

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE
AGUA POTABLE DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO VISTA –
ALEGRE**

TUTOR ACADEMICO: Prof. Rodolfo Grullón

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. César Aguirre

**Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela**

Por los Brs.:

Aguirre A. María E.

Bustamante D. Daniel A.

**Para optar al Título
de Ingeniero Mecánico**

Caracas, 2009



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
DEPARTAMENTO DE ENERGETICA



Caracas, 16 de octubre de 2.009

ACTA

Los abajo firmantes, miembros del jurado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres:

AGUIRRE MARIA EUGENIA y BUSTAMANTE DANIEL

Titulado:

“OPTIMIZACION DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE DE LA ESTACION DE BOMBEO VISTA-ALEGRE”

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

Prof. Manuel Martínez
Jurado



Prof. Rodolfo Grullón
Tutor

Prof. Juan Ruilova
Jurado

DEDICATORIA

A mi padre, Cesar José, que ha sido mi modelo a seguir a lo largo de toda mi carrera universitaria, que me ha apoyado incondicionalmente en todas mis decisiones y que me ha enseñado, con su ejemplo, a ser una ingeniera capaz, íntegra y, sobre todo, humana.

A mi mamá, Luisa, que ha estado a mi lado en todo el camino, que me ha brindado su cariño y apoyo incondicional en todo momento, siempre creyendo en mí y animándome en los tiempos difíciles.

A mi compañero de tesis y buen amigo, Daniel, que no sólo estuvo a mi lado a lo largo de este trabajo sino de toda la carrera universitaria, aceptando con paciencia mis errores y tendiéndome la mano no sólo en los momentos difíciles sino siempre que lo necesité.

A mis hermanos; M^a Leonor, Luis y Cesar; que han sido mis compañeros durante toda la vida, cuidándome y brindándome su apoyo en todo momento y de los cuales he aprendido el significado de hermandad.

A mis amigos, sin los cuales el camino hasta aquí habría sido mucho más difícil y menos emocionante ya que juntos formamos un equipo basado en el apoyo incondicional y la amistad.

M^a Eugenia

DEDICATORIA

A mi mama, por ser el apoyo incondicional para lograr esta meta que desde pequeño me planteé y a mi papa por ser ese apoyo espiritual en tiempos buenos y malos.

A mi familia, por siempre estar pendiente de mi desempeño y ayudándome en lo posible.

A mi compañera de tesis, amiga, colega y casi hermana por siempre estar allí cuando se necesita y comprender mis errores.

A mis amigos, por ser parte fundamental en mi desarrollo en la carrera y pedestal en cualquier momento.

A mis hermanos scout, por darme herramientas en la vida que en ningún otro lugar podré encontrar.

A todos aquellos profesores que me enseñaron de una u otra manera a ser cada día un mejor profesional preparado para su vida laboral.

Y a todas aquellas personas que de una u otra manera han contribuido con este gran logro personal, muchas gracias.

Daniel

AGRADECIMIENTOS

A todo el profesorado y personas que laboran en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Ilustre Universidad Central de Venezuela por darnos la herramientas para formarnos como ingenieros.

Al tutor industrial, el ingeniero Cesar Aguirre, por guiarnos en la realización de este trabajo, ofreciéndonos su experiencia y conocimientos con la mejor disposición posible, sin su ayuda nada de esto habría sido posible.

Al tutor, profesor Rodolfo Grullón, por guiarnos en la realización de este trabajo, prestándonos su apoyo y tiempo de manera incondicional y con disposición a ayudarnos.

Al proyectista electricista, Alexis José Pernía, por su disposición para atender nuestras consultas.

Al personal de Ingeniería C.A.U, los cuales se mantuvieron siempre con buena disposición para prestarnos su ayuda con cualquier necesidad que se fue presentando en el camino.

Al Bachiller, Jesús Alberto Pinto, por su gran ayuda a lo largo de toda la realización de este trabajo, por ofrecernos su tiempo en todo momento.

Al personal de la P.E.T.A, por ofrecernos su ayuda y completa disposición.

A la Directora de la escuela de ingeniería mecánica, Profesora M^a de los Ángeles Prato, por creer en nosotros y ayudarnos a llevar a cabo este trabajo.

Daniel y M^a Eugenia

Aguirre A. M^a Eugenia y Bustamante D. Daniel A.

**OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA
POTABLE DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO VISTA – ALEGRE**

Tutor académico: Profesor Rodolfo Grullón. Tutor Industrial: Ingeniero César Aguirre.

**Tesis. Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
2009. 159 pág.**

Palabras claves: Bomba, Abastecimiento-Agua, Optimización

Resumen

En el presente Trabajo Especial de Grado se realizó un estudio de la situación actual de la estación de bombeo Vista Alegre, con el fin de optimizar su operación ya que la misma se encuentra trabajando de manera ineficiente y sin equipo de reserva. Para lograr este fin se planteó la construcción, de una estación de refuerzo con múltiples de succión y descarga acondicionados versátilmente para el trabajo de los grupos tanto en serie, para conformar una bomba de refuerzo; como en paralelo para trabajar como una estación independiente que surta de agua a aquellas zonas aledañas desprovistas del servicio. Para darle forma a esta idea se realizó, en primer lugar, la determinación de las pérdidas de presentes con el fin de establecer el caudal a ser suplido y proyectar dicho consumo al año 2024. También se caracterizó el sistema en el cual operará la nueva estación bajo las distintas configuraciones. Asimismo, se diseñaron los múltiples de succión y descarga para que permitiesen cambiar la disposición de los equipos, se determinaron los parámetros hidráulicos, se realizó la selección de válvulas según la condición de sobrepresiones, se efectuaron los análisis de perdidas dentro de la estación y de cavitación, se establecieron los parámetros de los equipos eléctricos y finalmente se realizó una propuesta económica referente a la inversión necesaria para el proyecto.

Aguirre A. M^a Eugenia y Bustamante D. Daniel A.

**OPTIMIZATION OF THE WATER SUPPLY SYSTEM IN THE VISTA-
ALEGRE PUMPING STATION**

Academic Tutor: Profesor Rodolfo Grullón. Industrial Tutor: Engineer César Aguirre.
**Undergraduate Thesis. Caracas. U.C.V. Faculty of Engineering. Mechanical
Engineering School. 2009. 159 pages.**

Keywords: Pump, Water Supply, Optimization

Abstract

In the present special degree it was make a study on the current situation in Vista- Alegre pumping station, in order to optimize this operation because is now working inefficiently and without and reserve pump. For this purpose it was propose to built a new reinforcement station with the suction and discharge's multiples design to have the possibility to change the arrestment of the pumps from series to parallel and vice versa in order to use this new station as a reserve pump for Vista-Alegre, when is working in series, and for supply with the water service the area that is right now devoid of this service, when is working in parallel. To give shape to this idea, in first place, it was determine the flow that's currently wasting on the first miles of the Vista-Alegre pumping station's adduction pipe, and calculates with this the population that's going to be supply with the water service and project for 2024. It was also make the characteristics for the new station system and made the design of the suction and discharge's multiples for make the pump's arrestment change possible, it was determinate the hydraulic parameters, the selection of the valves according to the overpressure study previously made, the analysis for the hydraulic losses into the station and cavitations, the selection of the electric parameters and the economic feasibility study.

INDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTO	IV
RESUMEN	V
ÍNDICE DE CONTENIDO	VII
INDICE DE TABLAS	XV
INDICE DE GRAFICAS	XVIII
INDICE DE FIGURAS	XIX
NOMENCLATURA, ABREVIATURA Y SIMBOLOS	XX
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I: IDENTIFICACION DE LA EMPRESA	2
1.1 Identificación de la empresa	2
CAPÍTULO II: DEFINICION DEL PROYECTO	4
2.1 Antecedentes del proyecto	4
2.2 Planteamiento del problema	5
2.3 Objetivos y Alcances	6
2.3.1 Objetivo General	6
2.3.2 Objetivos Específicos	6
2.3.3 Alcances	6

CAPÍTULO III: FUNDAMENTO TEORICO	8
3.1 Proyección de la población	8
3.1.1 Métodos matemáticos para realizar la proyección de la población	8
3.1.2 Método del crecimiento aritmético	9
3.1.3 Método del crecimiento geométrico	10
3.1.4 Método del crecimiento parabólico	11
3.1.5 Método de extrapolación de los datos transformados	13
3.1.6 Método demográfico	13
3.2 Principios de la mecánica de los fluidos aplicados a sistemas de bombeo	14
3.2.1 Conservación de la masa: Ecuación de Continuidad	14
3.2.2 Flujo de fluidos viscosos	16
3.2.3 Numero de Reynolds	17
3.2.4 Flujo interno en tuberías	17
3.2.4.1 Flujo laminar	17
3.2.4.2 Flujo turbulento	18
3.2.5 Ecuación de la energía: Ecuación de Bernoulli	19
3.2.6 Pérdidas originadas en sistemas de tuberías	21
3.2.7 Envejecimiento de tuberías	25
3.2.8 Cavitación	26
3.2.8.1 Condiciones de la cavitación	27

3.2.8.2 Efectos de la cavitación	27
3.2.8.3 Consecuencias de la cavitación	28
3.2.8.4 Tipos de cavitación	28
3.2.9 NPSH (Net Positive Suction Head)	29
3.2.9.1 NPSH requerido	29
3.2.9.2 NPSH disponible	30
3.2.10 Régimen permanente	32
3.2.10.1 Ley de la conservación de la energía	32
3.2.10.2 Ecuación general de una turbomaquina hidráulica	34
3.2.11 Análisis de redes en tuberías comerciales	35
3.2.11.1 Tipos de redes	35
3.2.11.2 Método de resolución de redes	36
3.2.11.2.1 Método grafico para sistemas abiertos	36
3.2.11.2.2 Métodos numéricos	37
3.2.12 Régimen transitorio en tuberías	41
3.2.12.1 Descripción matemática del régimen transitorio en tuberías	42
3.2.12.2 Ecuación dinámica del movimiento en régimen transitorio	45
3.2.12.3 Métodos simplificados para el cálculo del golpe de ariete	46
3.3 Criterios básicos para el diseño de un sistema de abastecimiento de agua	54
3.3.1 Consumo de agua	54

3.3.2 Factores que afectan el consumo	55
3.3.2.1 Tipo de comunidad	55
3.3.2.2 Factores económicos y sociales	56
3.3.2.3 Factores meteorológicos	57
3.3.3 Variaciones periódicas de los consumos e influencia sobre las diferentes partes del sistema	57
3.3.3.1 Consumo medio diario	58
3.3.3.2 Consumo máximo diario	58
3.3.3.3 Consumo máximo horario	59
3.3.3.4 Consumo en caso de incendio	59
3.3.4 Redes de distribución	60
3.3.4.1 Tipos de redes	61
3.3.4.1.1 Tipo ramificado	61
3.3.4.1.2 Tipo malla	61
3.4 Estación de bombeo	61
3.4.1 Equipo de bombeo	62
3.4.2 Equipos dispuestos en paralelo y en serie	62
3.4.3 Parámetros de las bombas	63
3.4.4 Válvulas usadas en las estaciones de bombeo	65
3.4.5 Medios de accionamiento para bombas	67

3.4.6 Motores eléctricos trifásicos	68
3.4.7 Calculo del diámetro óptimo para la aducción de la estación	68
CAPÍTULO IV: ANALISIS DE LA SITUACION ACTUAL	71
4.1 Ubicación de la estación de bombeo	71
4.2 Especificaciones técnicas	72
4.2.1 Edificación de la estación de bombeo	72
4.2.2 Grupo de bombas	72
4.2.3 Tuberías en la estación	73
4.2.3.1 Succión en la estación de bombeo	74
4.2.3.2 Descarga en la estación de bombeo	74
4.2.4 Arreglo actual de los equipos	75
4.2.4.1 Arreglo de los grupos 1,3 y 2	76
4.2.4.2 Arreglo de los grupos 2,4 y 3	77
4.2.5 Características de los motores eléctricos de cada equipo	78
4.3 Estimación de la rugosidad actual de las tuberías	79
4.4 Curva característica del sistema	81
4.5 Gastos de consumo	84
4.6 Parámetros eléctricos y consumos de los equipos instalados	87
CAPITULO V: CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO	89

5.1 Zona a ser abastecida	89
5.2 Proyección y determinación de la población a abastecer	89
5.3 Calculo del caudal medio	91
5.4 Periodo de diseño	91
5.5 Ubicación del nuevo sistema	91
5.6 Rango de velocidades del fluido a la succión y a la descarga	91
CAPÍTULO VI: DISEÑO DE LA NUEVA ESTACIÓN DE BOMBEO	93
6.1 Caudal de diseño	93
6.2 Consumo máximo diario	93
6.3 Consumo máximo horario	93
6.4 Consumo en caso de incendio	94
6.5 Numero de unidades y etapas	94
6.5.1 Numero de unidades	94
6.5.2 Numero de etapas por unidad	95
6.6 Determinación de la característica del sistema	97
6.6.1 Diseño de los múltiples de succión y descarga	97
6.6.2 Manipulación de válvulas para la disposición de los equipos en serie y en paralelo	104
6.6.3 Curva característica del sistema	105
6.6.3.1 Curva característica del sistema con los equipos dispuestos en paralelo	105

6.6.3.2 Curva característica del sistema con los equipos dispuestos en serie	108
6.6.3.3 Perdidas dentro de la estación de bombeo	109
6.7 Determinación de la característica de las bombas	121
6.7.1 Selección de bombas	121
6.7.2 Cavitación	126
6.8 Estimación de transitorios hidráulicos	126
6.8.1 Golpe de ariete por falla eléctrica	126
6.9 Selección de válvulas	127
6.10 Especificaciones de las tuberías	128
6.11 Selección de motores	129
6.11.1 Potencia de los motores	129
6.11.2 Especificaciones de los motores	129
6.12 Instalación eléctrica	130
6.12.1 Sistema de potencia y control	130
CAPÍTULO VII: ANALISIS DE COSTOS	134
7.1 Presupuesto general de la inversión	134
7.2 Ahorros económicos	137
7.2.1 Ahorro en el consumo eléctrico	137
7.2.2 Ahorro en el mantenimiento de los equipos	139

CONCLUSIONES	141
RECOMENDACIONES	144
APENDICES	145
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	158

INDICE DE TABLAS

3.1 Valores de α según las características del agua	26
3.2 Valores de μ y E_c según el material de la tubería	45
3.3 Consumos mínimos permisibles según las normas INOS	55
3.4 Consumo per. Cápita de acuerdo al tipo de vivienda	56
4.1 Especificaciones técnicas de las bombas Ingersoll-Rand ubicadas en la estación	72
4.2 Especificaciones técnicas de las bombas Byron Jackson ubicadas en la estación	73
4.3 Especificaciones técnicas de los motores eléctricos de los grupos 1 y 4	78
4.4 Especificaciones técnicas de los motores eléctricos de los grupos 2 y 3	79
4.5 Propiedades de la muestra de agua tomada en la E/B Vista Alegre	80
4.6 Caudales y Alturas por equipos y para los distintos arreglos posibles	84
4.7 Mediciones de caudal en el múltiple de descarga de la E/B Vista Alegre	85
4.8 Mediciones de caudal en la entrada al tanque de la Estación Canaima	86
4.9 Potencia y Energía consumida por los grupos en los distintos arreglos posibles	88
5.1 Estimación de la población por el método lineal	90
5.2 Velocidades en las tuberías en base al caudal de diseño	92
6.1 Elementos de la estación de bombeo, con múltiples de succión y descarga	98

6.2 Análisis de los posible diámetros para la tubería del múltiple de descarga	100
6.3 Análisis de los posible diámetros para las tuberías secundarias de succión y descarga	101
6.4 Resultado de la selección de diámetros para todas las tuberías de la estación	104
6.5 Condición de cada válvula del diseño según la disposición de los equipos	105
6.6 Perdidas por tramo recto en la estación de bombeo	111
6.7 Perdidas de energía por accesorios	113
6.8 perdidas por tramos rectos sin elevaciones	114
6.9 Perdidas totales para tramos con elevaciones	115
6.10 Perdidas totales en la succión para el trabajo en paralelo	118
6.11 Perdidas totales en la descarga para el trabajo en paralelo	118
6.12 Perdidas totales en la succión en el trabajo en serie	120
6.13 Perdidas totales en la descarga en el trabajo en serie	120
6.14 Puntos de pendiente de la curva de la bomba	121
6.15 Características del la bomba KSB WKL 150	122
6.16 $NPSH_d$ y $NPSH_r$ para las bombas	126
6.17 Sobrepresiones del sistema	127
6.18 Válvulas presentes en la línea de aducción y estación de bombeo	127
6.19 Potencia al freno de los equipos	129
6.20 Potencia eléctrica de los motores	129

6.21 Especificaciones del motor eléctrico	130
6.22 Especificaciones del transformadores eléctricos	130
6.23 Especificaciones del conductor eléctrico	131
6.24 Características del tubo tipo conduit de canalizaciones	131
6.25 Características del tablero de control de cada motor eléctrico	133
7.1 Costos estimados por partida	136
7.2 Ahorro eléctrico	138
7.3 Ahorro en mantenimiento	139

INDICE DE GRAFICAS

4.1 Curva característica de los equipos 1 y 3 marca Byron Jackson	75
4.2 Curva característica de los equipos 2 y 4 marca Ingersoll Rand	76
4.3 Arreglo en paralelo de los equipos 1, 3 y 2	77
4.4 Arreglo en paralelo de los equipos 2, 4 y 1	78
4.5 Curva característica del sistema de la Estación Vista Alegre	82
4.6 Rango de operación de los grupos 1, 2 y 3 o 1, 3 y 4 al funcionar en paralelo	83
4.7 Rango de operación de los grupos 1, 2 y 4 o 2, 3 y 4 al funcionar en paralelo	83
4.8 Caudal bombeado por la estación Vista Alegre	86
4.9 Caudal recibido por la estación Canaima	87
6.1 Curvas de mejor y peor operación del sistema en paralelo	107
6.2 Curva del sistema operando en serie	109
6.3 Comparación grafica entre la curva del equipo seleccionado y la pendiente seleccionada	121
6.4 Punto de operación del sistema y los equipos funcionando en paralelo	123
6.5 Punto de operación de las bombas en serie	125

INDICE DE FIGURAS

3.1 Flujo de fluido unidimensional a través de una tubería de sección variable	15
3.2 Flujo estacionario, de fluido incompresible de viscosidad despreciable	20
3.3 Grafico de caudal máximo para evitar cavitación	31
3.4 Esquema simple de una estación de bombeo	34
3.5 Grafico de los valores de K vs L(longitud de tubería)	50
3.6 Grafico de coeficiente C vs Hm %	50
3.7 Grafico de x_a , x_b , t_a y t_b	51
3.8 Recta positiva de Bergeron, lugar geométrico de los puntos (h_a, Q_a) en función del tiempo t_a	52
3.9 Condiciones de b en $t+\Delta t$ dadas las de a y c	54
4.1 Plano de planta de la distribución de la estación de bombeo Vista Alegre	74
6.1 Distribución de la nueva estación de refuerzo	97
6.2 Esquema de conexión de la estación de bombeo al funcionar en serie	108
6.3 Distribución por nodos de los tramos de tubería que conforman la estación	110
6.4 Vista lateral derecha de la estación nueva	110
6.5 Vista frontal de la estación de bombeo	111

GLOSARIO DE TÉRMINOS

A (unidad):	Amperes.
A:	área transversal.
a:	Velocidad de propagación de las perturbaciones en el fluido.
C (Método de mandilase):	Coefficiente que depende de Ha
C:	Factor de colocación de la tubería.
Cos ϕ :	Factor de potencia.
Df:	Defunciones entre las fecha inicial y final del periodo.
Dint:	Diámetro interno de la tubería.
e ₁₋₂ :	Energía especifica por unidad de masa.
e:	Espesor de la tubería.
E:	Modulo de elasticidad del liquido
E ₁ Y E ₂ :	Energía total en el punto inicial y en el punto final
Ec:	Modulo de elasticidad de la tubería.
Em:	Emigraciones entre las fecha inicial y final del periodo.
f:	Factor de fricción de Darcy.
Ft:	Pies. (en ingles, Feet,)
G.P.M:	Galones por minutos, unidad de caudal.
g:	Magnitud de la fuerza de gravedad.

Ha:	Magnitud de la sobrepresión.
hab:	Habitantes.
hf 1-2:	Energía desde el punto inicial hasta el punto final convertida en perdidas.
IL:	Corriente en línea.
Im:	Inmigraciones entre las fecha inicial y final del periodo.
In (“):	Pulgadas. (en ingles, inches).
INCAU:	Ingeniería C.A.U ca.
INOS:	Instituto Nacional de obras sanitarias.
K (Método de mendiluce):	Coeficiente que depende de la longitud.
K:	Coeficiente de pérdidas para accesorios.
K0:	Periodo anual de crecimiento
K2:	Constante para el cálculo del consumo máximo horario.
K3:	Constante para el cálculo del caudal en caso de incendio.
Kt:	Constante para el cálculo del consumo máximo diario.
KVA:	Kilovoltio por ampere.
L:	Longitud de la tubería.
l:	Trabajo específico por unidad de masa.
Lts/s:	Litros sobre segundos.
m 1 y m 2:	Masas a la entrada y a la salida del volumen de control.
M.C.A:	Metros de columna de agua.

M.C.M:	Milipulgadas circulares.
m.s.n.m:	Metros sobre el nivel del mar.
m/s:	Metros sobre segundos.
mg/l:	Miligramos sobre litros.
mm/años:	Milímetros por año.
n y no:	Velocidades de giro al inicio y al final.
N:	Nacimientos entre las fecha inicial y final del periodo.
Np:	Intervalo de tiempo en años transcurrido entre los años de estimación
NPSH:	En ingles, Net positive succión head, Altura neta positiva en la succión.
NPSHd:	Altura neta positiva disponible en la succión.
NPSHr:	Altura neta positiva requerida en la succión.
Nq:	Numero especifico de vueltas.
P0:	Potencia en el eje del motor.
P2:	Población del último año
Patm:	Presión atmosférica.
Pb:	Potencia al freno en el eje de la bomba.
Pe:	potencia eléctrica.
Pn:	Población proyectada

Psia:	Libras/ pulgadas ² Absolutas. (en ingles, pounds/ square inches).
Psig:	Libras/ pulgadas ² relativas a la presión atmosférica. (en ingles, pounds/ square inches).
Ptp:	Población estimada para el tiempo tp.
Pu:	Potencia útil.
Pv:	Presión de vapor a las condiciones del fluido.
Px:	Presión en el punto x.
Q:	caudal
Q1-2:	Calor total desde el punto uncial hasta el final.
Qm:	Caudal medio.
Qmax/diario:	Caudal máximo diario.
r:	Ritmo anual de crecimiento de la población
Re critico:	Numero de Reynolds critico
Re:	Numero de Reynolds
rpm:	Revoluciones por minuto.
S:	Punto a la entrada de la bomba.
t:	Tiempo en años.
tc:	tiempo de cierre y/o apertura de válvulas.
td:	Tiempo de arranque y/o parada de los equipos.
tp:	Periodo en años para el cual se desea la proyección

V_c :	Voltaje en línea.
V_m :	Velocidad promedio o media.
V_s :	Velocidad media a la succión.
W_{1-2} :	Trabajo total desde el punto inicial hasta el punto final.
α :	Velocidad anual de crecimiento de la rugosidad (mm/años)
β :	Angulo de inclinación de la tubería.
γ :	Peso específico relativo al fluido.
Δp_{1-2} :	Diferencia de presiones del punto inicial al punto final.
Δz :	Diferencia de cotas entre dos puntos.
ϵ_0 :	Rugosidad relativa inicial (mm).
ϵ_t :	Rugosidad efectiva en el tiempo t (mm).
η :	Rendimiento.
η_{mec} :	Eficiencia mecánica.
η_{mot} :	Rendimiento del motor.
ν :	Viscosidad cinemática relativa al fluido.
ρ :	Densidad relativa al fluido.
T :	Periodo del sistema.
\dot{m} :	Caudal másico.
m^3/h :	Metros cúbicos por hora.
μ :	Viscosidad relativa al fluido.

INTRODUCCION

Las estaciones de bombeo son elementos de gran importancia dentro de los sistemas de agua potable de las grandes ciudades, debido a que estas son las responsables de transportar el agua a los distintos sitios de la ciudad con los parámetros operacionales adecuados para su correcto consumo. Es por ello que es de las instalaciones sanitarias más usadas en la redes de agua potable, por su versatilidad y bajos costos de operación.

Este trabajo está dividido en 7 capítulos, comprendidos por una breve información de la empresa, su historia y trabajos, planteamiento del problema, sus objetivos y alcances, una revisión bibliográfica de los distintos aspectos teórico para el diseño y funcionamiento de una estación de bombeo.

Seguidamente se encuentra un capítulo acerca de la situación actual de la estación de bombeo de Vista Alegre y de su línea de impulsión, así como distintos análisis de su funcionamiento, otro capítulo habla sobre las consideraciones para el diseño de la nueva estación, desde la población a ser abastecida, hasta la zona de influencia y consideraciones varias.

Un capítulo con el diseño de la nueva estación, la cual optimiza la operación de la estación de bombeo de Vista Alegre, desde su tubería de impulsión, los equipos electromecánicos, accesorios, los múltiples de succión y descarga para las distintas opciones de operación, serie o en paralelo, hasta los equipos eléctricos como interruptores y fusibles y sus conducciones. Por último un estudio económico sobre la construcción de la nueva estación y una comparación de niveles de consumo energético entre este proyecto y la implementación de más equipos en la estación de bombeo de Vista Alegre.

CAPÍTULO I

IDENTIFICACION DE LA EMPRESA

1.1. IDENTIFICACION DE LA EMPRESA

La empresa ingeniera C.A.U ubicada en el Estanque el Pinar, cota 905, fue fundada en el año 1987, teniendo como meta fundamental la realización de proyectos, instalación, mantenimiento y servicios de obras electromecánicas orientadas en los acueductos a nivel nacional, sin embargo su trabajo se enfoca en el área de mantenimiento de las estaciones de bombeo del sistema metropolitano, estando actualmente a cargo de 80 estaciones de bombeo y 34 pozos que conforman dicho sistema de abastecimiento de agua potable. A su vez la empresa ha realizado innumerables proyectos e instalaciones y ha prestado asesoría técnica en el manejo de acueductos.

Ingeniería C.A.U forma parte del grupo de contratistas de la empresa Hidrológica de la región capital Hidrocapital, creando así un equipo de trabajo el cual tiene la responsabilidad de asegurar la administración, operación, mantenimiento, aplicación 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 el estado Miranda.

La empresa tiene como misión no solo prestar un excelente servicio de abastecimiento de agua potable y de recolección, tratamiento y deposición de las aguas servidas, sino poner en marcha proyectos dirigidos a mejorar las estaciones que se encuentran actualmente operando con el fin de disminuir los consumos eléctricos y le deterioro de los equipos que las conforman, para que de este modo el sistema vaya poco a poco haciéndose más eficiente y los venezolanos puedan contar con un mejor servicio.

CAPÍTULO II

DEFINICION DEL PROYECTO

2.1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

Actualmente la ciudad de Caracas es surtida por tres grandes acueductos TUY I, TUY II y TUY III, estos a su vez surten a estaciones de bombeo de menor envergadura, en la ciudad de Caracas se cuentan con aproximadamente 79 estaciones, dentro de las cuales está la estación de bombeo de Vista Alegre.

La estación de bombeo Vista Alegre es la primera y más importante de las estaciones que conforman el llamado eje Vista Alegre-El Junquito, el cual está conformado por las estaciones Canaima, Luis Hurtado e Himalaya, dichas estaciones fueron diseñada para elevar el nivel energético del agua potable y posteriormente abastecer a las zonas residenciales ubicadas en El Junquito, de allí la importancia de que opere de la manera más eficiente y confiable posible. Dicho eje hoy en día se ve amenazado por los desarrollos no planificados a lo largo de la tubería de impulsión lo que conlleva a una alteración de las condiciones originales de diseño. Debido a esto se plantean dos soluciones, la primera consiste en continuar supliendo la demanda mediante la colocación de más equipos de bombeo, y la segunda en optimizar la estación de bombeo de Vista Alegre de manera de poder satisfacer las necesidades a distintos niveles de bombeo y hacerlo de la manera más eficiente tomando en cuenta los parámetros de confiabilidad, operación y mantenimiento.

2.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el eje de abastecimiento Vista Alegre-El Junquito, en su primer tramo (Vista Alegre-Canaima) presenta una gran deficiencia debido a la extracción de caudales no controlados a cotas inferiores, al grado que de los 270 lts/s que se bombean por la estación, con sus tres equipos de 90 lts/s cada uno, solo logran llegar a Canaima 170lt/s lo que genera una gran ineficiencia en el sistema y se traduce en pérdidas económicas y energéticas, de allí la necesidad de recuperar estos 100 lts/s. Actualmente la compañía prestadora del servicio de agua potable planteó una solución la cual consiste en suplir las pérdidas mencionadas anteriormente mediante la instalación de una bomba adicional, sin embargo se considera que la medida no solucionara la situación actual en vista de que las pérdidas energéticas serán mayores.

En tal sentido se considera una solución alternativa, la cual consiste en diseñar una estación de bombeo paralela a la estación Vista Alegre con una aducción independiente que abastezca a las zonas aledañas y de esta manera asegurar que el caudal bombeado sea el caudal demandado por la línea y a las cotas inferiores.

