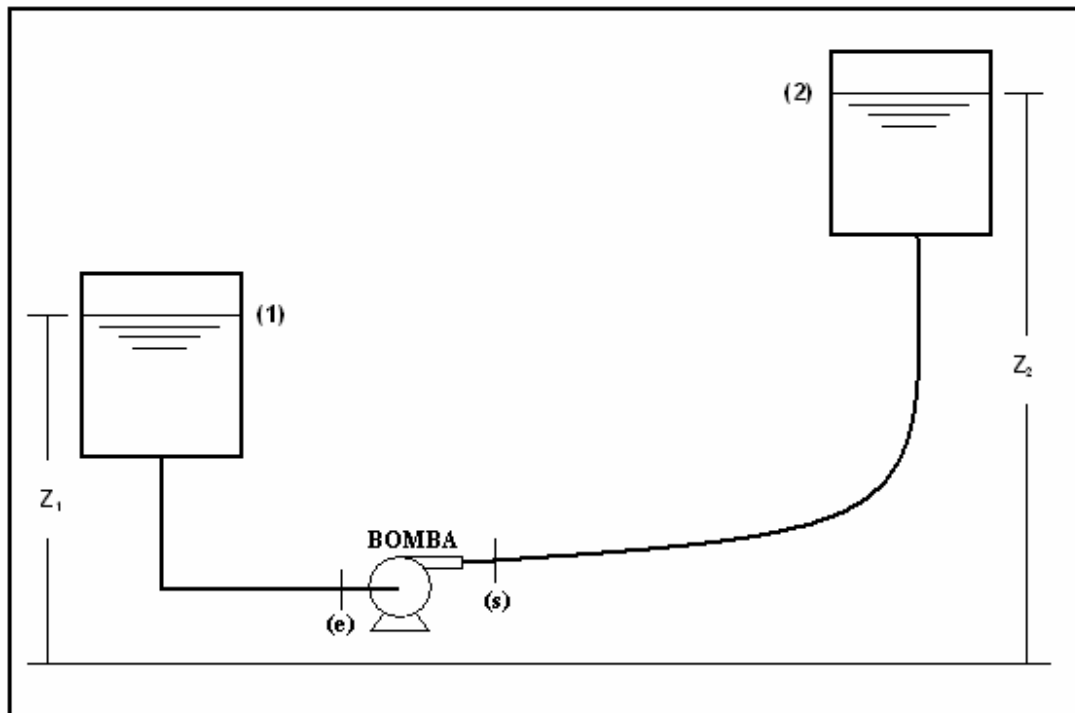


Figura 3.4 Esquema general de un sistema de bombeo

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre (1) y (2) y la entrada de la bomba (e) se obtiene la relación:

$$U_1 + \frac{P_1}{\rho} + g * Z_1 + \frac{V_1^2}{2} = U_e + e_e + g * h_{f1-e} \quad (3.32)$$

esto es igual a:

$$e_e = \frac{P_1}{\rho} + g * Z_1 + \frac{V_1^2}{2} - g * h_{f1-e} \quad (3.33)$$

Igualmente entre la salida de la bomba y el punto (2):

$$U_2 + \frac{P_2}{\rho} + g * Z_2 + \frac{V_2^2}{2} = U_s + e_s + g * h_{fs-2} \quad (3.34)$$

por lo tanto, el trabajo específico es igual a:

$$e_s = \frac{P_2}{\rho} + g * Z_2 + \frac{V_2^2}{2} - g * h_{fs-2} \quad (3.35)$$

Si se divide la ecuación entre g, la curva del sistema queda definida como:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + (Z_2 - Z_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2 * g} + h_{f1-e} + h_{fs-2} \quad (3.36)$$

donde h_{f1-e} y h_{fs-2} son las pérdidas de carga en la tubería de succión y descarga, respectivamente. Esta es la ecuación de energía y se puede aplicar a cualquier flujo uniforme estable con una entrada y salida.

3.2.9.2. Análisis de redes de tuberías

Las metodologías analíticas de cálculo se fundamentan en las siguientes ecuaciones:

- Continuidad: $Q = A * V$
- Energía: $H_2 + h_{f2} + h_L + h_{f1} = H_1$
- Cantidad de Movimiento: $F = \rho * Q_1 * V_1 + \rho * Q_2 * V_2 + \dots + \rho * Q_n * V_n$

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 del cálculo numérico.

En orden cronológico se presentan los siguientes métodos de análisis de redes de tuberías:

- Método gráfico.
- Métodos numéricos:
 - Método de Hardy – Cross.
 - Método de Newton – Raphson.
 - Método de la Teoría Lineal.

Con el **Método gráfico** [14] 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 calculada para cada caso.
- 3) Simplificar la red en ramales equivalentes.
- 4) Determinar el punto de trabajo (sistema, ramales y bombas gráficamente)

En razón de su sencillez, el **Método de Hardy – Cross** [14] tuvo y mantiene todavía una gran difusión desde que fue introducido por Hardy Cross. Por lo demás, ha estado sujeto a mejoras sistemáticas por diversos investigadores, principalmente orientadas a acelerar o garantizar su convergencia hacia la distribución definitiva de gastos y alturas piezométricas en redes de tuberías a presión.

Para analizar una red mediante el método 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 comunidad.
- 4) Para cada ciclo o camino, evaluar el caudal correctivo δQ con la siguiente ecuación:

$$\delta Q = \frac{-\sum (K)_i * Q_i * (Q_i)^{n-1}}{\sum n * |K_i * (Q_i)^{n-1}|} \quad (3.37)$$

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

$$Q_i = Q_{0i} + \sum \delta Q \quad (3.38)$$

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

El **Método de Newton Raphson** [14] ha sido ampliamente y eficazmente utilizado y consiste en la determinación de una raíz aislada R , de la función $Y=F(x)$, por aproximaciones sucesivas de formulas de recurrencia del tipo:

$$a_2 = a_1 - \frac{F(a_1)}{F'(a_1)} \quad \text{o bien} \quad a_2 - a_1 = -\frac{F}{F'}$$

La linealización de las ecuaciones de energía del sistema, o **Método Lineal** [14], 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 definan mediante el balance de energía.
- 2) Linealizar las ecuaciones descomponiendo los términos de segundo orden $(Q_i)^2$ en producto de un valor discreto Q_i , es decir:

$$(Q_i)^2 = |Q_i'| * Q_i \quad (3.39)$$

- 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 linealizadas.
- 5) Actualizar los caudales en cada tubo Q_i .
- 6) Repetir los pasos 4 y 5 hasta que se logre la exactitud deseada.

3.2.10. Régimen transitorio

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

determinan allí las condiciones transitorias del flujo. Las modificaciones antes mencionadas producen un efecto de sobrepresión.

Las sobrepresiones son sobrecargas bruscas y transitorias que ocurren en las tuberías de aducción, causadas por el efecto pulsátil de la onda irruptiva generada por un cambio abrupto de la velocidad del agua dentro de dicha tubería. Este efecto también conocido como “golpe de ariete” o “ariete hidráulica” (waterhammer) [12].

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 parar 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 a 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 potencial el agua y la tubería han sido transformadas 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 en el golpe de ariete, la sección 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 los grupos moto-bomba, 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 rotación 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.

3.2.10.1. Descripción matemática del régimen permanente

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, la de continuidad y la de movimiento, dentro del enfoque unidimensional de análisis, y con la limitación de ser aplicables a líquidos y conductos circulares de propiedades únicas y poco elásticos; las respectivas expresiones adoptan las formas siguientes:

➤ Ecuación de Continuidad:

$$V \frac{dh}{dx} + \frac{dh}{dt} + V \operatorname{sen} \alpha + \frac{a^2}{g} \frac{dV}{dx} = 0 \quad (3.40)$$

donde:

V = velocidad del flujo

α = ángulo de inclinación de la tubería

h = altura piezométrica

g = gravedad

X = dirección del movimiento

a = velocidad de propagación de las perturbaciones en las magnitudes de flujo

t = tiempo

➤ Ecuación dinámica del Movimiento:

$$\frac{dh}{dx} + \frac{V}{g} \frac{dV}{dx} + \frac{1}{g} \frac{dV}{dt} + f \frac{V|V|}{2gD} = 0 \quad (3.41)$$

donde f es el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach [14] y la expresión cuadrática en el término que evalúa los efectos de la fricción se descompone

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.(JOUKOWSKI)

$$a = \sqrt{\frac{\frac{E}{\rho}}{1 + \frac{Ed}{E_c e}} C} \quad (3.42)$$

donde:

- 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 interno
- e = espesor
- C = factor de colocación de la tubería

Las ecuaciones (3.40) y (3.41) conforman un sistema de ecuaciones en derivadas parciales no lineales, cuya integración analítica, sujeta a las condiciones de contorno, o es imposible o es excesivamente compleja. Se utilizan entonces, procedimientos numéricos orientados a la definición de las funciones:

$$V = f(x,t) \quad (3.43)$$

$$h = g(x,t) \quad (3.44)$$

que constituyen la solución al régimen transitorio.

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

$$\zeta = \frac{aV_0}{gh_0} \quad (3.45)$$

$$\tau = \frac{T_v}{(2L/a)} \quad (3.46)$$

donde:

a = velocidad de propagación de las perturbaciones

V_0 = velocidad relacionada con el régimen permanente

h_0 = altura piezométrica relacionada 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

L = longitud recta

El cálculo de la celeridad de las ondas elásticas, ecuación (3.42), el factor de colocación de la tubería C , dependen de las restricciones de la tubería y de su tipo y se definen 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.

$$C = 1 - \mu^2 \quad (3.47)$$

donde μ representa la relación de Poisson [13].

- Tubería de acero con juntas mecánicas, soldadas pero con frecuencia 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 conjuntas de soldaduras a todo lo largo de su eje y colocadas de forma tal que no se restringe la deformación axial global:

$$C = \frac{5}{4} - \mu \quad (3.48)$$

- Tuberías de concreto reforzado: en la ecuación (3.42) se utiliza como valor E_c el módulo de elasticidad del acero siempre que para e se introduzca un espesor equivalente dado por la expresión:

$$e_c = E_r * e_e + \frac{A_s}{l_s} \quad (3.49)$$

en la cual:

e_e = espesor equivalente

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

e_c = espesor del concreto

A_s = área transversal del acero de refuerzo

l_s = espaciamiento de las barras o cables de acero de refuerzo

En el cuadro 3.3 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	$2.10 \cdot 10^6$	0.30
Hierro Fundido Dúctil	$0.98 \cdot 10^6$	0.25
Hierro Galvanizado	$1.687 \cdot 10^6$	0.26
Concreto	$0.210 \cdot 10^6$	0.10 – 0.15
Asbesto-Cemento	$0.240 \cdot 10^6$	----
Polietileno	$8.150 \cdot 10^6$	0.47

Cuadro 3.3 Materiales de las tuberías

3.2.10.2. Métodos simplificados para el cálculo del golpe de ariete

Entre los métodos fundamentados se presentan a continuación el desarrollado por Lorenza Allievi y el método gráfico de Bergeron y Schnyder [12], para el cálculo del golpe de ariete.

Las formas simplificadas de las ecuaciones fundamentales (3.40) y (3.41) que describen el régimen transitorio se presentan a continuación:

- Ecuación de la continuidad:

$$\frac{dH}{dt} = -\frac{a^2}{g} \frac{dV}{dx} \quad (3.50)$$

- Ecuación del movimiento:

$$\frac{dH}{dx} = -\frac{1}{g} \frac{dV}{dt} \quad (3.51)$$

Las soluciones generales de estas ecuaciones son:

$$H - H_0 = f\left(t - \frac{x}{a}\right) + F\left(t + \frac{x}{a}\right) \quad (3.52)$$

$$V - V_0 = \frac{g}{a} \left(f\left(t - \frac{x}{a}\right) - F\left(t + \frac{x}{a}\right) \right) \quad (3.53)$$

3.2.10.3 Método de Allievi

Este método se fundamenta en las ecuaciones (3.52) y (3.53) 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, la cual se alimenta de un estanque aguas arriba, cuyo nivel permanece invariable con el tiempo.

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

$$H_a = \frac{a * V_0}{g} \quad (3.54)$$

en el cual V_0 es la velocidad del régimen permanente. El tiempo de fase o tiempo crítico está representado por la relación:

$$t_c = 2 \frac{L}{a} \quad (3.55)$$

donde L es la longitud total de la tubería.

3.2.10.4. Método gráfico de Bergeron y Schnyder

Este método para el cálculo de golpe de ariete se fundamenta al igual que el método de Allievi en las ecuaciones (3.52) y (3.53), las cuales se utilizan para obtener las ecuaciones que definen las conocidas rectas de Bergeron [10]. Estas rectas se comportan de acuerdo a la siguiente expresión:

$$h(t_B, x_B) = h(t_A, x_A) + \frac{a}{gA} [Q(t_B, x_B) - Q(t_A, x_A)] \quad (3.56)$$

La ecuación anterior establece una relación 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 (ver figura 3.5), siempre que se cumpla la relación:

$$x_B = x_A - (t_B - t_A) * a \quad (3.57)$$

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

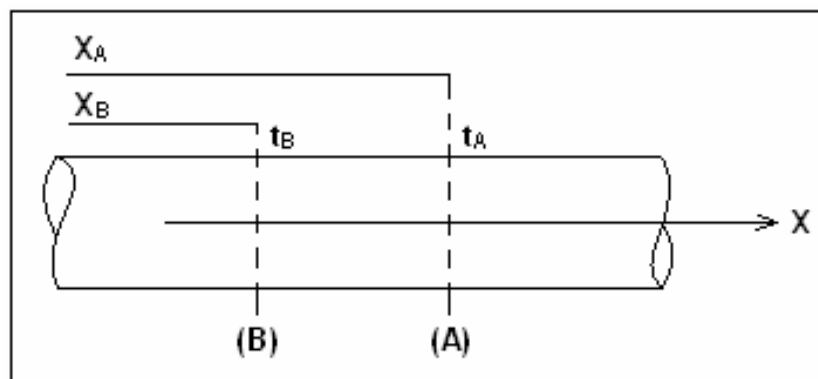


Figura 3.5 Recta positiva de Bergeron [10]

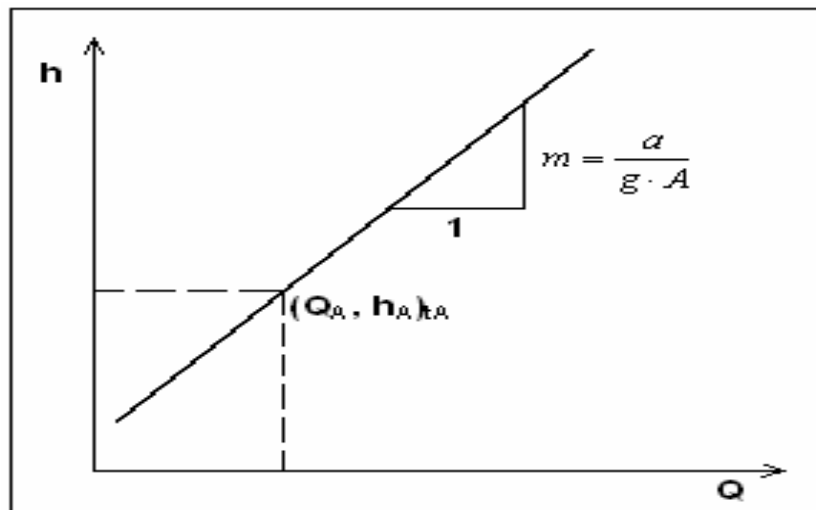


Figura 3.6 Recta Positiva de Bergeron, Lugar Geométrico de los puntos [10]

3.2.10.5 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 motobombas 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 de rotación conformado por el rotor del motor, el rodete, los elementos transmisores de 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 unos instantes después, comienza a 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 ondas perturbadoras en la línea de descarga.

La ecuación dinámica de giración del conjunto motobomba es:

$$M = \frac{-W * R^2}{g} * \frac{2\pi}{60} * \frac{dN}{dt} \quad (3.58)$$

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

$$\frac{M_1 + M_2}{2} = -\frac{W * R^2}{g} * \frac{2\pi}{60} * \frac{N_1 - N_2}{\Delta t} \quad (3.59)$$

Se considera el valor de $\beta = M / M_0$ 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.

3.2.10.6. Reflexión de la onda de perturbación en confluencias

Considerando la derivación que se muestra en la figura 3.7, de acuerdo con las ecuaciones (3.53) y (3.54) 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:

$$F_2 = F_3 = s * F_1 \quad (3.60)$$

$$f_1 = r * F_1 \quad (3.61)$$

donde: $s - r = 1 \quad (3.62)$

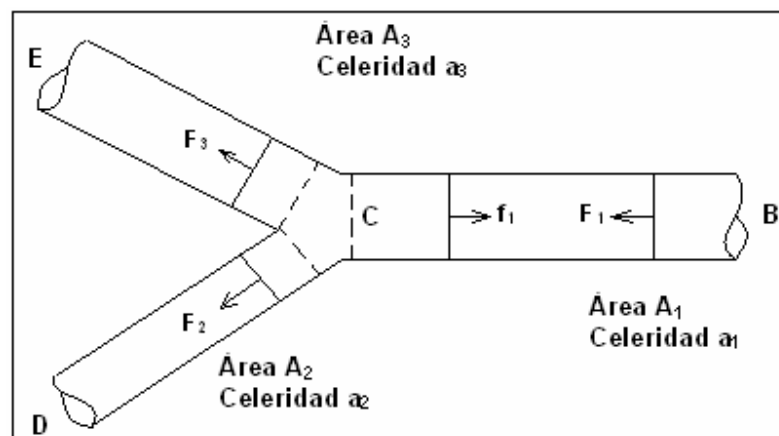


Figura 3.7 Transmisión de ondas de perturbación en una derivación

En estas ecuaciones, r y s son factores de transmisión y reflexión de la onda de perturbación, respectivamente. Estos efectos dependen del área de la sección transversal y de la velocidad de propagación de la onda da

cada sección de tubería. Los valores de estos factores se hallan con las ecuaciones siguientes:

$$s = \frac{2 \frac{A_1}{a_1}}{\frac{A_1}{a_1} + \frac{A_2}{a_2} + \frac{A_3}{a_3}} \quad (3.63)$$

$$s = \frac{\frac{A_1}{a_1} - \frac{A_2}{a_2} - \frac{A_3}{a_3}}{\frac{A_1}{a_1} + \frac{A_2}{a_2} + \frac{A_3}{a_3}} \quad (3.64)$$

De acuerdo a las ecuaciones (3.56) y (3.57), se observa que en cada confluencia que alcanza una perturbación se produce una reflexión de 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

Un sistema de abastecimiento de agua está constituido por una serie de estructuras presentando características diferentes, las cuales están afectadas por coeficientes de diseño distintos en razón de la función que cumplen dentro del sistema. Para su diseño, es preciso conocer el comportamiento de los materiales bajo el punto de vista de su resistencia física a los esfuerzos y los daños a los que estarán expuestos, así como, desde el punto de vista funcional su aprovechamiento y eficiencia, para ajustarlos a criterios económicos.

Es conveniente entonces analizar las características que conforman los criterios de diseño:

- Consumo de agua.
- Factores que afectan el consumo.
- Variaciones periódicas de los consumos e influencias sobre las diferentes partes del sistema.
- Redes de distribución.

3.3.1. Consumo de agua

Esta información es de vital importancia en el diseño de sistemas de abastecimientos de agua. Se ha llegado a aproximaciones bastantes 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 entre 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 un consumo medio, lo cual ha de constituir la base de todo diseño, requiriéndose 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 [1] sugieren como consumos mínimos permisibles para objeto de diseño de sistemas de abastecimiento de agua, los indicados en el siguiente cuadro:

POBLACIÓN	Servicio con Medidores (litros/persona/día)	Servicio 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

Cuadro 3.4 Consumos mínimos permisibles según las normas INOS [1]

3.3.2. Factores que afectan el consumo

3.3.2.1. Tipo de comunidad

Una comunidad o zona a desarrollar está constituida por sectores residenciales, comercios, industrias y recreacionales, cuya composición porcentual es variable para cada caso. Esto nos permite fijar el tipo de consumo de agua predominante y orientar en tal sentido las estimaciones; así se tiene:

- Consumo doméstico: Constituido por el consumo familiar de agua de bebida, lavado de ropa y aseo personal, cocina, limpieza, riego de jardín, lavado de carro y adecuado funcionamiento de las instalaciones sanitarias. Representa generalmente el consumo predominante en el diseño.
- Comercial o industrial: Puede ser un gasto significativo en caso donde las áreas a desarrollar tengan una vinculación comercial o industrial. El comercio o industria constituye una situación normal, hoteles,

estaciones de gasolina, etc., ello puede ser incluido y estimado dentro de los per. cápita adoptados, y diseñar en base a estos 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 las pérdidas en la red: Es motivado por juntas en mal estado, válvulas, conexiones defectuosas y pueden llegar a representar de un 10% a un 15% 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 algunos 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 económico-sociales de una población pueden evidenciarse a través del tipo de vivienda. En este sentido, se han presentado algunas consideraciones que permiten evaluar este factor al analizar, para diversas zonas del país los consumos de agua en viviendas como: el insalubre rancho, la vivienda rural, la casa quinta y la casa tradicional.

	RANCHO		CASA		V. RURAL		QUINTA	
	l / v / d	l / p / d	l / v / d	l / p / d	l / v / d	l / p / d	l / v / d	l / p / d
Máximo	693 marzo	100 marzo	951 abril	139 abril	1.015 marzo	156 abril	1.211 mayo	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

Cuadro 3.5 Consumos per cápita de acuerdo al tipo de vivienda [1]

3.3.2.3. Factores Metereológicos

Generalmente los consumos de agua de una región varían a lo largo del año de acuerdo con la temperatura ambiental y a la distribución de las lluvias. Este mismo hecho puede establecer la 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 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 de máximo y mínimo consumo.

3.3.3.1. Consumo medio diario

Adoptando 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 considera 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.
- El resultado de una estimación de consumo per. cápita para la población futura.

- 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 [1]:

$$Q_m = \frac{\text{Población} * \text{Dotación}}{86400} \quad (3.65)$$

3.3.3.2. Consumo máximo diario

Se define como el máximo diario, 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 [1].

Puede entonces establecerse la relación:

$$Q_{\text{máx_diario}} = K_1 * Q_m \quad (3.66)$$

donde: $K_1 = 1.2 - 1.6$

Q_m = consumo medio en litros por segundos

3.3.3.3. Consumo máximo horario

El consumo máximo horario, se define como la hora del día de máximo consumo. Éste está relacionado al consumo medio (Q_m) mediante la expresión [1]:

$$Q_{\text{máx_horario}} = K_2 * Q_m \quad (3.67)$$

Las normas INOS expresan [1]: “El Consumo Máximo Horario debe suponerse como 200% del consumo diario promedio anual cuando la población de la ciudad sea de 100.000 o más, cuando es de 1000 o menos”, el consumo máximo horario promedio anual puede obtenerse por medio de la siguiente expresión:

$$Q_{\text{máx_horario}} = 275 - 0.75 * X \quad (3.68)$$

donde X es la población en miles de habitantes y $Q_{\text{máx_horario}}$ es el consumo máximo horario en porcentaje del promedio anual.

3.3.3.4. Factor para el caso de incendios

Debe complementarse esta condición para lo cual es necesario determinar 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.

$$Q_I = K_3 * Q_m + Inc \quad (3.69)$$

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% 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% de áreas de construcción aislada o construcciones unifamiliares continuas.

- 32(l/s): Zona industrial, de comercio, viviendas con áreas de construcción mayores de 120% y áreas de reunión como iglesias, cines, teatros, graderías para espectadores, etc.
- No se exigirá dotación de incendio en parcelamientos 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 tuberías que es utilizado para distribuir el agua, siendo de vital importancia la capacidad de la fuente de abastecimiento [14].

Las cantidades de agua están definidas por los consumos, estimados en base a las dotaciones 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 del área de estudio.

Las presiones de 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 el 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 vivienda y de la ubicación de las fuentes de abastecimiento y del tanque, puede determinarse el tipo de red de distribución, las redes pueden ser de varios tipos:

- **Tipo Ramificado:** Son redes de distribución constituidas por un ramal troncal y una serie de ramificaciones que pueden constituir 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 los ramales.
- **Tipo Mallado:** Son aquellas redes constituidas por tuberías interconectadas formando mallas. Este tipo de red 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

Estas instalaciones están, en general, constituidas por un patio o plataforma donde se instalan los grupos moto-bombas, las válvulas, las líneas o cables de transmisión de energía para el accionamiento de los motores y equipos complementarios, los múltiples de entrada y salida, las bombas de llenado, y la grúa para la movilización de todos esos elementos. En sistemas importantes, la estación debe poseer una sala de mandos, con una visual irrestricta sobre el patio, donde se colocan los tableros para el control de la operación de los grupos y de los dispositivos de seguridad.

Se puede definir una estación de bombeo como aquella que toma el agua directamente o indirectamente de la fuente de abastecimiento y la eleva al tanque de almacenamiento, a una estación de rebombeo o a la red.

3.4.1. Bombas y los parámetros a tomar en cuenta para su selección

Una bomba es una máquina que absorbe fluido dentro de sí misma a través de un orificio de entrada y lo impulsa hacia fuera a través de una lumbrera de salida. Entre la gran variedad de bombas que existen se

encuentran las bombas centrífugas, las cuales constituyen no menos del 80% de la producción mundial de bombas. En una bomba centrífuga, el líquido es forzado por la presión atmosférica u otra hacia un grupo de paletas en rotación que viene a ser un impulsor que descarga el líquido a una presión más alta y a mayor velocidad en su periferia. Luego, la mayor parte de la energía de velocidad se convierte en energía de presión por medio de una voluta o con un grupo de paletas de difusión o estacionarias que rodean la periferia del impulsor.

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 por unidad de tiempo.
- Carga dinámica total o altura total de bombeo: En términos estrictos, una bomba sólo puede funcionar dentro de un sistema, para entregar un volumen dado de líquido en el sistema, la bomba debe aplicar, al líquido, una energía formada por los siguientes componentes.
 - Carga estática: Significa una diferencia en elevación. Por tanto, la carga estática total de un sistema es la diferencia en elevación entre los niveles del líquido en los puntos de descarga y de succión de la bomba.
 - Carga de fricción: La carga de fricción es la necesaria para contrarrestar las pérdidas por fricción ocasionadas por el flujo del líquido en la tubería, válvulas, accesorios, etc.
 - Pérdidas en la entrada y en la salida: Si la toma de la bomba está en un depósito, tanque o cámara de entrada, las pérdidas ocurren en el punto de conexión de la tubería de succión con el suministro.

La magnitud de las pérdidas dependen del diseño de la entrada al tubo. Asimismo, en el lado de la descarga del sistema cuando el tubo termina en algún cuerpo

de líquido, se pierde por completo la carga de velocidad del líquido y se debe considerar como parte de las pérdidas totales por fricción en el sistema.

- Potencia útil: Es la potencia hidráulica suministrada al fluido por la bomba y se calcula con la expresión:

$$P_U = \gamma * Q * H \quad (3.70)$$

- 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 que sigue:

$$\eta = \frac{P_U}{P_b} \quad (3.71)$$

- 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:

$$P_b = \frac{\gamma * Q * H}{\eta} \quad (3.72)$$

- Velocidad de rotación: Es la velocidad angular de los elementos giratorios del conjunto moto-bomba.
- Velocidad específica: Es la que relaciona los tres factores principales de las características de rendimiento: capacidad, carga y velocidad de rotación en un solo término y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$N_s = \frac{\eta^* \sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (3.73)$$

- Torque o par mecánico: Es el par necesario para producir el movimiento de rotación del conjunto en giro 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 movimientos giratorios, la relación entre torque y potencia es:

$$M = \frac{P}{\omega} \quad (3.74)$$

- Momento de inercia del grupo moto-bomba: Se refiere al momento de inercia de masa de las partes rotatorias del motor, el 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:

$$I = W * R^2 = \frac{m * R^2}{g} \quad (3.75)$$

donde: m = masa del conjunto de giro

R = radio de giro

W = peso del conjunto de giro

- Carga Neta de Succión Positiva (NPSH):
 - NPSH Requerido: Es la energía necesaria, en carga de líquido que se necesita en la succión de la bomba por arriba de la presión de vapor del

líquido a fin de que la bomba entregue una capacidad dada a una velocidad dada.

- **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:

$$NPSH_d = \frac{P_s + P_a - P_v}{\gamma} - \Delta Z - h_s \quad (3.76)$$

Si la presión de succión es negativa:

$$NPSH_d = \frac{-P_s + P_a - P_v}{\gamma} - \Delta Z - h_s \quad (3.77)$$

donde: 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:

$$NPSH_{\text{disponible}} > NPSH_{\text{requerido}} \quad (3.78)$$

- 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 [8]:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{N}{N_0} * \left(\frac{D}{D_0}\right)^3 \quad (3.79)$$

$$\frac{H}{H_0} = \frac{\rho}{\rho_0} * \left(\frac{N}{N_0}\right)^2 * \left(\frac{D}{D_0}\right)^2 \quad (3.80)$$

$$\frac{P}{P_0} = \frac{\rho}{\rho_0} * \left(\frac{N}{N_0}\right)^3 * \left(\frac{D}{D_0}\right)^5 \quad (3.81)$$

$$\frac{M}{M_0} = \frac{\rho}{\rho_0} * \left(\frac{N}{N_0}\right)^2 * \left(\frac{D}{D_0}\right)^5 \quad (3.82)$$

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: Es el 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 expresión:

$$N_q = \frac{\omega \left(\frac{\text{rad}}{\text{seg}} \right) * \sqrt{Q \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)}}{\left(L \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right) \right)^{3/4}} \quad (3.83)$$

3.4.2. Válvulas y accesorios en las estaciones de bombeo

Las válvulas son elementos que se colocan en las tuberías como auxiliares para la adecuada operación, mantenimiento y seguridad de los sistemas de conducción de fluidos. Las válvulas también se pueden definir como dispositivos para regular el caudal de los fluidos que circulan por los sistemas de tuberías.

3.4.2.1. Clasificación de las válvulas según su función

El tipo de válvula dependerá de la función que debe efectuar, sea de cierre (bloqueo), estrangulación o para impedir el flujo inverso. Estas funciones se deben determinar después de un estudio cuidadoso de las necesidades de la unidad y de los sistemas para los cuales se destina la válvula.

Las características principales y los usos más comunes de los diversos tipos de válvulas para servicio de bloqueo o cierre son:

- Válvulas de compuerta: Válvula con un elemento de cierre en forma de disco que se ajusta fuertemente por encima de una abertura a través

de la que pasa el agua. Resistencia mínima al fluido de la tubería, se utiliza totalmente abierta o cerrada. Accionamiento poco frecuente.

- Válvulas de bola: No hay obstrucción al flujo. Se utiliza para líquidos viscosos y pastas aguadas. Cierre positivo, se utiliza totalmente abierta o cerrada.
- Válvulas de mariposa: Mecanismo de estrangulación para regular el caudal de un líquido. Su uso principal es para cierre y estrangulación de grandes volúmenes de líquidos a baja presión. Su diseño de disco abierto, rectilíneo, evita cualquier acumulación de sólidos, la caída de presión es muy pequeña.

Existen también las *válvulas reguladoras* las cuales tienen 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 se encuentran las siguientes:

- Válvulas de globo: Están caracterizadas por un elemento obturador circular, solidario a un vástago de deslizamiento, generalmente vertical, el cual cierra contra un asiento de igual geometría, conteniendo 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.
- Válvula 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 asociado 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: Válvula en la que el flujo de fluido se regula por medio del movimiento relativo de una bola en un alojamiento esférico, resultante de la presión del fluido y del peso de la bola. 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.

Existen también las *válvulas para el control direccional del flujo*. El diseño de estas válvulas es tal que admiten flujo en una sola dirección, y entre los diversos tipos disponibles las más comunes son las de retención a clapeta basculante y las válvulas de pie. Las válvulas para el control direccional del movimiento impiden el vaciado de tanques en 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 dirección de flujo o retención se describe el modelo más común. Esta constituida 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 contra peso.
- Válvulas de admisión y expulsión de aire: Muchas veces se denomina *ventosa*. En las de doble efecto el flotante mayor obtura o deja libre el orificio a través del cual se expulsa aire en la tubería

durante las operaciones de llenado y vaciado, respectivamente. El flotante y orificios de menores dimensiones permite la expulsión de aire en estado libre que por diversas causas pueda acumularse en los puntos altos cuando la tubería funciona a presión.

3.4.3. Motores eléctricos

Para el accionamiento de las bombas centrífugas se utilizan con frecuencia motores eléctricos sincrónicos y motores de inducción tipo “jaula de ardilla”. Estos últimos operan a una velocidad menor que la sincrónica en un margen denominado deslizamiento, el cual es del orden de 1.5%. Estos motores transforman la energía eléctrica en energía mecánica mediante un par o un torque, que luego la bomba la transforma en energía hidráulica. Por otra parte en el cuadro 3.6 se indican las velocidades sincrónicas para 60 hz. y diversos pares de polos.

N° de Polos	2	4	6	8	10	12	14
N (rpm)	3600	1800	1200	900	720	600	514

Cuadro 3.6 Velocidades sincrónicas para 60 hz.

3.4.3.1. Características que definen un motor

1. Tensión (V). Monofásica, trifásica, corriente continua, con diferentes valores (220V, 380V, 500V)
2. Potencia (Kw.). En función a la potencia y tensión vendrá dada por la intensidad (A)
3. Frecuencia (Hz). En Europa, 50 Hz. En América, 60 Hz.
4. Velocidad (n). Dependerá de la polaridad del motor y Frecuencia de la red.

5. Nivel de protección del motor (IP--)
6. Forma constructiva
7. Clase de aislamiento (Y...c).
8. Factor de potencia ($\cos I$)
9. Tipo de servicio.
10. Ejecución de la caja de bornas.
11. Características particulares del motor, además de las generales dadas por el constructor.
12. Dimensionado del motor y peso.
13. Diagramas de par, velocidad, consumos.

3.4.3.2. 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.
- 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: Relativo al movimiento de rotación.

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

$$P_e = \sqrt{3} * V_L * I_L * \cos \phi \quad (3.84)$$

donde: P_e = potencia eléctrica

V_L = tensión de línea

I_L = corriente de línea

$\cos \phi$ = factor de potencia

Para el caso de los sistemas de bombeo, el cálculo de la potencia que debe entregar el motor se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$P_0 = \frac{P_b}{\eta_{mec}} \quad (3.85)$$

donde: P_0 = potencia neta en el eje del motor

P_b = potencia requerida en el eje de la bomba

$\eta_{mec.}$ = 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. Este rendimiento del motor se define matemáticamente mediante la siguiente expresión:

$$\eta_{mot.} = \frac{P_0}{P_e} \quad (3.86)$$

donde: P_0 = potencia neta en el eje del motor

P_e = potencia eléctrica exigida por el motor

CAPÍTULO IV

SITUACIÓN ACTUAL DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO

El presente trabajo tiene como foco principal el abastecimiento de agua potable a una comunidad a través del bombeo directo denominado también bombeo contra la red de distribución. La estación esta conformada por tres unidades, cada unidad conformada a su vez por una bomba centrífuga y un motor eléctrico, de las cuales operan dos y la otra se mantiene en reserva. Ver Figura 4.1.

4.1. Ubicación de la estación de bombeo

La estación de bombeo Yaguara II se encuentra ubicada al final de la Avenida Principal de La Yaguara, Parroquia El Paraíso, Municipio Libertador. La estación se encuentra a una cota de 1003 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). De la estación salen dos tuberías, una de 4 pulgadas que distribuye el agua potable a los barrios Sucre, San Rafael y Los Piñas y otra de 6 pulgadas que abastece a la calle G y a la urbanización Colinas de Vista Alegre. La distribución en la urbanización se hace a través de tuberías de 4 pulgadas.

4.2. Especificaciones técnicas

4.2.1 Edificación de la estación

La estructura física de la estación de bombeo consta de un área destinada para las unidades moro-bombas y otra para el operador de turno, a continuación se presenta la distribución de la estación (figura 4.2):

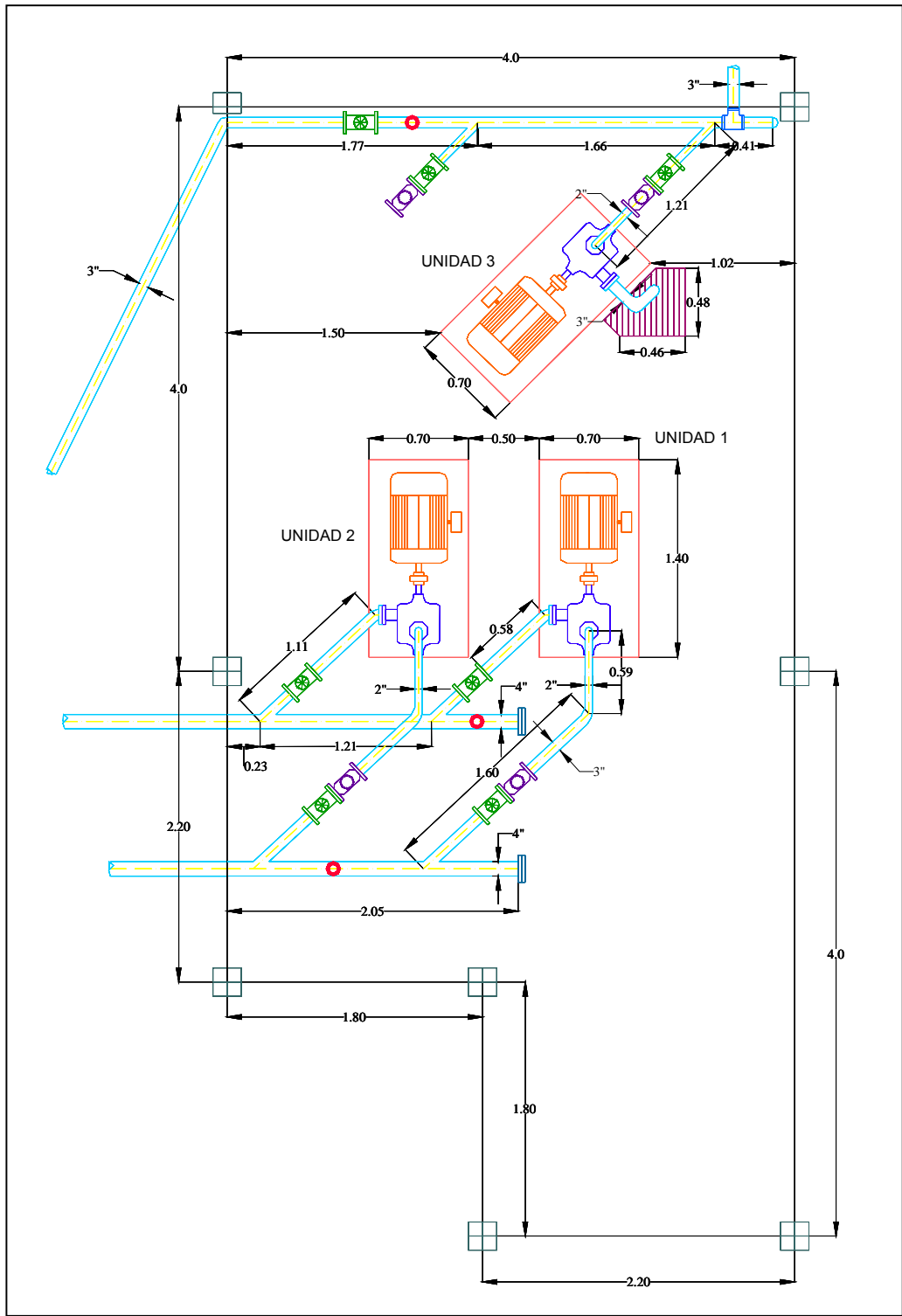


Figura 4.1 Distribución actual de la estación de bombeo Yaguara II

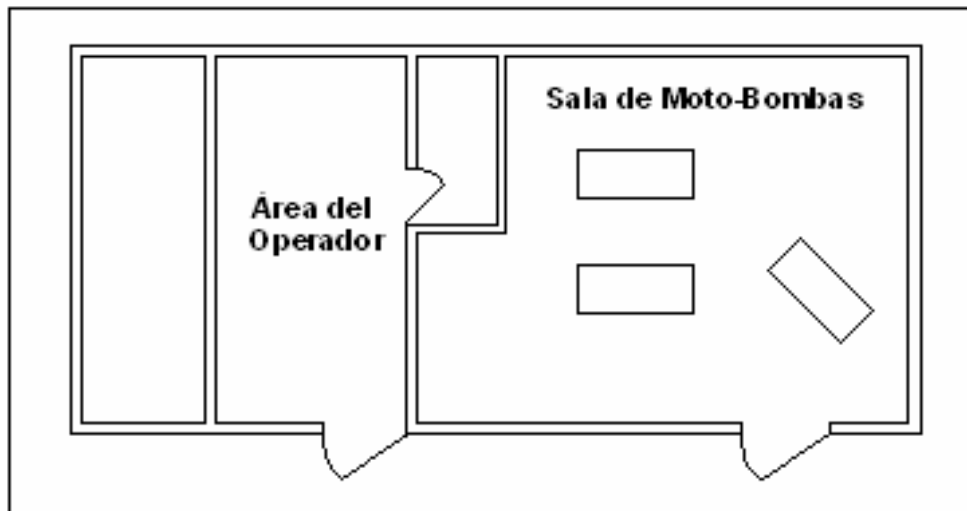


Figura 4.2 Distribución de toda la estación de Bombeo

Es de acotar que el tablero eléctrico se encuentra ubicado dentro del área destinada a los grupos moto-bombas.

4.2.2. Grupo de Bombas

Las bombas instaladas son centrífugas y las especificaciones técnicas de las mismas se presentan en la cuadro 4.1:

Bombas	Grupos		
	1	2	3
Marca	Ksb	Ksb	Ksb
Modelo	WKL	WKL	WKL
Diámetro de descarga (mm)	50	50	40
Diámetro del impulsor(mm)	160	160	135
Número de etapas o escalonamientos	3	3	3
Presión máxima brida de succión (bar)	10	10	10
Presión máxima en el cuerpo (bar)	40	40	40
Sentido de rotación	Horario visto desde el lado de la succión		

Cuadro 4.1 Especificaciones técnicas de las bombas actuales

4.2.3. Tuberías en la estación

Las tuberías que se encuentran en la estación son de acero al carbono de resistencia media, tanto la de succión como la de descarga.

4.2.3.1. Tuberías de succión

La estación de bombeo es abastecida a través de una tubería de 34 pulgadas que luego se reduce a 18 pulgadas proveniente del sistema Tuy III, esta tubería se dirige a la estación por la avenida principal de la Yaguara. La conexión de las tuberías de succión se encuentra por debajo del suelo y se desconoce su distribución, por no existir planos de la misma.

4.2.3.2. Tubería de descarga

Las tuberías de descarga son dos, una proveniente de los grupos 1 y 2 que luego se une con la tubería de descarga del grupo 3, estas tuberías son de 4 pulgadas.