La mayor cantidad de extracción de caudal ocurre en los primeros kilómetros de la tubería de aducción, en donde la altura estática es aproximadamente la mitad de la altura de bombeo de la estación Vista Alegre y tomando en cuenta la vulnerabilidad del sistema se plantea como parámetro que los equipos a seleccionar cumplan con $H_b = \frac{1}{2} H_{v.a}$, en donde H_b sería la altura estática diseñada para la nueva estación y $H_{v.a}$ es la altura estática de la estación Vista Alegre, y de esta manera poder cambiar la conexión de los nuevos grupos de bombas conectadas en paralelo a serie lo que permitirá realizar mantenimiento o solventar alguna falla técnica que se pueda presentar en el futuro en la estación Vista Alegre, lo que garantizará un buen funcionamiento de la línea a largo plazo sin el derroche energético que se presenta actualmente además de aumentar la confiabilidad del sistema.

2.3. OBJETIVOS Y ALCANCES

2.3.1. OBJETIVO GENERAL

- Optimizar el sistema de abastecimiento de agua potable de la Estación de Bombeo Vista – Alegre

2.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Estudiar sistemas de bombeo operando en serie y/o en paralelo.
- Definir las perdidas energéticas existentes en el sistema de abastecimiento.
- Calcular los parámetros hidráulicos y mecánicos que regirán la nueva estación de bombeo.
- Determinar las presiones de trabajo máximas y mínimas posibles del sistema.
- Calcular los parámetros eléctricos básicos que regirán la nueva estación de bombeo.
- Seleccionar los equipos hidráulicos, mecánicos y eléctricos a ser utilizados en la estación de bombeo
- Diseñar los múltiples de succión y descarga que permita cambiar la disposición de las bombas de paralelo a serie y viceversa.
- Determinar los parámetros técnico – Económicos para la realización del estudio de factibilidad del proyecto.

2.3.3. ALCANCES

- Determinar el área de influencia de la nueva Estación de Bombeo
- Determinación de las pérdidas energéticas de la estación de bombeo basado en la extracción de caudal existente.
- Determinar los aspectos hidráulicos y mecánicos referentes al sistema de tubería.
- Determinación de los parámetros eléctricos básicos, sin incluir aquellos referentes a la instrumentación y control de los mismos.

- Determinación y disposición de los equipos mecánicos, eléctricos e hidráulicos.
- Realización de un diseño de sistema de válvulas para la conexión de las bombas, que permita disponer de las mismas en serio y/o paralelo.
- Determinación de las presiones máximas y mínimas posibles en el sistema.
- Determinación de la línea piezométrica.
- Realización de un estudio técnico económico para la elaboración de la estación de bombeo.
- Cálculo de las pérdidas en los múltiples tanto de succión como de descarga

CAPÍTULO III

FUNDAMENTO TEORICO

3.1 Proyección de la población

El estudio de la población es de vital interés para las actividades de planificación dentro de los sectores como sanidad, vivienda, seguridad social, empleo, servicios públicos, conservación del medio ambiente entre otros. Las proyecciones de la población constituyen una de las actividades más importantes para la realización de actividades económicas y sociales de un país en vista de que dependerán de la misma las medidas a ser tomadas para crear la visión a futuro de un proyecto y asegurar que el mismo se adaptará a la sociedad en un tiempo estimado.

3.1.1 Métodos matemáticos para realizar la proyección de la población.

Los métodos matemáticos que se aplican en el cálculo de la población futura del país, se basan en ecuaciones que expresan el crecimiento demográfico en función del tiempo, dicho crecimiento medido y expresado en una tasa o en un porcentaje de cambio, se obtiene a partir de la observación o estimación del volumen poblacional en dos o más fechas del pasado reciente. Por lo general, los censos de población, realizados con un intervalo aproximado de diez años, permiten dicha medición. Por otro lado, si no existe esa información, es válido utilizar por analogía, tasa de

crecimiento demográfico de otros países que hayan experimentado circunstancias similares.

3.1.2 Método del Crecimiento Aritmético (Cambio Lineal).

Es 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. Para esto se supone una relación de aumento lineal de la población de la siguiente naturaleza:

$$p_n = p_2 + k_0 * t_p \quad (3.1)$$

Donde:

p_n = Poblacion proyectada

p_2 = Poblacion del ultimo censo realizado

k_0 = Periodo anual de crecimiento

t_p = Periodo en años para el cual se desea hacer el crecimiento

$$k_0 = \frac{p_2 - p_1}{N_p} \quad (3.2)$$

Donde:

p_2 y p_1 = Son las cifras de poblacion.

N_p = Intervalo transcurrido en años entre los dos censos.

Antes de aplicar este método se debe considerar, además de su relativa sencillez, que el supuesto básico de un aumento constante de población, significa en realidad un ritmo descendente del crecimiento de la población.

3.1.3 Método del Crecimiento Geométrico (Cambio Geométrico)

El método de crecimiento geométrico supone que la población aumenta constantemente en una cifra proporcional a su volumen cambiante. Para obtener la población futura se aplica al último dato poblacional que se tenga, la fórmula del "interés compuesto" manteniendo constante la misma tasa anual de crecimiento del período anterior:

$$p_n = p_2 * (1 + r)^{t_p} \quad (3.3)$$

Donde:

p_n = Poblacion proyectada

p_2 = Poblacion del ultimo censo

r = ritmo anual de crecimiento de la poblacion

t_p = periodo en años para el cual se desea hace la estimacion

$$(1 + r) = \sqrt[N_p]{\frac{p_2}{p_1}} \quad (3.4)$$

Donde:

p_2 y p_1 = Son las cifras de poblacion.

N_p = Intervalo transcurrido en años entre los dos censos.

De esa manera se realiza una extrapolación geométrica del ritmo de aumento de la población indicado por la comparación del último censo y en anterior.

$$p_n = p_2 * \sqrt[n_p]{\frac{p_2}{p_1}}^{t_p} \quad (3.5)$$

Se debe tomar en cuenta que no es posible suponer que la población de un país crecerá durante un período indefinido a un ritmo constante, pues llegaría a ser tan grande que resultarían casi imposibles más aumentos. Por tanto, conviene limitar la extrapolación geométrica a períodos, si posible, suponer que población aumentará siguiendo una proporción geométrica, ya sea porque los niveles de natalidad, mortalidad y migraciones se mantendrán constantes, o porque las variaciones de alguno de dichos factores se verán compensadas con variaciones en sentido contrario, de otro de los factores.

También deberá escogerse con sumo cuidado la población base de la proyección, como el período al cual se refiere la tasa de crecimiento que se va aplicar. Si han transcurrido varias décadas desde la fecha a la cual se refiere la población base, la extrapolación geométrica resultará cada vez menos fiable y puede conducir a una exageración acumulativa de la población acumulada. Ocurrirá del mismo modo, si la tasa de crecimiento seleccionada pertenece a un período muy lejano en el tiempo, cuando el crecimiento alcanzaba niveles distintos.

3.1.4 Método del Crecimiento Parabólico.

El método del crecimiento parabólico es utilizado en los casos en que se dispone de estimaciones de la población referidas a tres o más fechas pasadas y la tendencia

observada no responde ni a una línea recta, ni a una curva geométrica o exponencial, es factible el empleo de una función polinómica siendo las más utilizadas las de segundo o tercer grado.

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

La Fórmula general de las funciones polinómicas de segundo grado es la siguiente: $Y = a + bx + cx^2$, la misma que aplicada con fines de extrapolación de la población se simboliza de la siguiente manera:

$$p_{tp} = a + b * t_p + c * t_p^2 \quad (3.6)$$

Donde:

t_p = Intervalo cronológico en años, medido desde la fecha de la primera estimación.

p_{tp} = Poblacion estimado para el tiempo t_p años despues de la fecha fijada

$a; b; c$ = Constantes de la ecuación de 2do grado, las cuales se pueden calcular resolviendo la misma para los 3 censos.

En el caso de tener resultados de 4 censos se puede aplicar el método mediante una curva de 3er grado, con lo cual no solo se tomar 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.

Curva parabólica de 3er grado:

$$p_{tp} = a + b * t_p + c * t_p^2 + d * t_p^3 \quad (3.7)$$

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

3.1.5 Método de la extrapolación logarítmica de los datos transformados

Este método recaen en la búsqueda de una solución para el problema que se presenta en el caso anterior cuando se extrapola la población a un periodo muy grande, en muchos casos, este defecto puede modificarse aplicando la extrapolación parabólica a los logaritmos de las cantidades, en vez de aplicarlas a las cifras en sí. La extrapolación de logaritmos implica una proyección de ritmos cambiantes de crecimiento, en vez de cantidades absolutas.

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

$$\log p_t = a + b * t_p + c * t_p^2 \quad (3.8)$$

$$\log p_t = a + b * t_p + c * t_p^2 + d * t_p \quad (3.9)$$

3.1.6 Método demográfico

Existen 3 factores responsables del cambio cronológico de la población: nacimientos, defunciones y migraciones, para poder cuantificar el cambio numérico de

la población a causa de estos factores se utiliza la llamada ecuación compensadora.

La ecuación compensadora se define:

$$p_{tp} = p_0 + (N - Df) + (I_m - E_m) \quad (3.10)$$

Donde:

p_{tp} = Poblacion proyectada

p_0 = poblacion del ultimo censo

N = Nacimientos entre la fecha inicial y la final del periodo en estudio

Df = defunciones entre la fecha inicial y la final del periodo de estudio

I_m = Inmigraciones entre la fecha inicial y la final el periodo de estudio

E_m = Emigraciones entre la fecha inicial y la final del periodo de estudio

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

3.2.1 Conservación de la masa: Ecuación de continuidad

La ley de conservación de la masa para efectos del estudio de los fluidos es expresada mediante la ecuación de continuidad, la cual dependiendo de las propiedades del fluido en estudio será más o menos complicada. Para efectos del trabajo que a continuación se presenta la ecuación se estudiará sólo para el caso de un flujo de fluido incompresible, en donde solo se presentarán cambios en sus propiedades en la dirección principal del movimiento, la densidad del mismo será tomada como una constante, la

velocidad vendrá representada por el valor promedio de las distintas velocidades presentes en el perfil descrito por el flujo de manera de caracterizar cinemáticamente el régimen en una sección particular de la tubería y a su vez las mismas se considerarán inelásticas. Tomando las consideraciones anteriores se presenta el siguiente análisis:

Donde: V_1 y $V_2 = f(x)$

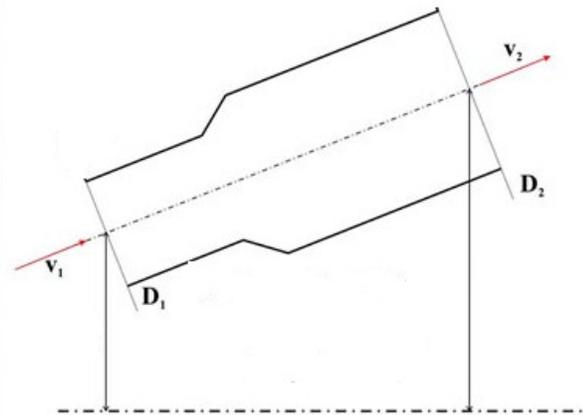


Figura 3.1 Flujo de fluido unidimensional a través de una tubería de sección variable.

Conservación de la masa:

$$m_1 = m_2$$

$$\rho \cdot A_1 \cdot V_1 = \rho \cdot A_2 \cdot V_2$$

$$\frac{d(A_1 \cdot V_1)}{dx} = \frac{d(A_2 \cdot V_2)}{dx} = \frac{dQ}{dx}$$

Integrando:

$$\int \frac{d(A_1 \cdot V_1)}{dx} = \int \frac{d(A_2 \cdot V_2)}{dx} = \int \frac{dQ}{dx} \quad (3.11)$$

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 = Q = \text{Constante} \quad (3.12)$$

Siendo Q el caudal que pasa por la sección transversal (A) del conducto, y como se observa el mismo será constante no importa cuántas variaciones de A existan

siempre y cuando la densidad del fluidos que pasa por la misma sea constante, de lo contrario el estudio debe realizarse de forma másica.

3.2.2 Flujo de fluidos viscosos

La viscosidad es la propiedad de los fluidos en la cual se mide la resistencia de los mismos para alterar su flujo mediante la aplicación de una fuerza, es la razón por la cual un fluido que presente alta viscosidad tendrá mayor resistencia a fluir si se compara con uno de menor viscosidad. Dicha propiedad se determina calculando la intensidad de la fuerza con la que una capa de fluido en movimiento arrastra consigo a las capas adyacentes del mismo, para ello se utiliza un viscosímetro. Esta propiedad puede verse alterada si el fluido se expone a cambios de temperatura, ya que la misma es directamente proporcional a la densidad e inversamente proporcional a la temperatura.

Los flujos viscosos incluyen una amplia gama de flujos internos como lo son: flujo en tubería, flujo en canales o conductos entre otros. Para estos casos la presencia de la viscosidad trae consigo perdidas considerable de energía producto de la resistencia presente en los contornos de la tubería lo que incrementa considerablemente los esfuerzos contantes producto de las variaciones de velocidades originadas por la condición de no deslizamiento ($v=0$, en los contornos).

3.2.3 Numero de Reynolds

La transición de flujo laminar a flujo turbulento depende de la geometría, la rugosidad, la velocidad de flujo, la temperatura de la superficie y el tipo de fluido. Todos estos factores se ven reflejados en el efecto que producen las fuerzas viscosas y cinemáticas en el comportamiento del fluido, es por esto que se llegó a la conclusión que el régimen de flujo depende de la razón entre ellas a lo cual se le denominó número de Reynolds.

$$Re = \frac{\text{fuerzas inerciales}}{\text{fuerzas viscosas}} = \frac{V_m * D}{\nu} = \frac{\rho * V_m * D}{\mu} \quad (3.13)$$

Donde:

$V_m =$ *velocidad de flujo promedio*

$D =$ *longitud característica de la geometría (para tuberías circulares, diámetro)*

$\rho =$ *densidad del fluido*

$\mu =$ *viscosidad del fluido*

3.2.4 Flujo interno en tuberías

3.2.4.1 Flujo laminar

En un flujo laminar la corriente es relativamente lenta y no es perturbada por las posibles protuberancias del contorno, de forma que si por cualquier circunstancia se inicia un fenómeno de turbulencia, la viscosidad lo elimina en vista de que la misma es relativamente grande, y por esta razón el estudio del comportamiento de los flujos laminares se aplica tanto a tuberías lisas como a rugosas. Los valores altos de viscosidad traen por consiguiente que las fuerzas viscosas también sean muy grandes

lo que hace que el numero de Reynolds disminuya, por lo cual se determina que para valores del mismo menores de 2300 (Valor critico de Reynolds) el flujo es considerado laminar.

Para estos flujos la resistencia solo se ve afectada por las fuerzas viscosas por lo que los esfuerzos solo dependerán de la viscosidad, lo que determina que para flujo laminar el factor de fricción es representado según la siguiente ecuación:

$$f = \frac{8*\tau_w}{\rho*V_m^2} \quad (3.14)$$

$$\tau_w = \mu * \frac{dU}{dy}$$

Sustituyendo

$$f = \frac{64*\mu}{\rho*D*V_m} = \frac{64}{Re} \quad (3.15)$$

3.2.4.2 Flujo turbulento

El flujo turbulento se caracteriza porque el fluido continuamente se mezcla, de forma caótica, como consecuencia de la ruptura de un flujo ordenado de vórtices, que afectan zonas en dirección del movimiento, en consecuencia se presentan grandes valores de velocidad por lo que las viscosidades son muy pequeñas y las fuerza inerciales superan en gran magnitud a las fuerzas viscosas, lo que genera grandes números de Reynolds, superiores al valor critico. De esta manera se afirma que el numero de Reynolds critico (Re=2300) representa la transición de un flujo laminar a turbulento.

3.2.5 Ecuación de la Energía: Ecuación de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli es una relación aproximada entre la presión, la velocidad y la altura la cual es aplicable sólo para flujo de fluidos estacionarios e incompresibles en donde las fuerzas netas de fricción son despreciables, es decir se supone un fluido con viscosidad cero, un fluido no viscoso, y donde no existe ninguna transferencia de calor. Es bien sabido que todos los fluidos presentan viscosidad por lo que la ecuación de Bernoulli no puede ser aplicable para todo un campo de flujo de interés práctico, sin embargo la simplicidad de la misma la ha hecho muy útil para la aproximación de resultados los cuales suelen ser muy apropiados para fluidos donde no se habla de viscosidad cero sino de tener efectos viscosos significativamente despreciables en comparación a los efectos inerciales, gravitacionales y de presión.

Según las consideraciones anteriormente descritas se analiza el flujo de un fluido estacionario incompresible, y viscosidad despreciable.

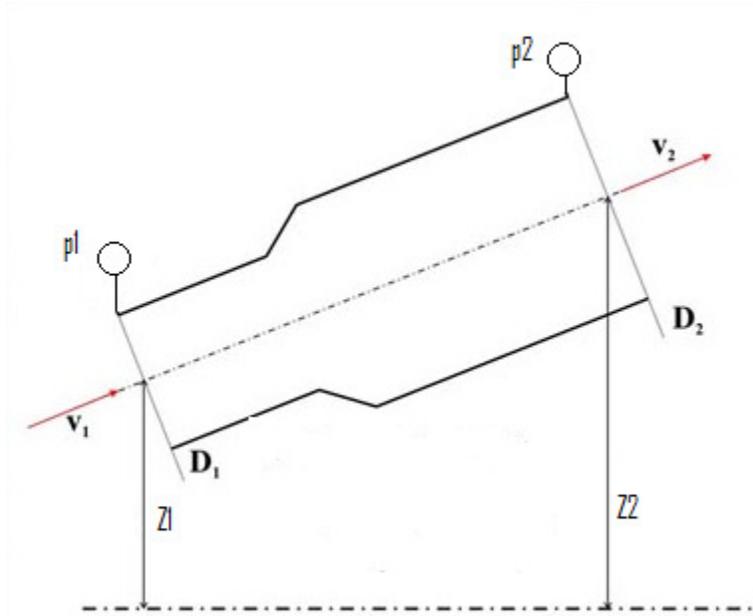


Figura 3.2 flujo estacionario, de fluido incompresible de viscosidad despreciable

La energía total en cualquier punto del ducto se define como el compromiso entre la presión, la velocidad y la altura:

$$H = \frac{P_x}{\gamma} + \frac{V_x^2}{2 * g} + Z_x \quad (3.16)$$

Siendo x el punto de estudio en el ducto.

Donde:

$$\frac{P_x}{\gamma} = \text{Es la carga o presión estática.}$$

$$\frac{V_x^2}{2 * g} = \text{Es la energía cinética}$$

$$Z_x = \text{Es la altura o energía potencial}$$

La suma entre los términos

$Z_x + \frac{P_x}{\gamma}$ se refiere a la carga piezométrica en el punto.

De acuerdo con la ley de la conservación de la energía se realiza un balance entre los puntos 1 y 2, y se determina:

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

Siendo h_{f1-2} la energía que se convierte en pérdidas desde el punto 1 al punto 2, la cual puede ser producto de factores en la tubería, bien sean accesorios o las mismas pérdidas relacionadas por la fricción en el tramo recto.

3.2.6 Pérdidas originadas en sistemas de tuberías

Las pérdidas de carga, o pérdidas de presión en una tubería representan la potencia necesaria, bien sea por un ventilador o por una bomba, para mantener el flujo y trasladarlo según sea el sistema. Estas pérdidas viene originadas por los efectos de fricción el los contornos de las tuberías, el rozamiento de unas capas de flujo contra otras y para el caso de un flujo turbulento, el coque de las partículas entre sí, lo que determina que la caída de presión se debe únicamente a los efectos viscosos.

Para cualquier tipo de flujo de fluidos internos ya sea laminar o turbulento las pérdidas de carga se expresan de la siguiente manera:

$$\Delta P_l = f * \frac{L}{D} * \frac{V_m^2}{2 \cdot g} \quad (3.18)$$

Donde:

L

= Longitud del tramo de tubería al cual corresponden las pérdidas calculadas

D = Longitud característica de la geometría en estudio

(diámetro para tuberías circulares)

$\frac{V_m^2}{2 * g}$ es la presión dinámica

f = el factor de fricción adimensional de Darcy

Como se expresa en la ecuación (3.14) al sustituir el factor de Darcy en la ecuación de pérdida de presión se obtiene que para fluidos en régimen laminar el factor adimensional de fricción se calcula de la siguiente manera:

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

A diferencia del flujo laminar en el caso del flujo turbulento el análisis del comportamiento del perfil de velocidades se basa en mediciones por lo que su estudio es de tipo empírico. La razón, es que debido al gran desorden presente en las partículas no es posible modelar un perfil de velocidades, por lo que se aproxima un valor tomando como constante el valor medido de la velocidad.

Los elevados valores del número de Reynolds característicos de este tipo de fluidos reflejan que el valor neto de las fuerzas viscosas no es lo suficientemente grande como para evitar que la rugosidad no afecte en el comportamiento del mismo, es por esta razón que para el caso de tuberías rugosa en régimen turbulento el factor de fricción no puede ser calculado de la misma manera ya que se ve afectado tanto por el Reynolds como por la rugosidad relativa de la tubería, es por esta razón que el 1939 Cyril F. Colebrook desarrolla una expresión que combinan los datos disponibles

para flujo en transición y turbulento en tuberías lisas y rugosas. Se tiene la ecuación de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right] \quad (3.19)$$

No obstante la ecuación de Colebrook aun presenta inconvenientes ya que la misma es demasiado compleja, por esta razón Swamee propone una aproximación un poco más sencilla:

$$f = \frac{0.25}{\log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right)^2} \quad (3.20)$$

Años más tarde en 1944 Lewis F. Moody produjo una expresión grafica de f mediante los trabajos de Hunter Rouse los cuales se basaron en la producción de una representación de f como función de Re y $Re\sqrt{f}$. A este grafico se le conoce comúnmente como el diagrama de Moody y es actualmente muy utilizado en la práctica, el mismo representa el factor de fricción de Darcy como función del Re y la rugosidad relativa en una rango que va desde flujo laminar pasando por transitorio hasta flujo turbulento. Cabe destacar que para flujo laminar el factor de fricción disminuye con numeros de Reynolds crecientes y es independiente de la rugosidad de la tubería como se había demostrado anteriormente.

Cualquier elemento de produzca una perturbación en el flujo natural del fluido dentro de una tubería o fuera de ella genera pérdidas. A aquellas perturbaciones producidas por los accesorios colocados en el sistemas son llamadas perdidas menores, cabe destacar que en la mayoría de los casos efectivamente resultan ser menores que las perdidas por ficción, pero sin embargo puede darse el caso de sean mayores, todo depende de en qué manera los accesorios perturben el flujo.

Dichas pérdidas son representadas en función de un coeficiente el cual depende del tipo de accesorio presente en la tubería, al mismo se le da el nombre de coeficiente de pérdida o resistencia:

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

Donde:

h_f = *Es la perdida de carga producida por la interseccion del accesorio*

k_l = *Coeficiente de perdida o resistencia*

V^2 = *Velocidad promedio dentro de la tuberia*

Se puede observar que la ecuación anteriormente descrita viene representada por un valor único de velocidad el cual se refiere al valor promedio de la misma dentro de la tubería, sin embargo si se presentase un cambio en la sección transversal, la velocidad tendría valores diferentes para aguas arriba y aguas abajo del accesorio. El cálculo del valor de pérdidas menores para este caso es mucho más complejo, sin embargo para todos los casos se trata de pérdidas de cargas, por lo que se puede realizar un balance de energía (Ecuación de Bernoulli) entre un punto antes y un punto después del accesorio, no muy alejados entre sí ya que entre más se alejen el valor será menos exacto ya que se estarán tomando valores de pérdidas de fricción del tramo de tubería. Entre los accesorios más comunes se tienen: Válvulas, ramificaciones, conexiones, flexiones, codos, expansiones, contracciones, medidores de flujos, salidas, entradas, entre otros.

3.2.7 Envejecimiento de las tuberías.

Las tuberías con el tiempo sufren de cierta reducción en su capacidad portadora de líquido, debido a la corrosión experimentada, deposiciones internas de material, químicos constituyentes del agua y del material de la tubería que aumentan el factor de fricción y disminuyen la longitud característica, lo que trae consigo una reducción del área de transporte. Este aumento de la rugosidad puede ser cuantificado mediante una expresión desarrollada por Colebrook y White en donde se demuestra que la disminución de la capacidad portadora se debe casi exclusivamente al aumento de la rugosidad con el tiempo.

$$\varepsilon_T = \varepsilon_0 + \alpha T \quad (3.22)$$

Donde:

ε_T : rugosidad efectiva después de T años, (mm).

ε_0 : rugosidad efectiva inicial, (mm).

α : Velocidad anual de crecimiento de rugosidad, (mm/año).

T= Tiempo en años.

Grupo	Características del agua	Valores de α (mm/año)		
		Mínimo	Medio	Máximo
1	Aguas poco mineralizadas. No agresivas, con poco contenido de materia orgánica	0.005	0.025	0.055
2	Aguas poco mineralizadas pero corrosivas (PH reducido), de contenido de hierro y materia orgánica inferior a 3 mg/l	0.055	0.07	0.18
3	Aguas muy corrosivas (PH muy alto), contenido de cloruro y sulfatos menores a 150 mg/L y hierro superiores a 3 mg/L	0.18	0.2	0.4
4	Aguas corrosivas (PH reducido), contenido de cloruros y sulfatos entre 500 y 700 mg/L considerable materia orgánica	0.4	0.51	0.6
5	Aguas muy mineralizadas, de gran dureza PH superiores a 7, residuos sólidos superiores a 2000 mg/L	0.6	0.7	1

Tabla 3.1 Valores de α según las características del agua

3.2.8 Cavitación

La cavitación es un fenómeno muy importante de la mecánica de los fluidos y de particular influencia en el funcionamiento de toda máquina hidráulica. Para el estudio que se presenta en este trabajo se enfocará éste fenómeno exclusivamente a bombas centrifugas. Cuando se produce cavitación, la bomba no solamente no cumple con su servicio básico de bombear un líquido sino que también experimenta daños internos, fallas de los sellos, rodamientos, etc.

El traslado de energía mecánica al fluido bombeado, en otros términos el desarrollo de presión en la bomba, necesariamente crea regiones dentro del rodete en

las que la presión decae por debajo la presión estática que se tiene a la entrada del rodete. Dependiendo del nivel de la presión estática puede ocurrir la evaporación o formación de burbujas de vapor de un líquido ya que el mismo se conduce hacia una región donde la presión se reduce a la presión del vapor del fluido a las condiciones del sistema, con la consecuente condensación, colapso o implosión de las burbujas cuando éstas pasan a una región donde la presión estática está sobre la presión del vapor originando así una erosión en el material del rodete, lo que trae consigo una disminución de la eficiencia de la bomba.

3.2.8.1 Condiciones de la cavitación

La presión estática en algún punto dentro de la bomba puede bajar hasta un nivel inferior a la presión de vapor bajo dos condiciones:

1. Porque la caída de presión actual en el sistema externo de succión es mayor que la que se consideró durante el diseño del sistema. Esto resulta en que la presión disponible en la succión de la bomba (NPSHa) no es suficientemente alta para suministrar la energía requerida para superar la caída de presión interna (NPSHr) propia del diseño de la bomba.

2. Porque la caída de presión actual dentro de la bomba (NPSHr) es más grande que la informada por el fabricante y que se usó para seleccionar la bomba.

3.2.8.2 Efectos de la cavitación

Efectos mecánicos: Como se mencionó anteriormente el colapso de las burbujas de vapor producidas por el descenso de la presión estática dentro de una bomba centrífuga trae consigo el deterioro de las partes mecánicas, ya que el choque de las mismas con la estructura ataca principalmente a los pozos y ranuras de la superficie metálica por lo que en poco tiempo puede ocasionar daños considerables a la maquinaria lo que afecta al desempeño de la misma. Es por esta razón que se resalta la importancia del buen acabado de la superficie interna de la bomba.

Efectos químicos: A raíz de las implosiones de las burbujas se liberan iones de oxígeno que atacan las superficies metálicas erosionándolas.

3.2.8.3 Consecuencias de la cavitación

- Pérdida de sólidos en las superficies límites (llamado erosión por cavitación o PITTING)
- Ruidos generados sobre un ancho espectro de frecuencias (frecuencia de golpeteo: 25.000 c/s).
- Pérdidas y alteraciones de las propiedades hidrodinámicas.
- Altas vibraciones producto del choque de las burbujas contra las superficies internas de la bomba.

3.2.8.4 Tipos de cavitación

- La Cavitación Vaporosa: Se refiere a la cavitación por la formación y colapso de las burbujas que se forman debido a la vaporización del líquido bombeado. Es la forma de cavitación más común en las bombas de proceso. Generalmente ocurre debido a un insuficiente NPSH disponible o a fenómenos de recirculación interna. Se manifiesta como una reducción del desempeño de la bomba, ruido excesivo, alta vibración y desgaste en algunos componentes. La extensión del daño puede ir desde unas picaduras relativamente menores después de años de servicio, hasta fallas catastróficas en un corto periodo de tiempo.
- La Cavitación Gaseosa: Se refiere a la cavitación por la formación y colapso de las burbujas que se forman por la presencia de gases disueltos en el líquido bombeado (generalmente aire pero puede ser cualquier gas presente en el sistema). Esta cavitación raramente produce daño en el impulsor o carcasa. Su efecto principal es una pérdida de capacidad. No debe confundirse con el

ingreso de aire o bombeo de líquidos espumosos, situaciones que no necesariamente producen cavitación pero sí reducción de capacidad, detención del bombeo y otros problemas.

3.2.9 NPSH (Net Positive Suction Head).

Para evitar las consecuencias anteriormente descritas producto de la cavitación, se requiere un cierto margen entre la presión estática a la entrada del rodete y la presión de vapor del fluido. Debido a que es difícil determinar en forma directa, la presión en la entrada del rodete, se utiliza la presión total, es decir la energía contenida en el fluido, medida en un punto específico aguas arriba de la bomba, como valor de medida referencial y es la diferencia entre esta presión total y la presión del vapor lo que se conoce como NPSH.