4.2.4. Arreglo actual de las bombas

Actualmente operan dos unidades de las tres y una se mantiene en reserva. La operación de las bombas se presenta a continuación:

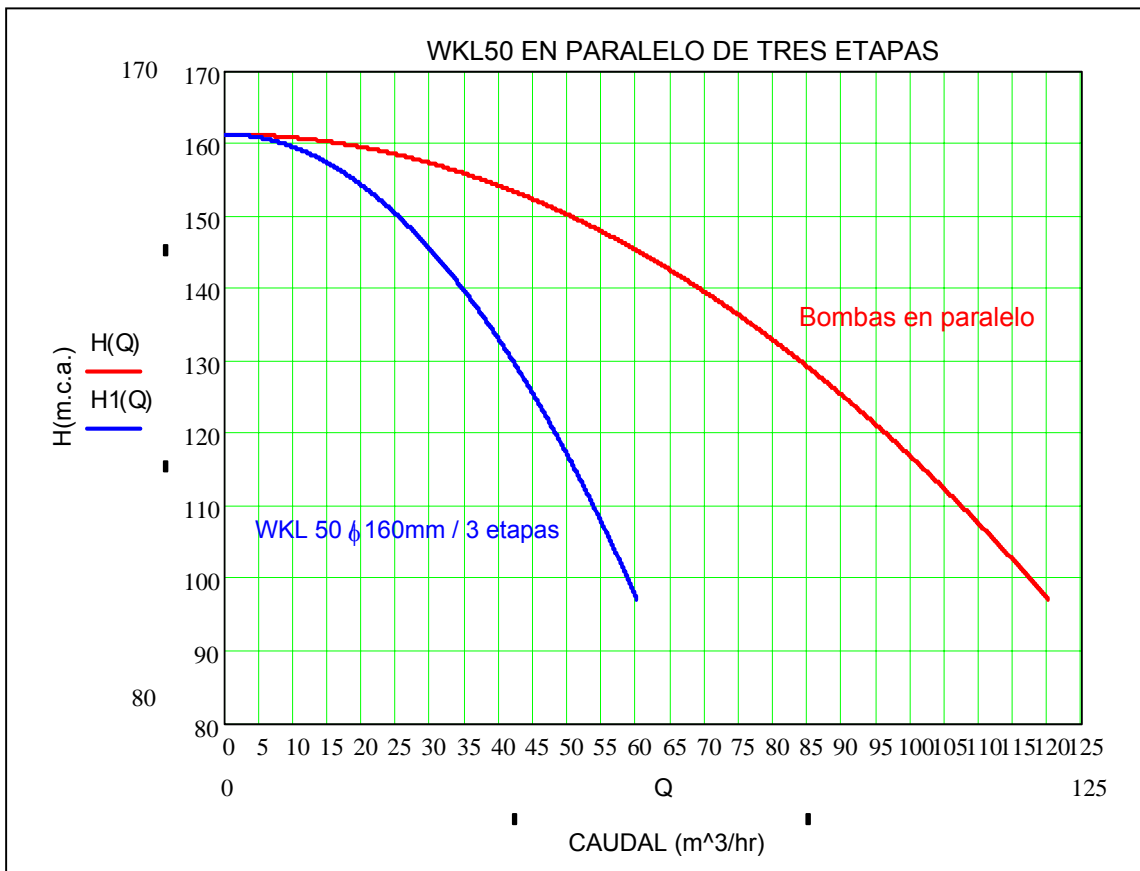
- Grupo 1 y 2 en paralelo
- Grupo 1 y 3 en paralelo
- Grupo 2 y 3 en paralelo

4.2.4.1. Arreglo de los Grupos 1 y 2

Estas dos bombas operan en paralelo y la tubería de descarga es de 4" de diámetro. Las curvas correspondientes a esta conexión se pueden observar en la gráfica 4.1.

4.2.4.2. Arreglo de los Grupo 1 y 3 y de los Grupos 2 y 3

Las bombas 1 y 3 presentan la misma configuración de la conexión que los grupos 2 y 3, por tener, las unidades 1 y 2 las mismas características. Estas conexiones son en paralelo tanto para el grupo 1 y 3 como para el 2 y 3; el diámetro de la tubería de descarga es de 4". Las curvas correspondientes a esta conexión se pueden observar en la gráfica 4.2.



Gráfica 4.1 Arreglo de los grupos 1 y 2 en paralelo

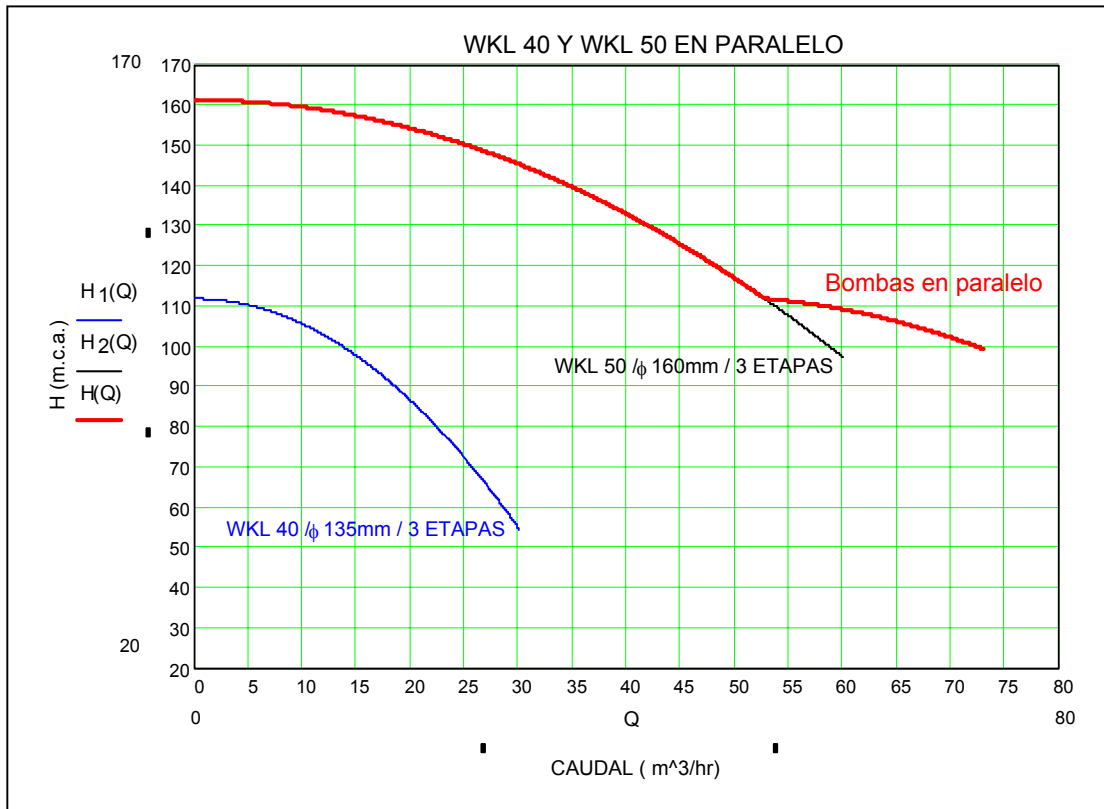


Gráfico 4.2 Arreglo de los grupos 1 y 3 y de los grupos 2 y 3

4.2.5. Motores eléctricos

A continuación se presentan las características técnicas de los motores que forman parte de los grupos moto-bombas:

Motores	Grupos		
	1	2	3
Marca	BBC		
Potencia (hp / Kw)	57 / 43		
Velocidad nominal (rpm)	3500		
Dimensiones (cm)	Ø 40 Longitud 64		
Transmisión	Acople directo		
Tensión (V)	200 Δ 420 Δ		
Corriente (A)	200 / 100		
Factor de Potencia	0.94		

Cuadro 4.2 Especificaciones técnicas de los motores actuales

4.3. Descripción de distribución de la zona de influencia

4.3.1. Descripción del sistema

Como se dijo anteriormente, la estación abastece al Barrio Sucre y a la Urb. Colinas de Vista Alegre, dividiendo al bombeo de la estación en dos partes. Los diámetros de la tubería de descarga son de 4" para el barrio Sucre y luego se divide en ramales de 2". Para la Urb. Colinas de Vista Alegre la distribución se hace mediante una tubería de 6" que luego cambia a 4" para la distribución en toda la urbanización. A continuación se presenta en la figura 4.5 la red de distribución en toda la zona abastecida.

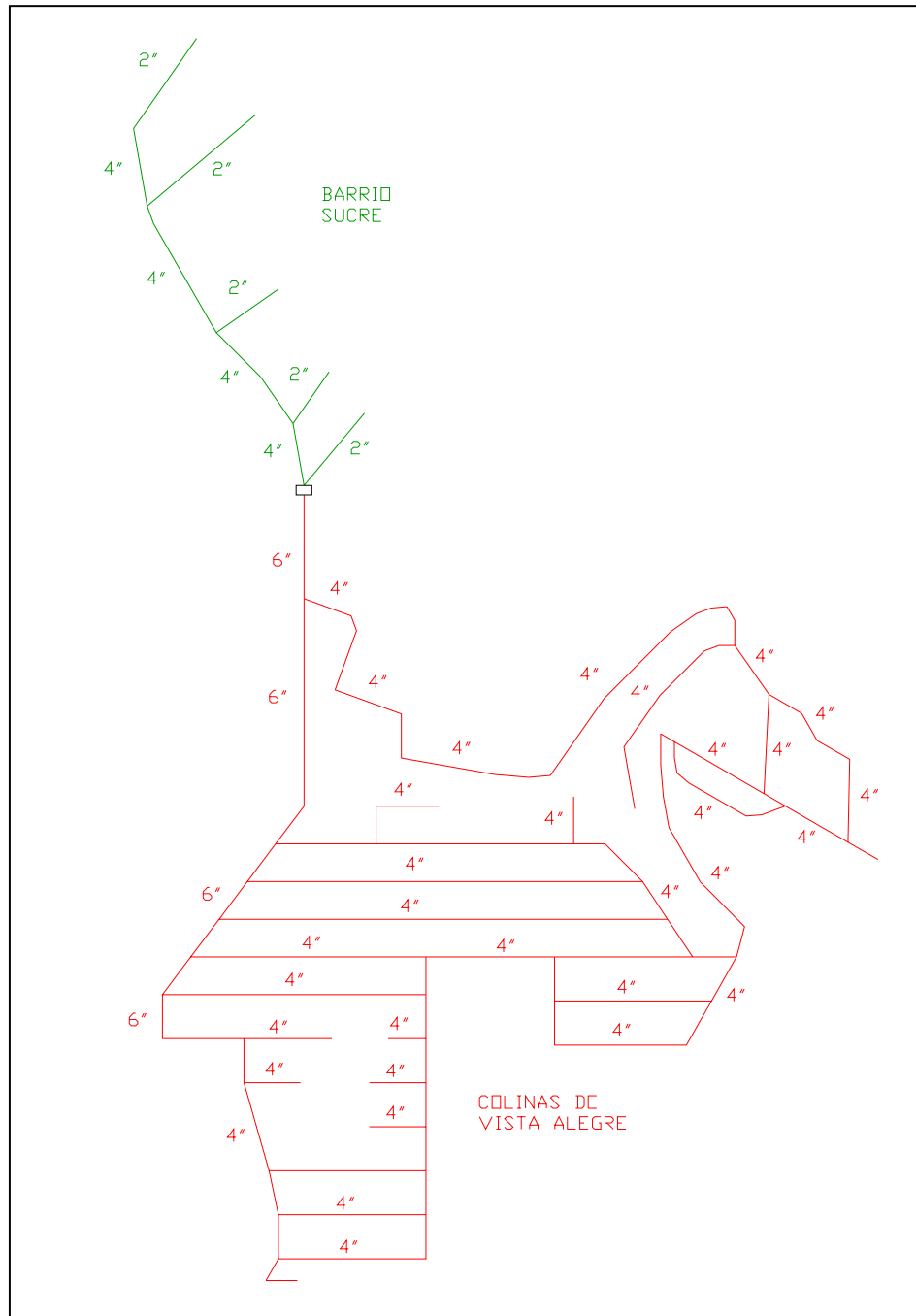


Figura 4.3 Red de distribución de la zona abastecida

4.4. Estimación de la rugosidad actual de las tuberías

El material de las tuberías del sistema es de acero al carbono y para este tipo de tubería la rugosidad absoluta se selecciono de la cuadro en el apéndice 2.

$$\varepsilon_{inicial} = 0.046 \text{ mm}$$

En las tuberías usadas la rugosidad tiende a crecer linealmente con el tiempo. Esto afecta la capacidad hidráulica de las tuberías y se debe a ciertos factores como la sedimentación, depósitos minerales, crecimiento orgánico y corrosión entre otros.

El agua bombeada por la estación es proveniente del sistema Tuy III y las características de la misma se encuentran enmarcadas dentro de aguas no agresivas, poco mineralizadas con poco contenido de minerales y materia orgánica. Para este tipo de aguas la estimación del coeficiente de proporcionalidad se obtiene de la cuadro 3.1, seleccionándose el siguiente valor:

$$\alpha = 0.055 \text{ mm/año}$$

Tomando en cuenta que el sistema de tuberías de la zona abastecida tiene aproximadamente un tiempo de servicio de 25 años y utilizando la ecuación (3.22) se puede entonces estimar la rugosidad actual de las tuberías, arrojando este cálculo el siguiente resultado:

$$\varepsilon = 0.046 + 0.055 * 25$$

$$\varepsilon = 1.421 \text{ mm}$$

4.5. Curva característica del sistema

Por medio de las informaciones de la compañía de operaciones de Hidrocapital, se tienen los registros de presiones del múltiple de descarga como en el múltiple de succión, hay que tomar en cuenta que la operación del sistema tiene variaciones a lo largo del día (momentos de gran demanda y menor demanda).

Por otro lado se debe considerar el comportamiento especial del sistema debido al periodo de regulación del agua, el cual mantiene a la estación en parada durante tres días a la semana.

Para hallar la altura dinámica total se deben tener las especificaciones de todos los elementos que conforman la red o con mediciones de caudal y presión en los puntos apropiados para un buen estudio. Algunas características de la red de distribución que se conocen son las longitudes y diámetros de los tramos principales de tuberías, también la rugosidad estimada, las tomas menores se consideran perdidas de la red, en los distintos nodos de los tramos principales.

A raíz de estas afirmaciones, las informaciones de la empresa de operación de HIDROCAPITAL, las mediciones de caudal hechas en sitio y por la dificultad de determinar en sitio las características exactas de la red, se obtiene la curva del sistema estimada para cada línea de bombeo.

El punto de operación del sistema de bombeo coincide con un punto de la curva del sistema al que se bombea, ya que corresponde al punto de operación del mismo. Considerando un comportamiento cuadrático para el sistema, se obtiene la curva del sistema con el punto de operación, la presión en la succión y la diferencia de cotas.

Teniendo estos elementos conocidos y simplificando la formula (3.36) nos queda la siguiente igualdad.

$$H(Q) = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + Z_2 - Z_1 + KQ^2$$

donde:

P_1 : Presión en la succión

P_2 : Presión en el punto más alto de la red

V_1 : Velocidad media en la succión

V_2 : Velocidad media en el punto más desfavorable de la red

Z_1 : Cota de la estación de bombeo

Z_2 : Cota del punto más alto de la red

γ : Peso específico del agua

K : Constante de la curva de pérdidas

El valor de K se obtiene de la siguiente manera:

$$K = \frac{P_{des} - \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + Z_2 - Z_1 \right)}{(Q_{bombeo})^2}$$

donde:

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

Q_{bombeo} : Caudal que envía la bomba.

Para la relación se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones.

- La presión en el punto más desfavorable de la red en la zona de mayor cota debe ser la presión mínima requerida para la alimentación de una vivienda. La norma venezolana exige un mínimo de 20 m.c.a, pero hay que reseñar que para las condiciones actuales de la zona de trabajo es 0 m.c.a porque las condiciones no son las más idóneas.
- La presión en la succión de las bombas varía según los parámetros de operación, con una presión mínima de 12 m.c.a. y una máxima de 25 m.c.a.
- Las velocidades en los puntos 1 y 2 dependen del caudal y del diámetro de tubería por consiguiente se tomaran los valores para un caudal medio.
- La diferencia de cotas máxima es de 122 m.
- La presión de descarga máxima para dos grupos de trabajo es: 135 m.c.a.

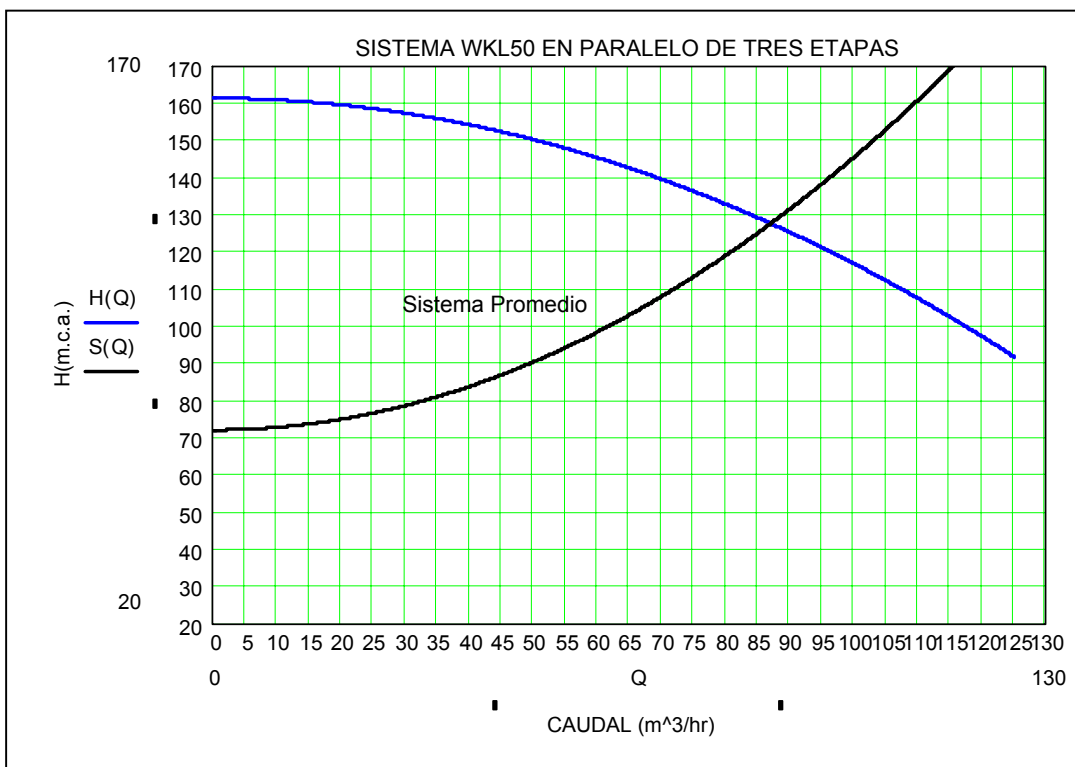
Para las mediciones realizadas se tienen los siguientes parámetros de operación, porque se sabe que la estación esta trabajando en un caso especial. Para las velocidades se utilizo un caudal medio para cada bomba, y se tomo el valor de velocidad media correspondiente.

- Presión de succión 20 m.c.a
- Presión de descarga 120 m.c.a.
- Diferencia de cotas 93 m
- Caudal 126 m³/h
- Velocidad de succión 1.25 m/s
- Velocidad de descarga 0.25 m/s

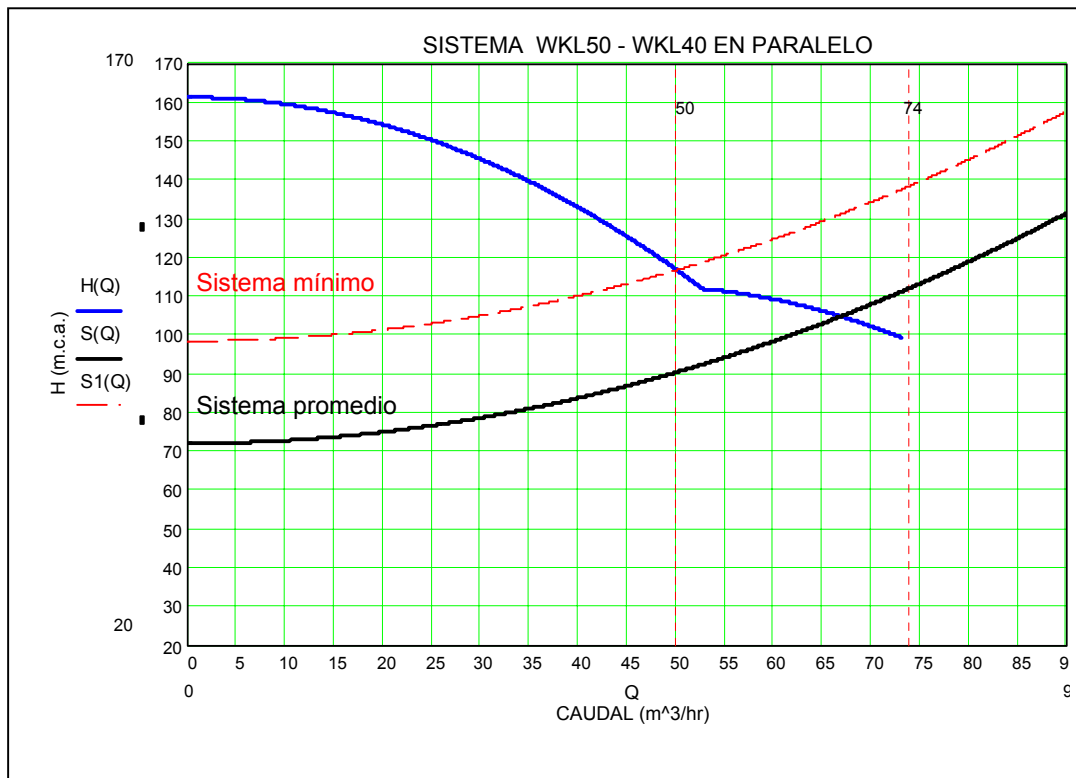
Sustituyendo en la ecuación $K = 0.0073398 \text{ hr}^2 / \text{m}$

De esta forma, gracias a los registros de presiones se obtienen las curvas características del sistema, cabe destacar que esta ecuación describe el comportamiento del sistema para un instante, en el gráfico de detallan los puntos extremos de mayor y menor demanda en la red.

En los siguientes gráficos se detalla en comportamiento del sistema a lo largo de un día de trabajo. El grafico (4.3) representa el funcionamiento de los dos principales grupos de trabajo, mientras el grafico (4.4) muestra el funcionamiento de uno de los grupos principales con el grupo de emergencia. La curva en negro representa el comportamiento promedio del sistema de la red. (El punto remarcado indica en punto de operación promedio) Las curvas punteadas rojas describen los extremos de trabajo y la curva azul representa la curva característica del sistema de las bombas



Gráfica 4.3 Sistema equivalente entre dos bombas WKL 50 trabajando en paralelo



Gráfica 4.4 Sistema equivalente bomba WKL 40 y WKL 50 trabajando en paralelo

4.6. Gastos de consumo

La estación de bombeo YAGUARA II tiene un caudal promedio de 35 litros por segundo. Esta data se calculó mediante los registros de presión en la descarga de las bombas en un periodo de seis meses, con las curvas características de las mismas y las mediciones de caudal hechas en un día completo de trabajo.

BOMBA	CAUDAL (m ³ /hr)		
	Mínimo	Máximo	Promedio
1	35	48	43.5
2	35	48	43.5
TOTAL 1 Y 2 (paralelo)	70	96	87
1 o 2	48	59	55.5
3	2	14	11.5
TOTAL 1 o 2 Y 3 (paralelo)	50	73	67

Cuadro 4.3 Caudales mínimo, máximo y promedio de las bombas

Para los grupos 1 y 2 trabajando en paralelo se tiene:

Caudal promedio: 87 m³/hr de agua.

Velocidad media asociada: 0.75 m/s, desde la descarga hasta los primeros metros, donde empieza el consumo.

Para un grupo principal trabajando en paralelo con el grupo de emergencia:

Caudal promedio: 67 m³/hr de agua.

Velocidad media asociada: 0.6 m/s, desde la descarga hasta los primeros metros, donde empieza el consumo.

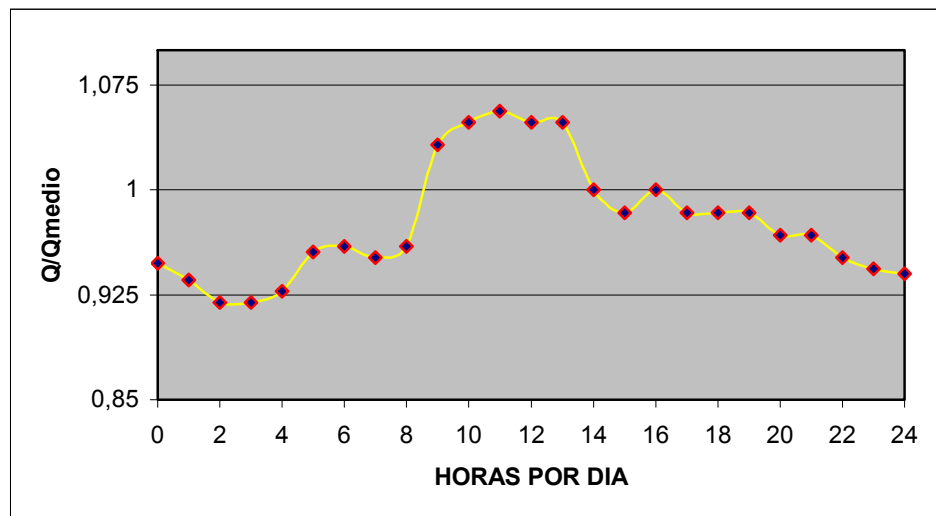
En el cuadro 4.4 se presentan las velocidades de descarga. La velocidad del flujo depende directamente del diámetro de la tubería y del caudal. Para nuestro caso el diámetro de las tuberías es de 4 pulgadas pero hay que tomar en cuenta que el diámetro de las tuberías disminuye linealmente con los años de servicio que presenten las mismas debido a la

corrosión, incrustaciones y la composición química del agua entre otras causas.

BOMBAS (Conexión en paralelo)	VELOCIDAD (m ³ /s)		
	Mínima	Máxima	Promedio
1 y 2	0.60	0.82	0.75
1 y 2 o 3	0.43	0.62	0.60

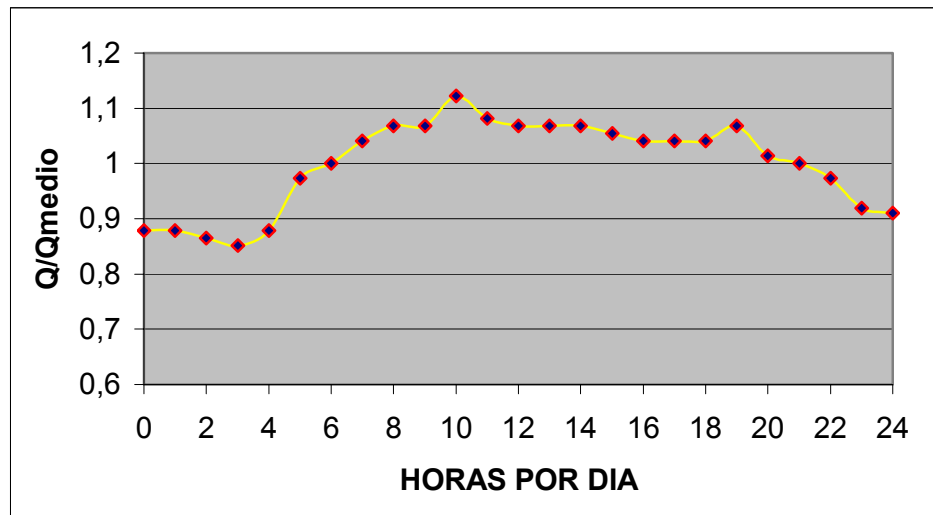
Cuadro 4.4 Velocidad del flujo en la descarga de la estación de bombeo

Con los registros de presiones y las curvas de las bombas correspondientes se puede obtener una curva de consumo promedio diario con respecto al caudal medio determinado.



Gráfica 4.4 Representación del Consumo Diario para los grupos principales

Se puede apreciar en el gráfico 4.6 que las horas del día de mayor demanda son las del mediodía y donde ocurre el mayor incremento es en el horario de la mañana. Esta curva varía a lo largo del año dependiendo la época laboral (vacaciones) o el grado de sequía en la zona, por ello el caudal máximo del día representa el caudal máximo diario asignado a esta población.



Gráfica 4.5 Representación del Consumo Diario funcionando el grupo de emergencia

En este gráfico 4.7 se aprecia el consumo cuando trabaja el grupo de emergencia y un grupo principal. Se puede observar que ocurre un crecimiento significativo en las horas de la mañana y luego disminuye en horas de la madrugada. Hay que reseñar que los caudales promedios para las dos formas de operación son distintos, por lo cual se aprecian las variaciones pertinentes.

4.7. Consumo eléctrico

Cada bomba funciona con un motor trifásico de inducción rotor jaula de ardilla. Estos motores normalmente poseen el bobinado del estator en triangulo, por lo que la tensión por cada fase es la misma que en la alimentación y de 220 voltios para los dos motores principales y de 230 voltios para el motor de emergencia.

El factor de potencia en los motores de este tipo varía de acuerdo a la carga aplicada en el eje. La tendencia de la curva del factor de potencia esta entre los valores de 0.8 y 0.9, dependiendo de la marca y modelo. Para nuestro caso tenemos 0.9 (dato de placa de factor de carga) y realizando cálculos con la información de corriente y tensión comparados con los datos de altura y caudal de cada bomba, tenemos un rango para los valores de $\cos \phi$ entre 0.85 y 0.92. Se destaca que estos cálculos incluyen las pérdidas eléctricas y mecánicas producidas en el motor y en el acople (20 % de la energía eléctrica absorbida por la red).

El consumo eléctrico esta regido por la demanda de agua de la zona de acuerdo a los caudales exigidos a cada bomba durante su funcionamiento. El consumo eléctrico mensual medido en Kwh. de los tres grupos de bombeo se calcula con la potencia eléctrica promedio que requiere cada uno (Cuadro 4.4).

GRUPO	POTENCIA		CONSUMO MENSUAL (Kwh.)	COSTO MENSUAL (Bs.)
	hp	Kw.		
1	57.5	43	23360	1312832
2	57.5	43		
3	57.5	43		
TOTAL	172.5	129		

*Costo mensual en base a tarifa referida a servicio general (56.20 Bs. /Kwh.)

Cuadro 4.4 Velocidad del flujo en la descarga de la estación de bombeo

4.8. Costos asociados al mantenimiento de los equipos electromecánicos

Los costos de mantenimiento se contabilizan anualmente. Por experiencia, los costos anuales de las cuadrillas de mantenimiento se calculan con base en un valor para la capacidad instalada de hp.

Lo que se quiere con este estudio es visualizar la gran cantidad de reparaciones a la que esta sometida constantemente la estación de bombeo LA YAGUARA II, la gran cantidad de inspecciones realizadas por el equipo de electromecánica INCAU y reseñar las últimas correcciones que se han hecho en este año.

En el apéndice 6 se presentan las actividades tanto de reparación como de mantenimiento que se han realizado en el presente año. Se puede mencionar que los últimos tres años los costos se han multiplicado exponencialmente por concepto de la devaluación de la moneda local y como todos ya sabemos, los repuestos de estos equipos son importados. Esto implica un incremento aproximado del tres a cuatro veces más de año en año para materiales y equipos.

4.9. Análisis general de la situación actual de la estación de bombeo

4.9.1. Edificación de la estación

La obra civil de la estación de bombeo se encuentra en mal estado (figura 4.8), y su estructura tiene décadas de fundada. Las paredes, el piso, las bases de los equipos moto-bombas, los equipos eléctricos, tableros, transformadores, cabina del operador, baño, puertas y ventanas se

encuentran bastante deteriorados y a su vez algunos ya cumplieron su tiempo de vida y siguen en uso.



Figura 4.4 Estación de Bombeo Yaguara II

Los grupos de bombeo (figura 4.9) se notan deteriorados y su funcionamiento no es el más adecuado porque siempre tienen problemas (apagado y encendido); esto debido a los problemas de regulación de agua y problemas de baja presión en la succión.

El proceso de oxidación es completamente notorio y avanzado en las bases metálicas, tuberías, accesorios y bombas (figura 4.10 y 4.11). Por otro lado, el efecto de filtración se nota en las paredes, techos y pisos de toda la estructura.



Figura 4.5 Todos los grupos que conforman la E/B Yaguara II



Figura 4.6 Estado de deterioro de las fundaciones de los grupos moto-bombas



Figura 4.11 Fugas que presentan las bombas de la estación

4.9.2. Grupos de bombeo instalados

De los tres grupos siempre funcionan dos en paralelo. Estos dos grupos se detienen con frecuencia a causa de la regulación del agua, baja succión, fallas y mantenimiento. Estas paradas son muy perjudiciales para el funcionamiento e influyen en el deterioro de los equipos. Cuando ocurre una falla o se realiza mantenimiento, el tiempo de parada de los equipos puede ser largo dependiendo de la dificultad para obtener los repuestos, este tiempo tiende a ser largo porque la mayoría de estos equipos son importados.

Se puede mencionar que el sistema se encuentra fuera de los parámetros de rendimiento, ahorro de energía y costo a los cuales esta sometida cualquier instalación de este tipo. Esto es debido a las variaciones en las necesidades de consumo a lo largo de los años y el proyecto inicial para cual el fue diseñada la estación es obsoleto. Un ejemplo de esto es que

las zonas altas tienen agua cuando las partes bajas están totalmente saturadas.

Los registros de la estación durante los últimos meses reflejan múltiples paradas de los equipos por mantenimiento y reparaciones de fallas eléctricas y de tubería, representando altos costos por concepto de mantenimiento.

Otra causa de constante falla es el diseño imprevisto de conexiones de tubería entre los grupos principales y el grupo de emergencia y los accesorios de este último están en deterioro total.

El punto de operación de las bombas varía en función de la hora, día de semana y del mes debido a la demanda que presenta la zona; es decir, la estación permanece dos días consecutivos parada por regulación, luego se pone en marcha y la demanda es excesivamente alta en las zonas bajas como consecuencia de ello las zonas altas del área todavía permanecen sin el vital líquido. Estos puntos de operación representan el consumo eléctrico que varía en función del caudal suministrado y del rendimiento de la bomba para dicho caudal.

A continuación se presentan los distintos rendimientos para los caudales mínimo, máximo y promedio de cada bomba (cuadro 4.5). Estos datos basados en las mediciones realizadas de caudal y de presiones de succión y descarga.

RENDIMIENTO (%)			
BOMBA	CAUDAL MÍNIMO	CAUDAL MÁXIMO	CAUDAL PROMEDIO
1 PARALELO CON 2	50	61	54
1 PARALELO CON 3	30	55	44
2 PARALELO CON 1	50	61	54
2 PARALELO CON 3	32	56	45
3 PARALELO CON 1	47	64	61
3 PARALELO CON 2	46	63	62

Cuadro 4.5 Rendimientos de las bombas

4.9.3 Comportamiento hidráulico

A lo largo de los años las tuberías han aumentando su rugosidad, debido a las causas antes mencionadas. A continuación se presentan los valores de rugosidad tanto inicial como actual:

- $\varepsilon_{inicial} = 0.046 \text{ mm}$
- $\varepsilon_{actual} = 1.421 \text{ mm}$

Para calcular el factor de fricción inicial y actual que presentan las tuberías en el sistema se recurre a la aplicación de la ecuación de Swami (Ecuación 3.20). La rugosidad la calculamos con base en el caudal medio y por ende en la velocidad media. A continuación se presentan los resultados arrojados por el cálculo:

- Condición inicial de las tuberías: $f_A = 0.0176$
- Condición actual de las tuberías: $f_A = 0.0426$

Se puede apreciar el aumento considerable de 2.5 veces del factor de fricción en las tuberías. En tuberías pequeñas este factor afecta el comportamiento hidráulico del sistema, pero considerando que el mismo es pequeño se puede decir que el sistema de tuberías puede seguir en operación.

Para el análisis de la red de distribución se utilizó el método lineal. Como resultados de este proceso de análisis se determinaron aspectos significativos que influyen en la distribución de agua en el sector. Entre estos aspectos significativos tenemos:

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 cota entre el punto más alto de la red y la estación de bombeo.

Las condiciones de operación del sistema actual de bombas presentan variaciones significativas en la presión estática dependiendo fundamentalmente del horario y la demanda de la zona.

Diferencia de cota entre el punto más alto y la estación de bombeo:

$$\Delta Z = 1125 \text{ m} - 1003 \text{ m} = 122 \text{ m}$$

La carga estática que vencen las bombas es igual a:

$$H_e = \Delta Z - \text{Presión Succión} + P_m$$

P_m : se refiere a la presión mínima por norma que debe satisfacer el sistema de abastecimiento de agua de una vivienda (20 m.c.a). Para nuestro

caso tomaremos 0 m.c.a porque los puntos más altos de la red durante la mayor parte del día no están siendo abastecidos.

$$H_e (P_s) = 122 - P_s$$

De este modo se puede apreciar que la carga estática dependerá de la presión de succión que varía a lo largo del día en función de la demanda de la zona.

Las regulaciones rutinarias del sector se realizan los días lunes, martes y viernes. Estas paradas prolongadas de las bombas disminuyen la columna de agua en la tubería. Los días miércoles y sábados, días que siguen a la regulación, el sistema de tubería se encuentra vacío por que el agua fue consumida, principalmente por las zonas de menor cota, hasta llega a 27 metros donde no existen mas tomas. Esto hace que la presión estática sea igual a 12 metros de columna de agua por la existencia de la válvula check que impide que fluya en dirección contraria, este valor va aumentando a medida que se llena nuevamente la red al poner en funcionamiento las bombas.

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, pero hay que reseñar que un gran número de viviendas poseen tanques (Terrazas y Colinas de Vista Alegre) y este proceso puede durar una buena parte de los días miércoles (día de mayor demanda). Basándose en este hecho y justificándolo por los resultados obtenidos en el análisis de red con el método lineal. Se determina que el fluido alcanza las zonas más altas del sistema de tuberías cuando el consumo ha disminuido en los tramos inferiores. Este análisis se realizó en una hoja dinámica mediante un software llamado MATHCAD, para calcular caudales de tránsito en los tramos principales de la red.

4.10. Cálculo de la población abastecida por la estación de bombeo

4.10.1. Población actual

La población que es beneficiada por la estación es una pequeña porción de la parroquia El Paraíso. Anteriormente el sector de La Yaguara pertenecía a la Parroquia La Vega y a partir del año 1998 pasó a formar parte de la Parroquia el Paraíso. A continuación en el cuadro 4.6 se presentan datos estadísticos de proyección de la población, suministrados por el Instituto Nacional de Estadística (INE):

AÑO	Municipio Libertador (habitantes)	Parroquia la Vega (habitantes)
1990	1970337	118554
1991	1972326	119985
1992	1973407	121371
1993	1973917	122726
1994	1974323	124080
1995	1974572	125431
1996	1974816	126791
1997	1975004	128149
1998	1975294	129519
1999	1975463	130886
2000	1975786	132273
2001	1976337	133677
2002	1977492	135129
2003	1978543	136579
2004	1979455	138018
2005	1980194	139427
2010	1983434	146362
2015	1985899	153038
2020	1987897	159474

Cuadro 4.6 Proyección de población por Municipio y Parroquia.

Período 1990 – 2020. (INE)

Una de las zonas abastecidas por la estación fue fundada en 1964 con el nombre de Barrio Sucre de La Yaguara. Con el transcurrir de los años se dividió en Barrio San Rafael y Los Piñas.

El Instituto Nacional de Estadísticas realiza censos de población dividiendo esta última en grupos de 250 viviendas; estos grupos son denominados segmentos.

El Barrio Sucre se encuentra ubicado en el segmento N° 1 de la parroquia La Vega; así mismo, la urbanización Colinas de Vista Alegre se encuentra en los segmentos 15, 16 y 17 de la Parroquia El Paraíso.

Los datos poblacionales de los barrios antes mencionados fueron obtenidos a través de FUNDACOMUN, organismo que suministra información de estadística poblacional de los barrios al INE. Se obtuvieron los resultados de los últimos tres censos realizados en el barrio Sucre. Es de acotar que los Barrios San Rafael y Los Piñas para FUNDACOMUN son englobados como Barrio Sucre. También se obtuvieron los resultados de los últimos tres censos realizados en la urbanización Colinas de Vista Alegre, la información fue suministrada por el Instituto Nacional de Estadísticas. Estos datos se presentan a continuación en el cuadro 4.7.

Barrio Sucre		Ubr. Colinas de Vista Alegre	
Año	Población	Año	Población
1964	177	1971	1967
1986	1050	1980	2859
1990	1378	1990	3095

Cuadro 4.7 Censos de la Urbanización Colinas de Vista Alegre

La proyección de la población beneficiada por la estación de bombeo se realiza por separado. Se proyectará la población del Barrio Sucre y luego la de la urbanización de Colinas de Vista Alegre, esto por dos motivos, el primero es que los años de los censos no son los mismos y segundo que no se trata del mismo tipo de población en cuanto el consumo de agua se refiere.

4.10.1.1. Proyección de la Población del Barrio Sucre y de la Urbanización Colinas de Vista Alegre por el Método Aritmético (Método Lineal)

Todos los cálculos de los métodos de proyecciones de población se realizaron utilizando el software Excel de Microsoft.

Utilizando la ecuación 3.2, se tiene para el Barrio Sucre:

P_1 = población en el año 1986 $\rightarrow P_1 = 1050$ habitantes

P_2 = población en el año 1990 $\rightarrow P_2 = 1378$ habitantes

t_p = periodo para el cual se desea hacer el estimado, en años.

K_0 = Promedio anual de crecimiento de población.

Entonces se tiene:

$$K_0 = \frac{P_2 - P_1}{N_p} \Rightarrow K_0 = \frac{1378 - 1050}{1990 - 1986} \Rightarrow K_0 = 82.00$$

Aplicando la ecuación 3.1 se tiene:

$$P_{2003} = P_2 + K_0 * t_{2003} \Rightarrow P_{2003} = 1378 + 82 * (2003 - 1990) \Rightarrow P_{2003} = 2444 \text{ Habitantes}$$

Así mismo, se calcula para la urbanización Colinas de Vista Alegre:

$$P_1 = \text{población en el año 1980} \rightarrow P_1 = 2859 \text{ habitantes}$$

$$P_2 = \text{población en el año 1990} \rightarrow P_2 = 3095 \text{ habitantes}$$

$$K_0 = \frac{3095 - 2859}{1990 - 1980} \Rightarrow K_0 = 23.60$$

$$P_{2003} = 3095 + 23.60 * (2003 - 1990) \Rightarrow P_{2003} = 3402 \text{ Habitantes}$$

Luego de utilizar este método se obtienen los siguientes resultados (cuadro 4.8):

AÑO	Proyección de la población	
	Barrio Sucre	Urb. Colinas de Vista Alegre
2003	2444	3402
2004	2526	3425
2005	2608	3449
2006	2690	3473
2007	2772	3496
2008	2854	3520
2009	2936	3543
2010	3018	3567
2015	3428	3685
2020	3838	3803
2025	4248	3921

Cuadro 4.8 Proyección de la población de la Urb. C de Vista Alegre y Barrio Sucre por el Método Lineal

4.10.1.2. Proyección de la población del Barrio Sucre y de la Urbanización Colinas de Vista Alegre por el método de las proporciones geométricas (Método Geométrico)

Aplicando este método para la población del Barrio Sucre y utilizando la ecuación 3.4 se tiene:

$$P_1 = \text{población en el año 1986} \rightarrow P_1 = 1050 \text{ habitantes}$$

$$P_2 = \text{población en el año 1990} \rightarrow P_2 = 1378 \text{ habitantes}$$

t_p = periodo para el cual se desea hacer el estimado, en años.

N_p = intervalo transcurrido entre los dos últimos censos, en años.