El NPSH aparte de variar con el caudal también se modifica con la temperatura ya que la presión de vapor (P_v) es función de la misma, es por esta razón que es dependiente de tipo de fluido que se bombee, ya que existe una curva única de presión de vapor vs temperatura para cada tipo de fluido.

3.2.9.1 NPSH requerido (NPSHr)

Se refiere a la presión absoluta mínima a la entrada del rotor lo que garantiza un flujo sano en el interior de la bomba, es decir representa la energía mínima que se requiere para que la presión estática a la entrada de la bomba no alcance los valores de la presión de vapor del fluido a las temperaturas de trabajo. Es un dato básico característico de cada tipo de bomba, variable según el modelo, tamaño y condiciones de servicio, por tanto es un dato que facilitan los fabricantes.

3.2.9.2 NPSH Disponible (NPSHd)

Se refiere a la presión absoluta total a la entrada del rotor como resultado final de la aspiración específica de las condiciones de la instalación, es decir es la energía disponible que se tiene a la entrada la bomba. Es función de la instalación e independiente del tipo de bomba y su conocimiento es de vital importancia para la instalación ya que permite una elección adecuada de la bomba evitando así posibles defectos a futuro.

El cálculo del NPSHd se realiza de la siguiente manera:

$$NPSHd = h_s + \frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} - Z_s \quad (3.23)$$

$$NPSHd = \frac{P_s + P_{atm} - P_v}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2 * g} \quad (3.24)$$

Donde:

“s” es el punto a la entrada de la bomba

P_v = Presión de vapor a las condiciones del fluido

V_s = Velocidad promedio del fluido a entrada de la bomba

P_{atm} = Presión atmosférica a la cual se ve sometida el sistema

Según lo expuesto anteriormente la condición para que la bomba se encuentre en un rango seguro de trabajo, libre de cavitación se refiere a:

$$NPSHd \geq NPSHr \quad (3.25)$$

Sin embargo esta condición no asegura la completa ausencia de cavitación, ya que la misma esta directamente ligada al caudal bombeado, lo que significa que si el mismo se reduce a limites en los que se puede generar recirculación en la entrada del rotor, se puede provocar localmente una disminución de la presión la cual puede llegar a valores que alcancen la presión de vapor del fluido a las temperaturas de trabajo.

Gráficamente se puede visualizar el rango de trabajo de la bomba según el compromiso del NPSHr, el NPSHd y el caudal, en donde el punto de corte de estos 3 elementos representa el caudal máximo que puede entregar la bomba sin que haya cavitación.

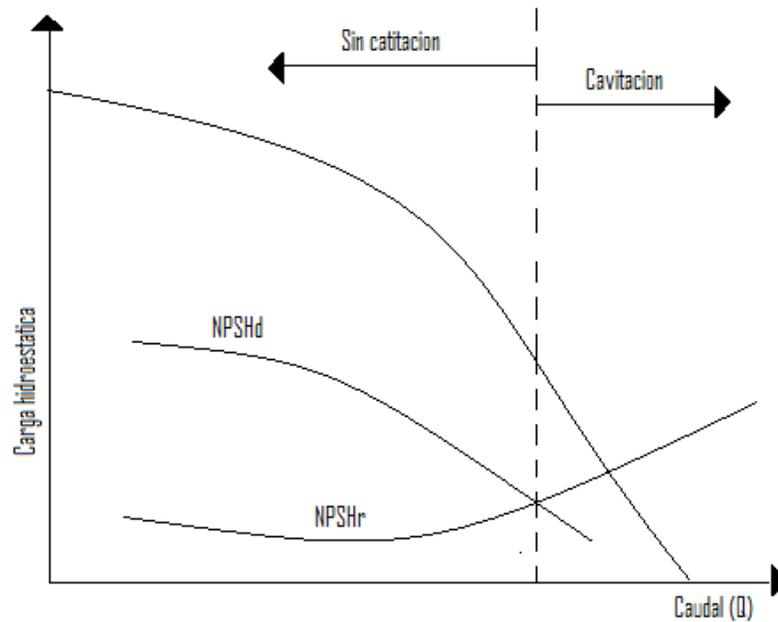


Figura 3.3 Grafico del caudal máximo para evitar la cavitación

3.2.10 Régimen permanente

La base del estudio de sistemas de transporte de agua potable recae sobre la premisa de que dicho flujo se encuentra en un régimen permanente es decir, que sus propiedades, tales como masa, peso específico, presión, velocidad, viscosidad entre otras no sufren variaciones a través del tiempo, esto facilita en gran magnitud el estudio y permite desarrollar la ecuación general de las turbomaquinas hidráulicas.

3.2.10.1 Ley de la conservación de la energía.

Para realizar el estudio de un sistema de transporte de fluido es fundamental la consideración de la conservación de la energía, para ello se utiliza la primera ley de la termodinámica también conocida como ley de la conservación de la energía, la cual plantea que al igual que la materia la energía no se crea ni se destruye es decir, define el cambio de estado entre un punto inicial (1) y un punto final (2) como se expresa:

$$Q_{1-2} = E_2 - E_1 + W_{1-2} \quad (3.26)$$

Donde:

Q_{1-2} = Calor transmitido al sistema en el transcurso de 1 a 2

E_2 = Energía contenida en el sistema al final del mismo

E_1 = Energía contenida en el sistema al inicio del mismo

W_{1-2} = El trabajo efectuado por el sistema durante el proceso

Esta ecuación es usada frecuentemente para la aplicación de la ecuación de Bernuolli, pero esto solo es válido para sistemas donde los efectos viscosos puedan ser despreciados, caso que no se aplica para sistemas de tuberías y calanes abierto, sin embargo es posible realizar un balance de energía específica entre la entrada y la salida del sistema.

Se debe considerar que para el estudio de las turbomáquinas el calor generado en el volumen de control es considerado depreciable por lo que el balance a la entrada y a la salida de la misma se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{E_2 - E_1}{\dot{m}} = \frac{W_{1.-2}}{\dot{m}}$$

Lo que es igual:

$$e_2 - e_1 = L \quad (3.27)$$

Donde:

e_1 y e_2 = Representa la energía específica a la en el punto 1 y en el punto 2

L = Representa el trabajo específico efectuado desde el punto 1 hasta el 2

Si se va a realizar en estudio para una turbomáquina se pueden expresar los puntos 1 y 2 como la entrada y la salida de la maquina:

$$e_s - e_e = L \quad (3.28)$$

3.2.10.2 Ecuación general de una turbomáquina hidráulica.

Basados en las premisas expuestas anteriormente se puede deducir la ecuación general de una turbomaquina donde el fluido no presente variación de

densidad ni temperatura, es decir una turbomaquina hidráulica. Para ello se analizará un sistema simple de transporte de líquido de una sola bomba:

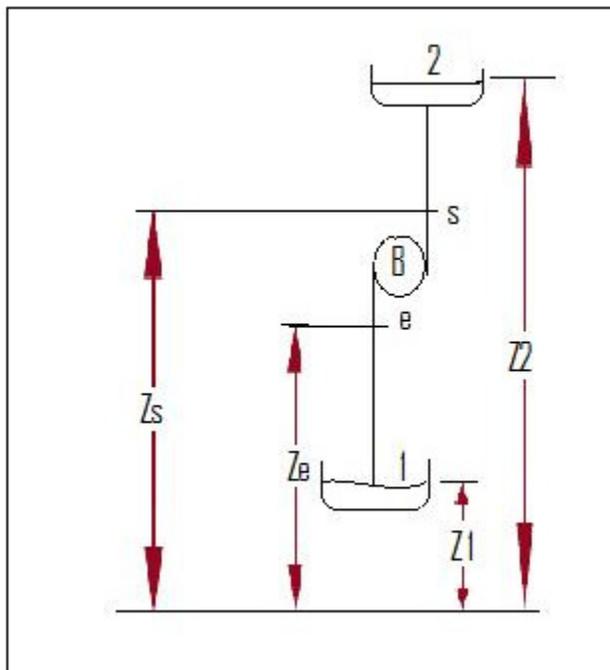


Figura 3.4 Esquema simple de una estación de bombeo

Se realiza un primer balance de energía entre el tanque de succión del sistema (1) y la brida de succión de la bomba (e):

$$\frac{P_e}{\gamma} + \frac{V_e^2}{2 \cdot g} + Z_e = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + Z_1 - h_{1-e} \quad (3.29)$$

Entre la brida de descarga de la bomba y el tanque de descarga del sistema:

$$\frac{P_s}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2 \cdot g} + Z_s = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + Z_2 + h_{s-2} \quad (3.30)$$

Mediante la ecuación (3.29) y la (3.30) se realiza el balance de energía entre la succión y la descarga de la bomba, y se define la ecuación general de la bomba:

$$H = \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma} \right) + \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2 \cdot g} \right) + (Z_2 - Z_1) + (h_{1-e} + h_{s-2}) \quad (3.31)$$

Donde:

$$h_{1-e} \text{ y } h_{s-2}$$

= Representan las pérdidas en la tubería de succión y descarga

3.2.11 Análisis de redes en tuberías comerciales.

El análisis de sistemas de flujos permanentes incompresibles suele ser por lo general muy laborioso, es por esta razón que se han venido desarrollando métodos de diferentes grados de complejidad matemática y convergencia iterativa.

3.2.11.1 Tipos de redes.

Existen en lo general dos tipos de redes, las abiertas y las cerradas. Se entiende por redes abiertas aquellas donde no existe recirculación de flujo, y cerradas donde el flujo es recirculado constantemente a través del sistema. Para la resolución de redes abiertas de no más de 3 nodos y 10 ramales (redes abiertas simples), se utiliza el método gráfico de reducción o sistemas equivalentes, para redes abiertas más complejas o redes cerradas se utiliza los métodos numéricos los cuales actualmente son desarrollados mediante la ayuda de programas computacionales que facilitan la convergencia de los mismos.

3.2.11.2 Método de resolución de redes

Existen dos métodos utilizados en la práctica para la resolución de redes de flujos incompresibles en régimen permanente, los gráficos y los numéricos ambos se basan en la fundamentación de la ecuación de continuidad en los nodos y la ecuación de Bernoulli (ecuación de la energía).

3.2.11.2.1 Método gráfico para sistemas abiertos

Como su nombre lo indica este método se basa en la solución gráfica del sistema de ecuaciones desarrollado por medio de la sustitución sucesiva hasta obtener dos ecuaciones que, mediante el método gráfico de reducción sistemática de todos los elementos del sistema se obtendrá finalmente una red equivalente.

Pasos para la resolución de una red abierta mediante el método gráfico

- Definir los nodos existentes en el sistema
- Relacionar la energía presente en cada ramal con cada uno de los nodos mediante la ecuación de Bernoulli.
- Estimar las alturas piezométricas de cada nodo mediante la suposición de la dirección de los distintos flujos.
- Reducir las ecuaciones obtenidas a dos mediante la suma algebraica de curvas en paralelo.
- Se hallan las soluciones de tantos ramales existan, obteniendo así las alturas piezométricas de los nodos vinculados a los ramales.
- Con las alturas piezométricas se calcula el punto de trabajo para cada ramal y de esta manera el caudal respectivo para, posteriormente con los datos de la bomba del ramal, calcular H .

3.2.11.2.2 Métodos Numéricos.

Para la resolución de redes existen tres (3) métodos numéricos; el método lineal, o método de Charles-Wood, el método de Newton-Raphson, y el método de Hardy-Cross.

Método lineal en sistemas abiertos y/o cerrados.

Para la utilización de este método se debe considerar, el conocimiento de la geometría del sistema, el coeficiente de pérdidas de cada ramal (k) como una constante y el comportamiento de la bomba como un polinomio de 2do grado, de la forma:

$$H = A + B * Q + C * Q^2 \quad (3.32)$$

Pasos para la resolución de redes abiertas y/o cerradas, mediante el método lineal

- Se asumen las direcciones de los flujos en los ramales
- Se plantean las ecuaciones de continuidad para cada uno de los nodos existentes en el sistema.
- Se plantean las ecuaciones de pérdidas para cada lazo cerrado, de existir uno abierto se cierra con un pseudo lazo. De esta manera se obtienen las n ecuaciones con las n incógnitas.
- Se procede a linealizar las ecuaciones no lineales, para lo cual se asume para cada ramal un caudal y un coeficiente de pérdida de la siguiente forma:

$$\sum K_i * Q_i^2 = \sum (K_i * Q_i^{\circ}) * Q_i \quad (3.33)$$

Los valores de Q_i° , son asumidos para iniciar la iteración.

- Una vez linealizadas las ecuaciones se asumen valores para los Q_i° y se resuelve el sistema de ecuaciones encontrando valores para los Q_i
- De no ser los valores de Q_i la solución para los ramales, se repite el proceso, pero esta vez se toman los valores de Q_i obtenidos como los nuevos valores de Q_i° .
- Este proceso se repite hasta encontrar la solución que satisface al sistema.

Método de Newton-Rapson

Para la utilización de este método se debe considerar, al igual que en el método lineal, el coeficiente de fricción para cada rama como un constante y el comportamiento de la bomba como un polinomio de segundo grado.

El método de Newton-Rapson permite determinar un mejor estimado de las incógnitas del sistema mediante la aplicación iterativa de su fórmula:

$$Q(m + 1) = Q(m) - \frac{F(Q(m))}{\frac{dF(Q(m))}{dQ(m)}} \quad (3.34)$$

Donde:

m= Representa el numero de iteraciones

F=f(Q)=0

Para la extensión de sistema de ecuaciones simultaneas, lineales o no lineales, la ecuación (3.34) se expresa de la siguiente manera:

$$Q(m+1) = Q(m) - \frac{F(Q(m))}{D} \quad (3.35)$$

Q y F son los siguientes vectores:

$$Q = \begin{bmatrix} \dot{Q}_1 \\ \cdot \\ \dot{Q}_n \end{bmatrix}; \quad F = \begin{bmatrix} \dot{F}_1 \\ \cdot \\ \dot{F}_n \end{bmatrix}$$

Donde $D^{-1} = \text{Jacobiano}$

$$D^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\delta F_1}{\delta Q_1} & \frac{\delta F_1}{\delta Q_n} \\ \frac{\delta F_n}{\delta Q_1} & \frac{\delta F_n}{\delta Q_n} \end{bmatrix}$$

Para conseguir la solución del sistema se aplica:

$$\begin{bmatrix} \frac{\delta F_1}{\delta Q_1} & \frac{\delta F_1}{\delta Q_n} \\ \frac{\delta F_n}{\delta Q_1} & \frac{\delta F_n}{\delta Q_n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_1 \\ \cdot \\ Z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ \cdot \\ F_n \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Donde: $D^{-1} * F = Z \Rightarrow D * Z = F$

Método de Hardy-Cross

Es el más antiguo de los métodos de resolución de redes, por lo que la convergencia del mismo suele ser muy larga y en algunas ocasiones llega a fallar en la solución proporcionada.

Al igual que en los métodos anteriores, para la realización del mismo se debe considerar al coeficiente de pérdidas de cada ramal como una constante y el comportamiento de la bomba como un polinomio de segundo grado.

Pasos para la resolución de redes cerradas mediante el método de Hardy-Cross

- Plantear las ecuaciones de energía de cada ramal de la red.
- Definir un caudal correctivo δQ para cada caudal presente en la red.
- Suponer valores iniciales de los caudales de la red para realizar la primera iteración.
- Después de realizada la primera iteración evaluar el caudal correctivo con la siguiente ecuación:

$$\delta Q = \frac{\pm Z_i \pm \sum k_i Q_i^2 \pm H_i}{\pm \sum 2 * K_i Q_i \pm \sum \frac{dH_i}{dQ_i}} \quad (3.37)$$

- Con los nuevos valores de los caudales correctivos actualizar los caudales de cada ramal, sumando todos los caudales correctivos algebraicamente:

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

- Repetir esta operación hasta que la solución converja.

3.2.12 Régimen transitorio en tuberías

Como se menciono anteriormente la base del estudio del transporte de agua potable recaen en la premisa de que dicho flujo se encuentre en régimen permanente, sin embargo no considerar los cambios de presión y velocidad que se generan en los sistemas de transferencia de líquidos a presión sería un error ya que los mismos están sujetos a ciertas fases de su operación caracterizadas por modificaciones temporales de la magnitud del flujo, la cuales viene relacionadas al accionamiento de dispositivos y maquinas hidráulicas instaladas a lo largo del sistema de conducción del flujo, ejemplo típico de esto, la apertura o cierre de un válvula o las alteraciones que se producen en los múltiples de succión y descarga producto del accionamiento o parada de una motobomba.

Estas modificaciones o alteraciones del régimen de flujo originan cambios localizados de presión y velocidad los cuales se propagan a lo largo de todo el conducto con, aproximadamente la velocidad del sonido, lo cual establece una compleja configuración de ondas primarias y reflejadas las cuales se adicionan a las presiones estacionarias presentes originado el fenómeno conocido como “Golpe de ariete”

El fenómeno de golpe de ariete o también conocido como régimen transitorio en tuberías a presión, se produce cuando por algún motivo se origina un cambio en la cantidad de movimiento del fluido, la presencia de este fenómeno se manifiesta como una brusca depresión y/o sobrepresión, entendiéndose por sobrepresiones sobre cargas 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 las tuberías. Este fenómeno forma parte de los

problemas más frecuentes que se presentan en los sistemas de conducción y viene relacionado con el arranque y/o parada incontrolada de bombas y cierre o apertura incontrolada de válvulas, en la mayoría de los casos el accionamiento de válvulas es fácilmente controlado, el problema se presenta con el control del accionamiento de los grupos de bombeos ya que esto viene sujeto de fallas eléctricas, y la inercia de la bomba, ya que debe entenderse que entre mayor sea el momento de inercia del conjunto motor-bomba más tiempo tardará en detenerse por completo y menor será el efecto del golpe de ariete.

3.2.12.1 Descripción matemática del régimen transitorio en tuberías.

Como en la mayoría de los estudios realizados en la hidráulica, el movimiento transitorio en tuberías a presión es descrito mediante las ecuaciones de continuidad y movimiento tomando en cuenta, tal y como se mencionó anteriormente, la variabilidad temporal de las magnitudes del flujo y la elasticidad del líquido y del conducto. De esta manera se desarrolla la ecuación de continuidad dentro del enfoque unidimensional de análisis y con la limitación de ser aplicables a líquidos y a conductos circulares de propiedades únicas y poco elásticos. Tomando en cuenta todas y cada una de estas consideraciones la expresión adopta la siguiente forma.

Ecuación de continuidad para flujo en régimen transitorio en tuberías circulares:

$$V * \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} + V * \text{sen}\beta + \frac{a^2}{g} * \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (3.38)$$

Donde:

V_m =Velocidad promedio del flujo.

β = Angulo de inclinacion de la tuberia.

h = Altura piezométrica.

g = Aceleración de la gravedad.

X = Dirección de movimiento.

a = Velocidad de propagación de las perturbaciones en las magnitudes del flujo.

t = Tiempo.

Como se comentó anteriormente los cambios que se producen en las magnitudes del flujo y en sus propiedades se propagan a lo largo de la tubería con una velocidad equivalente a la del sonido, sin embargo la misma está modificada por la elasticidad del ducto por lo cual aplicando los principios de las cantidades de movimiento lineal y realizando un balance de masa se obtiene la siguiente expresión para la velocidad de propagación de las ondas elásticas o perturbaciones de las magnitudes de flujo (a) (Celeridad de la onda):

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

E = Modulo de elasticidad del liquido.

E_c = Modulo de elasticidad de la tubería

ρ = densidad del liquido.

D = Diametro de la tubería.

e = Espesor del conducto.

C = Factor de colocacion de la tubería.

El factor C depende de las restricciones de la tubería en y ciertos casos del tipo de la misma. Para el cálculo de este factor se analizan las siguientes indicaciones:

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

$$C = a - \mu^2 \quad (3.40)$$

- Para tuberías de acero con juntas mecánicas o soldadas pero con frecuentes juntas de expansión, de longitud total constante; tuberías de asbesto-cemento; hierro fundido, plástico y todas aquellas que no admitan esfuerzos longitudinales y que sean capaces de absorber pequeñas deformaciones axiales.

$$C = 1 \quad (3.41)$$

- Para tuberías de acero con juntas de soldaduras a todo l largo de su eje y colocadas de forma tal que no se restringe la deformación axial.

$$C = \frac{5}{4} - \mu \quad (3.42)$$

- Para tuberías de concreto reforzado : Para este tipo de tuberías se debe realizar un ajuste en la ecuación de la velocidad de propagación con de las modificaciones, ya que para el valor de " E_c " debe ser usado el modulo de elasticidad del acero y para el caso de " e " se debe definir de la siguiente manera:

$$e_e = E_r * e_c + \frac{A_s}{I_s} \quad (3.43)$$

Donde:

e_e = espesor equivalente

E_r = Relacion entre el modulo de elasticidad del concreto y del acero.

e_c = Espesor del concreto.

A_s = Area transversal del acero de refuerzo.

I_s = Espaciamiento de las barras o cables del acero de refuerzo.

Para todos los casos μ representa la ecuación de Poisson la cual puede hallarse en la siguiente tabla mediante una relación entre el material del ducto y el modulo de elasticidad del mismo. De esta manera se tiene:

Material	E_c (kgf/cm ²)	μ
Acero	$2,10 * 10^6$	0,30
Hierro fundido ductil	$0,98 * 10^6$	0,25
Concreto	$0,21 * 10^6$	0,10 - 0,15
Asbesto-cemento	$0,24 * 10^6$	-
Polietileo	$8,15 * 10^3$	0,46

Tabla 3.2 Valores de μ y E_c según el material de la tubería

3.2.12.2 Ecuación dinámica del movimiento en régimen transitorio:

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{V}{g} * \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} * \frac{\partial V}{\partial t} + f * \frac{V|V|}{2 * g * D} = 0 \quad (3.44)$$

Donde:

f= Es el factor de fricción de Darcy- Weisbach.

La ecuación de continuidad y la ecuación del movimiento dinámico para régimen permanente conforman un sistema en derivadas parciales cuya integración resulta sumamente compleja por lo que se utilizan procedimientos para la definición de las funciones:

$$V = f(x, t) \quad (3.45)$$

$$h = g(x, t) \quad (3.46)$$

Estas ecuaciones constituyen la solución para el régimen permanente.

Los efectos transitorios en un sistema de conducción mediante tuberías a presión pueden ser aproximados mediante la caracterización de los siguientes parámetros:

$$\xi = \frac{a * V_0}{g * h_0} \quad (3.47)$$

$$\tau_c = \frac{T}{2 * L/a} \quad (3.48)$$

Donde:

a= Velocidad de propagación de las perturbaciones.

V_0 y h_0 = Velocidad y altura piezométrica relacionadas con el régimen permanente.

T = Tiempo indicativo de la rapidez de los cambios que origina el régimen transitorio(Periodo del sistema).

L= Longitud del conducto.

3.2.12.3 Métodos simplificados para el cálculo del Golpe de Ariete.

En vista de la complejidad que presenta la resolución de las ecuaciones de continuidad y movimiento para régimen transitorio se elaboraron soluciones aproximadas de las mismas, las cuales para fines prácticos han proporcionado una herramienta confiable para el análisis de las modificaciones en un flujo conducido a presión, es por esta razón que fundamentan la base para los métodos de aproximación de cálculo de golpe de ariete en sistemas de distribución de líquido.

Forma simplificada de las ecuaciones de continuidad y de la ecuación dinámica del movimiento para régimen transitorio (ecuaciones fundamentales del flujo transitorio)

➤ **Ecuación de continuidad**

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

➤ **Ecuación dinámica del movimiento**

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

Solución de las ecuaciones fundamentales del flujo transitorio

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

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

Método práctico (Allievi, Michau, Mendiluce)

Es el primer procedimiento más o menos riguroso desde el punto de vista práctico y teórico que se elabora para el cálculo del golpe de ariete, el mismo encierre consigo tres métodos elaborados por 3 científicos distintos pero sin embargo se fundamentan en los mismos principios teóricos.

Como ya se mencionó anteriormente existen 2 situaciones en las cuales los sistemas de conducción de líquidos a presión son más propensos a ser sometidos al fenómeno de golpe de ariete, el cierre y/o apertura de válvulas y la parada y/o arranque de equipos de bombeo, es por esta razón que el estudio de los métodos se basa en la presencia de solo estas dos situaciones.

Cierre y/o apertura de válvulas:

- Se determina el periodo del sistema(T), es decir el tiempo en el cual tarda la onda en recorrer todo el conducto ida y vuelta a partir de la válvula, y se compara con el tiempo de cierre y/o apertura (t_c) determinando si el cierre es lento o rápido, mediante las siguientes expresiones:

$$T = \frac{2 * L}{a} \quad (3.54)$$

$$t_c \leq T \text{ cierre rapido} \quad (3.55)$$

$$t_c > T \text{ cierre rapido} \quad (3.56)$$

Donde:

$t_c =$ Tiempo de cierre y/o apertura de la valvula.

$T =$ Periodo del sistema

- Si el cierre es rápido se utiliza el modelo de Allievi, de ser lento se utiliza el de Michau.

$$h_1 - h_0 = \frac{a * V_0}{g} \quad \text{Metodo de Allievi} \quad (3.57)$$

Donde V_0 es la velocidad del flujo en régimen permanente y $h_1 - h_0$ representa el valor neto de la sobrepresión.

$$h_1 - h_0 = \frac{2 * L * V_0}{g * t_c} \quad \text{Metodo de Michau} \quad (3.58)$$

Arranque y/o parada de equipos de bombeo

- Se determina el periodo del sistema(T), y se compara con el tiempo de detención de la columna de liquido (t_d) determinando si el cierre es lento o rápido, mediante las siguientes expresiones:

$$t_d \leq T \text{ cierre rapido} \quad (3.59)$$

$$t_d > T \text{ cierre rapido} \quad (3.60)$$

Donde:

$t_d =$ Tiempo de detencion de la columna de liquido

T = Periodo del sistema

- Si el cierre es rápido se utiliza el modelo de Allievi, de ser lento se utiliza el de Mendiluce

$$t_d = C + \frac{K * L * V_0}{g * Ha} \quad (3.61)$$

Donde:

$Ha =$ Representa la magnitud de la sobrepresion es decir, $h_1 - h_0$.

$K =$ Coeficiente cuyo valor dependerá de la longitud del conducto.

$C =$ Coeficiente cuyo valor dependerá del porcentaje de Ha

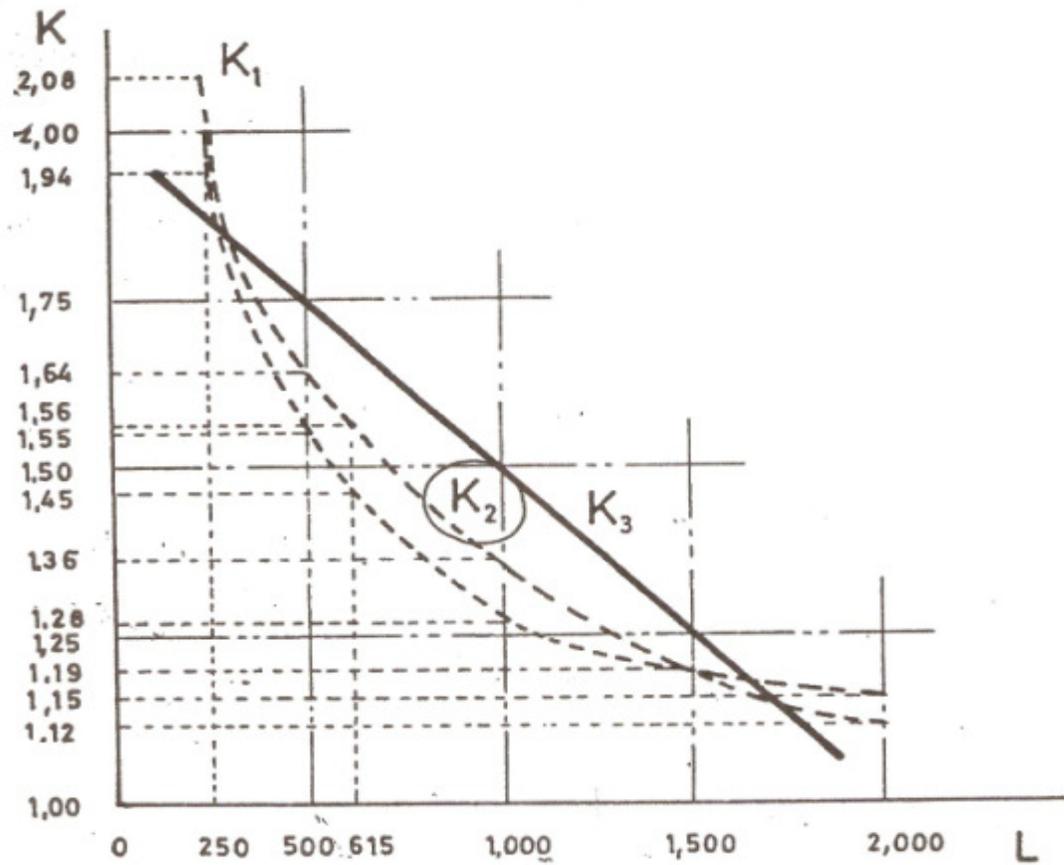


Figura 3.5 Grafico de los valores de K vs L (longitud de la tubería)

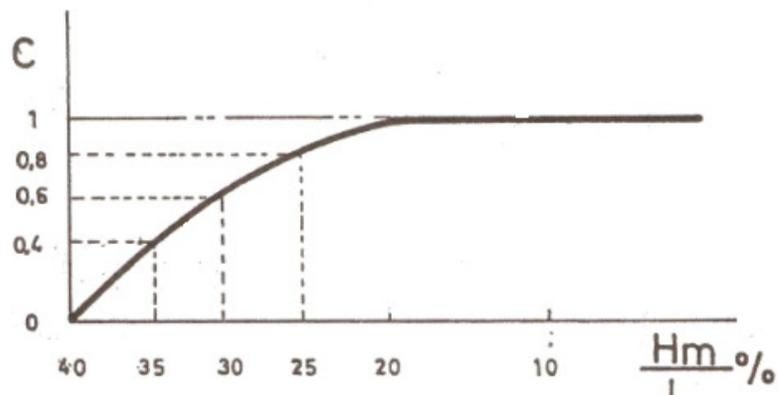


Figura 3.6 Grafico del coeficiente C vs $H_m\%$

Método grafico de Bergeron y Schnyder

El método gráfico de Schnyder-Bergeron permite tratar y resolver problemas de golpe de ariete en forma gráfica, y al igual que el método práctico éste se fundamenta en la solución de las ecuaciones del régimen transitorio, (3.52) y (3.53), las cuales dan origen a las ecuaciones de las rectas de Bergeron que establecen una relación entre los valores de caudal y la altura piezometrica (Q,H) conocidos para dos puntos diferentes de la tubería (a y b) en tiempos distintos (t_b y t_a) siempre y cuando se cumpla con la siguiente relación:

$$x_b = x_a - (t_b - t_a) * a \quad (3.62)$$

Se expresa entonces la expresión para la ecuación de las rectas de Bergeron:

$$h(x_b, t_b) = h(x_a, t_a) + \frac{a}{g * A} [Q(x_b, t_b) - Q(t_a, x_a)] \quad (3.63)$$

De esta manera se definen las condiciones de un punto “a” cualquiera de la tubería, y se podrá relacionar con las condiciones del flujo en una sección aguas arriba siempre y cuando haya transcurrido un tiempo igual a ($t_a + L/A$) siendo L la distancia existente entre ambos puntos.