Entonces:

$$N_p = 1990 - 1986 = 4$$

$$(1 + r) = \sqrt[4]{\frac{1378}{1050}} \Rightarrow (1 + r) = 1.070$$

Aplicando la ecuación 3.3 se tiene:

$$t_p = 2003 - 1990 = 13$$

$$P_{2003} = 1378 * (1.070)^{13} \Rightarrow P_{2003} = 3334 \text{ Habitantes}$$

Repitiendo el procedimiento para la población de la Urb. Colinas de Vista Alegre queda:

$$P_1 = \text{población en el año 1980} \rightarrow P_1 = 2859 \text{ habitantes}$$

$$P_2 = \text{población en el año 1990} \rightarrow P_2 = 3095 \text{ habitantes}$$

$$N_p = 1990 - 1980 = 10$$

$$(1 + r) = \sqrt[4]{\frac{3095}{2859}} \Rightarrow (1 + r) = 1.0079$$

$$t_p = 2003 - 1990 = 13$$

$$P_{2003} = 3095 * (1.0079)^{13} \Rightarrow P_{2003} = 3431 \text{ Habitantes}$$

La utilización de este método arroja los siguientes resultados (cuadro 4.9):

AÑO	Proyección de la población	
	Barrio Sucre	Urb. Colinas de Vista Alegre
2003	3334	3431
2004	3568	3458
2005	3819	3486
2006	4088	3514
2007	4375	3542
2008	4683	3570
2009	5012	3598
2010	5365	3627
2015	7536	3774
2020	10585	3926
2025	14869	4085

Cuadro 4.9 Proyección de la población de la Urb. C de Vista Alegre y Barrio Sucre por el Método Geométrico

4.10.1.3. Proyección de la Población del Barrio Sucre por el método de extrapolación mediante parábolas (Método Parabólico)

Al utilizar este método se asume que el crecimiento de la población se comporta de acuerdo a una ecuación de segundo grado. Para el caso del Barrio Sucre el crecimiento de la población siempre irá en aumento, lo cual no se aplica a la Urb. Colinas de Vista Alegre. En este último, siendo zonas ya establecidas y desarrolladas el crecimiento no es tan pronunciado con el transcurrir de los años.

Para el Barrio Sucre, resolviendo el sistema de ecuaciones se tiene:

$$a = 177$$

$$b = 3.874$$

$$c = 1.628$$

y aplicando la ecuación 3.6 se obtienen los siguientes resultados (cuadro 4.10):

	2003	2004	2005	2006
Barrio Sucre	2804	2936	3072	3211

2007	2008	2009	2010	2015	2020	2025
3353	3499	3647	3799	4608	5498	6470

Cuadro 4.10 Proyección de la población del Barrio Sucre por el Método Parabólico

4.10.1.4. Proyección de la población del Barrio Sucre por el método de la extrapolación parabólica de datos transformados

Al igual que en el método parabólico, este método sólo se aplica a poblaciones donde el crecimiento, con el pasar de los años, va en considerable aumento como es el caso del Barrio Sucre.

Aplicando este método y resolviendo el sistema de ecuaciones se tiene:

$$a = 2.248$$

$$b = 0.048$$

$$c = -2.165 * 10^{-4}$$

utilizando la ecuación 3.8 se obtienen los siguientes resultados (cuadro 4.11):

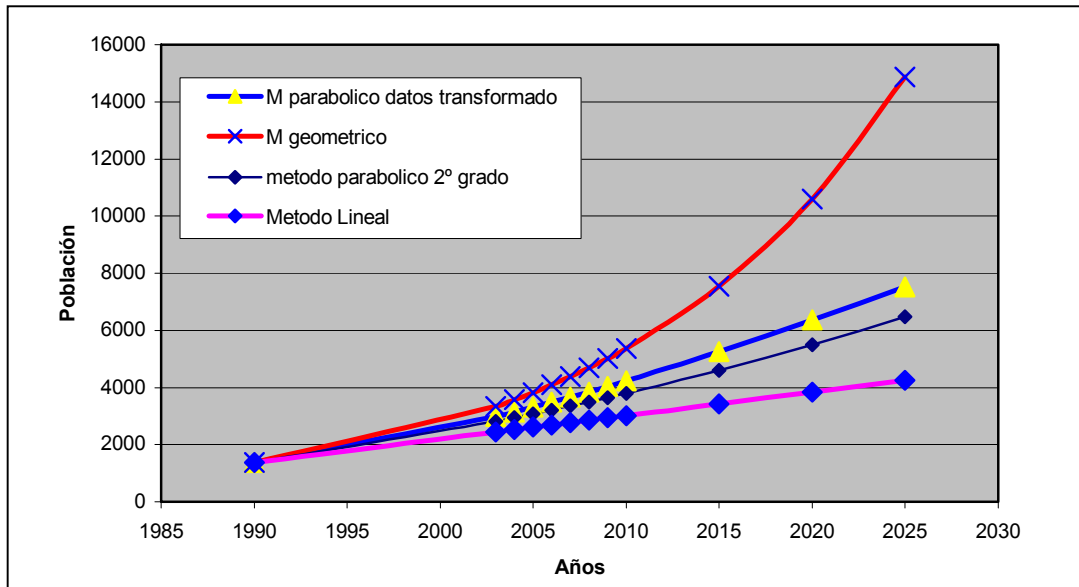
	2003	2004	2005	2006
Barrio Sucre	2986	3147	3313	3485

2007	2008	2009	2010	2015	2020	2025
3662	3844	4031	4223	5249	6365	7527

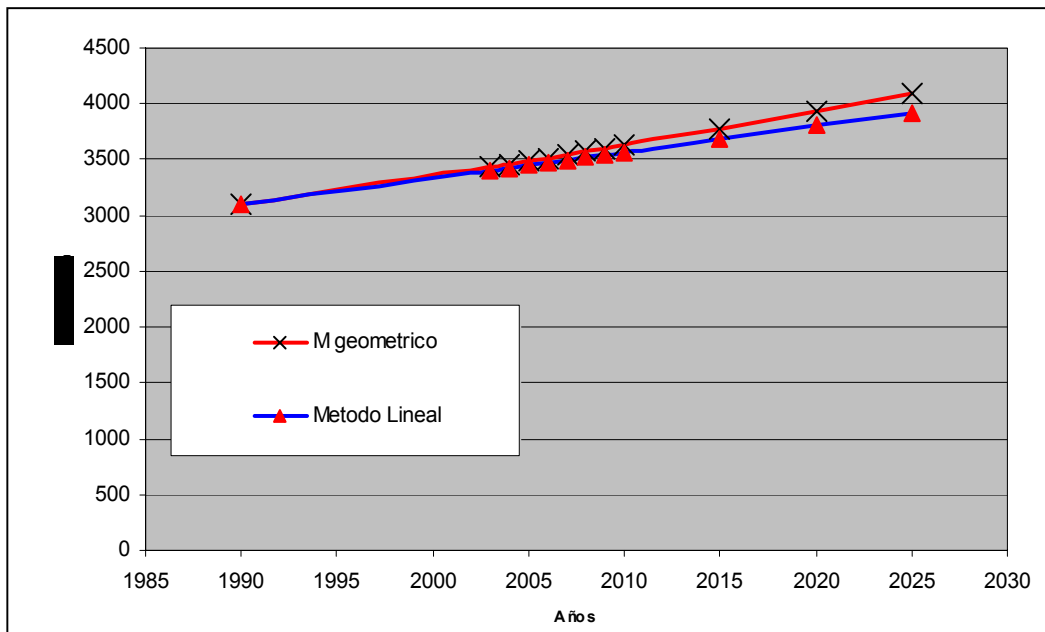
Cuadro 4.11 Proyección de la población del Barrio Sucre por el Método de Extrapolación Parabólica de Datos transformados

4.10.1.5. Comparación de los métodos utilizados para la proyección de la población

En las gráficas 4.12 y 4.13 se muestran los resultados de las proyecciones realizadas por los diferentes métodos, para las poblaciones del Barrio Sucre y de la Urb. Colinas de Vista Alegre, respectivamente.



Gráfica 4.6 Proyecciones del Barrio Sucre



Gráfica 4.7 Proyecciones de la Urb. Colinas de Vista Alegre

CAPÍTULO V

CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE LA NUEVA ESTACION

5.1 Zona abastecida

Tenemos la figura 4.3 con los tramos principales que surte la estación, los cuales abarcan: Las colinas de Vista Alegre, Terrazas de Vista Alegre, sectores totalmente establecidos y con medidores de agua. Por otro lado tenemos la zona popular o Barrio Sucre, el cual lo conforman varios sectores: San Rafael, Los Piñas, La Montañita. Estos sectores no tienen medidores de agua y la distribución de las tomas no es muy bien calificada, esto debido al gran número de tomas ilegales.

Como existe el problema de la baja presión de succión para poner en marcha a los equipos, se tiene como solución una conexión de tubería desde la estación hasta el alimentador de la estación de Vista Alegre, el cual tiene una presión promedio de 60 m.c.a. lo cual solucionaría el problema de baja succión.

El proceso de conexión de la tubería se va a realizar en varias etapas conjuntamente con la rehabilitación de la estación nueva. La primera etapa es la instalación de un tramo de tubería de 8 pulgadas desde la estación YAGUARA II hasta el lugar de conexión con el alimentador de aproximadamente 40m de longitud. La segunda etapa se realizará después de la restauración completa de la estación y los equipos estén debidamente instalados. Esta consiste en la conexión de la tubería del alimentador y la nueva tubería de la estación. La conexión se realizara por soldadura o por el procedimiento adecuado para la unión. Para realizar este trabajo es

necesario suspender el servicio, tomando las previsiones para que este corte dure lo mínimo posible.

5.2 Determinación de la población a ser abastecida

La zona beneficiada por la estación de bombeo con el transcurrir de los años va a cambiar; es decir, tendrá un crecimiento constante, más pronunciado en el caso del Barrio Sucre que en la urbanización Colinas de Vista Alegre.

Los cálculos de las proyecciones de población futura de la zona se basan en los métodos seleccionados en el capítulo anterior, en el cual se seleccionó el método parabólico de datos transformados para la proyección de la población del Barrio Sucre y por otro lado para la proyección de la población de la Urbanización Colinas de Vista Alegre se seleccionó el método aritmético (método lineal). Estas proyecciones se consideran válidas para determinar la población futura que se beneficiará del suministro de agua potable a través de la nueva estación de bombeo.

En el cuadro 5.1 se presentan las proyecciones de las poblaciones de las localidades de Barrio Sucre y de la Urbanización Colinas de Vista Alegre.

AÑO	POBLACIÓN Barrio Sucre	POBLACIÓN C. de V. Alegre
2003	2986	3402
2004	3147	3425
2005	3313	3449
2006	3485	3473
2007	3662	3496
2008	3844	3520
2009	4031	3543
2010	4223	3567
2011	4419	3591
2012	4621	3614
2013	4826	3638
2014	5036	3661
2015	5249	3685
2016	5466	3709
2017	5687	3732
2018	5910	3756
2019	6136	3779
2020	6365	3803
2021	6595	3827
2022	6827	3850
2023	7060	3874
2024	7293	3897
2025	7525	3921

Cuadro 5.1 Proyección de la población de Barrio Sucre y de la Urb. Colinas de Vista Alegre

El total de personas que será abastecida por la estación de bombeo para el final del periodo (año 2025) será de 11446 personas aproximadamente. Se toma este número de habitantes por ser el más desfavorable para establecer los parámetros del rediseño de la nueva estación.

5.3 Cálculo del caudal promedio

La estimación del caudal la vamos a realizar de la siguiente manera:

1. Caudal medio para una zona totalmente establecida y con medidores de consumo de agua (Colinas de Vista Alegre).
2. Caudal medio para una zona de barrios, sin medidores (Barrio Sucre, San Rafael, La montaña, Los Piñas)

Para calcular la dotación necesaria en cada comunidad se recurrió a la Gaceta oficial N° 4044. En la misma se señala que en localidades con servicio con medidores y que la población sea menor de 20.000 habitantes el consumo por persona es de 200 (litros/per./día); por otro lado, para servicio sin medidores el consumo es de 400 (litros/per./día).

Para el primer caso:

Para una zona totalmente establecida con una proyección de habitantes relativamente baja, tenemos que su máxima población es de 3921 habitantes. Estas zonas por gaceta oficial N° 4044 tienen una dotación asignada de 200 litros por persona al día.

Aplicando la fórmula tenemos:

$$Q_{\text{medio}} = \text{Población} * \text{Dotación} + Q_{\text{asociado}}$$

Donde: Q_{asociado} = caudal asociado a otros factores, como: caudal comercial, por pérdidas.

En el cuadro 5.2 se presentan las proyecciones de población y caudal medio requerido durante el periodo 2003 – 2025.

AÑOS	POBLACIÓN (HABITANTES)	DOTACIÓN (Litros/per/día)	CAUDAL MEDIO	
			(Litros/seg)	(m ³ /h)
2003	3402	200	8.525	30.689
2004	3425	200	8.582	30.896
2005	3449	200	8.642	31.113
2006	3473	200	8.703	31.329
2007	3496	200	8.760	31.537
2008	3520	200	8.820	31.753
2009	3543	200	8.878	31.961
2010	3567	200	8.938	32.177
2011	3591	200	8.998	32.394
2012	3614	200	9.056	32.601
2013	3638	200	9.116	32.818
2014	3661	200	9.174	33.025
2015	3685	200	9.234	33.242
2016	3709	200	9.294	33.458
2017	3732	200	9.352	33.665
2018	3756	200	9.412	33.882
2019	3779	200	9.469	34.089
2020	3803	200	9.529	34.306
2021	3827	200	9.590	34.522
2022	3850	200	9.647	34.730
2023	3874	200	9.707	34.946
2024	3897	200	9.765	35.154
2025	3921	200	9.825	35.370

Cuadro 5.2 Proyección de la población de la Urb. C. de V. Alegre, dotación y caudal medio

Para el segundo caso:

Para la zona popular de barriadas tenemos una proyección de población para el año 2025 de 7525 habitantes y según gaceta oficial N° 4044 se tiene una dotación de 400 litros por persona por día (cuadro 5.3).

Aplicando la fórmula tenemos.

$$Q_{medio} = Población * Dotación + Q_{asociado}$$

AÑO	POBLACIÓN (HABITANTES)	DOTACIÓN (litros/per/día)	CAUDAL MEDIO	
			(litros/seg)	(m ³ /hr)
2003	2986	400	14.964	53.872
2004	3147	400	15.771	56.777
2005	3313	400	16.603	59.772
2006	3485	400	17.465	62.875
2007	3662	400	18.352	66.068
2008	3844	400	19.264	69.352
2009	4031	400	20.201	72.725
2010	4223	400	21.164	76.189
2011	4419	400	22.146	79.726
2012	4621	400	23.158	83.370
2013	4826	400	24.186	87.068
2014	5036	400	25.238	90.857
2015	5249	400	26.306	94.700
2016	5466	400	27.393	98.615
2017	5687	400	28.501	102.602
2018	5910	400	29.618	106.625
2019	6136	400	30.751	110.703
2020	6365	400	31.898	114.834
2021	6595	400	33.051	118.984
2022	6827	400	34.214	123.170
2023	7060	400	35.381	127.373
2024	7293	400	36.549	131.577
2025	7525	400	37.712	135.762

Cuadro 5.3 Proyección de la población del barrio Sucre, dotación y caudal medio

5.4 Periodo de diseño

El sistema de bombeo de agua se proyectará para atender las necesidades de la zona a ser abastecida durante un periodo de 20 años aproximadamente, tiempo durante el cual el sistema será altamente eficiente.

A continuación tenemos los componentes del sistema de abastecimiento de agua donde se indica el periodo de diseño.

Estación de bombeo: (edificios, equipos, bombas, accesorios, etc.)

- Instalaciones y edificios: las instalaciones estarán diseñadas o reacondicionadas tomando en cuenta las posibilidades de ampliaciones a futuro y con periodo de diseño de 20 a 25 años.
- Bombas y motores: Estos equipos con la durabilidad relativamente corta por los problemas de mantenimiento o mala operatividad de los mismos, por experiencia de la empresa de electromecánica, tienen un periodo de diseño entre 15 y 20 años.
- Líneas de aducción: Para tuberías de acero es aconsejable un periodo de diseño comprendido entre 20 y 30 años.
- Redes de distribución: Las redes de distribución deben diseñarse para el completo desarrollo del área que se surte del vital líquido. Se estima un periodo de diseño entre 20 y 25 años.
- Equipos eléctricos y accesorios del Sistema: Se le asignan un periodo de diseño de acuerdo a su función y ubicación respecto a los componentes del sistema que los contiene.

5.5 Ubicación del nuevo sistema

La nueva estación de bombeo se instalará en el mismo terreno donde se encuentra actualmente, pero con las modificaciones expuestas en el diagrama. Se eligió esta nueva ubicación de los equipos con el fin de mejorar la distribución en las estructuras y por el aprovechamiento del terreno disponible, prestando atención a minimizar la interrupción del servicio.

5.6 Rango de velocidades recomendadas para el fluido

Las velocidades en la succión y en la descarga de las estaciones de bombeo deben estar entre unos valores recomendados para optimizar un buen rendimiento en su funcionamiento. Estos intervalos son producto de la experiencia en este tipo de instalaciones. Sin embargo, estas velocidades pueden salirse de estos rangos dependiendo de las condiciones especiales de trabajo o caso particular de funcionamiento.

En la succión las velocidades generalmente están comprendidas entre 1 m/s y 2.5 m/s, y en algunos casos deben ser mayores a 0.5 m/s, siendo este valor la velocidad mínima recomendada para que no exista deposición en las tuberías. El valor medio representativo más recomendado es 1.5 m/s.

En la descarga, las velocidades son más elevadas y pueden alcanzar el doble de los valores en la succión, 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 las condiciones dadas. Para las líneas de descarga cortas se admiten velocidades más elevadas que las mencionadas.

CAPÍTULO VI

REDISEÑO DE LA ESTACIÓN

6.1 Objetivo general

Tomando en consideración la experiencia en otros sistemas de acueductos, producto de muchos años de estudio y que se reflejan en la normativa existente a lo que concierne a este tipo de proyectos. Estas normas donde se especifican las condiciones del abastecimiento referentes a los caudales máximos diarios, horarios de mayor demanda, tipo de zona de abastecimiento y cantidad de habitantes, factores importantes que influyen en el propósito fundamental de este trabajo que es la de satisfacer las demandas de agua que se presentan en la zona a lo largo del periodo de diseño.

A continuación presentamos los parámetros importantes en la determinación y asignación de esta dotación de agua al sector de estudio.

6.2. Cálculo del caudal de diseño

El nuevo sistema de bombeo al igual que el actual, será directo contra la red de distribución debido a que la infraestructura esta diseñada de dicha forma. El caudal medio a partir se hará el diseño de la Estación de Bombeo, es de $47.5 \text{ l/s} \approx 171 \text{ m}^3 / \text{hr.}$ (para el último año del período de diseño)

6.2.1. Consumo máximo diario

Para calcular el consumo máximo diario [2025] se utilizo la ecuación 3.67, con un valor de $K_1 = 1.15$ Entonces, se tiene:

$$Q_{\text{max imo-diaro}} = 1.15 * 47.5 \text{ l/s}$$

$$Q_{\text{max imo-diaro}} = 54.7 \text{ l/s} \approx 197 \text{ m}^3/\text{hr}$$

6.2.2. Consumo máximo horario

Como lo especifican las normas del INOS (revisar sección 3.3.3.2.) empleamos la ecuación 3.68 para obtener el valor de K_2 porque la población se encuentra en un rango entre 1.000 y 100.000 habitantes.

$$K_2 = [275 - (0.75 * 14.82)] / 100$$

$$K_2 = 2.64$$

El consumo máximo horario es:

$$Q_{\text{max imo-diaro}} = 2.64 * 47.5 \text{ l/s}$$

$$Q_{\text{max imo-diaro}} = 124.08 \text{ l/s} \approx 446.7 \text{ m}^3/\text{hr}$$

6.2.3. Consumo en caso de incendio

De acuerdo a la norma INOS (revisar sección 3.3.3.3.) Por tratarse de una zona residencial y comercialmente escasa, el caudal para incendio es de

10 l/s. Se determina un valor de $K_3 = 180\%$ del caudal medio, y sumándose el gasto requerido por la norma nos queda.

$$Q_1 = 1,8 * 47.5 \text{ l/s} + 10 \text{ l/s}$$

$$Q_1 = 95.5 \text{ l/s} \approx 343.8 \text{ m}^3/\text{hr} \text{ [para el 2025]}$$

6.2.4. Caudal de diseño

Tomando en consideración las previsiones pertinentes para el diseño, el caudal de diseño a ser utilizado es el máximo caudal de consumo diario (54 l/s \approx 197 m³/hr) dicho caudal estimado para el año más desfavorable de diseño (de mayor demanda) y con propiedad de atender todos los requerimientos para un buen funcionamiento y suministro del vital líquido.

6.3. Determinación de las unidades y etapas de los equipos de bombeo

6.3.1. Número de unidades de bombeo

Para determinar el número de unidades de bombeo se utiliza un criterio práctico y tomando en cuentas variaciones en la demanda, el cambio de la curva del sistema (punto de operación, extremos de funcionamiento, etc.)