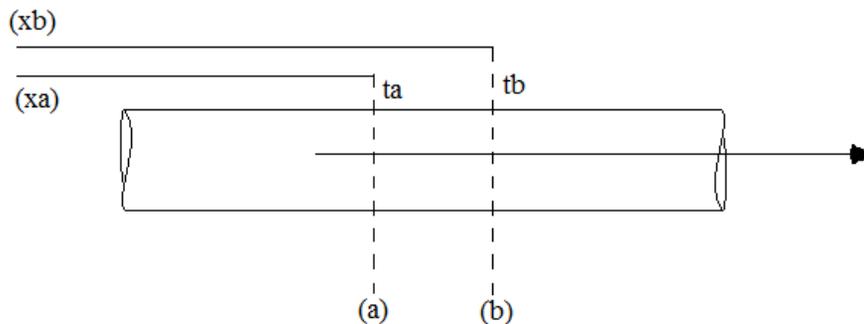


Figura 3.7 Grafico de x_a, x_b, t_a y t_b

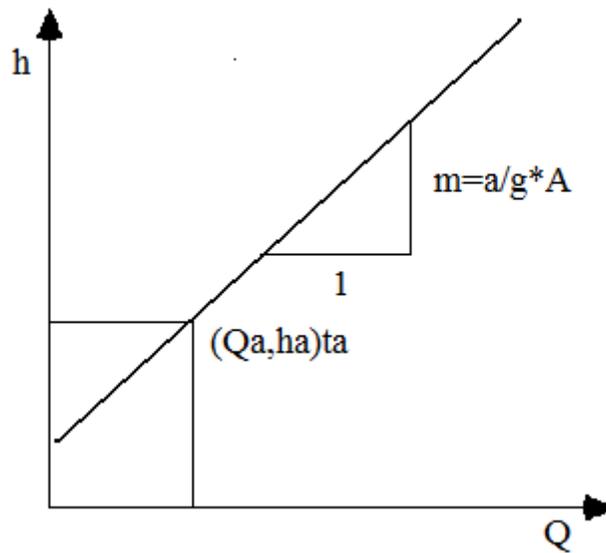


Figura 3.8 Recta positiva de Bergeron, lugar geométrico de los puntos (h_a, Q_a) en función del tiempo t_a .

El significado físico de las rectas de Bergeron es que presiones y caudales de posiciones que se desplacen a una velocidad “a”, se encuentran sobre una misma recta de pendiente $m = \frac{a}{A \cdot g}$, la cual será positiva de A a B y negativa de B a A.

Método de la característica

El Método de las Características ha sido el método explícito más usado en el flujo transitorio en tuberías, debido principalmente a la facilidad para introducir diferentes dispositivos y condiciones de borde (bombas, válvulas, estanques hidroneumáticos, etc.). Sin embargo, como todo método explícito, adolece de restricciones desde el punto de vista de su estabilidad numérica.

Para obtener las expresiones que constituyen la base del método se multiplica la ecuación del movimiento por un parámetro λ y se suma con la ecuación de continuidad resultando así:

$$\lambda * g \frac{\partial h}{\partial x} + \lambda * V \frac{\partial V}{\partial x} + \lambda \frac{\partial y}{\partial t} + \lambda * f \frac{V * |V|}{2 * D} + V \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} + V \sin \alpha + \frac{a^2}{g} * \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (3.64)$$

Tomando en cuenta que h y V son funciones de (x,t) , sus diferencias tales con respecto al tiempo se puede escribir como:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\partial h}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.65)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t} \quad (3.66)$$

Se verifica entonces que:

$$\frac{dx}{dt} = \lambda * g + V \quad (3.67)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{a^2}{\lambda * g} + V \quad (3.68)$$

Mediante el análisis anterior se obtienen las ecuaciones características tanto para rectas positivas como para rectas negativas:

Positivas:

$$h_b - h_a + \frac{a}{g} * (V_b - V_a) + V_a \sin \alpha (t_b - t_a) + \frac{a}{g} f * \frac{V_a * |V_a|}{2 * D} (t_b - t_a) = 0 \quad (3.69)$$

$$x_b - x_a = a * (t_b - t_a) \quad (3.70)$$

Negativas:

$$h_b - h_c + \frac{a}{g} * (V_b - V_c) + V_c \sin \alpha (t_b - t_c) - \frac{a}{g} f * \frac{V_c * |V_c|}{2 * D} (t_b - t_c) = 0 \quad (3.71)$$

$$x_b - x_c = -a * (t_b - t_c) \quad (3.72)$$

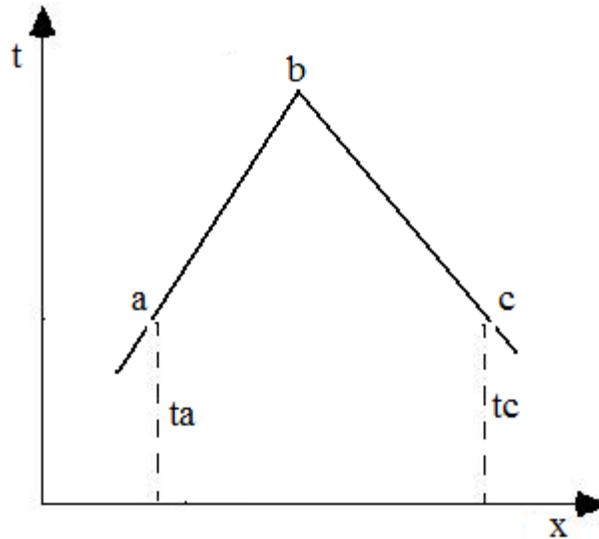


Figura 3.9 Condiciones de b en $t+\Delta t$ dadas las de a y c

Si se conocen las condiciones de flujo de a y c para los tiempo t_a y t_c , la resolución de las ecuaciones (3.69), (3.70), (3.71) y (3.72) permiten determinar las magnitudes del flujo en una sección intermedia de abscisa x_b y tiempo t_b

3.3 Criterios básicos para el diseño de un sistema de abastecimiento de agua

3.3.1 Consumo de agua

Una correcta estimación del consumo para un sistema de agua potable implica sistemas mucho más eficientes y con costos de instalación y operación mucho

menores, es por ello que se han desarrollado métodos que permiten aproximar de manera precisa y sencilla las dotaciones de agua necesarias, basándose en los usos de tierra, la zonificación y en varios casos las características de la población.

Estos valores de consumo permiten determinar los llamados valores de diseño, en este caso el caudal medio, lo cual ha de constituir la base todo el diseño.

Para Venezuela, el ente encargado de dictaminar los valores para el cálculo del consumo es el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, Hidrológica de Venezuela “Hidrocaven”, dicho organismo establece que los consumos mínimos permisibles de diseño para un sistema de abastecimiento de agua potable, se expresan en la siguiente tabla:

POBLACION	Servicios con medidores (litros/persona/día)	Servicios sin medidores (litros/persona/día)
Hasta 20000 habitantes	200	400
De 20000 a 50000 habitantes	250	500
Más de 50000 habitantes	300	600

Tabla 3.3 Consumos mínimos permisibles según las normas HIDROVEN

3.3.2 Factores que afectan el consumo

3.3.2.1 Tipo de Comunidad

- *Consumo Domestico:* este tipo de consumo lo constituye el agua de bebida, lavado de ropa, baño y aseo personal, cocina, limpieza, y adecuado funcionamiento de las instalaciones sanitarias.

- *Consumo Comercial o Industrial:* son todos aquellos consumos realizados por industrias o comercios, generalmente presentan un gasto significativo para cualquier sistema. En cualquier caso, las cifras de consumo deben basarse en el tipo de industria o comercio a abastecer.
- *Consumo Público:* es todo consumo destinado a riego de zonas verdes, parques y jardines públicos, así como la limpieza de las calles.
- *Consumo por Incendio:* en un combate de incendios, el mejor aliado es el sistema de agua potable, es por ello que para el diseño de cualquier sistema de abastecimiento se debe de considerar este valor.
- *Consumo por pérdida en la red:* este consumo se debe a juntas en mal estado, válvulas y conexiones, este tipo de consumo puede representar hasta un 10% del consumo total.

3.3.2.2 Factores Económicos y Sociales

Dichos factores están relacionados con el tipo de vivienda a la cual se debe abastecer. En este sentido, investigaciones realizadas, permiten evaluar este factor y ser considerado en el estudio, al analizar distintas zonas del país los consumos de aguas para distintas viviendas son:

	Rancho		Casa		Vivienda Rural		Casa Quinta	
	l/viv/día	l/pers/día	l/viv/día	l/pers/día	l/viv/día	l/pers/día	l/viv/día	l/pers/día
Máximo	693	100	951	139	1015	156	1211	274
Mínimo	473	71	728	106	885	139	961	193
Promedio	562	85	849	127	966	149	1100	227

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

3.3.2.3 Factores Meteorológicos

Estos factores contemplan el hecho de que el consumo de agua varía de acuerdo a las condiciones ambientales, es decir a la temperatura ambiental y la distribución de lluvias. Además este factor varía de acuerdo a la zona del país donde se instale el sistema de abastecimiento, de tal manera este factor pretende expresar los consumos correspondientes a la higiene personal de la población y su efecto en el consumo per cápita.

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

En general un sistema de abastecimiento de agua potable, el consumo no es siempre el mismo, es por ello que se debe de contemplar en su diseño dichas variaciones, además de los siguientes aspectos:

- En todo momento se debe abastecer agua potable de forma continua y a una presión adecuada, a fin de satisfacer necesidades sanitarias, sociales, económicas y de confort.
- Los consumos de agua de una localidad generalmente varían en periodos estacionales, mensuales, diarias y horarias, es decir
 - Las comunidades demandan mayores cantidades de agua del sistema en periodos de sequia
 - Generalmente en una semana se consume mayor agua unos días (generalmente el lunes) y en otros días se consume menores cantidades de agua (generalmente los domingos).
 - Durante un día habrá horas que se consumirá mayores cantidades de agua y en otros se consumirá menores cantidades de agua

3.3.3.1 Consumo Medio Diario

Es el caudal determinado en base a la demanda del sistema de abastecimiento de agua potable, generalmente en l/s, dicho caudal se determina en base a la población futura, es decir durante el periodo de vida útil y constituye la base para el diseño del sistema.

El caudal medio diario (Q_m) puede ser obtenido por los siguientes medios:

- Por la sumatoria de las dotaciones asignadas a las parcelas a dotar, en caso de una zona planificada
- Por la estimación del consumo per cápita para la población futura
- Como promedio de los consumos diarios registrados en la localidad

Para su determinación se usa la siguiente ecuación, expresado en l/s:

$$Q_m = \frac{\text{Poblacion} \cdot \text{Dotacion}}{86400} \quad (3.72)$$

3.3.3.2 Consumo Máximo Diario

Es el mayor consumo registrado para una población durante un año, este caudal, en base a distintas investigaciones, está relacionado con el caudal medio.

Se determina en base a la siguiente ecuación:

$$Q_{max/diario} = K_1 \cdot Q_m \quad (3.73)$$

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

Q_m =consumo medio del sistema

3.3.3.3 Consumo Máximo Horario

El consumo máximo horario, es aquel consumo máximo que ocurre a cierta hora del día de máximo consumo, al igual que el consumo máximo diario está relacionado con el consumo medio diario mediante la siguiente expresión:

$$Q_{max/horario} = K_2 \cdot Q_m \quad (3.74)$$

De acuerdo a las normas del HIDROVEN, el caudal máximo horario se supone como el 200% del consumo diario promedio para zonas con poblaciones de 100000 mil o más habitantes. Para zonas con poblaciones menores, se determina el valor de K_2 con la siguiente relación:

$$K_2 = 275 - 0,75 \cdot X \quad (3.75)$$

En la cual, X representa la población en miles de habitantes.

3.3.3.4 Consumo en caso de Incendio

Este consumo es el mínimo que debe poseer un sistema durante una ocurrencia de incendio, para que pueda ser afrontado y permitir un abastecimiento de agua confiable, se determina en base a la siguiente expresión:

$$Q_I = K_3 \cdot Q_m + Q_{incendio} \quad (3.76)$$

Con base en la normas del HIDROVEN, estas dicen que debe hacerse un análisis del sistema en la demanda correspondiente al 180% del consumo promedio

anual, más la demanda del incendio, esta demanda se determina en base a las siguientes consideraciones:

- 10 (l/s) para una zona residencial unifamiliar de viviendas aisladas.
- 16 (l/s) para una zona residencial, comercial o mixta con construcciones aisladas o construcciones unifamiliares continuas.
- 32 (l/s) para una zona industrial, de comercio, viviendas con áreas de construcción mayores y zonas de reunión pública como iglesias, cines, estadios, etc.
- No se destina dotación de incendio para parcelamientos con un promedio igual a 4 lotes por hectárea o menor.

3.3.4 Redes de distribución

Son los recorridos que realiza la tubería del sistema para abastecer a los distintos consumidores del sistema.

En cada caso su dotación estará supeditada por la población a abastecer y en cualquier caso para la situación más desfavorable, esto hace pensar en los factores K_2 y K_3 además del consumo en caso de incendio.

Además en las zonas de tomas de agua, ya sean residenciales, comerciales o industriales, se deben cumplir con unos valores de presión, tanto mínima como máxima, asegurando siempre un servicio continuo y confiable.

3.3.4.1 Tipos de Redes

Existen dos tipos de redes de distribución, su selección varía de acuerdo a la topografía y ubicación de las fuentes de agua potable.

3.3.4.1.1. Tipo Ramificado

Constituido por ramal central y a partir de él, se bifurcan otros que pueden constituir mallas o ramales ciegos, se usa cuando por el terreno no se pueden conectar los ramales unos con otros.

3.3.4.1.2. Tipo Malla

Son aquellas redes de distribución en las que únicamente existan lazos cerrados o circuitos, es decir no hay ramales ciegos.

3.4 Estación de bombeo

Las estaciones de bombeo son conjuntos de equipos electromecánicos utilizados para elevar un agua potable desde un nivel energético inicial a un nivel energético mayor.

Generalmente las estaciones de bombeo constan de las siguientes partes:

- Línea de succión.
- Los equipos de bombeo.

- Línea de impulsión.
- Servicios auxiliares:
 - Dispositivos de protección contra el golpe de ariete.
 - Línea de alimentación de energía eléctrica o instalación para almacenamiento de combustible.
 - Sistema de instrumentación y control
 - Válvulas de distintos tipos

3.4.1 Equipo de bombeo

Son los encargados de elevar la presión del agua potable, su número estará supeditado a los consumos del sistema y sus variaciones, aparte se estima un margen de seguridad para prever casos de emergencia, como mantenimiento, arranque rápido. Para determinar el número de equipos a instalar se utilizara el consumo máximo diario.

3.4.2 Equipos dispuestos en paralelo y en serie

En las estaciones de bombeo, no existe un único equipo de bombeo, sino un conjunto de ellos, estos pueden estar conectados en paralelo o en serie, es decir si se necesita manejar grandes caudales de agua potable con equipos más pequeños se conectarán los equipos con una única succión y una única descarga. En cambio si se conectan de manera que la descarga de un equipo sea la succión del siguiente y así sucesivamente se alcanzaran grandes incrementos de presión y en consecuencia grandes alturas de bombeo.

3.4.3 Parámetros de las bombas

Los parámetros que describen el funcionamiento de una bomba son:

- Caudal: es el volumen de líquido por unidad de tiempo que pasa a través del equipo
- Altura de bombeo o carga dinámica:
 - Carga estática: es la distancia vertical desde el punto más bajo aguas abajo hasta el punto más alto aguas arriba.
 - Pérdidas de carga: son las pérdidas de presión ocurridas en la tubería debido a las fuerzas viscosas.
 - Pérdidas menores: son aquellas ocurridas en las válvulas, codos, es decir en todos los accesorios incluyendo los cambios de dirección.
- Potencia útil: es la potencia que transmite la bomba al fluido para elevar su nivel energético, se calcula de la siguiente manera:

$$P_u = \gamma \cdot Q \cdot H \quad (3.77)$$

- Potencia al freno: es la cantidad de potencia que debe ser suministrada a una bomba en cierto punto de trabajo, para que la misma funcione, se expresa de la siguiente manera:

$$P_b = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta} \quad (3.78)$$

- Rendimiento: es la relación entre la energía suministrada al fluido y la energía suministrada al equipo, expresa en cierto grado que tan bueno es un equipo comparado con otro trabajando en el mismo punto de caudal, se expresa de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{P_u}{P_b} \quad (3.79)$$

- Momento de inercia del grupo: es el momento de inercia ejercida por todos los elementos rotatorios del conjunto, es decir, los elementos

giratorios del motor, eje de transmisión, rodete de la bomba o impelente y el líquido contenido en el rodete, generalmente es un valor que el fabricante de la bomba proporciona en su manual.

- Carga neta positiva de succión (NPSH): es la cantidad de energía existente en la succión de una bomba, en el estudio de una instalación existen dos tipos:
 - NPSH Requerido: es la energía requerida para hacer fluir líquido hacia la bomba sin producir su vaporización y en consecuencia la cavitación.
 - NPSH Disponible: es la energía disponible en la succión de la bomba para permitir la entrada de fluido, está referida al eje de apertura de succión en bombas horizontales o al plano inferior del primer impelente en bombas verticales; se expresa de la siguiente manera.

$$NPSH_d = \frac{P_s + P_a - P_v}{\gamma} - \Delta z - h_s \quad (3.80)$$

siendo Δz : carga estática de succión
 P_{atm} : presión atmosférica del lugar
 P_v : presión de vapor del líquido a la temperatura del flujo
 h_s : pérdidas de carga totales del lado de succión
 γ : peso específico relativo al agua

A fin de evitar cavitación en la succión de las bombas, se debe cumplir que:

$$NPSH_d > NPSH_r \quad (3.81)$$

- Leyes de semejanza: son relaciones adimensionales, estas sirven para determinar el comportamiento de una turbomáquina conocido el comportamiento con otra, siempre y cuando sean semejantes, es decir se cumpla la semejanza geométrica, dinámica y cinemática. Al aplicar estos principios se obtienen las siguientes relaciones:

$$\frac{Q}{Q_o} = \frac{n}{n_o} \left(\frac{D}{D_o} \right)^3 \quad (3.82)$$

$$\frac{H}{H_o} = \left(\frac{n}{n_o}\right)^2 \left(\frac{D}{D_o}\right)^2 \quad (3.83)$$

$$\frac{N}{N_o} = \left(\frac{n}{n_o}\right)^3 \left(\frac{D}{D_o}\right)^5 \quad (3.84)$$

donde Q, Q_o : caudal en la condición inicial y final
 n, n_o : velocidad de giro en la condición inicial y final
 D, D_o : diámetro del rodete en la condición inicial y final

- Número específico de vueltas (nq): son las vueltas que da un rodete semejante geoméricamente, cinemáticamente y dinámicamente al rodete considerado y que opera a una altura y caudal unitario, siendo este valor dado para el punto de máximo rendimiento. La expresión matemática de este valor es:

$$nq = \frac{\omega \left[\frac{rad}{s}\right] \cdot \sqrt{Q \left[\frac{m^3}{s}\right]}}{(g \cdot H)^{\frac{3}{4}}} \quad (3.85)$$

3.4.4 Válvulas usadas en las estaciones de bombeo

Las válvulas son elementos utilizados en los sistemas de abastecimiento de agua potable para seleccionar y/o regular el flujo, mantenimiento e incluso protección al sistema, en general existen cuatro grandes grupos de válvulas, estas son:

- Válvulas de servicio: son aquellas válvulas que se accionan en caso de mantenimiento o reparación de los equipos o sistemas de conducción, estas válvulas generalmente permiten o interrumpen la totalidad del flujo, las más comunes son:
 - Válvula Mariposa: estas válvulas son de diseño sencillo, soliendo usar para controlar el flujo y regularlo, se caracterizan por ser de operación rápida, ya que solo necesita un cuarto de vuelta para pasar de la posición de cerrado a la posición de abierto, teniendo además una pequeña caída de

presión dado a que no alteran la dirección del fluido, su elemento de cierre es una placa circular

- Válvula de Compuerta: es una válvula que abre mediante el levantamiento de una compuerta o cuchilla, la cuál puede ser redonda o rectangular, y así permitir el paso del fluido.
- Válvulas reguladoras: son aquellas válvulas encargadas de regular alguna magnitud o variable de operación como la presión o el caudal, las más utilizadas son:
 - Válvula de globo: estas válvulas permiten regular el paso del fluido, el cual al pasar por la válvula cambia de dirección, disipando energía, debido a su diseño por lo que ofrece una gran resistencia a su circulación. Este tipo de válvula es ideal para aquellos servicios que requieren un frecuente uso de las válvulas, así como aquellos otros en los que es necesario regular el paso del fluido. La apertura y cierre de la válvula requiere un pequeño número de vueltas del volante.
 - Válvulas de paso anular: estas válvulas permiten regular el flujo sin generar grandes estrangulamientos, ya que mantiene una sección de paso lineal sin ningún cambio de dirección, por lo que su disipación de energía es baja.
 - Válvulas de esfera y cono: válvula utilizada para resistir grandes presiones y efectos hidrodinámicos, su obturador es de forma cónica o esférica y posee una perforación en la dirección del flujo del mismo diámetro de la tubería.
- Válvulas de dirección de flujo: son válvulas que generalmente permiten el flujo en una sola dirección, se utilizan en sistemas de bombeo para evitar el vaciado de tanques, giro inverso de equipos y para mantener cebados los sistemas de bombeo, en general se usan las válvulas de retención para realizar este trabajo, estas válvulas poseen un elemento o placa con un eje solidario a el cuerpo de la válvula el

cual se abre debido a los efectos del flujo y al cesar este se cierra por el peso de este elemento.

3.4.5 Medios de accionamiento para bombas

Las bombas pueden ser accionadas por distintos medios, unos más usados que otros, estos pueden ser:

- Turbinas a gas o vapor: usados generalmente en centrales de generación o para grandes equipos con grandes potencias de trabajo, su uso generalmente está limitado al espacio de uso y su complejidad para su funcionamiento y arranque. Son de grandes costos de instalación, operación y mantenimiento.
- Motores diesel: usados por su gran versatilidad y confiabilidad permiten accionar equipos de gran potencia, su uso está limitado a la disponibilidad de combustible, se usan en zonas sin alimentación eléctrica. Son de bajos costos de instalación y mantenimiento, sin embargo su operación es costosa y determinada por el costo de combustible.
- Motores eléctricos: usado por su pequeño tamaño y gran versatilidad, son de bajo costo de mantenimiento e instalación, su operación es simple y puede ser altamente automatizada es el medio de accionamiento más utilizado en una estación de bombeo, especialmente los trifásicos de corriente alterna, pueden ser de dos tipos:
 - Sincrónicos:
 - Rotor liso o cilíndrico
 - Rotor de polos salientes
 - Asincrónicos:
 - De cortocircuito
 - De bobinado o de anillos

3.4.6. Motores eléctricos trifásicos

Los motores eléctricos trifásicos, son aquellos que poseen tres líneas de alimentación de corriente, su potencia se determina en base a la siguiente ecuación:

$$Pe = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \phi \quad (3.86)$$

donde Pe: potencia eléctrica
 V_L : voltaje en la línea
 I_L : corriente en la línea
 $\cos\phi$: factor de potencia

Para su aplicación en sistemas de bombeo, la potencia que debe de entregar el motor en su eje se expresa de la siguiente manera:

$$Po = \frac{Pb}{\eta_{mec}} \quad (3.87)$$

donde Po: potencia en el eje del motor
 Pb: potencia al freno en el eje de la bomba
 η_{mec} : eficiencia mecánica de la transmisión

3.4.7. Cálculo del diámetro óptimo para la aducción de la estación.

El cálculo del diámetro óptimo para la tubería de aducción de una estación de bombeo es una técnica analítica la cual se fundamenta en la teoría matemática de valores extrémales de funciones y requiere que los valores que caracterizan a este diámetro sean tratados como variables continuas, matemáticamente, se debe determinar el mínimo valor de la función, condicionada a las restricciones que se hayan impuesto.

Para el caso particular del diámetro de la tubería de aducción la condición principal es el costo, por lo que la función a ser derivada con respecto al diámetro será la de costos del sistema la cual viene expresada de la siguiente manera:

$$C_T = C_{B1} + C_{TT} + C_{B2} + R * C_{B3} \quad (3.88)$$

Donde:

$$C_{TT} = \text{Costo de la tubería } f(d, e, l)$$

$$C_{B1} = \text{Costos totales de los equipos de bombeo } f(Q, c_{b1}, re)$$

$$C_{B2} = \text{Costos totales de las obras civiles}$$

$R = \text{factor de capitalización el cual depende del interés y el tiempo del diseño}$

$$C_{B3} = \text{costos totales de energía } f(P, t)$$

Dicha ecuación es derivada respecto al diámetro, donde se tiene:

$$D = R * Q^{3/7} \quad (3.89)$$

Donde:

$$R = 0,261 * \sqrt[7]{\frac{f}{\alpha * \eta} * \frac{(r_e * c_{b1} + r_e * c_{b2} + r * c_{b3} * T)}{c_a}} \quad (3.90)$$

Donde:

$$f = \text{Factor de fricción de Darcy}$$

$$\alpha = 0,007 \text{ para tuberías acero al carbono}$$

$$\eta = \text{Rendimiento de los equipos moto bombas}$$

$r_e =$ Reserva de potencia instalada

$c_{b1} =$ Costo del equipo de bombeo bs/kw

$c_{b2} =$ costo de las obras civiles $\frac{bs}{kw}$

$c_{b3} =$ costo de la energia electrica bs/kwh

$T =$ numero de horas de bombeo al año

$c_a =$ costo total de la tubeira $\frac{bs}{kg}$ acero

De esta manera se garantiza el diámetro que origina el mínimo valor de la función de costo y en vista de que la misma también satisface los parámetro mecánico e hidráulicos de la estación se asume que igualmente el diámetro.

CAPÍTULO IV

ANALISIS DE LA SITUACION ACTUAL

El siguiente trabajo tiene como meta optimizar el sistema de abastecimiento de agua potable de la estación de bombeo Vista Alegre la cual presenta, en su tubería de aducción, serios problemas de pérdidas de caudal, lo que trae consigo perdidas energéticas que se traducen en económicas originadas por la explosión demográfica no planificada de los últimos tiempo en la ciudad de Caracas. Para lograr la meta propuesta, en este estudio se analizará una posible solución al problema y se determinará la factibilidad de la misma a ser puesta en marcha.

Actualmente la estación de bombeo cuenta con 4 unidades, dispuestas en paralelo, cada una de ellas compuesta por un motor y una bomba, de las cuales 3 se encuentran en operación y una permanece como reserva por razones de mantenimiento. Ver figura 4.1

4.1 Ubicación de la estación de bombeo.

La estación de bombeo Vista Alegre se encuentra ubicada al final de la Avenida García Gonzales Da Silva en la parroquia El Paraíso, municipio Libertador a una cota 1000 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m). De la estación parte una tubería de 24 pulgadas que se dirige directamente al estanque Canaima el cual surte a la estación del mismo nombre.

4.2 Especificaciones técnicas

4.2.1 Edificación de la estación de bombeo

La estación de bombeo cuenta con una infraestructura de aproximadamente unos 420mts² lo que comprende la sala de maquinas, lugar dispuesto para la colocación de equipos y múltiples de descarga y succión, la sala de controles, donde se ubican los tableros desde los cuales se monitorea el desempeño de los equipos eléctricos y la sala del operador ubicada en un espacio tal que el mismo posee visibilidad completa de la sala de maquinas, proporcionando así un monitoreo las 24 horas del día.

4.2.2 Grupo de bombas

Como se mencionó anteriormente la estación cuenta con 4 equipos motor-bomba, de las cuales 2 de ellas son del fabricante Byron Jackson y las otras 2 Ingersoll-Rand, y debido a esta diferencia de fabricante cada una de ella presenta ciertas variaciones en sus especificaciones técnicas la cuales se presentan en los siguientes cuadros.

Bombas de los equipos 2 y 4

Especificaciones técnicas	
Marca	Ingersoll-Rand
Modelo	8x13DA-6
Número de etapas o escalonamientos	6
Presión máxima de descarga	1000psig
Caudal	1617 GPM
Velocidad de giro	1780 rpm
Altura Max.	985 ft

Tabla 4.1 Especificaciones técnicas de las bombas Ingersoll-Rand ubicadas en la estación

Bombas de los equipos 1 y 3

Especificaciones técnicas	
Marca	Byron Jackson
Modelo	6x8x18h-6p-msn
Numero de etapas o escalonamientos	6
Caudal	1585(GPM)
Velocidad de giro	1760(rpm)
Altura Max	984 pie
NPSHr	22,8 Pteg
Eficiencia	82%

Tabla 4.2 Especificaciones técnicas de las bombas Byron Jackson ubicadas en la estación

4.2.3 Tuberías de la estación

Las tuberías existente en la estación de bombeo, tanto la de succión como la de descarga, son de acero ASTM 36a el cual es calificado como un acero simple al carbono y presenta la siguiente composición a parte del hierro: 0,26% de carbono, 0,04% de fosforo, 0,05% de azufre. No obstante estos porcentajes dependen de la forma del producto terminado.

4.2.3.1 Succión de la estación de bombeo

La estación de bombeo Vista Alegre es abastecida por el sistema Tuy III, el cual surte de agua al Tanque “ Los morochos de Baruta” de donde parte una tubería de 100 pulgadas la cual después de una serie de ramificaciones llega a la intercomunal de Antímamo en una tubería de 60 pulgadas en donde pasa a otra de 24 pulgadas que es la responsable de trasportar el fluido hasta la estación. Una vez allí, la tubería es recibida por medio de un múltiple de succión compuesto por una tubería principal de 24 pulgadas y 4 ramificaciones de 10 pulgadas que comprenden la succión de cada uno de los equipos que conforman la estación.(Ver figura 4.1)

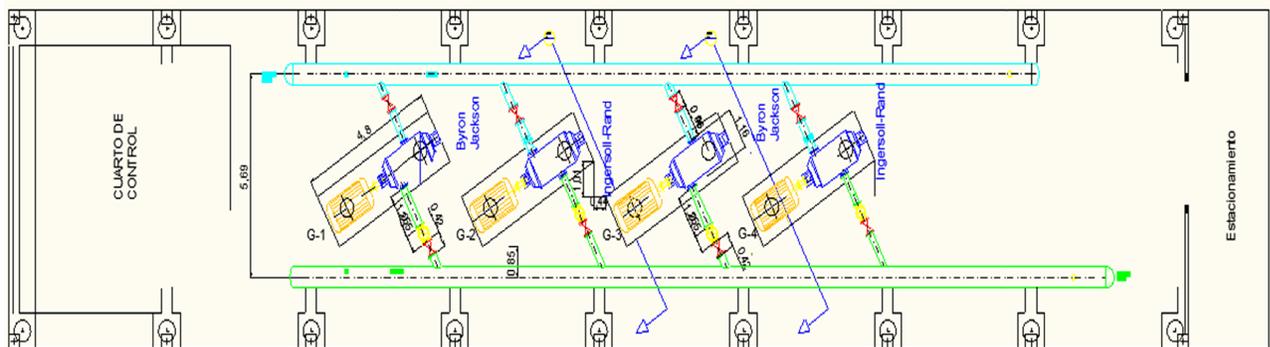


Figura 4.1 Plano de planta de la distribución de la E/B Vista alegre.

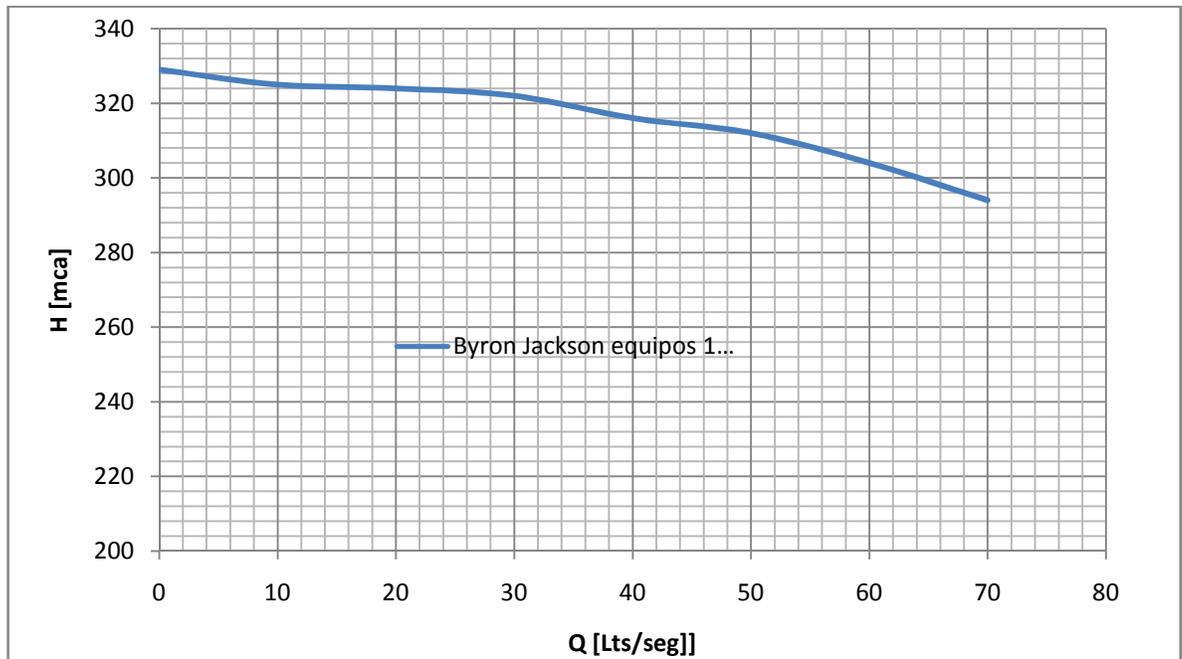
4.2.3.2 Descarga de la estación de bombeo

La descarga de la estación está comprendida por 4 ramales de 8 pulgadas que conforman la descarga de cada uno de los equipos del conjunto, las cuales son unidas a una única tubería de 24 pulgadas que es la encargada de trasportar el fluido al estanque Canaima ubicado en la cota 1297 sobre el nivel del mar. (Ver figura 4.1)

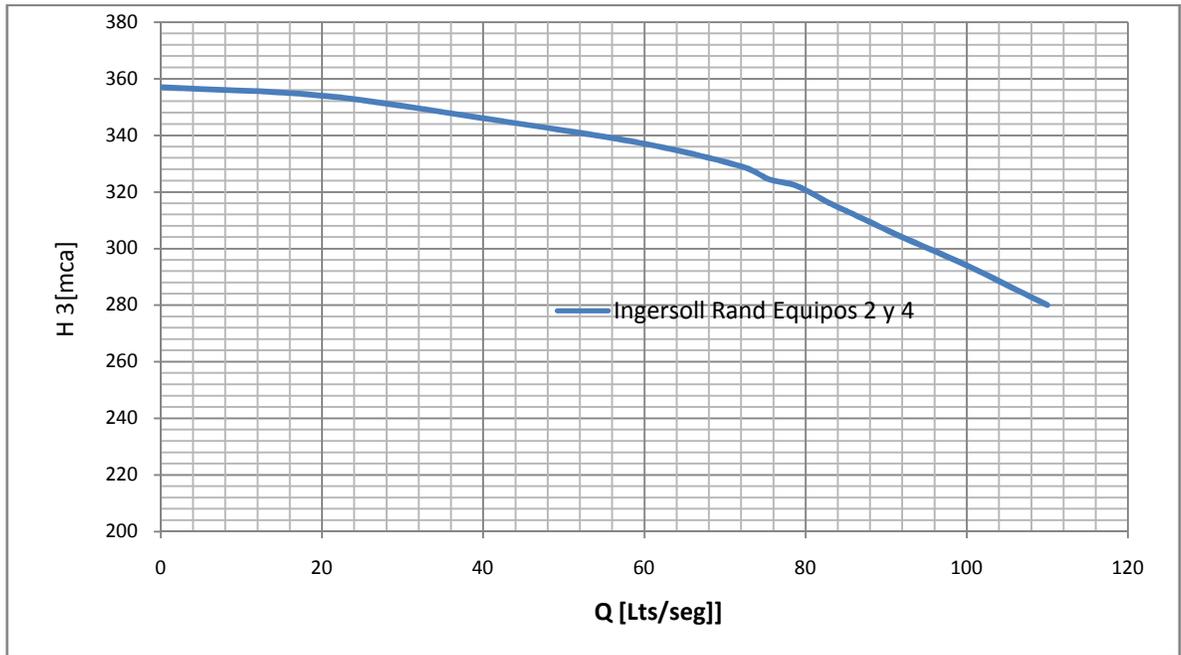
4.2.4 Arreglo actual de los equipos

La estación de bombeo actualmente trabaja con tres de sus cuatro grupos dispuestos en paralelo, teniendo de esta manera, un grupo de reserva el cual se pondrá en marcha para realizar mantenimiento a los demás grupos, no obstante en la actualidad el mismo se encuentra, por lo momentos, fuera de servicio.

Como se mencionó con anterioridad en la estación se cuenta con 2 tipos de bombas, lo que reduce las posibles combinaciones de trabajo a solo dos, cuando operan en paralelo los grupos 1, 3 y 2 o cuando operan los grupos 2, 4 y 1, en vista de que por su naturaleza los equipos 1 y 3 se consideran idénticos, al igual que los equipos 2 y 4, ya que poseen las mismas curvas características.



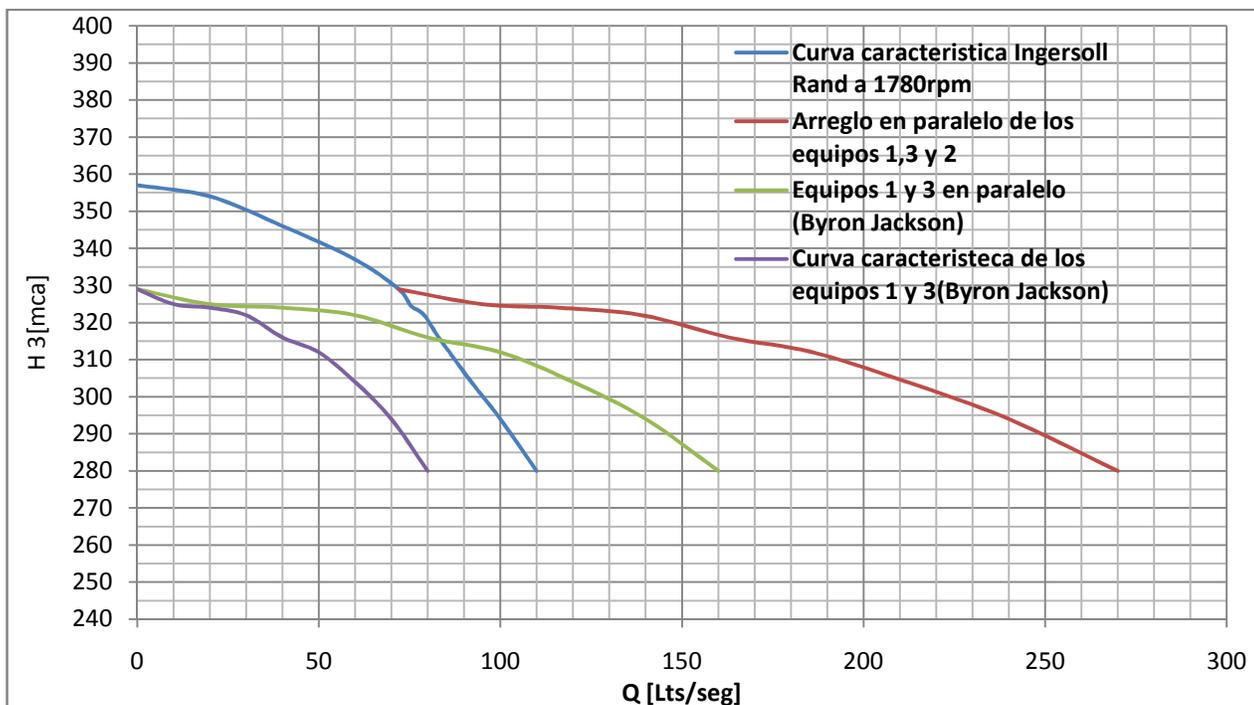
Gráfica 4.1 Curva característica de los equipos 1 y 3 marca Byron Jackson



Grafica 4.2 Curva característica de los equipos 2 y 4 marca Ingersoll Rand

4.2.4.1 Arreglo de los Grupos 1, 3 y 2.

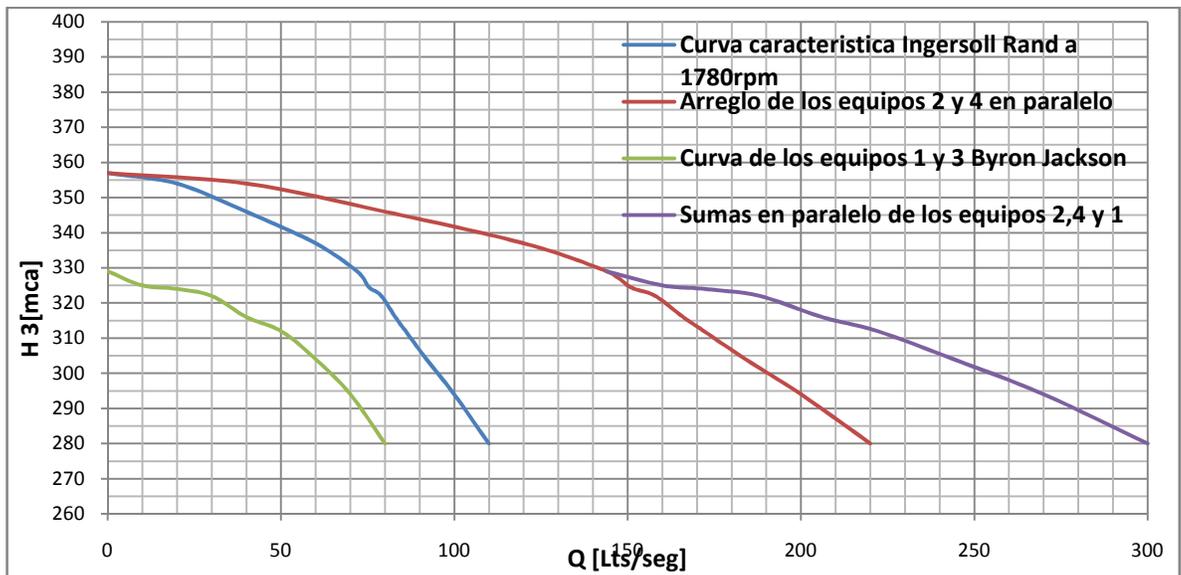
Los equipos 1, 3 y 2 se encuentran trabajando en paralelo, presentando cada uno de ellos una tubería de succión de 10" de diámetro y una descarga de 8" de diámetro. Las curvas correspondientes al comportamiento de este arreglo se presentan en la grafica 4.3



Grafica 4.3 Arreglo en paralelo de los equipos 1,3 y 2

4.2.4.2 Arreglo de los grupos 2, 4 y 3.

Las condiciones de trabajo para este arreglo son exactamente iguales a las del anterior, la diferencia se presenta en el comportamiento del mismo ya que existe una variación en las curvas características de las bombas de cada equipo. Esta diferencia se puede apreciar en la grafica 4.4



Gráfica 4.4 Arreglo en paralelo de los equipos 2, 4 y 1

4.2.5 Características de los motores eléctricos de cada equipo.

Al igual que las bombas, y como era de esperarse la estación de bombeo cuenta con dos tipos de motores eléctricos cuyas especificaciones técnicas se ven reflejadas en las siguientes tablas:

Motores	Grupos	
	1	3
Marca	ABB	
Modelo	AMH315-40	
Potencia(HP)	600	
Velocidad Nominal (rpm)	1785	
Corriente(A)	127	
Tensión(V)	2400	
Factor de potencia	0,86	
Peso(Kg)	1800	

Tabla 4.3 Especificaciones técnicas de los motores eléctricos de los grupos 1 y 4

Motores	Grupos	
	2	4
Marca	General Electric	
Modelo	5k511EN2063H	
Potencia(HP)	700	
Velocidad Nominal (rpm)	1775	
Corriente(A)	154	
Tensión(V)	2300	
Factor de potencia	1	
Peso(Kg)	1800	

Tabla 4.4 Especificaciones técnicas de los motores eléctricos de los grupos 2 y 3

4.3 Estimación de la rugosidad actual de las tuberías

Como ya se explico, en la operación de los sistemas de abastecimientos de agua potable se generan deposiciones dentro de la tubería debido a los materiales que se encuentran suspendidos y a las concentraciones de minerales.

Estos materiales se van depositando en la tubería, ocasionando que su diámetro disminuya con el tiempo, en consecuencia, los parámetros hidráulicos del sistema varían, es por ello que el estudio reviste una importancia sobre todo en maquinarias y equipos que poseen una larga vida útil.

Para este estudio se realizó la evaluación de la calidad del agua, en base a una muestra tomada en la estación de bombeo de Vista Alegre, los resultados fueron los siguientes:

Propiedad	Cantidad
Concentración de calcio	26 mg/l
Alcalinidad (CaCO₃)	65 mg/l
pH	7,29
Índice de Lagrangier	-0,5

Tabla 4.5 Propiedades de la muestra de agua tomada en la E/B Vista Alegre

Estos valores nos dicen que el agua no es dura, posee una concentración de calcio por debajo de la recomendado por la Organización Mundial de la Salud, por lo que su consumo como bebida no se recomienda, es neutra de acuerdo a su pH y en base al Índice de Lagrangier se puede decir que el agua esta muy poco saturada en relación a la concentración de carbonatos de calcio.

En base al modelo de la ecuación 3.22 y con las propiedades descritas en la tabla 4.5, se seleccionó un valor de crecimiento anual de rugosidad de 0,025 mm/año (valor medio) y sabiendo que la E/B Vista Alegre posee 13 años de operación, la rugosidad inicial del acero al carbono es de 0,0045 mm, la rugosidad actual de la tubería es:

$$\varepsilon_T = 0,0045 \text{ mm} + 0,025 \text{ mm/año} * 13 \text{ años} = 0,33 \text{ mm}$$

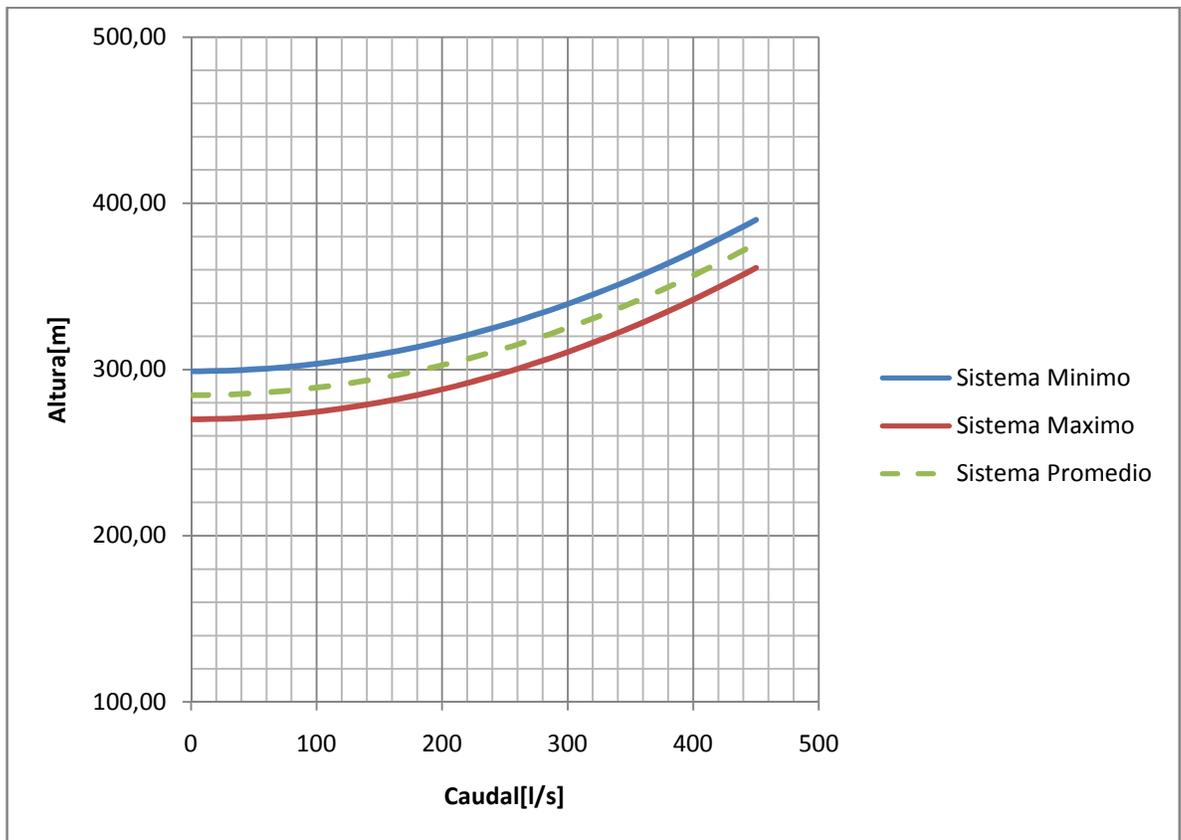
Suponiendo que esta cantidad de material se distribuye de manera uniforme en la paredes de la tubería, las tuberías de la estación de bombeo de Vista Alegre han disminuido su tamaño de 0,26 pulgadas

4.4 Curva característica del sistema

De manera general los sistemas de bombeo con parámetros operativos variables no admiten un punto único de operación, sino bandas de operación., tal es el caso presentado donde el caudal demandado por la línea no se mantiene constante en el transcurso del día. Es por esta razón que se estudian rangos de operación para las variables de altura de bombeo y caudal bombeado.

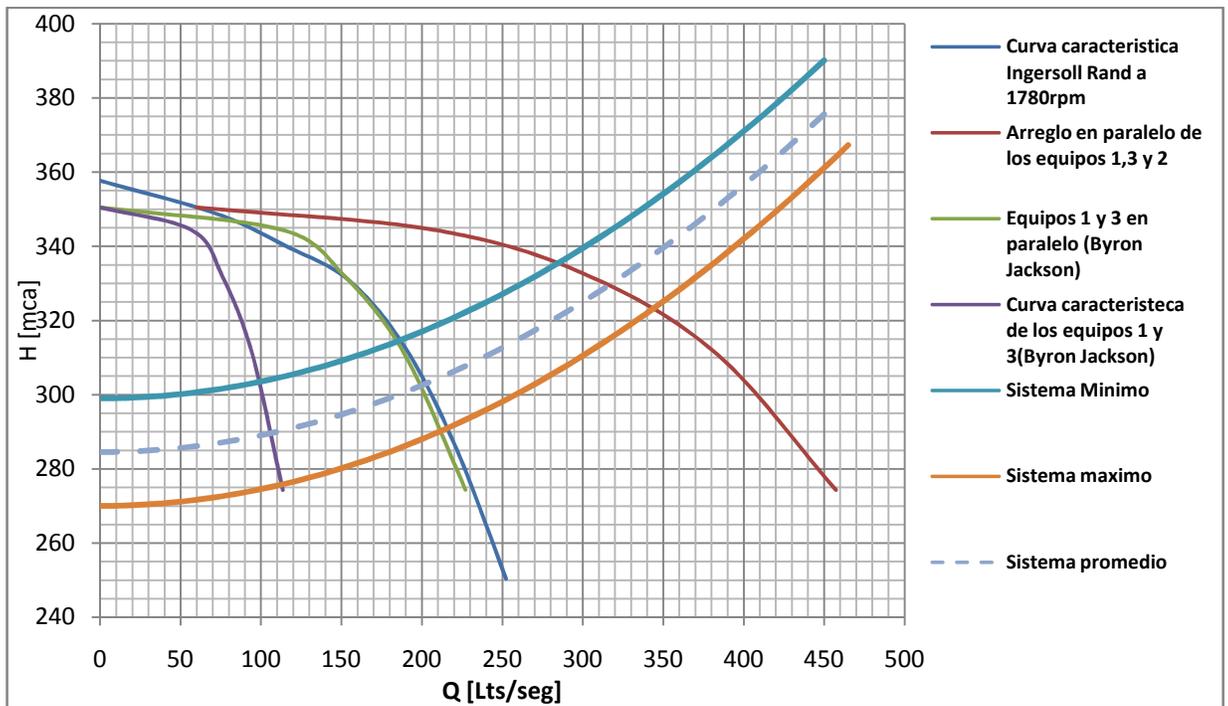
En la estación de bombeo Vista Alegre el sistema será variable de la presión de succión que posea en el múltiple, como consecuencia del nivel de agua que posee el Tanque de Los Morochos, el cual presenta cotas de 1085 m.s.n.m cuando están en su nivel máximo y 1045 m.s.n.m cuando se encuentran en su nivel mínimo de capacidad, esto indica que la presión del múltiple de succión varía entre 45 m.c.a y 85 m.c.a, por lo que la altura estática de bombeo varía entre 299 metros y 270 metros para el sistema de Vista Alegre-Canaima.

En la Estación Vista Alegre en promedio se bombean 237,4 l/s a una altura de 370 m.c.a, considerando que esa altura corresponde a la altura dinámica y considerando las variaciones expresadas en la presión de succión y la altura estática de bombeo, se representa el sistema en la siguiente grafica.

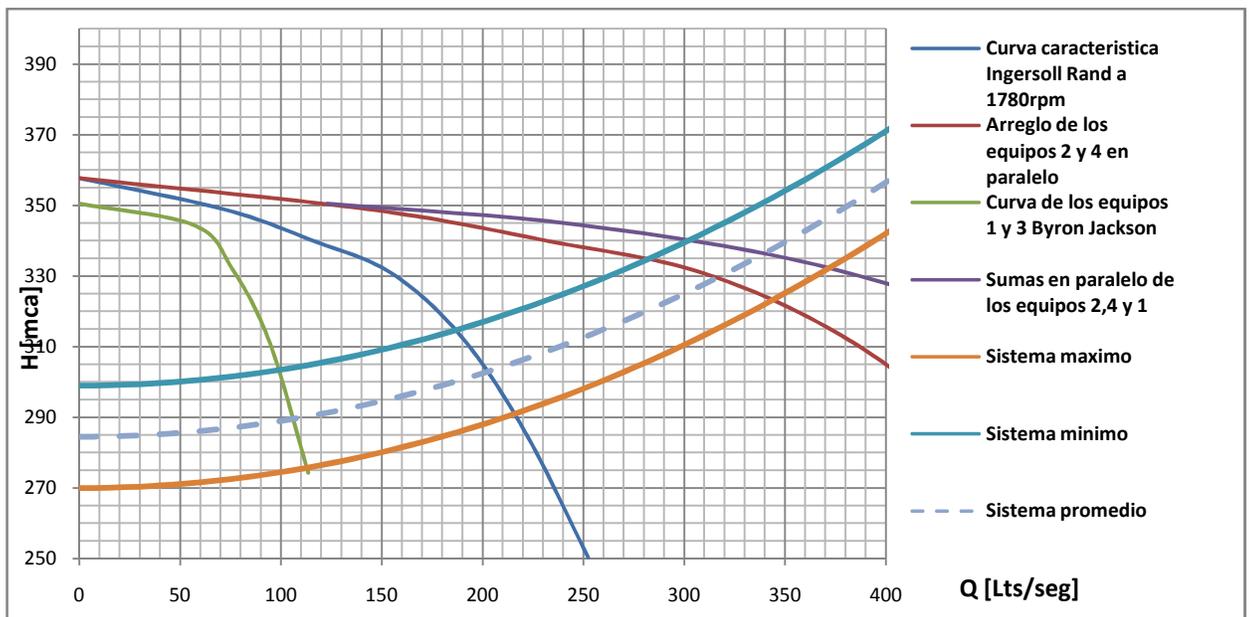


Grafica 4.5 Curva característica del sistema en la Estación Vista Alegre

Si se superponen estas curvas con las curvas de operación de los grupos y sus distintos arreglos podremos conocer los rangos de caudales bombeados por los grupos al conectarse al sistema mostrado anteriormente, como se definió en las graficas 4.3 y 4.4 sólo existen dos combinaciones posibles cuando deben trabajar 3 grupos en paralelo.



Grafica 4.6 Rango de operación de los grupos 1,2 y 3 o 1,3 y 4 al funcionar en paralelo



Grafica 4.7 Rango de operación de los grupos 1,2 y 4 o 2,3 y 4 al funcionar en paralelo

De estas graficas se puede extraer los siguientes resultados mostrados en la siguiente tabla, estos valores corresponden al sistema promedio

Equipo	Q[lts/s]	H[mca]
1	100	295
2	200	298
3	100	295
4	200	298
1,2,3 o 1,3,4	320	328
1,2,4 o 2,3,4,	340	334

Tabla 4.6 Caudales y Alturas por equipos y para los distintos arreglos posibles

4.5 Gastos de consumo

La estación de bombeo de Vista Alegre toma agua directamente del sistema Tuy III, mediante una tubería de 600 mm (24") y se distribuye a los grupos de bombeo mediante un múltiple que posee el mismo diámetro.