Un criterio para determinar el número de unidades de un sistema 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 los equipos de bombeo. Con esta descripción se

selecciona y justifica el número de unidades de cuerdo a las características disponibles. Para nuestro caso, la presión mínima en la succión es suficientemente alta (solución del nuevo alimentador) esta situación es muy favorable porque no se produce cavitación en la gran variedad bombas centrifugas comerciales

A continuaciones algunas consideraciones a tomarse en cuenta para el criterio de selección del número de unidades:

- Se establece la utilización de equipos a 1800 RPM, de mayor tamaño que los actuales y con la salvedad de reducir el números de unidades.
- Se establece un caudal mínimo por el orden del 35 y 50 por ciento del caudal medio (año más crítico) se estima la operación de una sola bomba. Este caudal mínimo se define para el consumo en as horas de menor demanda (madrugada), es igual a:

$$Q_{\min imo} = 0.35 * 47.5 \text{ l/s}$$

$$Q_{\min imo} = 16.63 \text{ l/s} \approx 60 \text{ m}^3/\text{hr}$$

- Para el caudal medio (47.5 l/s \approx 171 m³/hr) se especifica la operación de dos bombas capaz de suplir esta exigencia del sistema para los últimos años de diseño.
- Para el caudal máximo diario (54.7 l/s \approx 197 m³/hr) se especifica la operación de dos bombas [2025]
- Para el caso de ocurrencia de incendio (95.5 l/s) se permite la utilización de un grupo motobomba de emergencia (igual que el

principal) trabajando en paralelo. Hay que mencionar que este grupo corresponde al equipo alterno que debe incluirse para los casos de fallas del grupo principal y en caso de mantenimiento del mismo.

Se tiene que mencionar que el caudal máximo diario corresponde al día de máximo consumo de año de mayor demanda de la zona (máxima población), y la constante de diseño tomada para calcular este valor, se ha relacionado con el caudal medio de acuerdo a las estadísticas locales de los últimos meses.

Por otro lado, el funcionamiento de los dos grupos, principal y de emergencia, va a ocurrir en casos especiales. Casos críticos como ocurrencia de incendio, o medidas de regulación si persisten los grandes problemas de sequía.

Por tales motivos, la especificación de dos unidades de bombeo, principal y de respaldo o emergencia, con características idénticas, hace que se cumplan todos los requerimientos, condiciones de seguridad y flexibilidad para un buen abastecimiento de agua a la localidad en cuestión. Cuando la demanda lo requiera se establece la instalación de un tercer grupo donde todas las previsiones se han tomado en cuenta.

Con lo antes expuesto, se tiene una capacidad instalada, con respecto al caudal de diseño, igual a:

Capacidad Instalada = 1 bomba (caudal de diseño) + 1 bomba (emergencia)

$$\text{Capacidad Instalada} = 100\% + 100\% = \mathbf{200\%}$$

6.3.2. Determinación del número de etapas

Para obtener el número de etapas de la bomba se emplearon los datos de presión y caudal promedio. Un caudal de 197 m³ por hora y con la data de presiones se establece una altura de 122 m.

- Con estos datos evaluamos en el ábaco del apéndice 7 se obtiene un n_q para el máximo rendimiento correspondiente al caudal que manejará cada bomba, es decir:

$$Q = 57 \text{ l/s} \gggg n_q = 0.732$$

De la ecuación 3.70 se despeja el término de la velocidad angular y se calcula la velocidad de giro de la bomba.

$$Q := 0.057 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad H := 125\text{m} \quad g := 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad Nq := 0.732$$

$$\omega := Nq \cdot \frac{(g \cdot H)^{0.75}}{\sqrt{Q}} \quad \omega = 635.343 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

La velocidad de giro nos da: 3992 RPM.

Tomando en cuenta que la velocidad es alta y la condición de instalar maquinas cercanas a 1800 revoluciones por minutos, se calcula el número específico de vueltas para 1800 RPM, aplicando la formula 3.72:

$$Q = 0.057 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad H := 122\text{m} \quad g := 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad n := 1800 \text{ RPM}$$

$$\omega := \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60\text{s}} \text{rad} \quad \omega = 188.496 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$Nq := \omega \cdot \frac{\sqrt{Q}}{(g \cdot H)^{0.75}} \quad Nq = 0.221$$

Si nos vamos al ábaco (WORTHINGTON) apreciamos un rendimiento por debajo del 60 % y en los extremos mínimos del mismo. Para conseguir un mejor rendimiento se toma otro valor de n_q aumentando así el número de etapas:

$$Nq := 0.6$$

$$He := \left(\omega \cdot \frac{\sqrt{Q}}{g^{0.75} \cdot Nq} \right)^{\frac{4}{3}} \quad He = 32.244 \text{ m}$$

$$Z := \frac{H}{He} \quad Z = 3.784$$

Se justifica la condición de cuatros etapas para las bombas a utilizas con un rendimiento cercano al 80 %.

6.4. Diseño del sistema de succión y descarga de la estación

A continuación se presenta la distribución de la nueva estación de bombeo, se puede observar la distribución de las tuberías, ver plano anexo donde se presenta el rediseño de toda la estación.

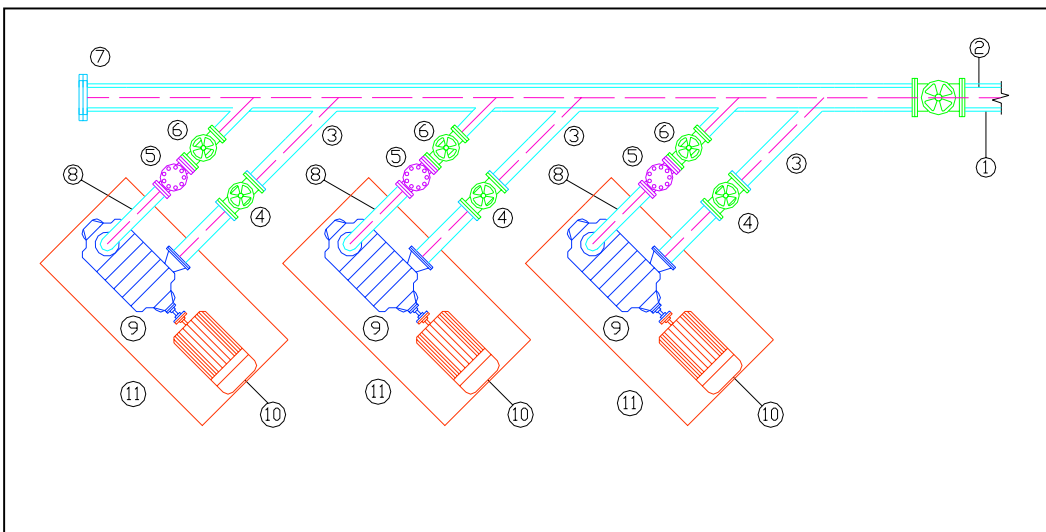


Figura 6.1 Distribución de la estación de bombeo

1	Tubería de succión (múltiple de succión)
2	Tubería de descarga (múltiple de descarga)
3	Tubería de succión de cada bomba
4	Válvula de paso succión (válvula compuerta)
5	Válvula de retención (válvula check)
6	Válvula de paso descarga (válvula de compuerta)
7	Brida ciega
8	Tubería de descarga de cada bomba
9	Bomba
10	Motor eléctrico (motor trifásico de inducción)
11	Fundación

Cuadro 6.1 Referencias de la distribución de la estación de bombeo

6.4.1. Diámetros en los sistemas de succión y descarga

De acuerdo con la ecuación (3.10) se tiene:

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

donde:

V = velocidad media del flujo

Q = caudal que pasa por el conducto

A = área de la sección transversal

para un conducto circular el $A = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2$

Para calcular el diámetro de las tuberías en la succión y en la descarga se utiliza el caudal de diseño (54.76 l/s) y los diámetros internos de las mismas, tomando en cuenta que el material de las tuberías es de acero al carbono, a continuación se presentan en el Cuadro 6.2 con los tentativos diámetros de tuberías con su respectivo diámetro interno, área transversal y la velocidad media.

Diámetro Nominal (pulgadas)	Diámetro Interno (Pulgadas)	Área Sección Transversal (cm ²)	Velocidad Media (m/s)
3	3.068	47.695	12.110
3 1/2	3.548	63.786	9.055
4	4.026	82.131	7.033
5	5.047	129.070	4.475
6	6.065	186.389	3.099
8	7.981	322.755	1.790
10	10.02	508.738	1.135

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

Para la selección del diámetro de los tramos individuales de succión y descarga de cada bomba se toma la mitad del caudal de diseño debido a que se instalarán dos unidades, este caudal equivale a 27.32 l/s. A continuación se presentan en el Cuadro 6.3 los diámetros tentativos para los tramos individuales con la respectiva velocidad media.

Diámetro Nominal (pulgadas)	Diámetro Interno (pulgadas)	Área Sección Transversal (cm ²)	Velocidad Media (m/s)
3	3.068	47.695	6.126
3 1/2	3.548	63.786	4.581
4	4.026	82.131	3.558
5	5.047	129.070	2.264
6	6.065	186.389	1.568
8	7.981	322.755	0.905
10	10.02	508.738	0.574

Cuadro 6.3 Velocidad media para diámetros tentativo en los tramos individuales de succión y descarga

6.4.1.1. Diámetro en el múltiple de succión

Al seleccionar el diámetro para el múltiple de succión se tiene que considerar que la velocidad debe variar en un rango recomendado de 1 m/s y 2.5 m/s. Tomando en cuenta esta consideración de diseño y con los resultados obtenidos representados en el cuadro 6.1 se selecciona una tubería de 8 pulgadas de diámetro en donde la velocidad media es de 1.79 m/s debido a que esta velocidad se encuentra en el rango recomendado.

6.4.1.2. Diámetro del múltiple de descarga

Para realizar la selección del diámetro de la tubería de descarga se tiene que considerar que la velocidad debe estar dentro del rango recomendado de 2 y 4 m/s. Se determina entonces el diámetro mas adecuado utilizando el cuadro 6.1, este diámetro es de 6 pulgadas debido a que la velocidad media es de 3.099 m/s y se encuentra dentro del rango antes mencionado.

6.4.1.3. Diámetro de los tramos individuales en la succión de cada bomba

Se determina el diámetro de la tubería en la succión de cada bomba de acuerdo con los resultados presentados en el cuadro 6.2, seleccionándose así un diámetro de 6 pulgadas con una velocidad de 2.264 m/s la cual se encuentra dentro del rango recomendado para esta tubería.

6.4.1.4. Diámetro de los tramos individuales en la descarga de cada bomba

De acuerdo con el cuadro 6.2 se selecciona una tubería de 4 pulgadas cuya velocidad media para este caso es de 3.558 m/s cumpliéndose que la misma se encuentra dentro del rango recomendado para este tipo de tuberías.

6.4.2. Resultados de la selección de diámetros para las tuberías de succión y descarga

A continuación se presentan en el cuadro 6.4 los resultados arrojados en la selección de los diámetros de las tuberías para cada sección de la succión y descarga en la estación de bombeo.

Tramo de Tubería	Diámetro Nominal (pulg.)	Diámetro Interno (pulg.)	Caudal (L/s)	Velocidad Media (m/s)	Nº de Reynolds
Múltiple de Succión	8	7.981	57.76	1.790	360260
Múltiple de Descarga	6	6.065	57.76	3.099	474070
Tramo Indv. Succión	6	6.065	29.22	3.641	288199
Tramo Indv. descarga	4	4.026	29.22	3.558	361287

Cuadro 6.4 Resultados de la selección de las tuberías

El cálculo del número de Reynolds se realiza tomando la viscosidad cinemática del agua para una temperatura de 20° centígrados, el valor de la misma corresponde a $\nu = 1.007 * 10^{-6} (m^2/s)$, verificándose así que el flujo es totalmente turbulento ($R_e > 2000$).

6.5. Determinación de la característica del sistema

6.5.1. Curva Característica del Sistema

La Característica del sistema depende fundamentalmente de la configuración de la red de distribución, y otros aspectos hidromecánicos que en mayor o menor grado, intervendrán en la caracterización hidráulica del sistema.

Se debe mencionar que las tuberías que conforman actualmente la red de distribución fueron diseñadas para un número de habitantes inferior al año más crítico de diseño (25 años), el valor actual de rugosidad de éstas corresponde al de tuberías con 15 o 20 años de servicio aproximadamente.

Tomando en cuenta el conjunto de consideraciones teóricas, criterios y procedimientos para el diseño, y recomendaciones prácticas que forman la tecnología moderna de bomba. Se decidió realizar la estimación de la característica del sistema.

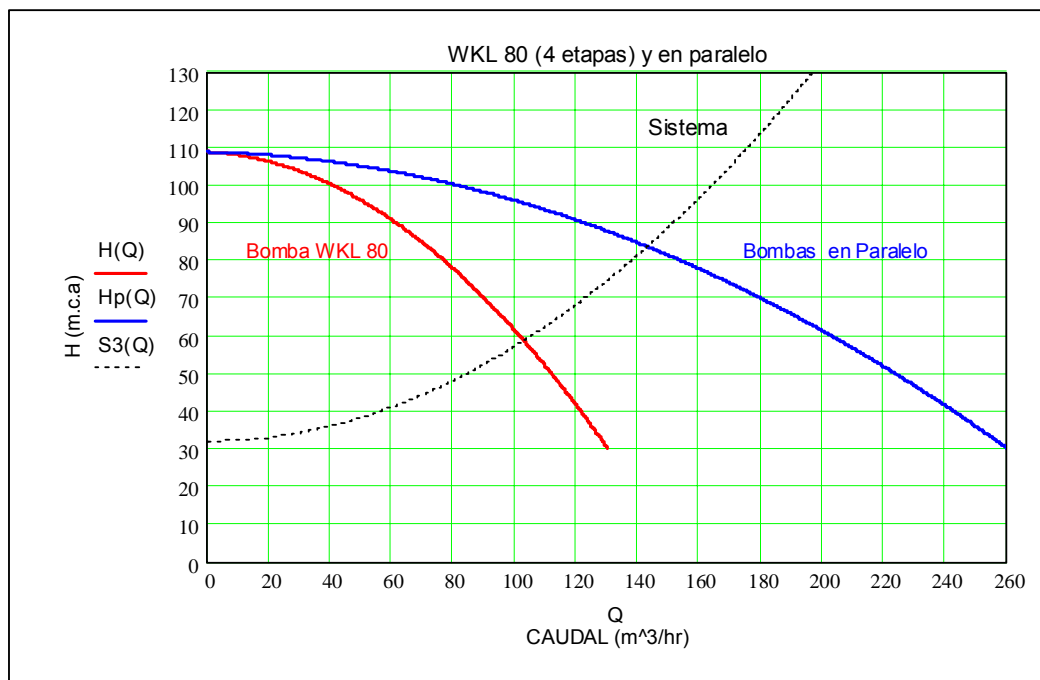
6.5.2. Determinación de las bombas

El procedimiento para la selección de los equipos de bombeo se realizó de la siguiente manera:

- Establecer los parámetros de trabajo
(Sistema, caudal máximo diario, altura de bombeo).
- Revisión de los catálogos de fabricantes distribuidores de equipos electro-mecánicos de HIDROCAPITAL.
(Ábacos de trabajo para bombas centrifugas multietapas).
- Luego de la selección de los equipos más apropiados, se procedió a revisar las eficiencias, rendimiento, etapas, entre otras características, para un mejor funcionamiento.

- Justificación del número de etapas
- Por último la selección de las bombas marca KSB WKL 80 de 4 etapas $\varnothing 220 \times 17$ mm a 1750 rpm.
- Cabe mencionar que una sola bomba no cumple con la demanda para todo el período de diseño, por lo que consideramos un funcionamiento de dos equipos en paralelo cuando los requerimientos los establezcan.

A continuación se presenta el gráfico de funcionamiento durante el período de diseño.



Gráfica 6.1 Funcionamiento del sistema durante el periodo de diseño

6.5.3. Pérdidas en la Estación de Bombeo

De acuerdo con la figura 6.2 se calcularon las pérdidas en la estación de bombeo para la fecha de puesta en marcha de los nuevos equipos y para el final del periodo de diseño.

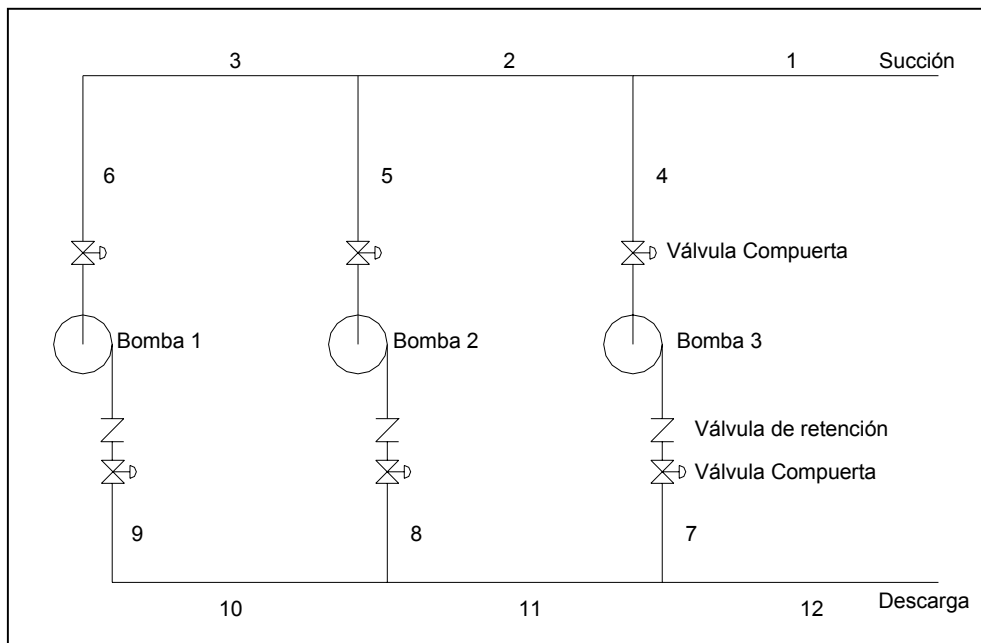


Figura 6.2 Detalles de la distribución de la E/ B

Tramo	Diámetro (pulgadas)	Longitud (m)
1	8	2.5
2	8	1.8
3	8	1.8
4	6	1.65
5	6	1.65
6	6	1.65
7	4	1.55
8	4	1.55
9	4	1.55
10	6	1.8
11	6	1.8
12	6	2.5

Cuadro 6.5 Diámetros y longitudes de las tuberías de la E /B

Para el cálculo de las pérdidas en la estación para la fecha de puesta en marcha de los nuevos equipos se tomaron en cuenta los siguientes factores: caudal para el año 2004, que las tuberías son nuevas y de acero al carbono, los grupos que operaran son los grupos 1 y 2 y todas las válvulas y accesorios.

Las pérdidas de carga en la estación se realizaron por el método de Swami, ver apéndice 5.

El factor de fricción se calculo utilizando la ecuación 3.20 y tomando en cuenta que las tuberías son nuevas, a continuación se presentan los resultados obtenidos:

$$f_i := \frac{0.25}{\log \left[\frac{\varepsilon}{3.71 \cdot D_i} + \frac{5.74}{(Re_i)^{0.9}} \right]^2} \quad f = \begin{pmatrix} 0.0161123018 \\ 0.0152992855 \\ 0.0142323637 \\ 0.0152992855 \end{pmatrix}$$

Luego utilizando la ecuación 3.18 se calcularon las pérdidas de carga por fricción para los tramos de tuberías 1, 2, 3, 6, 9, 10, 11, 12 representados en la figura 6.2:

$$h_{f_i} := f_i \cdot \frac{L_i \cdot (V_i)^2}{2 \cdot g \cdot D_i} \quad h_f = \begin{pmatrix} 0.0139 \\ 0.01754 \\ 0.11892 \\ 0.05209 \end{pmatrix} m$$

La pérdida de carga total es igual a:

$$h_f = 0.2024423 \quad m$$

Seguidamente se calculan las pérdidas de cargas causadas por las válvulas, utilizando la ecuación 3.21 y el respectivo valor de coeficiente de pérdida K .

$$h_f = k * \frac{V^2}{2 * g}$$

$$h_{\text{com}} = \left(\begin{array}{l} 0.0214063347 \\ 0.1102479302 \end{array} \right) \text{ m}$$

$$h_{f \text{ com}} = 0.131654249 \text{ m}$$

donde H_{com} representa las pérdidas referidas a las válvulas de compuerta.

$$h_{f \text{ ret}} = 0.1102479302 \text{ m}$$

donde h_{ret} representa las pérdidas referidas a la válvula de retención (check).

La pérdida de carga total en la estación se calcula sumando las pérdidas por fricción y las pérdidas ocasionadas por las válvulas.

$$h_{f \text{ total}} = h_f + h_{f \text{ ret}} + h_{f \text{ com}}$$

$$h_{f \text{ total}} = 0.4443445 \text{ m}$$

Para el cálculo de las pérdidas de carga en la estación de bombeo para el final del periodo se tomo en cuenta que estarán dos equipos en operación, el caudal será mayor y las condiciones de fricción de los tramos de tuberías han aumentado. Los tramos de tuberías que se utilizaron para

este estudio son: 1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12 según la figura 6.2. Ver apéndice 5.

Pérdidas por fricción en las tuberías:

$$h_f = 0.56423063 \text{ m}$$

Pérdidas ocasionadas por las válvulas de compuerta:

$$h_{f \text{ com}} = 0.000674208 \text{ m}$$

Pérdidas ocasionadas por las válvulas de retención (check):

$$h_{f \text{ ret}} = 0.000674208 \text{ m}$$

Pérdidas por divergencia de flujo en los tramos 3 y 5:

$$h_{f \text{ diverg}} = 0.0584945311 \text{ m}$$

Pérdidas por confluencia de flujo en los tramos 8 y 10:

$$h_{f \text{ conflu}} = 0.1096229042 \text{ m}$$

Pérdida total de carga en la estación:

$$h_{f \text{ total}} = h_f + h_{f \text{ ret}} + h_{f \text{ com}} + h_{f \text{ diverg}} + h_{f \text{ conflu}}$$

$$h_{f \text{ total}} = 0.733694752 \text{ m}$$

6.5.4 Cálculo para evitar la cavitación en las bombas

Con el objetivo de evitar los problemas de suspensión de servicio por baja presión en la succión de las bombas, se instalará una tubería de 8" aproximadamente de 110 metros de longitud desde el alimentador de la estación de la estación de bombeo Vista Alegre has la estación de bombeo Yaguara II donde la presión es de 60 m.c.a. aproximadamente. A continuación se representa en la figura 6.3 un plano de la nueva tubería.