Para conocer el caudal bombeado por la estación se realizaron mediciones cada 10 minutos, usando un medidor de caudal por ultrasonido, los resultados se observan en la siguiente tabla

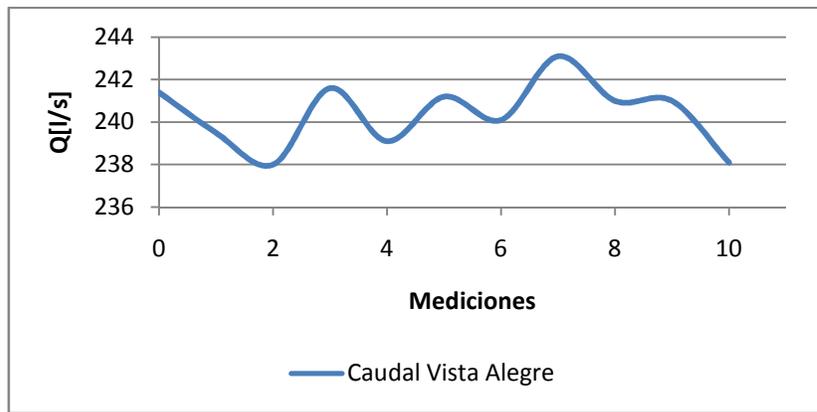
N°	Q[lts/s]
0	241,4
1	239,5
2	238
3	241,6
4	239,1
5	241,2
6	240,1
7	243,1
8	241
9	241
10	238,1

Tabla 4.7 Mediciones de caudal en el múltiple de descarga de la E/B Vista Alegre

Lo que significa que el caudal promedio es de 237,4 lts/s y con una desviación estándar de 1,57 lts/s.

Estos valores obtenidos durante esta medición corresponden con lo estipulado en el diseño de la Estación de Bombeo con el único punto a resaltar el del desgaste de los grupos de bombeo después de años de operación que hace que su valor disminuya.

En estas mediciones vemos como el caudal varia a lo largo de la prueba como se espera que sea en este tipo de instalaciones, esto se observa mejor en la grafica.

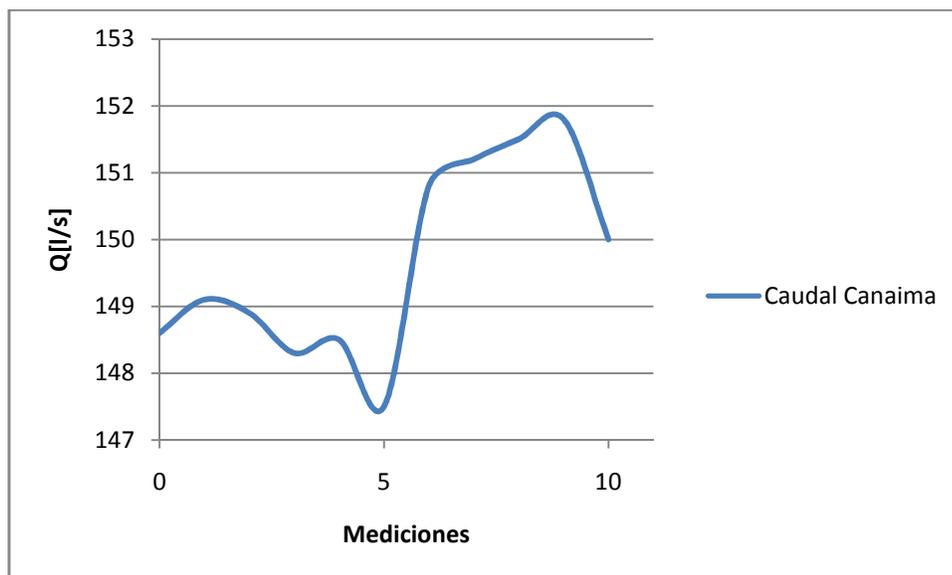


Grafica 4.8 Caudal bombeado por la Estación Vista Alegre

Cabe resaltar que la Estación Vista Alegre al ser una estación de paso este caudal debería de ser el mismo que el de la línea de aducción entre esta estación y la Estación de Bombeo Canaima considerando posibles fugas, pero es bien sabido que en esta línea ocurren múltiples tomas ilegales por lo que se procedió a tomar mediciones de caudal a la misma hora en la que tomaron las mediciones en la Estacion Vista Alegre cada 10 minutos, con el mismo instrumento antes de la entrada al tanque de la Estación Canaima para comprender la magnitud de dicho problema estos resultados se observan en la siguiente tabla y su correspondiente grafico

N°	Q [lts/s]
0	148,6
1	149,1
2	148,9
3	148,3
4	148,5
5	147,5
6	150,8
7	151,2
8	151,5
9	151,8
10	150,0

Tabla 4.8 Mediciones de caudal en la entrada al tanque de la Estación Canaima



Grafica 4.9 Caudal recibido por la Estación Canaima

Con un caudal promedio de 149,65 lts/s y una desviación estándar de 1,47 lts/s. Esta diferencia de caudales representa 90,72 lts/s en promedio por lo que la pérdida de agua en la línea representa un riesgo considerable para su funcionamiento correcto.

4.6 Parámetros eléctricos y consumos de los equipos instalados

Los equipos mecánicos requeridos en las estaciones de bombeo necesitan de elementos motores que los impulsen, en el caso de la E/B Vista Alegre que son motores eléctricos. Y estos motores necesitan de transformadores eléctricos para poder conectarse a la red eléctrica, estos poseen parámetros como es la potencia eléctrica medida en KVA. En caso de los diseños de estos sistemas se asume que la potencia consumida por los equipos eléctricos en HP es igual la potencia a manejar por los transformadores en KVA.

Además el consumo eléctrico es uno de los principales valores asociados a los costos de operación de los grupos de bombeo, es por ello que en los últimos tiempos se buscan maneras de que los equipos requieran la menor potencia y que sigan cumpliendo con su propósito operativo.

Para este estudio se utilizaron los valores de caudal y altura de la tabla 4.5, los resultados se expresan tanto en potencia eléctrica consumida como en energía consumida para un periodo de 24 horas de operación.

Equipo	KW	KWh
1	393,37	8496,80
2	694,79	15007,65
3	393,37	8496,80
4	694,79	15007,65
1,2,3 o 1,3,4	1481,53	32001,25
1,2,4 o 2,3,4	1356,14	29292,55

Tabla 4.9 Potencia y Energía consumida por los grupos en los distintos arreglos posibles

En base a esto la potencia instalada en transformadores para la estación de bombeo debe ser de mínimo 2800 KVA, actualmente están instalados 3000 KVA pero esto significa que no existe una capacidad de reserva para la instalación de nuevos equipos.

CAPÍTULO V

CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE LA ESTACION DE BOMBEO

5.1 Zona a ser abastecida

La zona a ser abastecida por la nueva estación, corresponde a todas las zonas de invasiones y barriadas adyacentes a la Carretera del Junquito, hasta llegar al kilometro 6, en donde se encuentra la llave de Coco Frio, correspondiente a la línea de gravedad del Tanque de la Estación de Bombeo Canaima, excluyendo al Barrio San Rafael el cual está conectado a la red de distribución de la estación Yaguara II.

Estos sectores no poseen nombres, principalmente porque son invasiones que tienen entre 6 meses y 3 años, por lo que aun están en proceso de conformación de la comunidad.

5.2 Proyección y determinación de la población a abastecer.

Para la proyección de la población solo se contaba con dos censos de la zona de abastecimiento, uno para el año 2008 y otro para el año 2009, estos censos fueron proporcionados por Hidrocapital.

Para realizar la proyección de la población se utilizaron alguno de los métodos descritos en el capítulo 3, en específico el método lineal, ya que al

poseer nada más dos censos de población, no era posible aplicar ninguno de los otros métodos de estimación de población.

Usando la ecuación 3.1, se generó la siguiente tabla, que nos expresa el crecimiento y la proyección de la población de la zona a ser abastecida.

AÑO	Proyección de la población
2008	10218
2009	12100
2010	13982
2011	15864
2012	17746
2013	19628
2014	21510
2015	23392
2016	25274
2017	27156
2018	29038
2020	32802
2021	34684
2022	36566
2023	38448
2024	40320

Tabla 5.1 Estimación de la población por el método lineal

5.3 Calculo del caudal medio.

El Caudal medio se determina en base a la ecuación 3.72 y basados en la población para el año 2024, mostrada en la tabla 5.1, de 40.320 habitantes y usando una dotación de 400 l/persona/día para un servicio sin medidores, se determino que el caudal medio o caudal de diseño a ser bombeado por la nueva estación será de 205,33 l/s.

5.4 Periodo de diseño.

El periodo de diseño será el tiempo en el que la estación de bombeo abastezca satisfactoriamente la demanda del sistema, a una presión adecuada y con una confiabilidad alta, se determino que esto ocurre en el año de 2024 ya que se alcanza un consumo que representa el doble del consumo bombeado por una unidad de la estación de Vista Alegre, parámetro previamente seleccionado para el diseño de la estación, esto representa un periodo de diseño de 15 años para la nueva estación considerando que no se instalen medidores en las líneas de distribución, lo cual ahorraría una cantidad considerable de agua.

5.5 Ubicación del nuevo sistema

Este sistema de bombeo de agua potable se ubicara dentro de la Estación de Bombeo de Vista Alegre, ya que se dispondrá de tal manera que las nuevas unidades tendrán el mismo múltiple de succión que las 4 unidades de Vista Alegre.

5.6 Rango de velocidades del fluido a la succión y a la descarga

En base al caudal de diseño o caudal medio se generó la siguiente tabla, la cual permite observar los valores de velocidad para los distintos diámetros de tuberías.

Dnominal (in)	Dint (in)	Velocidad (m/s)
8	7,891	6,50785782
10	10,02	4,03614444
12	11,938	2,84340677
14	13,12	2,35415185
16	15	1,80102452
18	16,87	1,42387537
24	24	0,7035252

Tabla 5.2 Velocidades en las tuberías en base al caudal de diseño

CAPÍTULO VI

DISEÑO DE LA NUEVA ESTACION DE BOMBEO

6.1 Caudal de diseño

De acuerdo a la estimación de población realizada en el capítulo 5, específicamente en la tabla 5.1, se determinó que la cantidad de personas a abastecer por la nueva estación de bombeo será de 40320 habitantes para el año de 2024, considerando de acuerdo a los valores de la tabla 3.2 para un servicio sin medidores, el caudal que debe aportar la nueva estación de bombeo al sistema es de 205,33 lts/s, siendo este el caudal de referencia o de diseño.

6.2 Consumo máximo diario

Este caudal ocurre en el día de mayor consumo, del año de mayor consumo, se determina en base a la ecuación 3.73 y asumiendo un valor de k_1 de 1,4 considerando el comportamiento de alto crecimiento del sistema el consumo máximo diario para el año 2024 será de 287,5 lts/s.

6.3 Consumo máximo horario

Al igual que el consumo máximo diario, el consumo máximo horario ocurre sólo en el año 2024, se determina en base a la ecuación 3.74, k_2 se obtuvo en base a la ecuación 3.75 y su valor es de 2.44, por lo que el consumo máximo horario para el año 2024 será de 502,5 lts/s.

6.4 Consumo en caso de incendio

Este consumo no necesariamente ocurre durante la vida de operación de la estación de bombeo sin embargo se debe asegurar que la estación de bombeo pueda abastecer en caso de que ocurra, se determina mediante la ecuación 3.76 y suponiendo que el Q_{incendio} es de 16 lts/s por ser una zona con viviendas continuas, para el año 2024 el consumo en caso de incendio será de 385,6 lts/s.

6.5 Número de unidades y etapas

6.5.1 Número de unidades

El criterio básico para la determinación del número de unidades de la estación, se establece mediante un análisis de las variaciones de consumo que se presenten en el sistema, así como las variaciones de la curva característica del mismo. Sin embargo en el caso particular de esta estación de refuerzo el espacio físico también toma un papel importante en este aspecto ya que como se mencionó con anterioridad se pretende usar el mismo espacio donde se ubica la actual estación de bombeo Vista alegre para facilitar el cambio de disposición de los equipos cuando los mismos deseen ser utilizados como refuerzo de la estación Vista alegre.

En vista a estos factores se tomaron las siguientes consideraciones para la selección del número de unidades:

- Se selecciona una velocidad de 1800 rpm para los equipos por razones de mantenimiento, ya que se alarga la vida útil de los elementos rotativos de los grupos
- Analizando los valores de caudal obtenidos se establece que para el caudal medio 205,3 l/s (m^3/h) se podría especificar la operación de 3 equipos en

paralelo sin embargo el espacio físico se vería comprometido por lo que se seleccionan 2 equipos de mayor capacidad para ser capaces de suplir la demanda durante los años de diseño de la estación.

- Para el caudal de máximo consumo diario 287,46 l/s (m^3/h), el cual corresponde al día de máximo consumo en el año de mayor demanda (2024), se requiere de la utilización de un tercer grupo, lo mismo ocurriría si se presentase un incendio ya que el caudal necesario para suplir este acontecimiento sería de 385,6 l/s (m^3/h), este tercer grupo corresponde al equipo de reserva que debe incluirse en la estación, el cual será utilizado para los casos en lo que ocurra algún tipo de falla o se presente el mantenimiento de algún equipo.

En vista a las consideraciones expuestas se establece que la instalación de dos equipos principales y uno de reserva o equipo de emergencia, de características idénticas, satisfacen al sistema desde los puntos de vista de consumo, seguridad y flexibilidad para asegurar el buen abastecimiento de agua potable a la zona en cuestión.

Es oportuno resaltar que, como se mencionó anteriormente la zona de abastecimiento a la cual va dirigida la estación son localidades que no presentan ningún control en el servicio de agua potable, por lo que una vez puesta en marcha la nueva estación y colocados los medidores pertinentes se garantizará un mejor consumo lo que añade años de diseño a las estación ya que se disminuirían en gran parte las fugas producidas por las tomas ilegales existentes.

En resumen se tiene la siguiente capacidad instalada de acuerdo al análisis de consumo y a las consideraciones del sistema:

Capacidad instalada: 2 bombas + 1 bomba de reserva

6.5.2 Numero de etapas por unidad

Para determinar el número de etapas de la bomba de cada equipo se tomaron los valores de caudal medio o caudal de diseño y una presión media, la misma viene definida por la diferencia de cotas entre la nueva

estación y el punto más alto de su recorrido. Obteniéndose así un caudal de 205,3 lts/s y una presión media de 201mts.

Con estos datos se evaluó el ábaco WORTHINGTON, anexado en el apéndice, y se obtuvo el siguiente valor de nq para rendimiento máximo

$$Q = 205,3 \frac{\text{lt}}{\text{s}} \text{ y } \eta = 85\% \gggg nq = 0,6$$

Este valor representa el nq para el rendimiento máximo de operación de los equipos, sin embargo el mismo debe corresponder a la condición impuesta anteriormente de velocidad de giro de los equipos, para esto se evalúa en la siguiente ecuación:

$$\omega = nq * \frac{(g * H)^{0,75}}{\sqrt{Q}}$$

Donde:

$$g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$H = 201 \text{ mts}$$

$$Q = \frac{205 \text{lt}}{\text{s}}$$

$$\omega = 3747,5 \text{ rpm}$$

Como se puede observar la velocidad es muy alta y supera el valor acordado de 1800 rpm, es por esta razón que se debe calcular el valor de nq manteniendo este parámetro fijo, para lo cual usamos la ecuación anterior.

$$nq = 0,2897$$

Con esta valor y el caudal volvemos al ábaco de WORTHINGTON y apreciamos que el rendimiento se encuentre por debajo del 80 % por lo cual lo tomamos como valor para el cálculo del número el nq de mayor rendimiento y la velocidad establecida

$$He = \left(\omega * \frac{\sqrt{Q}}{g^{0,75} * nq} \right)^{4/3} \quad He = 75,77$$

$$Z = \frac{H}{He} \quad z = 2,63 \text{ Se toma } z = 3$$

Se justifica la condición de 3 etapas para cada bomba con un rendimiento superior al 85%

6.6 Determinación de la característica del sistema

6.6.1 Diseño de los múltiples de succión y descarga

Para la elaboración del diseño de los múltiple de la estación se tuvo que realizar un estudio previo del comportamiento de los equipos, ya que los mismo debía poseer una disposición tal, que se les permitiese operar en serie o paralelo según fuese el requerimiento de trabajo, además el diseño de los múltiples debía minimizar en lo posible las turbulencias utilizando el espacio físico disponible en la actual estación de bombeo Vista- alegre

A continuación se presenta un plano de la distribución de las tuberías y equipos de la estación.

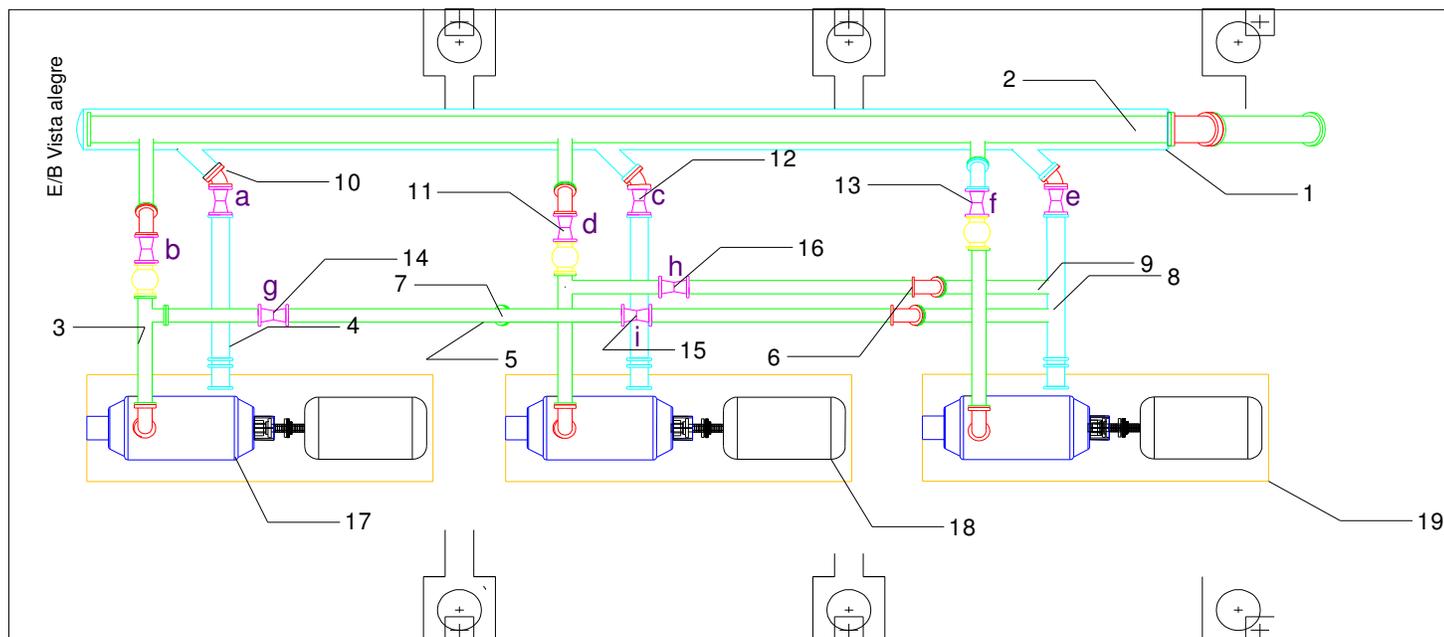


Figura 6.1 Distribución de la nueva estación de refuerzo

Capítulo VI: Diseño de la nueva estación de bombeo

Elemento	Características
1	Tubería del múltiple de succión
2	Tubería del múltiple de descarga
3	Descarga de la bomba 1
4	Succión de la bomba 1
5	Tubería que conecta la descarga de la bomba 1 con la succiones de las bombas 2 y 3
6	Tubería que conecta la descarga de la bomba 2 con la succión de la bomba 3
7	Salida de la tubería 5 para la succión de la bomba 2
8	Salida de la tubería 5 para la succión de la bomba 3
9	Salida de la tubería 6 para la succión de la bomba 3
10	Codo de 45° en las succiones al múltiple de succión
11	Válvula de retención (válvula check)
12	Válvula de paso de la succión(válvula de compuerta)
13	Válvula de paso de la descarga(válvula de compuerta)
14	Válvula de paso de la tubería 5 para la conexión entre la descarga de la bomba 1 y la succión de la bomba 2(válvula de compuerta)
15	válvula de paso de la tubería 5 para la conexión entre la descarga de la bomba 1 y la succión de la bomba 3(válvula de compuerta)
16	válvula de paso de la tubería 6 para la conexión entre la descarga de la bomba 2 y la succión de la bomba 3 (válvula de compuerta)
17	Motor eléctrico
18	Bomba centrífuga
19	Fundación de la bombas

Tabla 6.1 Características de los componentes de la estación

Diámetro de los sistemas de succión y descarga.

De acuerdo con la ecuación (3.12)

$$Q = V * A$$

$$A = \pi * \frac{D^2}{4}$$

Para realizar el cálculo de los diámetros de las tuberías de la estación de bombeo, primero se tuvo que hacer un análisis de los caudales circulantes por las mismas ya que como se mencionó, la estación debe estar diseñada para su operación tanto en serie como en paralelo por lo que, según sea el caso el diámetro escogido debía cumplir con los parámetros de velocidades preestablecidos. En el caso particular de la tubería del múltiple de succión no es necesario calcular un diámetro ya que en vista de que esta nueva estación de bombeo está siendo diseñada para tener la versatilidad de poder ser refuerzo de la actual estación de bombeo Vista alegre la succión de la estación en cuestión será la misma, la cual tiene un diámetro de 24 (pulgadas)

Para calcular el diámetros de la tubería principal de descarga se tomo el caudal de diseño (205, 3 lts/s o 738 m^3/hr) y tomando en cuenta que el material de la tubería es acero al carbono y schedule 40 se tomaron los diámetros internos que proporcionan las tablas del Cameron para estas característica, de esta manera se elaboró el siguiente cuadro.

Diámetro nominal	Dint(in)	Área(m^2)	Velocidad(m/s)
8	7.891	0.0315516	6.507857819
10	10.02	0.05087363	4.03614444
12	11.938	0.07221384	2.843406774
14	13.12	0.08722179	2.35415185
16	15	0.11400918	1.801024517
18	16.87	0.14420738	1.42387537
24	24	0.29186351	0.703525202

Tabla 6.2 Análisis de los posible diámetros para la tubería del múltiple de descarga

Para el cálculo de los diámetros de las tuberías secundarias de succión y descarga se analizó según la operación el caudal circulante, en el caso de trabajar en paralelo el mismo debe ser tomado como la mitad del caudal de diseño (102,5 lt/s o 67,2 m^3/hr), para el caso de trabajar en serie se debe tomar el caudal bombeado por una sola bomba, lo que sería equivalente al mismo caudal que circula en paralelo (102,5 lt/s o 67,2 m^3/hr).

Tomando en cuenta las mismas condiciones para las tuberías de los múltiples principales se elaboro el siguiente cuadro

Diámetro nominal	Dint(en pulgadas)	Área(m^2)	Velocidad(m/s)
8	7.891	0.0315516	3.253928909
10	10.02	0.05087363	2.01807222
12	11.938	0.07221384	1.421703387
14	13.12	0.08722179	1.177075925
16	15	0.11400918	0.900512258
18	16.87	0.14420738	0.711937685

Tabla 6.3 Análisis de los posible diámetros para las tuberías secundarias de succión y descarga

Selección del diámetro del múltiple de descarga.

Para realizar la selección del diámetro apropiado para el múltiple de descarga se realizó un análisis de la tabla 6.2 tomando en consideración la condición de rango de velocidades permitidos para la descarga, el cual se sitúa desde 2m/s hasta 4 m/s. Según esta condición los diámetros más apropiados serían 12 y 14 pulgadas, por lo cual en un principio se escogió un diámetro de 14 pulgadas, sin embargo después de una investigación de factibilidad en el mercado se concluyó que, tuberías de acero al carbono de 14 pulgadas no se están fabricando en el país, por tal motivo se debía considerar la siguiente opción la cual sugería tomar un diámetro de 12 pulgadas, no obstante

la velocidad aunque bien se encuentra dentro de los niveles es muy elevada, y para el caso especial de esta estación de bombeo se debe minimizar en la medida de lo posible las perdidas, ya que la complejidad de los múltiples de succión y descarga de las bombas ocasionan un alto valor de perdidas por accesorio por lo que sería prudente trabajar en un rango de velocidades pequeños para optimizar el funcionamiento.

Por otra parte se procedió a calcular el diámetro óptimo desde el punto de vista económico, el mismo se calculo de acuerdo a la ecuación 3.89 y 3.90 utilizando los siguientes valores para las variables.

$$\begin{aligned}f &= 0,0145 \\ \alpha &= 0,0007 \\ \eta &= 0,75 \% \\ r_e &= 1,5 \\ c_{b1} &= 1220,33 \text{ bsf/kw} \\ c_{b2} &= 0 \text{ bsf/kw} \\ c_{b3} &= 0,050 \text{ bsf/kwh} \\ T &= 8760 \text{ hr/año} \\ c_a &= 9,75 \text{ bsf/kg}\end{aligned}$$

Por lo tanto R tomara un valor de 0,93, lo que significa que el diámetro optimo será de 18,47 pulgadas

Tomando en cuenta estas posibilidades, se llegó a la conclusión de que el diámetro más apropiado debía ser de 16 pulgadas debido a que no originaba altas velocidades, ni altos costos, por lo que el diámetro se fijó en este valor.

Selección de los diámetros de las tuberías de succión individuales para cada bomba (tuberías secundarias)

Para la selección del diámetro de las tuberías de succión de cada bomba se realizó un análisis del cuadro 6.3 y tomando la condición del rango permitido de velocidades para la descarga el cual va de 1 m/s a 2.5 m/s, se escogió un diámetro de 12 pulgadas el cual corresponde a una velocidad de 1.421703387 m/s.

Selección de los diámetros de las tuberías de descarga individuales para cada bomba (tuberías secundarias)

Para la selección del diámetro de las tuberías de descarga de cada bomba así como en el caso anterior se analizó el cuadro 6.3 y tomando la condición del rango permitido de velocidades para la descarga el cual va de 2 m/s a 4 m/s, se escogió un diámetro de 10 pulgadas el cual corresponde a una velocidad de 2.018m/s, como se mencionó anteriormente para el caso particular de esta estación es recomendable trabajar con valores de velocidades que se acerquen mas al límite inferior permitido.

Resultado de la selección de diámetros para todas las tuberías de la estación

A continuación se presenta un cuadro con los resultados de la selección de diámetros, el mismo hace referencia a la enumeración elaborada en la figura 6.1

Tubería	Diámetro nominal (in)	Diámetro interno (in)	Caudal (lts/s)	Velocidad (m/s)
2	16	15	205.3	1.80102452
2	16	15	102.65	0.90015
3	10	10.02	102.65	2.01807222
4	12	11.938	102.65	1.42170339
5	10	10.02	102.65	2.01807222
6	10	10.02	102.65	2.01807222

Tabla 6.4 Resultado de la selección de diámetros para todas las tuberías de la estación

6.6.2 Manipulación de válvulas para la disposición de los equipos en serie o en paralelo.

Para lograr el cambio de disposición de los equipos el diseño cuenta con un conjunto de válvulas y conexiones como puede observarse en la figura 6.1, a continuación se muestra un cuadro donde se refleja la condición que debe adquirir cada válvula para pasar de una condición a otra en sus 3 posibilidades.

Paralelo	Grupos	Válvulas abiertas	Válvulas cerradas
	1 y 2	a,b,c,d	g,h,i,f,e
	1 y 3	a,b,e,f	g,h,i,c,d
	2 y 3	c,d,e,f	g,h,i,a,b
Serie	Grupos	Válvulas abiertas	Válvulas cerradas
	1 y 2	a,g,d	b,c,i,e,f,h
	1 y 3	a,g,h,f	b,e,i,c,d
	2 y 3	c,i,f	d,e,a,b,g,h

Tabla 6.5 Condición de cada válvula del diseño según la disposición de los equipos

6.6.3 Curva característica del sistema

La estación de bombeo está diseñada para operar en dos sistemas diferentes, ya que el cambio de trabajo de las bombas, de serie a paralelo o viceversa, acarrea consigo un cambio en el sistema contra el cual se está bombeando, es por esta razón que se presentan dos curvas características del sistema las cuales corresponden al tipo de operación en el cual se encuentre la estación.