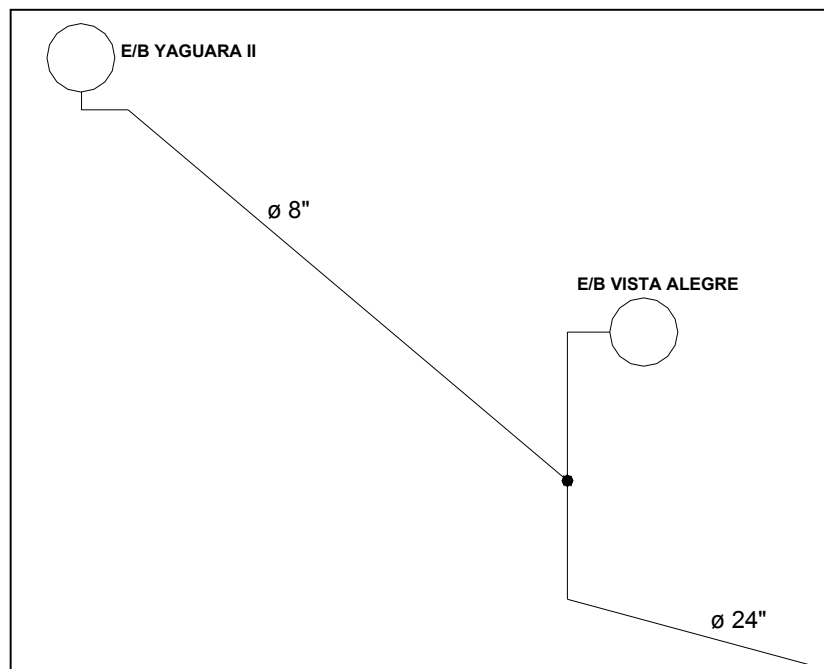


Figura 6.3 Sistema de Succión de la E/B Yaguara II

Para evitar la cavitación en las bombas, se determinó la presión mínima que se debe tener en el alimentador de la estación, proveniente este de la tubería de 24" que surte a la estación de bombeo Vista Alegre, de manera que la presión de succión de cada bomba obedezca con el valor de $NPSH_{\text{máximo}}$ establecido por el fabricante.

De acuerdo con la ecuación 3.76 se calcula la presión de succión y se calcula presión mínima que debe tener el alimentador.

$$NPSH_d = \frac{P_s + P_a - P_v}{\gamma} - \Delta Z - h_s$$

$$P_s := NPSH + \frac{P_v - P_a}{\gamma} + \Delta Z + h_s$$

donde: $\Delta Z = 24$ m

$P_a = 91.440$ Pa = 9.35 m

$P_v = 3.167$ Pa (a la temperatura de 25°C)

$h_s = 1.093$ m (ver apéndice 4)

$\gamma = 9780$ kg / (m*s)²

Entonces para que no exista el fenómeno de cavitación en ninguna de las bombas, la presión en el alimentador debe ser igual o mayor que:

$$P_s = 22.068 \text{ m}$$

Tomando en cuenta que la presión en el alimentador es de 60 m.c.a., se calcula el $NPSH_{\text{disponible}}$ ver apéndice 4:

$$NPSH_{\text{disponible}} = 43.932 \text{ m}$$

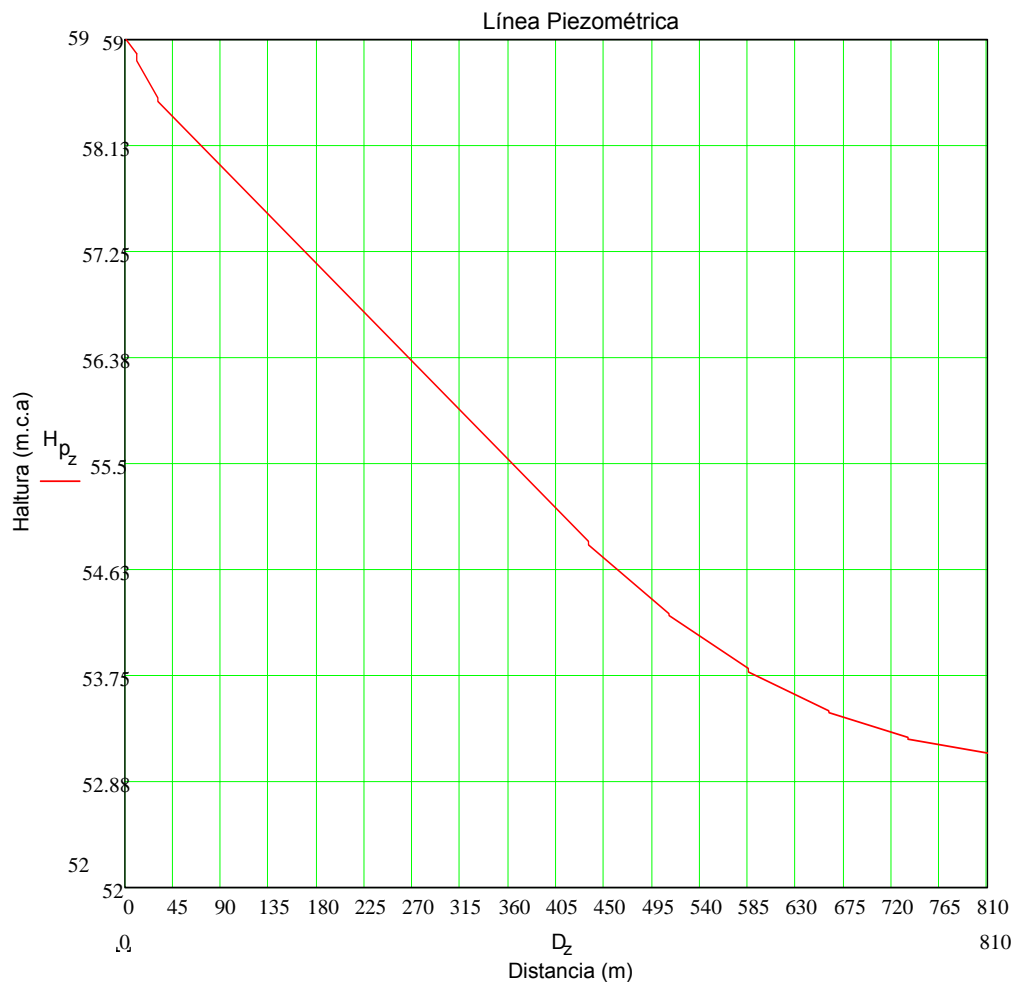
El valor de NPSH máximo que requieren las bombas según el fabricante es de 6 m.c.a. por lo cual se verifica que para la presión del alimentador proveniente de la estación de bombeo Vista Alegre de 60 m.c.a. no produce el fenómeno de cavitación en las bombas de la estación Yaguara II debido a que:

$$NPSH_{\text{disponible}} > NPSH_{\text{requerido}}$$

$$43.932 \text{ m} > 6 \text{ m}$$

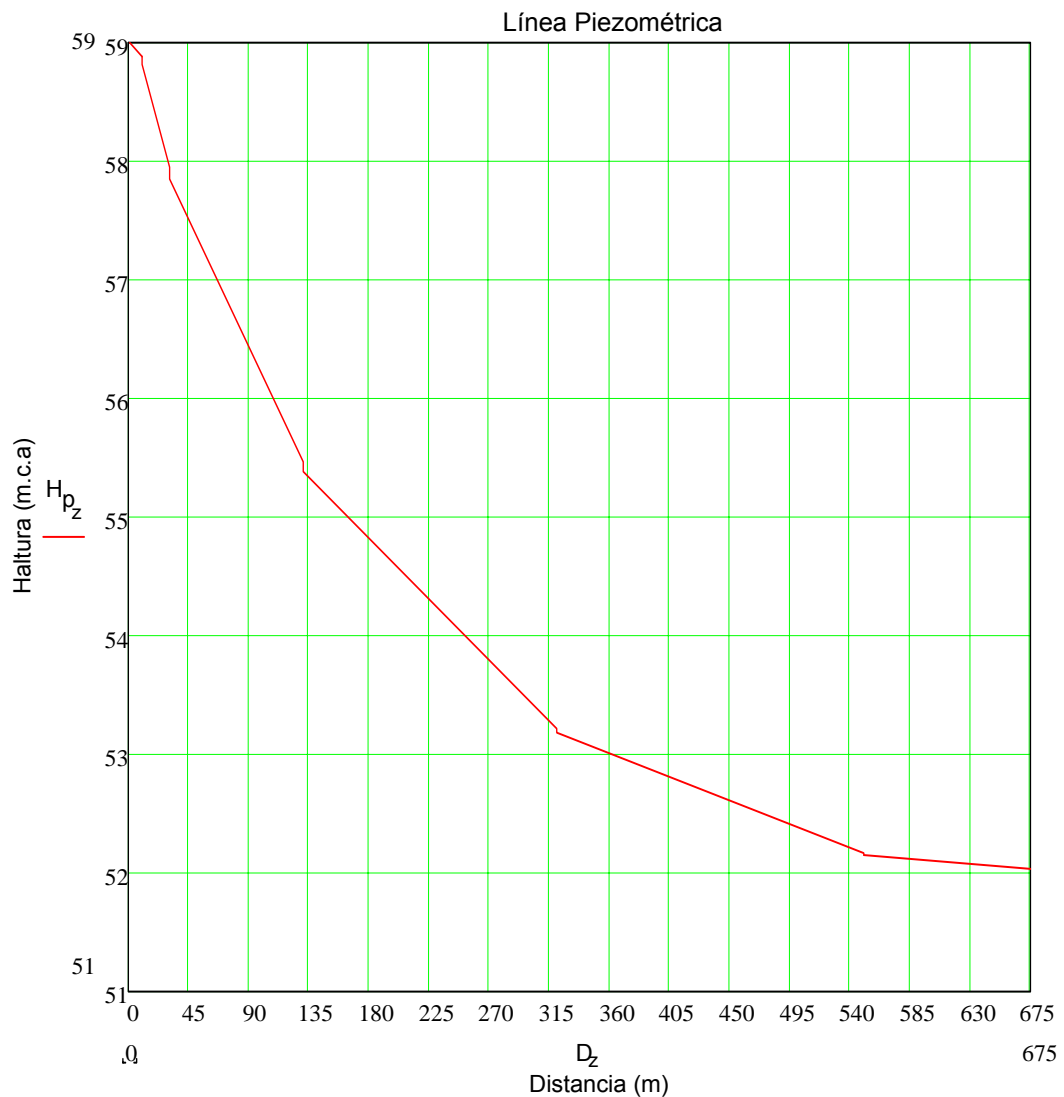
6.5.5. Determinación de las líneas piezométricas

La determinación de las líneas piezométricas se realizó dividiendo el sistema de distribución en dos tramos principales, el primer tramo es el que se dirige hacia Urbanización Colinas de Vista Alegre y el segundo tramo el que se dirige hacia el Barrio Sucre. Para el cálculo de dichas líneas se consideraron las pérdidas por fricción, las pérdidas ocasionadas por ensanchamiento y contracciones y las pérdidas por división de flujo. A continuación se presentan en las figuras 6.5 y 6.6 las líneas piezométricas para el sistema de la Urb. Colinas de Vista alegre y el sistema del Barrio Sucre respectivamente.



Gráfica 6.2 Línea piezométrica del sistema de la Urb. Colinas de Vista Alegre

Las pérdidas de carga para el sistema de la urbanización Colinas de Vista Alegre representan 5.9046 m en su mayoría causadas por la fricción en las tuberías, se puede decir entonces que se garantiza el suministro de agua para cada punto de entrega en el sistema.



Gráfica 6.3 Línea piezométrica del sistema Barrio Sucre

Para el caso del sistema del barrio Sucre las pérdidas de carga en el sistema son mayores debido a que se está manejando un caudal mucho

mayor que el caudal para la Urb. Colinas de Vista Alegre, estas pérdidas representan 6.9812 m.c.a. y la mayor cantidad de estas pérdidas se presentan también por la fricción en las tuberías.

6.6. 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 fallas de suministro de energía eléctrica en los motores que impulsan las bombas, así como el cierre de válvulas.

Los efectos del golpe de ariete ocasionados debido a fallas inesperadas o paros de emergencia de los motores eléctricos se calcularon para el año 2025. 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. Se toma el punto de operación para el caudal máximo diario en cada año, cuando la velocidad de flujo es mayor.

El cierre instantáneo de posible válvula ubicada en la tubería de 6 pulgadas (derivación de las redes Vista Alegre – Barrio Sucre) durante la operación de las bombas en régimen permanente genera el máximo cambio de presión en esta sección de la tubería y en dicho dispositivo.

6.6.1. 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 el año más desfavorable el 2025. Para el 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 en los puntos altos.

6.6.2. Desconexión de los motores eléctricos en régimen permanente en el año 2025

Se realizaron cambios en la configuración del sistema para estimar los efectos de las perturbaciones producto de la parada de los grupos motobomba, estos obedecen las siguientes consideraciones:

- Simplificación de las redes de la zona Barrio Sucre y Vista Alegre como un solo tramo de tubería para cada red, en cuyos extremos se encuentra ubicado un tanque.

En esta situación, 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 porque 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 (revisar sección 3.2.10.5). Por otro lado, 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.

- 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 (3.59).

- Verificación de los esfuerzos tangenciales, radiales y longitudinales contra el esfuerzo de fluencia de la tubería en el caso de perturbaciones.

Con las consideraciones anteriores se realizaron las estimaciones del comportamiento de las perturbaciones en la sección de tubería adyacente a la descarga de las bombas mediante el método práctico y cálculo de sobrepresión [12].

Para ello se realizaron los siguientes cálculos:

El cálculo de la sobrepresión depende del tiempo de cierre de la válvula.

Instantáneo: $t_c = 0$ Caso teórico, físicamente imposible, pero muy esencial en la explicación del fenómeno.

Rápido: $0 < t_c < 2t_o = 2L/c = T/2$. La presión máxima es la misma que en el cierre instantáneo, aunque la curva de presiones en la tubería en función del tiempo sea distinta. En el cierre rápido una onda no tiene tiempo de ir al estanque, reflejarse y volver a la válvula, antes de que termine medio ciclo.

Lento: $t_c > 2t_o = 2L/c = T/2$. La presión máxima es menor que en los dos casos precedentes, porque la depresión de la onda elástica llega a la válvula antes de que se complete el medio ciclo e impide el aumento ulterior de la presión.

$$E := 2 \cdot 10^8 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \quad E_c := 2.10 \cdot 10^{10} \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \quad \rho := 996.94 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$D := \begin{pmatrix} 4.026 \\ 6.065 \end{pmatrix} \text{in} \quad e := \begin{pmatrix} 0.237 \\ 0.280 \end{pmatrix} \text{in} \quad C := 1 \quad v := \begin{pmatrix} 1.321 \\ 1 \end{pmatrix} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$c_1 := \sqrt{\frac{\frac{E}{\rho}}{1 + \frac{E \cdot D_1}{E_c \cdot e_1} \cdot C}} \quad c_1 = 1.512 \times 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$c_2 := \sqrt{\frac{\frac{E}{\rho}}{1 + \frac{E \cdot D_2}{E_c \cdot e_2} \cdot C}} \quad c_2 = 1.541 \times 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\Delta p_1 := \rho \cdot c_1 \cdot v_1 \quad \text{sobrepresión en cierre instantáneo total de la válvula}$$

$$\Delta p_2 := \rho \cdot c_2 \cdot v_2$$

$$\Delta p =$$

	1
1	288.773
2	222.75

$$\text{psi}$$

Cabe destacar que las sobrepresiones $\Delta p_1 = 288.773$ psi equivale en el sistema internacional a: $1991019.75 \text{ Pa} \cong 1.99 \cdot E6\text{Pa}$. Y $\Delta p_2 = 222.75$ psi equivale en el sistema internacional a: $1535807.19 \text{ Pa} \cong 1.54 \cdot E6\text{Pa}$.

Para recipientes a presión se aplican dos métodos para el estudio de los esfuerzos: pared gruesa y pared delgada

Para pared delgada se tiene como parte fundamental que el espesor de la tubería sea 20 veces o más pequeño que su radio. Lo cual en nuestro caso no ocurre. Por lo tanto haremos un estudio sobre tuberías a presión de pared gruesa.

$$r_i := \begin{pmatrix} 2.013 \\ 3.0325 \end{pmatrix} \quad r_o := \begin{pmatrix} 2.263 \\ 3.3125 \end{pmatrix} \quad p_i := \Delta p \quad r := \begin{pmatrix} 2.1 \\ 3.2 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_t := \frac{(r_i)^2 \cdot p_i}{(r_o)^2 - (r_i)^2} \cdot \left[1 + \frac{(r_o)^2}{r_1} \right]$$

$$\sigma_r := \frac{(r_i)^2 \cdot p_i}{(r_o)^2 - (r_i)^2} \cdot \left[1 + \frac{(r_o)^2}{(r_1)^2} \right]$$

$$\sigma_l := \frac{(r_i)^2 \cdot p_i}{(r_o)^2 - (r_i)^2}$$

Por lo tanto tenemos los siguientes esfuerzos para la tubería de 4 pulgadas.

$$\sigma_t = 3.764 \times 10^3 \text{ psi} \quad \sigma_r = 2.366 \times 10^3 \text{ psi} \quad \sigma_l = 1.095 \times 10^3 \text{ psi}$$

$$\sigma_t := \frac{(r_2)^2 \cdot p_2}{(r_o_2)^2 - (r_i_2)^2} \cdot \left[1 + \frac{(r_o_2)^2}{r_2} \right]$$

$$\sigma_r := \frac{(r_2)^2 \cdot p_2}{(r_o_2)^2 - (r_i_2)^2} \cdot \left[1 + \frac{(r_o_2)^2}{(r_2)^2} \right]$$

$$\sigma_l := \frac{(r_2)^2 \cdot p_2}{(r_o_2)^2 - (r_i_2)^2}$$

A continuación los esfuerzos para la tubería de 6 pulgada son:

$$\sigma_t = 5.107 \times 10^3 \text{ psi} \quad \sigma_r = 2.388 \times 10^3 \text{ psi} \quad \sigma_l = 1.153 \times 10^3 \text{ psi}$$

Las tuberías que transportan agua de acero al carbono de resistencia media tienen un punto cedente entre (30000-33000) psi. y un esfuerzo máximo entre (55000-60000) psi.

Por otra parte se realiza un estudio de un caso especial de sobrepresión en cierre lento de una válvula

$$L := 12\text{m} \quad k \text{ entre } [1 \text{ y } 2] \quad k := 2 \quad tc := 2 \cdot \frac{L}{c} \quad tc = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 01587 \\ \hline 2 & 01558 \\ \hline \end{array} \text{ s}$$

$$\Delta p_3 := k \cdot \frac{\rho \cdot L \cdot v_1}{tc_1} \quad \Delta p_3 = 288.77289 \text{ psi}$$

$$\Delta p_4 := k \cdot \frac{\rho \cdot L \cdot v_2}{tc_2} \quad \Delta p_4 = 222.74973 \text{ psi}$$

Estos resultados son similares a los estudios anteriores y por consecuencia las tuberías cumplen los requerimientos para un buen funcionamiento.

Se puede concluir que las tuberías de acero al carbono, soportan las condiciones más desfavorables de sobrepresión, porque su esfuerzo admisible esta por el orden de $32000 \text{ psi} \cong 2.2 \cdot 10^8 \text{ Pa}$, lo cual es un valor muy por encima a los esfuerzos tangenciales, radiales y longitudinales que se presentan.

6.6.3. 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 "estacion derivación de tramos". Esta 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 3.55) de la válvula de reparación aguas abajo, de tal manera que no se producen compensaciones de ondas reflejadas que puedan atenuar el efecto de golpe de ariete que se genera en dicho accesorio. Esto trae como consecuencia que se produzca la máxima presión posible debido a este fenómeno.

Se calcula el tiempo crítico con la ecuación 3.55

$$t := \frac{2 \cdot 12 \text{ m}}{1512 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \quad t = 0.016 \text{ s}$$

Se calcula el valor de la sobrepresión con una velocidad media de flujo igual a $V_0 = 1.25 \text{ m/s}$ aplicando la ecuación 3.54.

La sobrepresión en la válvula para esta situación es igual a:

$$H_a := \frac{1512 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1.25 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}}{9.807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \quad H_a = 192.719 \text{ m}$$

- La presión en la válvula en régimen permanente es igual a:

$$H := 122 \text{ m} \quad \Delta z := 12 \text{ m} \quad h_f := 8.51 \text{ m}$$

$$H_v := H - \Delta z - h_f \quad H_v = 101.49 \text{ m}$$

- La presión máxima en la válvula asociada a este fenómeno es igual a:

$$H_m := H_v + H_a \quad H_m = 294.209 \text{ m}$$

$$h_m = 417.684 \text{ psi}$$

- Por consiguiente esta cercana a los 417.684 psi y equivale a $2.9 \cdot 10^6 \text{ Pa}$, dentro de este marco debemos tomar en consideración la atenuación debido a las bifurcaciones y por consiguiente la disminución de este valor.

Este valor de máxima presión se debe al cierre en un tiempo menor o igual al tiempo crítico, que en este caso es muy pequeño por la proximidad de la derivación, 0.016 segundos lo que implica una velocidad en el cierre muy elevada y que por complejidad no se realiza.

A continuación haremos el estudio de golpe de ariete en la derivación sin válvula. Reflexión de la onda de perturbación en confluencias (Waterhammer Wave Reflection)

$$a1 := 1512 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad a2 := 1541 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad a3 := 1512 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$d1 := 6.065 \text{ in} \quad d3 := 6.065 \text{ in} \quad d2 := 4.026 \text{ in}$$

$$A1 := \pi \frac{d1^2}{4} \quad A2 := \pi \frac{d2^2}{4} \quad A3 := \pi \frac{d3^2}{4}$$

$$s := \frac{\frac{2 \cdot A1}{a1}}{\frac{A1}{a1} + \frac{A2}{a2} + \frac{A3}{a3}} \quad s = 0.822$$

$$r := \frac{\frac{A1}{a1} - \frac{A2}{a2} - \frac{A3}{a3}}{\frac{A1}{a1} + \frac{A2}{a2} + \frac{A3}{a3}} \quad r = -0.178$$

$$F1 := 417.684 \text{ psi} \quad F2 := s \cdot F1 \quad F3 := s \cdot F1$$

$$F2 = 343.441 \text{ psi} \quad F3 = 343.441 \text{ psi}$$

$$f1 := r \cdot F1 \quad f1 = -74.243 \text{ psi}$$

Revisando la sección 3.2.10.5 se aprecia que la onda reflejada esta por el orden de 75 psi $\cong 5.2 \cdot E5$ Pa, lo cual es un valor muy pequeño para la resistencia de los componentes del sistema.

6.7. 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 consideración que el material de las tuberías en la estación de bombeo será de acero al carbono y por lo tanto sus extremos de brida ciega, el tipo de unión de las válvulas debe ser brida- brida.

- Válvula de reparación del múltiple de succión [13]: este accesorio estará sometido a la presión máxima del alimentador Vista Alegre. Asumiendo un factor de seguridad adecuado (1,2) se calcula la presión máxima del alimentador igual a: $1,2 * 80 \text{ metros} = 96 \text{ metros} = 136.4 \text{ psi} \cong 9.4 * E5 \text{ Pa}$.

Tipo:	Compuerta ANSI125
Vástago:	Ascendente
Instalación:	Horizontal
Diámetro:	8 pulgadas
Material del cuerpo:	Cast Iron Hierro Fundido
Presión Nominal:	220 psi $\cong 1.5 * E6 \text{ Pa}$
Extremos:	Unión Por brida- brida (Cara plana ANSI125)

- Válvula de reparación del múltiple de descarga [14]: la presión máxima que tendrá que soportar este accesorio corresponde a 202 metros = 287 psi $\cong 1.98 \cdot E6$ Pa

Tipo:	Compuerta ANSI 250
Vástago:	Ascendente
Instalación:	Horizontal
Diámetro:	6 pulgadas
Material del cuerpo:	Cast Iron Hierro Fundido
Presión Nominal:	300 psi $\cong 2.1 \cdot E6$ Pa
Extremos:	Unión brida a brida (cara plana ANSI 250)

- Válvula de reparación en los tramos individuales de succión de cada bomba [8]: la condición de operación de estas válvulas es semejante a la válvula de reparación del múltiple de succión.

Tipo:	Compuerta ANSI 125
Vástago:	Ascendente
Instalación:	Horizontal
Diámetro:	6 pulgadas
Material del cuerpo:	Cast Iron Hierro Fundido
Presión Nominal:	220 psi $\cong 1.5 \cdot E6$ Pa
Extremos:	Unión brida – brida (de cara plana ANSI125)

- Válvula de reparación en los tramos individuales de descarga de cada bomba [8]: la presión máxima a la que estará sometida este

accesorio será igual a la columna de líquido correspondiente a día de máximo consumo diario en el año 2025, es menor a 300 psi \cong 2.1*E6 Pa

Tipo:	Compuerta ANSI 250
Vástago:	Ascendente
Instalación:	Horizontal
Diámetro:	4 pulgadas
Material del cuerpo:	Cast Iron Hierro Fundido
Presión Nominal:	300 psi \cong 2.1*E6 Pa
Extremos:	Unión brida-brida (cara plana ANSI 250)

- Válvula de retención o válvula check (referencia 8 figura 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 menor de 300 psi \cong 2.1*E6 Pa

Tipo:	Check clase ANSI 250
Instalación:	Horizontal
Diámetro:	4 pulgadas
Material del cuerpo:	Cast Iron Hierro Fundido
Presión Nominal:	300 psi \cong 2.1*E6 Pa
Extremos:	Unión brida-brida (cara plana ANSI 250)

6.8. Especificaciones de las tuberías

- Alimentador E / B Vista Alegre – Yaguara II
 - Material: Acero al carbono
 - Diámetro nominal: 8 pulgadas
 - Diámetro exterior: 8.625 pulgadas
 - Diámetro interior: 7.981 pulgadas
 - Espesor: 0.322 pulgadas

- Múltiple de succión:
 - Material: Acero al carbono
 - Diámetro nominal: 8 pulgadas
 - Diámetro exterior: 8.625 pulgadas
 - Diámetro interior: 7.981 pulgadas
 - Espesor: 0.322 pulgadas

- Múltiple de descarga:
 - Material: Acero al carbono
 - Diámetro nominal: 6 pulgadas
 - Diámetro exterior: 6.6065 pulgadas
 - Diámetro interior: 6.065 pulgadas
 - Espesor: 0.280 pulgadas

- Tubería individual de succión
 - Material: Acero al carbono
 - Diámetro nominal: 6 pulgadas
 - Diámetro exterior: 6.6065 pulgadas
 - Diámetro interior: 6.065 pulgadas
 - Espesor: 0.280 pulgadas

- Tubería individual de descarga:
 - Material: Diámetro nominal:

Diámetro exterior:	4 pulgadas
Diámetro interior:	4.50 pulgadas
Espesor:	4.026 pulgadas
	0.237 pulgadas

Acero al carbono

▪ Múltiple de descarga:

Material:	Acero al carbono
Diámetro nominal:	6 pulgadas
Diámetro exterior:	6.6065 pulgadas
Diámetro interior:	6.065 pulgadas
Espesor:	0.280 pulgadas

6.9. Selección de los motores

6.9.1. 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 (3.72), como sigue a continuación:

$$P_b = \frac{\gamma * Q * H}{\eta}$$

$$P_b = \frac{9780 \frac{kg}{(m*s)^2} * 103 \frac{m^3}{hr} * 60m}{0.7} = 32.16 \text{ hp}$$

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. Ecuación 3.71.

$$P_b = \frac{32.16hp}{0.9} = 35.74hp$$

6.9.2. Especificaciones de los motores

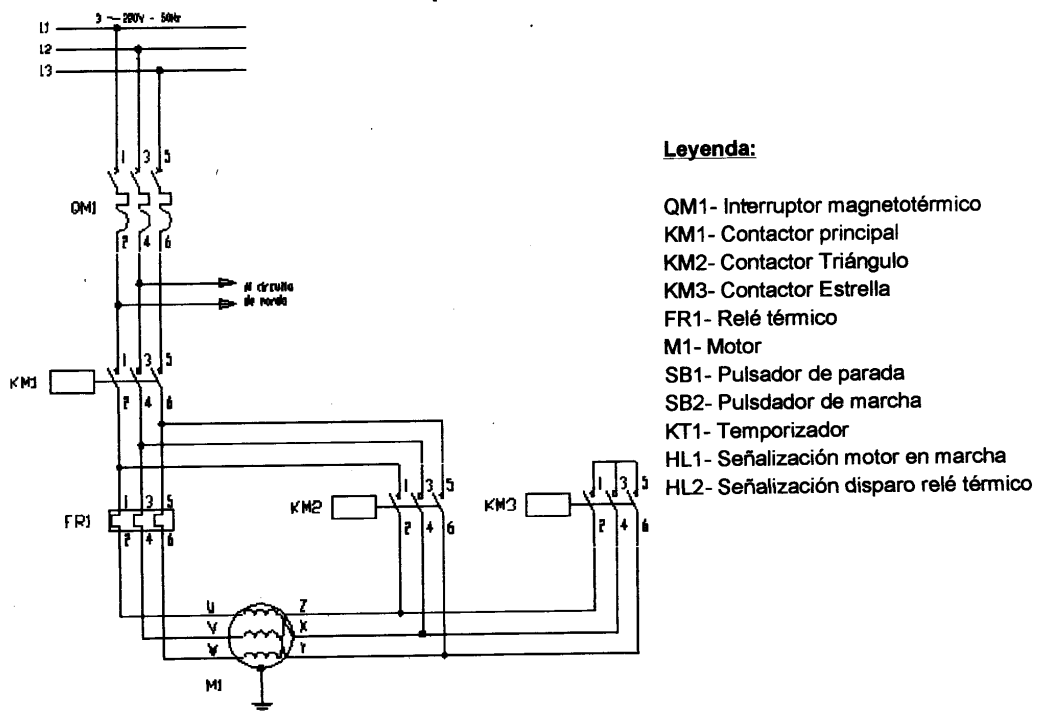
Marca:	U.S Electrical Motors Emerson
Tipo:	Trifásico de Inducción Rotor jaula de Ardilla
Número de polos:	4
Frecuencia:	60 Hz
Tensión:	230 Voltios
Intensidad nominal:	96.5 Ampere
Potencia nominal:	40 hp
Factor de potencia:	0.86
Velocidad mecánica:	1770 RPM
Par mecánico nominal:	161 N.m
Rendimiento:	90%
Aislamiento:	Clase G
Forma constructiva:	Open Drip proof
Frame:	324 MC
Acoplamiento:	Directo a la Bomba

6.10. Instalaciones eléctricas

A continuación se muestra 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.

6.10.1. Sistemas de potencia y control de los motores

Basándose en las características mencionadas en la selección del motor, el sistema de potencia eléctrico debe cumplir básicamente con el siguiente esquema, de acuerdo al Código Eléctrico Nacional:



En el Código Eléctrico Nacional se especifica para motores trifásicos de inducción de 40 hp las siguientes características:

- Capacidad: 40 hp

- Arrancador: NEMA #5
- Amperaje de placa: 96.5 A
- Corriente para protección de corto circuito (protección ramal): Interruptor automático 300 A
- Aislamiento de los conductores: THW (hasta 75 °C)
- Calibre de los conductores: THW - 6
- Diámetro del conduit: 2 pulgadas
- Longitud máxima de los conductores para una caída de tensión de 2 por ciento: 440 pies = 134 metros

El arranque de los motores más convenientes para el caso en que no se utilice variador de velocidad en dicho equipos es por el método a tensión reducida con el sistema estrella-triángulo con transición abierta. Cabe destacar que para cada motor requerimos todos los componentes iguales, porque los motores son iguales.

Para al arranque de los motores con este método se cálculo la capacidad de los contactores, la corriente y la tensión de acuerdo al esquema del apéndice 8, con los siguientes resultados:

- Tensión de línea: $V_L = 240$ Vol.
- Corriente de línea: $I_L = 96.5$ A
- Tensión de fase en arranque en estrella: 266 Vol.
- Corriente en fase de arranque en estrella: $2 \cdot I_N = 193$ A
- Par de arranque en estrella: 300 N.m
- Capacidad del contactor de línea: 23.1 hp
- Capacidad del contactor de triángulo: 23.1 hp
- Capacidad del contactor de arranque: 13.3 hp

6.11. Tabla de cableado

- Cableado del alimentador, capacidad 230 A.

THW 4/0 AWG 600 V.

- Cableado de los Interruptores de los motores, capacidad 96.5 A \approx 115 A.

THW 2 AWG 600 V.

- Cableado de los arrancadores, capacidad 55.7 A. \approx 65 A.

THW 6 AWG 600 V.

- Para el relé térmico ajustable se considera 56 A. como máximo.
- Las bobinas de 120 V. alterna.
- Par los contactores los de línea y triángulo son iguales, para una intensidad por encima de 56 A, se ajusta con tolerancia a 65 A.

$K_L = K_T = \mathbf{AC3 \text{ para } 65 \text{ A.}}$ con bobina 120 VAC y dos contactos NA y dos contactos NC.

K_E como $V_E = 132.8 \text{ V.}$ y la intensidad es un tercio de la intensidad de línea

$I_E = 32.2 \text{ A.} \approx 35 \text{ A.}$ tenemos: **AC3 para 35 A** con bobina 120 VAC y dos contactos NA y dos contactos NC.

- El temporizador se recomienda con un ajuste entre los 3 y 4 segundos para bobinado 120 VAC.
- Para el circuito de mando o control se recomienda un cableado **THW # 16 AWG 600 V.**

El esquema general del sistema de control es el siguiente:

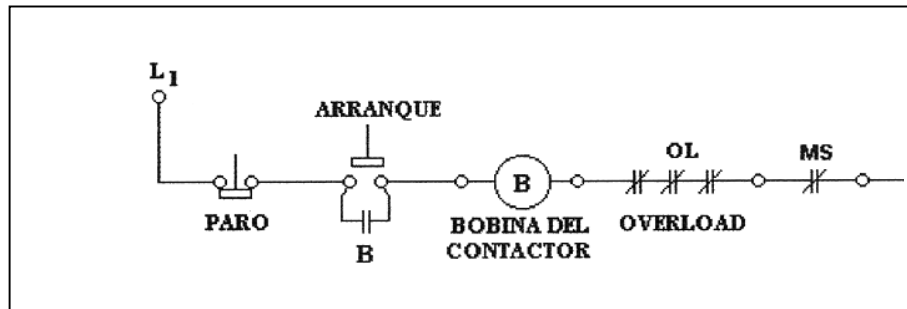


Figura 6.4 Circuito de control de motores trifásicos de inducción

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.

CAPITULO VII

EVALUACIÓN ECONÓMICA

7.1. Presupuesto

Este capítulo tiene como objetivo fundamental estimar los costos de inversión para visualizar la posible recuperación del capital, hay que tomar en consideración que no se realiza un estudio económico riguroso. Para lograr este objetivo se realizó un presupuesto general de inversión que incluye las partidas más importantes y corresponde básicamente a la rehabilitación de la edificación y equipamiento de la futura estación de bombeo YAGUARA II. Por otro lado se considera los ahorros por concepto de consumo eléctrico y mantenimiento.

A continuación los costos estimados para los equipos y rehabilitaciones necesarias para la nueva estación.

1. Equipos Electromecánicos:

Suministro e instalación de bombas centrifugas marca KSB WKL80 de cuatro etapas, con sus motores eléctricos US Motors de 40 hp a 1770 RPM, acoplamiento flexible. Costo Estimado. 16584000 Bs.

2. Accesorios

Consiste en todos los dispositivos de seguridad de la estación, válvulas, juntas de sujeción, bridas etc. Costo Estimado. 19216000 Bs.

3. Instrumentación

Consiste en todos los equipos de medición (manómetros) que sirven para tener registro de la operación de los equipos.

Costo Estimado: 1377240 Bs.

4. Obras de Servicios de tuberías

Reubicación de los múltiples de succión y de descarga, como también el suministro e instalación del tramo desde la estación al alimentador Vista Alegre. Costo Estimado. 13876375 Bs.

5. Instalaciones Eléctricas.

Suministro e Instalación de tableros de control eléctrico, Tensión 240 V, caja metálica, protectores trifásicos. Costo Estimado. 5250000 Bs.

6. Modificaciones Infraestructura

Construcción de una entrada entre la cabina del operador y la sala de máquinas, ventana de vidrio (visión), instalaciones sanitarias, albañilería, herrería. Costo Estimado. 4485000 Bs.

7. Acabado, pintura y impermeabilización

Consiste en el frisado y pintura de toda la estación de bombeo, como la impermeabilización del techo de la estación para evitar filtraciones de agua que puedan afectar la infraestructura y los equipos. Costo Estimado. 1062500 Bs.

8. Cableado

Consiste en suministro e instalación de los diferentes cables de alimentación, de los interruptores, de los arrancadores y del circuito de control. Costo Estimado. 650000 Bs.

SECCIÓN	TOTALES (Bs.)	(%)
Equipos Electromecánicas	16584000	26.53
Accesorios	19216000	30.75
Instrumentación	1377240	2.20
Obras de Servicios de tuberías	13876375	22.20
Instalaciones Eléctricas	5250000	8.40
Modificaciones Infraestructura	4485000	7.18
Acabado, pintura y impermeabilización	1062500	1.70
Cableado	650000	1.04
Total de la obra Bs.	62501115	100

Cuadro 7.1 Lista de precios de todos los equipos y materiales para la nueva estación

Los presupuestos fueron cotizados por las empresas distribuidoras de HIDROCAPITAL, las cuales fueron contactadas por Ingeniería C.A.U. Los precios en dólares se calcularon a 1600 Bs. por dólar.

Equipos Electromecánicos: Ksb, U.S Electrical Motors, Emerson
Válvulas, Bridas, Juntas: CLA-VAL, FIMACA (Fundición Industrial Mecánica y Artística).

Tuberías: Tuboacero C.A

Equipos de Medición: Tecmequip (Técnicas de medición y equipos).

Tableros e Instalaciones Eléctricas: Subtaca, Facelta, Siema Gar.

Cableado: Cables Eléctricos del Centro. NPS Control

Infraestructura: Cemex, EPA, etc.

Por otro lado en el capítulo anterior se menciona que la capacidad instalada actual es 172.5 hp (3 máquinas) de los cuales siempre se mantienen en funcionamiento 115 hp (2 máquinas). La propuesta de la nueva estación tiene como capacidad instalada 80 hp (2 equipos) para estar en funcionamiento 40 hp (1 equipo), posteriormente cuando la demanda lo requiera se colocara otro equipo de bombeo para aumentar a 120 hp y 80hp en funcionamiento.

<u>SISTEMA</u>	<u>CAPACIDAD</u>	<u>EN</u>
<u>DE BOMBEO</u>	<u>INSTALADA</u>	<u>FUNCIONAMIENTO</u>
ACTUALIDAD	172.5 hp	115 hp ≈ 85.8 Kw.
NUEVA ESTACIÓN	80 hp	40hp ≈ 29.8 Kw.
NUEVA ESTACIÓN A FUTURO	120 hp	80hp ≈ 59.7 Kw.

Se puede apreciar que para el nuevo sistema de bombeo en los primeros años existe un beneficio de 65 % en Kw. en funcionamiento, y cuando la demanda requiera el funcionamiento de 2 equipos existe un beneficio de 30 % en Kw. Estas reducciones de costos de operación se ven reflejadas en el consumo eléctrico de la estación.

Por otro lado en la estación actual se requiere mantenimiento general y revisión general cada 15 días, esto debido a gran deterioro de los equipos y a las malas condiciones de trabajo de los mismos. Esto se puede apreciar en el apéndice 6 y se aprecia las múltiples de reparaciones de sellos, espárragos, estoperas, gomas de acoples y rodamientos. Con la nueva estación se eliminarán en un 75 % los costos relacionados por concepto de reparaciones y mantenimiento.

Si realizamos un cálculo para el primer año del periodo de diseño(2004) tenemos que los ahorros por concepto de consumo eléctrico están por el orden del 50 % (7877004 Bs.) del gasto promedio anual (15754008 Bs.) de la estación de bombeo YAGUARA II que su factura promedio mensual es 1312832Bs. Revisando las reparaciones y el mantenimiento de la estación durante los últimos 24 meses tenemos un gasto promedio anual de sellos, estoperas, espárragos, gastos por cuadrillas, inspecciones, revisiones etc. Por el orden de 2250000 Bs. Tomando en consideración los valores para el primer año de diseño tenemos un ahorro de 1687500 Bs.

Cabe recalcar que la inversión del proyecto es: 62501115 Bs. Y para el primer año de diseño (2004) se tiene una recuperación de dicho costo por el orden de los 9564504 Bs. Lo que equivale a un 15.3 % del valor total invertido se puede concluir que la obra tiene un periodo muy corto de recuperación del capital.

CONCLUSIONES

- ❖ Con la instalación de los nuevos equipos se reduce el consumo eléctrico, la potencia actual de trabajo es de 115 hp y se disminuye a 40 hp, lo que origina un ahorro aproximado de un 50 % del gasto por consumo eléctrico de la estación.
- ❖ Con la nueva estación se reducen los gastos por concepto de inspección, reparación y mantenimiento en un 75 % de los requeridos actualmente.
- ❖ Implementando la nueva tubería de succión de la estación conectada al alimentador Vista Alegre se solventan los problemas de baja presión en la succión para la operación de los equipos, traduciéndose esto en un suministro de agua sin interrupciones.
- ❖ Se cumplen todos los requerimientos para un funcionamiento eficiente de los equipos garantizando que el fenómeno de golpe de Ariete no tendrá mayor influencia sobre los mismos.
- ❖ Los costos de inversión se recuperan en un corto periodo debido a los grandes ahorros de mantenimiento y energía eléctrica. Por lo cual el proyecto es sumamente rentable.
- ❖ El proyecto cumple con los requerimientos de disponibilidad y confiabilidad en casos especiales de emergencia.

- ❖ La información estadística referida a censos y crecimiento de la población de las zonas populares en el país no es confiable por no estar actualizada, ocasionando retrasos en el desarrollo de proyectos que impactan directamente en la calidad de vida de la sociedad.

- ❖ La determinación aproximada de las necesidades de consumo de agua de las zonas influenciadas por estaciones de bombeo son de gran importancia para el desarrollo de proyectos de sistemas de abastecimiento de agua en la ciudad. Garantizando con este estudio el suministro de agua a las zonas influenciadas por la estación de bombeo Yaguara II.

RECOMENDACIONES

- ◆ Tener información más precisa sobre la cantidad de población beneficiada por las estaciones de bombeo, para que esto no se traduzca en un factor de tranca en el diseño de proyectos similares, debido a que estos permiten aumentar el nivel de vida de la sociedad.

- ◆ Sustituir en los próximos años la tubería del tramo principal de Barrio Sucre de 4 pulgadas de diámetro por una de 6 pulgadas, para poder lograr una disminución de las pérdidas de carga en este sistema las cuales son muy elevadas.

- ◆ Elaborar el proyecto a la brevedad posible para evitar el aumento del índice de inflación en los precios de los equipos en su mayoría importados.

- ◆ Considerar con mayor importancia los ahorros de energía y mantenimiento de los equipos de menores velocidades, los cuales son muy significativos en la operación de las estaciones de bombeo.

- ◆ Cada operadora y contratista de HIDROCAPITAL debe tener un informe detallado a las estaciones, equipos, mediciones, reparaciones, entre otros factores primordiales para la elaboración de un proyecto a futuro.