6.6.3.1 Curva característica del sistema con los equipos dispuestos en paralelo

El sistema, cuando se encuentran trabajando en paralelo las bombas, es constituido por una tubería de 16 pulgadas de diámetro y 2,6 km de longitud, siendo la misma una tubería completamente nueva. Para elaborar la curva característica de este sistema se llevaron a cabo los siguientes procedimientos hidráulicos:

De la ecuación (3.18) se obtienen las pérdidas por tramo recto a lo largo la tubería de descarga:

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{V_m^2}{2 * g}$$

Donde

$$L = 2,6 \text{ km o } 2600 \text{ mts}$$

$$D = 16 \text{ pulgadas o } 0,4064 \text{ mts}$$

$$\frac{V_m^2}{2 * g} \text{ es la presión dinámica y } V_m = 1.80102452$$

f = el factor de fricción adimensional de Darcy

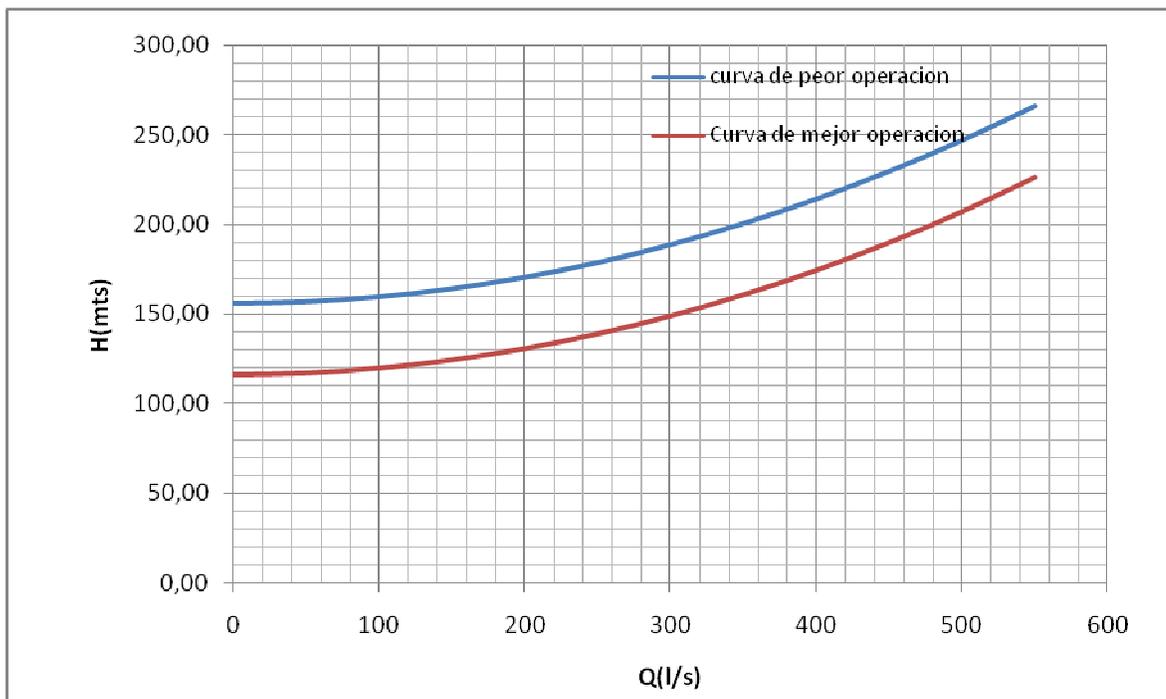
Para el cálculo del factor de Darcy se utilizó el diagrama de Moody con el valor del número de Reynolds para ese fluido en esas condiciones y la rugosidad relativa, siendo la tubería de acero al carbono. Ver apéndices

De la ecuación (3.13)

$$Re = \frac{\text{fuerzas inerciales}}{\text{fuerzas viscosas}} = \frac{V_m * D}{\nu} = \frac{\rho * V_m * D}{\mu}$$

Con este valor y tomando la altura estática del sistema la cual se refiere a la diferencia de cotas entre la estación de bombeo Vista Alegre y el punto más alto de la tubería de la nueva estación, coco frío, se elaboraron dos curvas características del sistema en paralelo, la primera se refiere a las condiciones más favorables de trabajo para esta estación, es decir y como se mencionó anteriormente, cuando el sistema está

operando con el mayor valor de presión en la succión y cuando es sistema opera con el menor valor de presión en la succión, obteniéndose así las siguientes curvas:



Grafica 6.1 Curvas de mejor y peor operación del sistema en paralelo

6.6.3.2 Curva característica del sistema con los equipos dispuestos en serie

El sistema, cuando las bombas se encuentran trabajando en serie, se comporta como una estación de refuerzo para el bombeo de vista alegre, es decir pasa a ser una bomba adicional a dicha estación, lo que implica que debe satisfacer el mismo sistema al cual responde vista alegre. Para que esto sea posible se diseñó una conexión entre la tubería de descarga de la nueva estación y la de vista alegre la cual se ubicó al final de la tubería de descarga de la nueva estación, punto al cual se le dio el nombre de coco frio. De esta manera el sistema se ve comprendido por una tubería de 16 pulgadas de diámetro y 2,6 km de longitud, una expansión de 16 pulgadas a 24 pulgadas

y una tubería de 2,5 km de longitud y 24 pulgadas de diámetro. No obstante debido a esta conexión se presenta una suma de caudales, el caudal bombeo por la nueva estación y el bombeado por Vista alegre, a raíz de esto se origina lo que se llama una red, por lo cual para poder conseguir la curva de ese sistema en su totalidad se procedió a realizar una suma de los sistemas como se muestra:

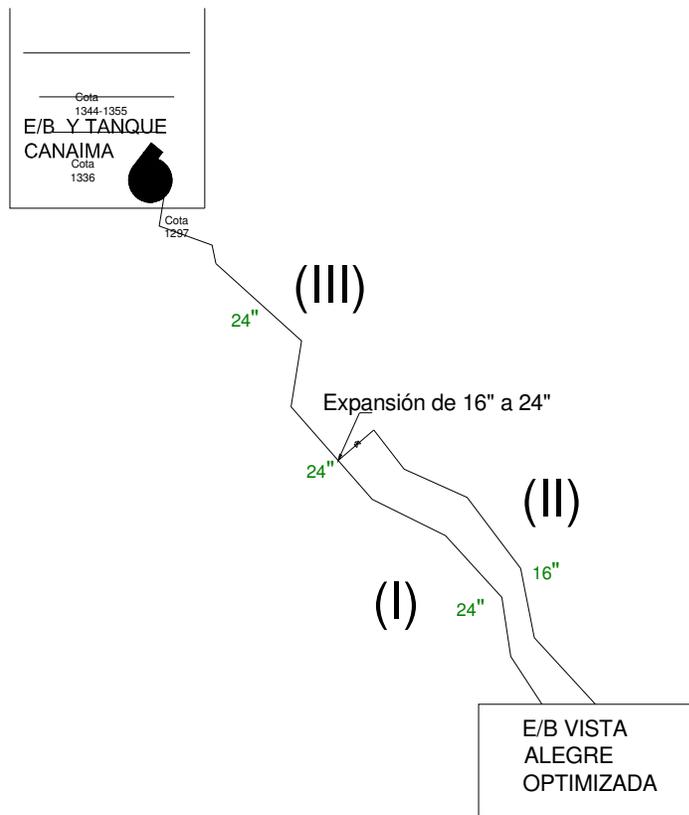


Figura 6.2 Representación del sistema en serie

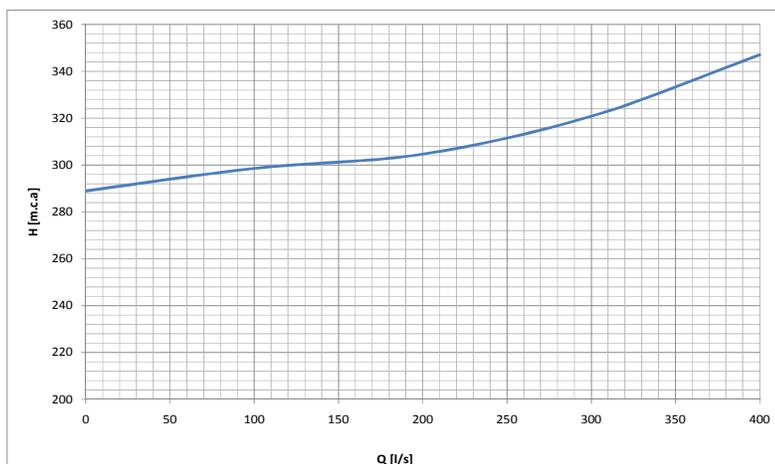


Figura 6.2 Curva del sistema operando en serie

6.6.3.3 Perdidas dentro de la estación de bombeo

La estación de bombeo se ve comprendida por un conjunto de tuberías y accesorio los cuales originan perdidas localizadas de energía. Para poder cuantificar estos valores y visualizar la influencia de los mismos en el comportamiento del compromiso entre el sistema y el conjunto de bombas se hace un análisis de todos los tramos y accesorios que constituyen la succión y la descarga de la estación.

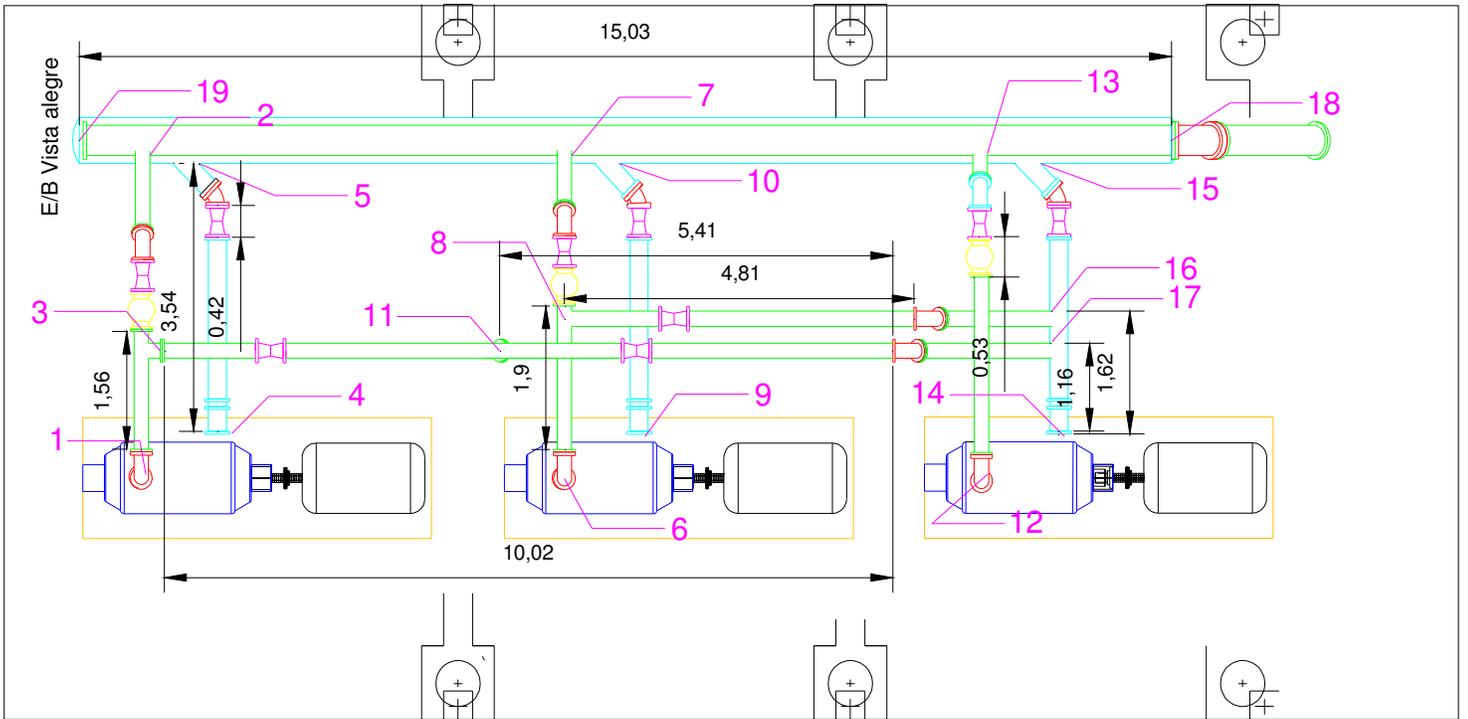


Figura 6.3 Distribución por nodos de los tramos de tubería que conforman la estación

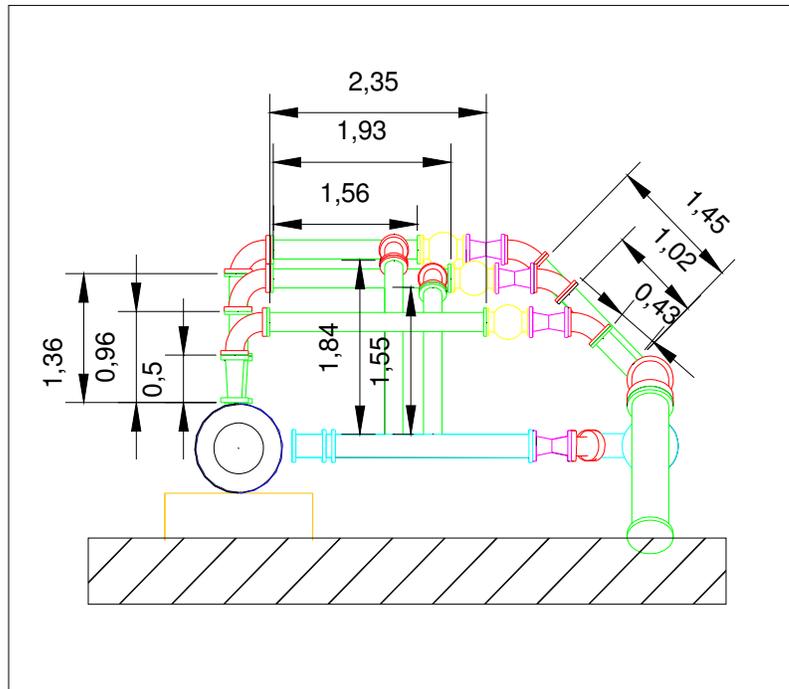


Figura 6.4 Vista lateral derecha de la estación nueva

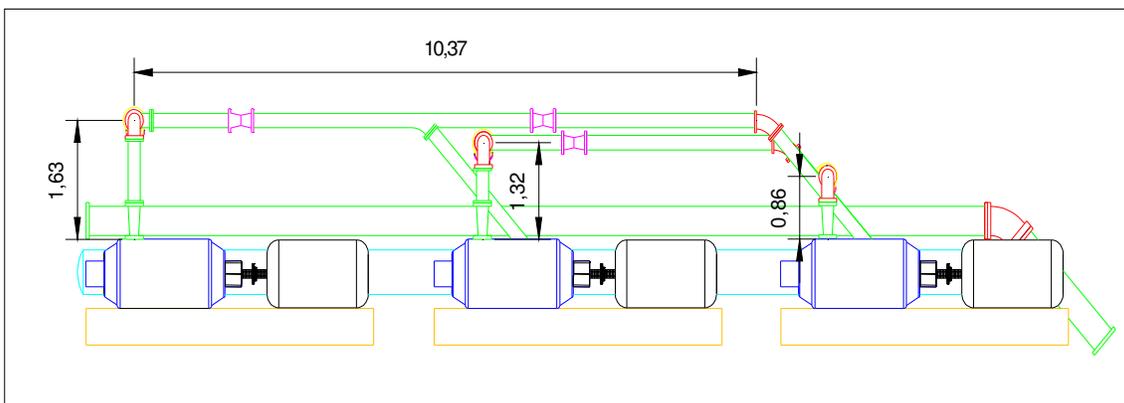


Figura 6.5 Vista frontal de la estación

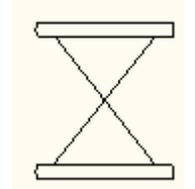
Tramos de tubería	Longitudes (m)	Diámetro (in)
4 a 5	3.54	11.938
9 a 10	3.54	11.938
3 a 11	4.61	10
20 a 9	1.16	11.938
16 a 14	1.61	11.938
17 a 14	1.16	11.938
14 a 15	3.54	11.938
18 a 19	15	15
18 a 19	15	15
1 a 2	5.16	10
6 a 8	2.88	10
1 a 3	2.92	10
6 a 7	3.93	10
8 a 16	6.72	10
11 a 20	2.45	10
3 a 17	12.32	10
13 a 12	4.63	10

Tabla 6.6 Resumen de la enumeración de tuberías según nodos

Perdidas por accesorios

Como se puede observar de la figura 6.3, las tuberías que conforman la estación de bombeo presentan un conjunto de válvulas y codos, los cuales son llamados accesorios y generan una pérdida localizada de energía la cual varía según el tipo y el diámetro de dicho accesorio.

Utilizando la ecuación (3.21) y seleccionando los respectivos coeficientes (k) para cada accesorio se calcularon las pérdidas correspondientes. Ver apéndice número 4.

Accesorio	Esquema del accesorio	Diámetro pulgadas	k coeficiente de pérdidas	Velocidad(m/s)	Perdidas hf(mca)
Codo de 45° largo embridado		12	0.4	1.4124715	0.04067433
Codo de 45° largo embridado		10	0.4	2.0129957	0.08261268
Válvula de compuerta 100% abierta		12	0.19	1.4124715	0.01932031

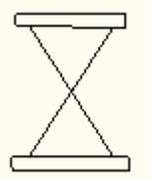
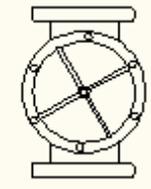
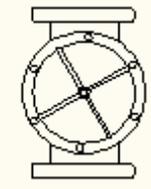
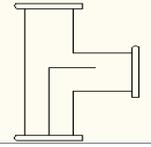
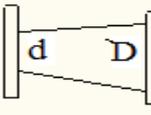
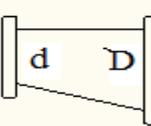
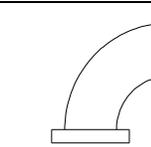
Válvula de compuerta 100% abierta		10	0.19	2.0129957	0.03924102
Válvula de retención (check) 100% abierta		12	3.5	1.4124715	0.35590038
Válvula de retención (check) 100% abierta		10	4.5	2.0129957	0.92939263
Conexión Tee embridada de 10x10x10		10	1	1.4124715	0.10168582
Cono de 10" a 6" donde $d/D = 0.6$		6"/10"	0.15	5.5916549	0.23904131
Cono excéntrico de 12" a 8" donde $d/D = 0.6$		8"/12"	0.15	3.1453059	0.07563417
Codo de 90° suave embridado		10"	0.3	1.4124715	0.03050575

Tabla 6.7 Perdidas de energía por accesorios

Perdidas por tramos recto

De acuerdo con la enumeración realizada anteriormente se calculan las pérdidas por tramo recto dentro de la estación

Como se puede observar del diseño existen un grupo de tramos de tuberías que además de tener una serie de accesorios como válvulas o codos, presentan elevaciones es decir, variaciones en la energía potencial del fluido, es por esta razón que para estos casos particulares se debe realizar un cálculo de pérdidas diferente.

Perdidas por tramo recto sin elevaciones

Para el cálculo de las pérdidas originadas en los tramos de tuberías que no presentan variaciones de cotas se utilizaron las formulas 3.18 y 3.20. Ver apéndices

A continuación se presenta un cuadro con los resultados obtenidos

Tramos de tubería	Longitudes	Diámetro (in)	Velocidad (m/s)	f	Reynolds	Hf(m)
4 a 5	3.54	11.938	1.412471547	0.013492059	426590.605	0.01601683
9 a 10	3.54	11.938	1.412471547	0.013492059	426590.605	0.01601683
3 a 11	4.61	10	2.012995746	0.013076642	509263.864	0.04901739
20 a 9	1.16	11.938	1.412471547	0.013492059	426590.605	0.00524845
16 a 14	1.61	11.938	1.412471547	0.013492059	426590.605	0.00728449
17 a 14	1.16	11.938	1.412471547	0.013492059	426590.605	0.00524845
14 a 15	3.54	11.938	1.412471547	0.013492059	426590.605	0.01601683
18 a 19	15	15	1.798100775	0.01241497	682347.007	0.08054545

Tabla 6.8 pérdidas por tramos rectos sin elevaciones

Perdidas por tramo recto con elevaciones.

Para el cálculo de las pérdidas originadas en los tramos de tuberías que presentan una variación de cota entre el punto inicial del tramo y el final, se realizó un balance de energía entre ambos puntos para expresar las pérdidas originadas por la componente de energía potencial, para esto se utilizó la ecuación (3.17). Ver apéndices

Se puede observar que para calcular las pérdidas con dicha fórmula es necesario el valor de las diferencias de presiones reales entre ambos puntos, valores que no son posibles de obtener debido a que la puesta en marcha de esta estación aun no se lleva a cabo, sin embargo dicho valor representa el total de las pérdidas ocasionadas en la tubería, es decir, pérdidas por tramos recto más accesorios. Los resultados se ven en la siguiente tabla

Tramos de tubería	Diámetro (in)	Velocidad (m/s)	f	Reynolds	Z2 (m.c.a)	Perdidas por accesorios	Hf(m.c.a)
1 a 2	10	2.01299	0.013	509263.864	0.04	1.3207933	1.3356
6 a 8	10	2.01299	0.013	509263.864	-1.55	0.0305057	1.6111
1 a 3	10	2.012995	0.013	509263.864	-1.36	0.0305057	1.4215
6 a 7	10	2.012995	0.013	509263.864	0.04	1.3207933	1.3225
8 a 16	10	2.012995	0.013	509263.864	-1.55	0.2235395	1.8449
11 a 20	10	2.012995	0.013	509263.864	-1.84	0.0826126	1.9486
3 a 17	10	2.012995	0.013	509263.864	-1.84	0.262780547	2.2337
13 a 12	10	2.012995	0.013	509263.864	0.04	1.320793394	1.3300

Tabla 6.9 Perdidas totales para tramos con elevaciones.

Pérdidas totales según el tipo de operación

El análisis de pérdidas corresponderá a tipo de operación bien sea en paralelo o en serie adicional, las pérdidas también deben ser clasificadas según correspondan a la succión o a la descarga de la operación.

Operación en paralelo

En vista que la nueva estación presenta un equipo de reserva existen 3 posibilidades diferentes de trabajar en paralelo, lo cual afecta el recorrido del fluido dentro de la estación y su vez el cálculo de las pérdidas.

Posibilidad # 1

Trabajando los equipos 1 y 2

Recorrido: Siguiendo la enumeración de la figura 6.3 se realizó el recorrido del fluido por tramos.

Tramos: 4 a 5, 1 a 2, 9 a 10, 6 a 7 y 19 a 18.

Succión: Tramos 5 a 4 y 10 a 9

Accesorios: 2 codos largos de 45° embridados, 2 válvulas de retención de 12" y dos conos de 12" a 8"

Descarga: Tramos 1 a 2, 6 a 7 y 19 a 18

Accesorios: 2 codos de 45°, 2 codos de 90°, 2 válvulas de compuerta de 10", 2 válvulas de retención de 10" y 2 conos de 10" a 6".

Para calcular las pérdidas de dicho recorrido se suman los valores expresados en los cuadros 6.7, 6.8 y 6.9 correspondientes a

cada tramo y accesorio. Cabe recordar que para los tramos 6 a 7 y 1 a 2 los accesorios están incluidos dentro del valor total de pérdidas.

Probabilidad # 2

Trabajando los equipos 1 y 3

Recorrido: 4 a 5, 1 a 2, 15 a 14, 12 a 13 y 19 a 18

Succión: Tramos 5 a 4 y 15 a 14

Accesorios: 2 codos largos de 45° embridados, 2 válvulas de retención de 12" y dos conos de 12" a 8"

Descarga: Tramos 1 a 2, 12 a 13 y 19 a 18

Accesorios: 2 codos de 45°, 2 codos de 90°, 2 válvulas de compuerta de 10", 2 válvulas de retención de 10" y 2 conos de 10" a 6".

Probabilidad # 3

Trabajando los equipos 2 y 3

Recorrido: 9 a 10, 6 a 7, 15 a 14, 12 a 13 y 19 a 18

Succión: Tramos 9 a 10 y 15 a 14

Accesorios: 2 codos largos de 45° embridados, 2 válvulas de retención de 12" y dos conos de 12" a 8"

Descarga: Tramos 6 a 7, 12 a 13 y 19 a 18

Accesorios: 2 codos de 45°, 2 codos de 90°, 2 válvulas de compuerta de 10", 2 válvulas de retención de 10" y 2 conos de 10" a 6".

Resultado de las pérdidas totales presentadas dentro de la estación según las tres probabilidades de trabajar en paralelo

Succión

Paralelo	Perdidas por tramos rectos (m.c.a)	Perdidas por accesorios (m.c.a)	Pérdidas totales (m.c.a)
1 y 2	0.03203366	0.271257605	0.303291268
1 y 3	0.03203366	0.271257605	0.303291268
2 y 3	0.03203366	0.271257605	0.303291268

Tabla 6.10 Perdidas totales en la succión para el trabajo en paralelo

Descarga

Paralelo	Perdidas por tramos rectos (m.c.a)	Perdidas por accesorios (m.c.a)	Pérdidas totales (m.c.a)
1 y 2	2.73878475	0	2.73878475
1 y 3	2.74622774	0	2.74622774
2 y 3	2.73314934	0	2.73314934

Tabla 6.11 Perdidas totales en la descarga para el trabajo en paralelo

Operación en serie

Al igual que se presenta en el caso de trabajo en paralelo, la estación presenta 3 probabilidades de trabajar en serie.

Posibilidad # 1

Trabajando los equipos 1 y 2

Recorrido: Tramos 5 a 4, 1 a 3, 3 a 11, 11 a 20, 20 a 9, 6 a 7 y 19 a 18

Succión: Tramos 5 a 4

Accesorios: 1 codo largo de 45° de 12", 1 válvula de compuerta de 12" y 1 cono de 12" a 8".

Descarga: Tramos 1 a 3, 3 a 11, 11 a 20, 20 a 9, 6 a 7 y 19 a 18

Accesorios: 1 conexión tee de 10 x 10 x 10, 2 válvulas de compuerta de 10", 2 codos largos de 45° de 10", 1 válvula de retención (check) de 10", 3 codos de 90° de 10", 2 conos de 10" a 6" y 1 cono de 12" a 8"

Probabilidad # 2

Trabajando los equipos 1 y 3

Recorrido: 5 a 4, 1 a 3, 3 a 17, 17 a 14, 12 a 13 y 19 a 18.

Succión: Tramo 5 a 4

Accesorios: 1 codo largo de 45° de 12", 1 válvula de compuerta de 12" y 1 cono de 12" a 8".

Descarga: Tramos 1 a 3, 3 a 17, 17 a 14, 12 a 13 y 19 a 18.

Accesorios: 1 conexión tee de 10 x 10 x 10, 3 válvulas de compuerta de 10", 2 codos largos de 45° de 10", 2 codos de 90° de 10", 1 válvula de retención (check) de 10" , 2 conos de 10" a 6" y 1 cono de 12" a 8"

Probabilidad # 3

Trabajando los equipos 2 y 3

Recorrido: 10 a 9, 6 a 8, 8 a 16, 16 a 14, 12 a 13, y 19 a 18

Succión: Tramo 10 a 9

Accesorios: 1 codo largo de 45° de 12", 1 válvula de compuerta de 12" y 1 cono de 12" a 8".

Descarga: Tramos 6 a 8, 8 a 16, 16 a 14, 12 a 13, y 19 a 18.

Accesorios: 1 conexión tee de 10 x 10 x 10, 2 válvulas de compuerta de 10", 2 codos largos de 45° de 10", 2 codos de 90°, 1 válvula de retención (check) de 10", 2 conos de 10" a 6" y 1 cono de 12" a 8"

Resultado de las pérdidas totales presentadas dentro de la estación según las tres probabilidades de trabajar en serie.

Succión

Serie	Perdidas por tramos rectos (m.c.a)	Perdidas por accesorios (m.c.a)	Pérdidas totales (m.c.a)
1 y 2	0.01601683	0.135628802	0.151645634
1 y 3	0.01601683	0.135628802	0.151645634
2 y 3	0.01601683	0.135628802	0.151645634

Tabla 6.12 Perdidas totales en la succión en el trabajo en serie

Descarga

Serie	Perdidas por tramos rectos (m.c.a)	Perdidas por accesorios (m.c.a)	Pérdidas totales (m.c.a)
1 y 2	4.76964748	0.216561012	4.9862085
1 y 3	5.01318707	0.075634166	5.08882124
2 y 3	4.81601288	0.075634166	4.89164704

Tabla 6.13 Perdidas totales en la descarga en el trabajo en serie

6.7 Determinación de la característica de las bombas

6.7.1 Selección de bombas

Para seleccionar la curva característica de los equipos de bombeo se trazo una pendiente estimada para el comportamiento adecuado de los equipos, para ello se utilizaron dos puntos escogidos en base al punto de operación que se estimó para el sistema, estos valores se presentan en el siguiente cuadro.

H[m.c.a]	Q[lts/s]
194,2	140
185	149,2

Tabla 6.14 Puntos de pendiente de la curva de la bomba

En base a esto se selecciono una curva de una bomba que posee el siguiente comportamiento

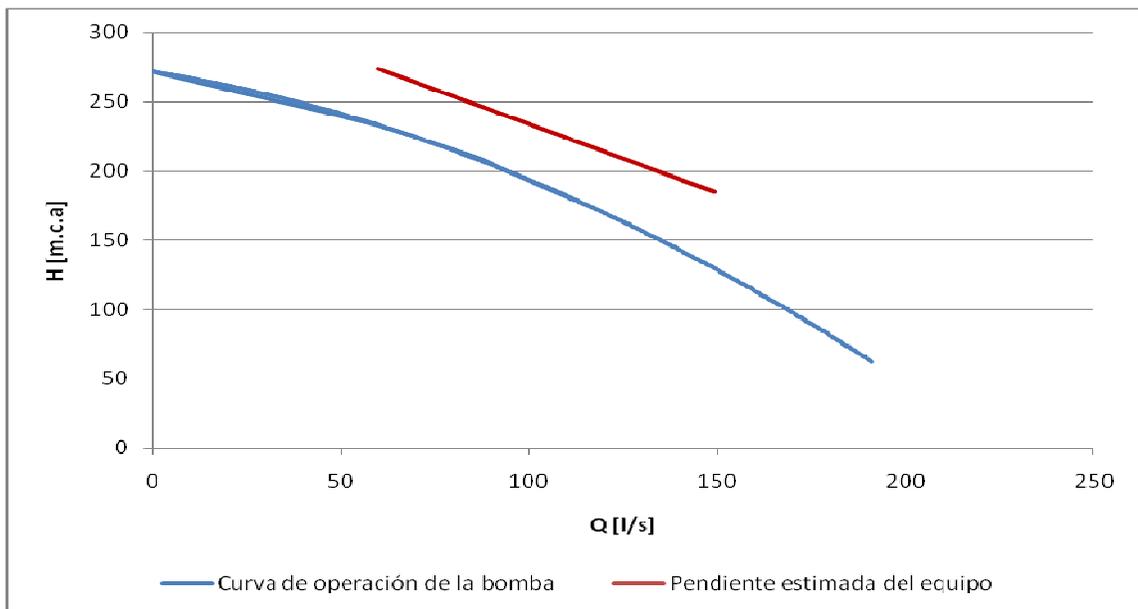


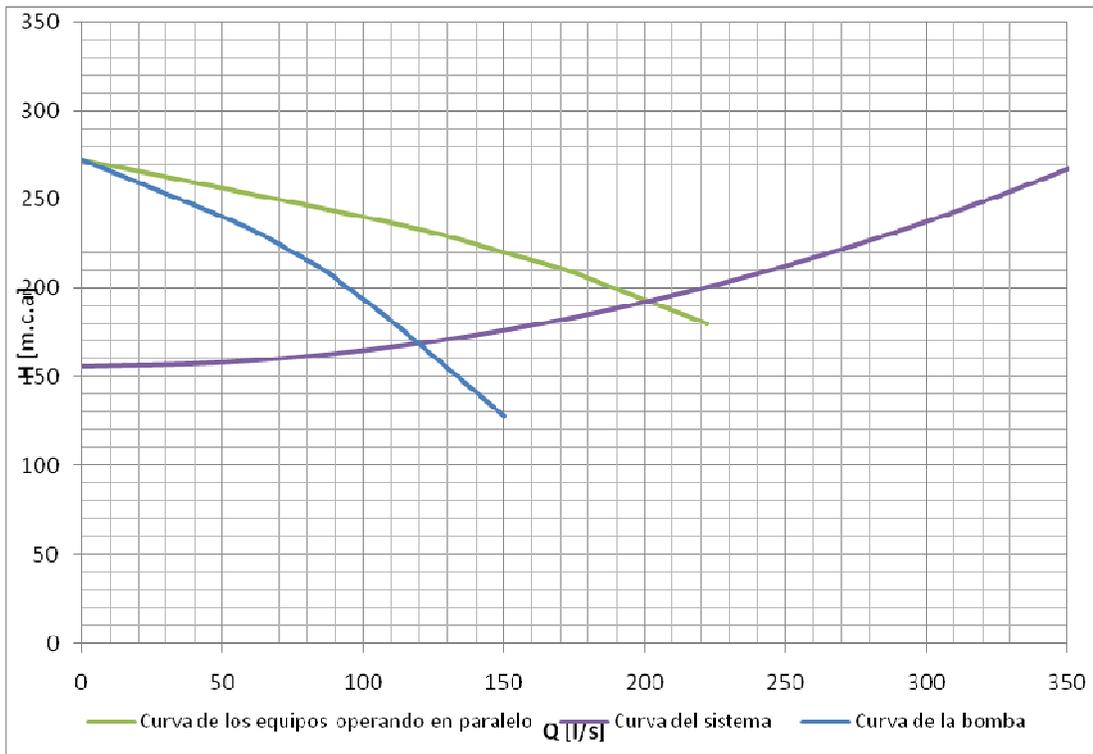
Gráfico 6.3 Comparación gráfica entre la curva del equipo seleccionado y la pendiente seleccionada

Este equipo presenta un comportamiento similar con la pendiente, en base a esto, este será el equipo seleccionado, las características del mismo son las siguientes

Marca	KSB
Modelo	WKL 150
Numero de etapas	3
Caudal máximo	160 l/s
Altura máxima	300 m.c.a
Máxima presión de succión	150 psi
Máxima presión de descarga	400 psi

Tabla 6.15 Características del la bomba KSB WKL 150

En base a esta curva característica se determinaron los puntos de operación por equipo para su funcionamiento en paralelo



Gráfica 6.4 Punto de operación del sistema y los equipos funcionando en paralelo

Por lo tanto para la operación en paralelo la estación de bombeo dará 200 l/s a una presión de 192 m.c.a, es decir que cada equipo operara con un caudal de 100 l/s a dicha presión y a una eficiencia de 75%, de acuerdo a las curvas de operación de las bombas.

Para poder reflejar la influencia que las pérdidas dentro de la estación tienen en el análisis de los puntos de operación de los sistemas, serie y paralelo, se partió de la premisa de que el sistema iba a englobar toda las tuberías hasta entrar a la estación, a partir de este punto se tomarían como parte de la bomba, es decir, la energía total que resulte de la proporcionada por las bombas menos las pérdidas dentro de la estación, será la proporcionada al sistema.

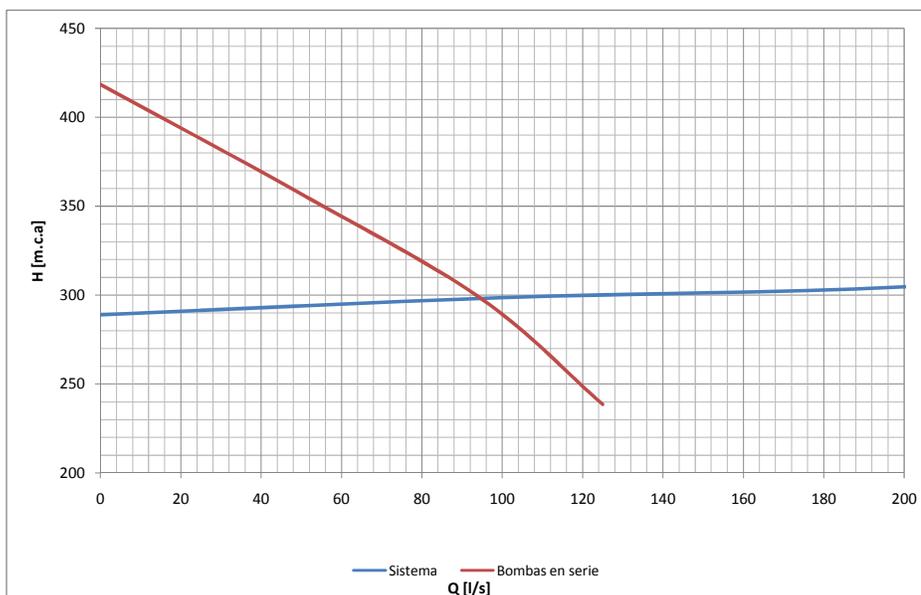
Para realizar este cálculo se tuvieron que elaborar sistemas equivalentes para cada operación con el fin de poder cuantificar las pérdidas totales a la descarga y disminuirlas a la bomba equivalente correspondiente, así mismo se realizó con las pérdidas totales de la succión, las cuales fueron disminuidas a la presión de succión presente en la estación.

Nótese que aun cuando existen 3 posibilidades distintas de operación en paralelo solo se presenta una curva, esto es debido a que en primer lugar, las 3 bombas son idénticas y en segundo porque se tomó de los 3 valores de pérdidas totales a la descarga, el de mayor magnitud. También es prudente aclarar que para realizar la nueva curva de la bomba fue necesario calcular las pérdidas para distintos caudales, ya que las expresadas anteriormente se refieren solamente al caudal de diseño.

De igual manera considerando los sistemas equivalentes y la bomba equivalente su operación en serie se realizó un análisis de la red basados en el método gráfico y suponiendo que:

- Por la línea de la nueva estación hasta el by-pass de Coco Frio fluirán 100 lts/s

Planteando la curva correspondiente al sistema e intersecandola graficamente con la curva de operación de las bombas operando en serie, se obtuvo el punto de operación en serie de las bombas, tal como se observa en la grafica 6.10.



Gráfica 6.5 Punto de operación de las bombas en serie

En base a esto los equipos dispuestos en serie bombearán 96 lts/s a una presión 295 m.c.a, es decir cada unidad aportará 147,5 m.c.a con un rendimiento de 73%.

A pesar de haber 3 posibilidades de operación en serie se redujo el sistema al caso en el que las pérdidas fueran mayores para considerar el peor caso posible.

6.7.2 Cavitación

Conocidos los puntos de operación de los equipos para su operación tanto en paralelo como en serie, se determinó el NPSH disponible en el sistema y se comparó con la energía necesaria que debe tener la bomba en su brida de succión para asegurar que la mismo no cavite.

Este NPSH disponible se determinó en base a la ecuación 3.23 y considerando las pérdidas en la succión para el año 2024 debido a los tramos de tubería del orden de 0,03 m.c.a para la operación en serie y 0,01 m.c.a para su operación en paralelo y en la válvula de 0,05 m.c.a y 0,03 m.c.a para la operación en serie y en paralelo respectivamente, el NPSH tanto disponible como requerido es.

Operación	NPSH _d [m.c.a]	NPSH _r [m.c.a]
En serie	53,75	10,3
En paralelo	53,89	8,5

Tabla 6.16 NPSH_d y NPSH_r para las bombas

Como el NPSH_d es mayor, en ambos casos, al NPSH_r se puede asegurar que los equipos no tendrán efectos de cavitación durante su periodo útil

6.8 Estimación de transitorios hidráulicos

6.8.1 Golpe de ariete por falla eléctrica

Para determinar la máxima presión que deben soportar las válvulas del sistema, se realiza un estudio de los fenómenos transitorios debido a una parada repentina de los equipos por fallas eléctricas.

Para realizar este estudio se determinó la celeridad del fluido en base a la ecuación 3.39, suponiendo que:

- El modulo de elasticidad el agua es de $2 \cdot 10^8 \text{ kgf/m}^2$
- El modulo de elasticidad del acero es de $2 \cdot 10^{10} \text{ kgf/m}^2$
- C tomara un valor de 1 por ser tuberías de acero, con juntas soldadas de acuerdo a la ecuación 3.41

En base a esto la celeridad será de 398,86 m/s, conocido este valor se estimo el periodo del sistema, tal como se describe en la ecuación 3.54, dando un tiempo de 13,03 s. Por lo tanto para el caso del cierre de la válvula de retención el proceso será rápido y se usara el método de Allievi, tal y como lo describe la ecuación 3.57.

Considerando ese modelo y los valores de operación tanto en serie como en paralelo, las sobrepresiones serán las siguientes.

	ΔH	H
Serie	94,74	389,74
Paralelo	27,86	222,86

Tabla 6.17 Sobrepresiones del sistema

6.9 Selección de válvulas

Conocidos los valores de presiones del sistema, se seleccionaron las válvulas.

Tipo de válvula	Presión Normal	Diámetro(in)
Válvula de retención	40 Kgf/cm ²	10 pulgadas
Válvula de compuerta	40 Kgf/cm ²	10 pulgadas
Válvula de compuerta	10 Kgf/cm ²	12 pulgadas
Válvula de compuerta	40 Kgf/cm ²	16 pulgadas

Tabla 6.18 Válvulas presentes en la línea de aducción y estación de bombeo

6.10 Especificación de las tuberías

Para la estación de bombeo se usaran las siguientes tuberías, en los distintos tramos.

Múltiple de succión

- Diámetro: 24"
- Material: Acero al carbono
- Espesor: 14,27 mm

Múltiple de descarga

- Diámetro: 16"
- Material: Acero al carbono
- Espesor: 12,70 mm

Tuberías de succión

- Diámetro: 12"
- Material: Acero al carbono
- Espesor: 10,31 mm

Tuberías de descarga

- Diámetro: 10"
- Material: Acero al carbono
- Espesor: 9,27 mm

6.11 Selección de motores

6.11.1 Potencia de motores

Conocidos los puntos de operación tanto en serie, como en paralelo, se determinó la potencia que debe tener la bomba en su eje, de acuerdo a la ecuación 3.78 y realizando la conversión a caballos de potencia, se determinó que la potencia de los motores es.

	Q [l/s]	H [m.c.a]	Pb [HP]	η [%]
Operación en serie	94	149	251,88	73
Operación en paralelo	100	190	332,58	75

Tabla 6.19 Potencia de la bomba

En base a la tabla anterior y la ecuación 3.87, asumiendo que la eficiencia de la transmisión es de 90%, las potencias eléctricas para los motores serán.

	Pe [HP]
Operación en serie	280,00
Operación en paralelo	370,00

Tabla 6.20 Potencia eléctrica de los motores

6.11.2 Especificaciones de motores

Conocido los valores mínimos de potencia eléctrica que deben poseer los motores, se seleccionaron unidades de al menos 400 HP, con las siguientes características.

Potencia	400 HP
Velocidad de giro	1750 rpm
Numero de polos	4 polos
Voltaje	480 V
Corriente	420,3 A

Tabla 6.21 Especificaciones del motor eléctrico

6.12 Instalación eléctrica

6.12.1 Sistema de potencia y control

Para la instalación de los motores eléctricos, se debe de colocar una serie de elementos de potencia, tal como los transformadores eléctricos. Los cuales deben tener las siguientes especificaciones.

Potencia	800 KVA
Voltaje	12400 V/480 V
Corriente en el devanado primario	37,25 A
Corriente en el devanado secundario	962,25 A
Interruptor en el lado primario	150 A
Interruptor en el lado secundario	1500 A

Tabla 6.22 Especificaciones del transformadores eléctricos

Además del transformador un motor eléctrico debe tener unos elementos de protección y control, además de los conductores para llevar la potencia desde el cajetín de control y sus correspondientes canalizaciones.

Para seleccionar los conductores se utiliza un factor de seguridad de 125% de la corriente nominal, considerando cualquier pico de corriente posible en el sistema, además que el arranque del mismo será a voltaje reducido, es decir que para seleccionar el conductor la corriente de referencia será de 420 A, este amperaje tan alto indica un conductor de muy alto calibre, lo que implica que se hace prácticamente inmanejable es por ello que se determino que se debe utilizar varios conductores por fase, en este caso 2, por lo tanto el calibre del conductor y sus características se muestran en la siguiente tabla.

Calibre [MCM]	Tipo	Capacidad [A]
400	Aislamiento de hule y resistente a la humedad [THW]	335

Tabla 6.23 Especificaciones del conductor eléctrico

De acuerdo a esto se seleccionaran los tubos de canalización tipo conduit considerando que el factor de relleno de los tubos es de 40% de acuerdo al código eléctrico nacional, las especificaciones del tubo son:

Diámetro nominal del tubo conduit [pulg]	Cantidad de conductores
4	2

Tabla 6.24 Características del tubo tipo conduit de canalizaciones

Por otra parte un motor eléctrico posee elementos de protección tales como fusibles e interruptores magnéticos estos se dimensionan de acuerdo a unos factores que se encuentran en el código eléctrico nacional.

Para el interruptor termomagnético, se determinó su capacidad en base a la corriente nominal y considerando que de acuerdo al código eléctrico nacional se usa un factor de 160% por ser un interruptor termomagnético de tiempo inverso, la capacidad del interruptor será de 650 A con una tensión de 480 V.

Otro elemento importante para el control de un motor eléctrico es la protección por sobrecarga la cual debe tener una capacidad de 115% de la corriente nominal del motor, por lo tanto su capacidad será de 500 A

El cajetín o CCM para alojar todos estos elementos está definido de acuerdo a la norma NEMA para su cerramiento y al código eléctrico nacional para su dimensionamiento, por lo tanto sus medidas serán de 50 cm de ancho y 160 cm de alto con un código NEMA número 12 por estar en una sala aislada de las unidades de bombeo y con su propia ventilación, dentro de la sala de control se colocaran 4 cajetines, tres de ellos serán los controles de cada unidad de bombeo y el cuarto será el cajetín de control principal para la estación de bombeo. En su parte delantera tendrá un selector de operación con tres posiciones, apagado, automática y manual. Además tendrá un medidor de voltaje y uno de amperaje.

Por otro lado estos motores deben arrancar mediante el procedimiento de voltaje reducido, por lo que deben poseer unos contactores, para que alternen su conexión de estrella a triángulo y continúen su operación estos contactores tendrán las siguientes capacidades.

- Contactor en línea debe ser de al menos 230 hp
- Contactor en triangulo debe ser de al menos 230 hp
- Contactor de arranque debe ser de al menos 135 hp

En resumen cada tablero eléctrico de cada motor deberá ser de las siguientes características:

Cajetín			Interruptor magnético	Protector de sobre corriente	Contactor de Arranque	Contactor Triangulo	Contactor Línea
Alto	Ancho	Tipo					
160 cm	50 cm	NEMA 12	650 A @ 480 V	500 A	135 hp	230 hp	230 hp

Tabla 6.25 Características del tablero de control de cada motor eléctrico

CAPITULO VII

ESTUDIO ECONÓMICO DE LA NUEVA ESTACIÓN DE REFUERZO

El siguiente capítulo muestra un estudio económico estimado de la inversión para la construcción de la estación, así como el análisis del ahorro económico para realizar el cálculo estimado del tiempo de recuperación de la inversión.

7.1 Presupuesto general de inversión

Para calcular una posible recuperación del capital invertido para la realización de la nueva estación se realizó un estudio económico no detallado el cual incluye las partidas más importante dentro de las cuales se destacan, la colocación de la tubería de aducción así como el costo de la misma, los equipos de bombeo (bomba-motor), los sistemas eléctricos, los tableros CCM, los accesorios y tuberías de los múltiples de succión y descarga y las modificaciones en la estructuras.

Se presenta entonces la estimación de costos por partidas:

- Equipos de Bombeo

Suministro transporte y colocación de 3 bombas KSB WKL150, suministro de 3 motores de 400hp a 1750 rpm y 480v.

Costo estimado **1.092.000 Bs**

- Tuberías para los múltiples de succión y descarga

Suministro transporte y colocación de 30 mts de tubería de 10" sch 40 de 9 mm de espesor Acero al carbono ANSI 5L grado B con impermeabilización, Suministro e instalación de 11 mts de 12" sch 40 de 9mm de espesor Acero al carbono ANSI 5L grado B.

Costos estimados **18.521,72 Bsf**

- Válvulas y accesorios

Suministro transporte y colocación de 9 válvulas de compuerta PN 40 de 10", suministro de 3 válvulas de compuerta PN 10 de 12", 3 válvulas de retención (check) PN 40 de 10" y accesorios en general codos, conos y conexiones tee.

Costo estimado **375.000 Bsf**

- Tableros CCM (Centro de control de motores)

Suministro transporte y colocación de un tablero CCM para 3 motores NEMA 12, tensión 480 v con interruptores magnéticos de 650 A y protectores de corriente a 500 A.

Costo estimado **103.200 Bsf**

- Sistemas eléctricos

Suministro transporte y colocación del cableado 3 interruptores de 650 A y uno de 1100 A y un transformador de 1000 KVA de 12400 v a 480 v.

Costo estimado **397.180,43 Bsf**

- Colocación de la tubería de aducción

Incluye todas las partidas para el suministro, transporte y colocación de 2600 mts de tubería de 16” shc 40 de 9 mm de espeso, Acero al carbono ANSI 5L grado B con recubrimiento interno y externo, dentro de las cuales se encuentran la excavación de zanjas y fosas, colocación de soporte, juntas soldadas etc.

Costo estimado **2.173.550,45 Bsf**

Nótese que las obras civiles no están contempladas en la estimación de los costos, ya que son despreciables frente a las demás partidas esto se debe a, como se ha mencionada a lo largo del trabajo, la estación de refuerzo está diseñada para ser implementada dentro de la infraestructura de Vista Alegre, lo que se traduce como un ahorro al presupuesto de la nueva estación.

A continuación se presenta un cuadro resumen de los costos reflejando el total estimado para la construcción de la estación.

Sección	Costo Bsf
Colocación de la tubería de aducción	2.173.550,45
Sistemas eléctricos	397.180,43
Tableros	103.200
Equipos de bombeo	1.092.000
Válvulas y accesorios	375.000
Múltiples	18.521,72
Total de Costos de la estación	4.159.452,61

Tabla 7.1 Costos estimados por partidas.

Los presupuestos fueron cotizados por las empresas distribuidoras de HIDROCAPITAL y contactadas por C.A.U c.a y MULTIAGUA, los precios en dólares solamente para los insumos se calcularon a 6,5 Bsf por dólar.

Entre las distribuidoras se encuentran:

Para equipos de bombeo: KSB, General Electric.

Válvulas: FIMACA

Tuberías: Tuboacero C.A

Tablero e instalaciones eléctricas: GEDISA ca, MARESA ca.

Cableado: GEDISA ca, MARESA ca.

7.2 Ahorros económicos

7.2.1 Ahorro en el consumo eléctrico

Entre los beneficios que, a nivel de confiabilidad y versatilidad, presenta el implemento de esta nueva estación de refuerzo, cabe mencionar también su factibilidad económica y el ahorro que se conseguirá mediante su operación en el consumo eléctrico de la estación Vista Alegre.

Para calcular dicho ahorro en el consumo eléctrico se analizó la variación en la operación de los equipos de Vista Alegre tras la puesta en marcha de la nueva estación de refuerzo. Como se mencionó con anterioridad, el objetivo principal de la operación de esta estación es eliminar las tomas no controladas de consumo de agua

potable que se encuentran agrupadas en los primeros kilómetros de la aducción, por lo que una vez que este objetivo se logre y sea entonces la estación de refuerzo la que se encargue de suplir este consumo, la estación Vista Alegre no se encontrará más suministrando la energía necesaria al fluido para abastecer al estanque Canaima mientras parte del mismo es extraído a una cota menor (coco frio), desaprovechando entonces el 33,42 % de la energía suministrada, sino que por el contrario se encontrará operando de manera correcta, y ese desaprovechamiento se traducirá entonces en el ahorro del consumo eléctrico.

Para cuantificar dicho ahorro se tomaron las tarifas eléctricas suministradas por La Electricidad de Caracas, los cuales registran que el costo por cargo de energía es de 0,049 Bsf/KWh. De estos alores se tiene:

Potencia hidráulica desaprovechada (hp)	233.33
Potencia eléctrica desaprovechada (hp)	259.25
Potencia eléctrica desaprovechada (Kw)	193.32
Consumo eléctrico por energía	82984.81 Bsf
Ahorro anual por consumo eléctrico	82.984.81 Bsf

Tabla 7.2 Ahorro Eléctrico

7.2.2 Ahorro en el mantenimiento de los equipos

Este ahorro viene reflejado por la misma causa del ahorro en el consumo eléctrico pero aplicado al mantenimiento de los equipos, es decir, actualmente a la estación Vista Alegre se le realiza un mantenimiento correspondiente a grupos de 700hp, sin embargo así como se desaprovecha la energía dejando fugar el fluido en cotas inferiores se desperdicia mantenimiento, ya que se le estaría aplicando a un equipo de capacidad mucho mayor a la demandante por el sistema, y de igual manera este ahorro representa el 33,42% del mantenimiento de un equipo de Vista Alegre.

Para cuantificar dicho ahorro se estimó que el mantenimiento de los equipos de bombeo representa aproximadamente el 6% del costo total.

Ahorro por mantenimiento	Bsf
Costo por bomba de vista alegre	210.000
Costo por motor de 700hp	652.000
Costo del mantenimiento de 700 hp	51.720
Ahorro anual por mantenimiento	17.284,824

Tabla 7.3 Ahorro de mantenimiento

Ahorro total anual

100.269,634 Bsf

Una vez calculados los ahorros económicos que la implementación de esta nueva estación le traería a la empresa portadora del servicio se contabiliza un total, el cual es comparado con el costo estimado para la construcción de la nueva estación, de esta manera se puede obtener el tiempo para la recuperación de la inversión, teniéndose que para el primer año de operación la estación ha recuperado aproximadamente el 8% de la inversión por lo que se estimarían entonces unos 12 años para su recuperación total.

CONCLUSIONES

Se optimiza el funcionamiento de la estación de bombeo Vista Alegre, eliminando el abastecimiento de agua potable de la zona de influencia por su parte, factor que permitirá que dicha estación opere de manera correcta y para lo cual fue diseñada, encargándose sólo del abastecimiento de agua potable del tanque Canaima.

Se estudiaron los sistemas para la operación tanto en serie como en paralelo, asegurando el correcto funcionamiento de la nueva estación para ambos casos.

Se analizó el sistema de la Estación Vista Alegre definiendo las pérdidas energéticas presentes.

Se asegura la no perturbación del funcionamiento de los equipos de bombeo por causa de fenómenos no deseados como la cavitación o la sobrepresión.

El proyecto cumple con los requerimientos de disponibilidad y confiabilidad en casos especiales de emergencia.

Se da confiabilidad tanto a la estación de bombeo Vista Alegre como a la nueva estación, debido a que se tendrán unidades de reserva en caso de mantenimiento o falla de alguno de los equipos.

Se cumplen todos los requerimientos para el funcionamiento eficiente de los equipos, garantizando que el fenómeno de sobrepresión no tendrá mayor influencia sobre los mismos.

Se asegura un correcto funcionamiento de los equipos eléctricos, así como su distribución dentro de la estación, cumpliendo además con la normativa de seguridad.

Se asegura las condiciones adecuadas para el buen funcionamiento de los equipos eléctricos, cubriendo la protección de los mismos en ocasiones donde se presenten irregularidades con el servicio de energía eléctrica.

De acuerdo con los parámetros hidráulicos, mecánicos y eléctricos se seleccionaron los equipos adecuados para el funcionamiento de la estación cumpliendo con las normas de distribución de equipos, tuberías y válvulas, para su manipulación, reparación y operación, en cuanto a espacios y distribución.

Se garantiza que el diseño del múltiple de succión y descarga, se adapta al espacio físico disponible, produciendo el menor número de pérdidas y cubriendo aspectos de operación de las unidades tanto en serie como en paralelo

La construcción de esta nueva estación es factible económicamente, a raíz del ahorro producido en el consumo eléctrico y en el mantenimiento de los equipos de la estación Vista Alegre.

Conclusiones

Se mejora la calidad de vida de los habitantes de las zonas aledañas, ya que tendrán un servicio confiable y continuo de agua potable

La determinación del consumo de agua potable para un sector en específico es de gran importancia para el desarrollo de proyectos de mejoramiento del servicio.

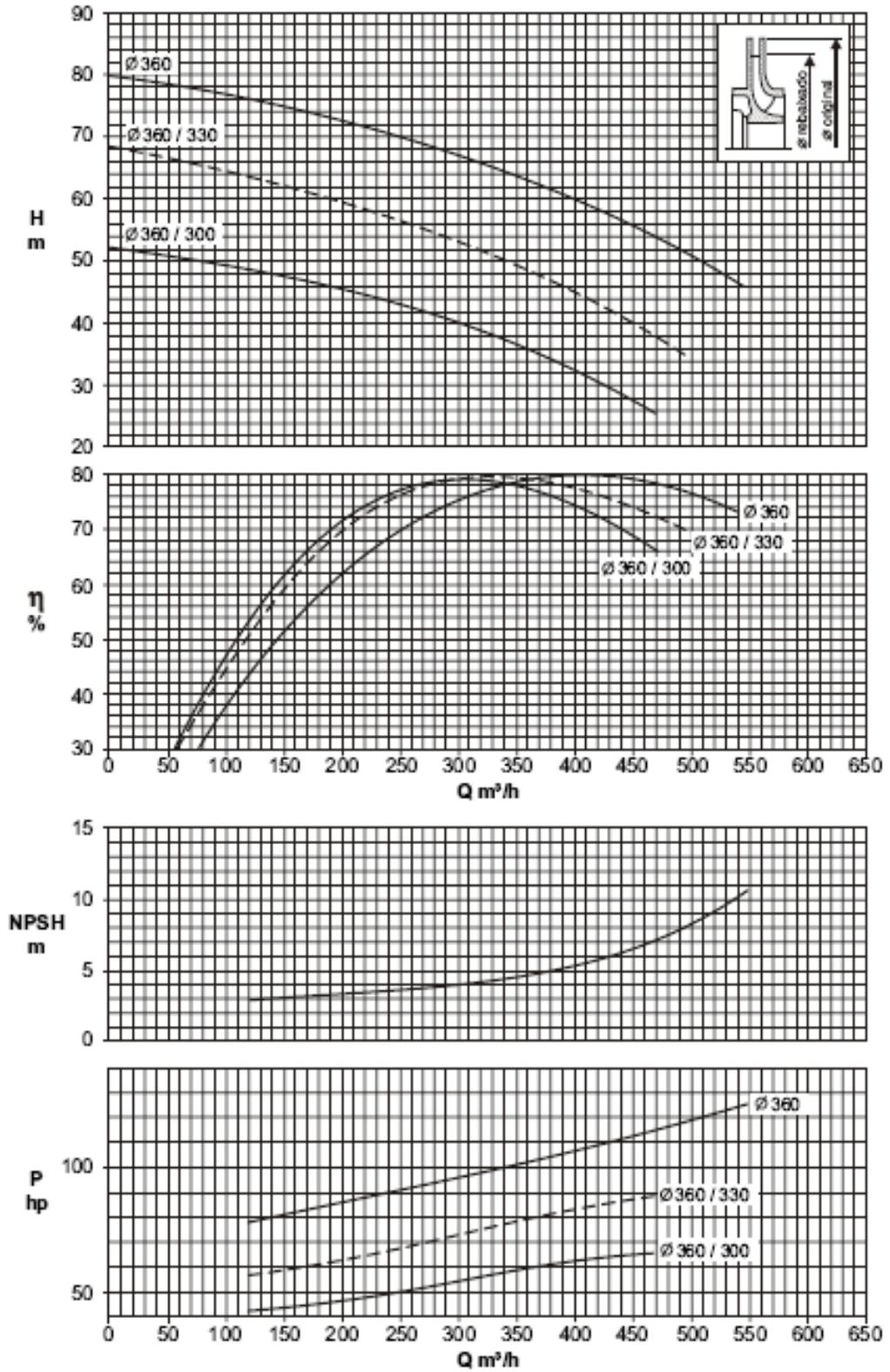
RECOMENDACIONES

Realizar un estudio de la red de distribución de agua potable, en el área de influencia establecido en este estudio, con el fin de poder llevar el agua bombeada en la nueva estación a los consumidores.

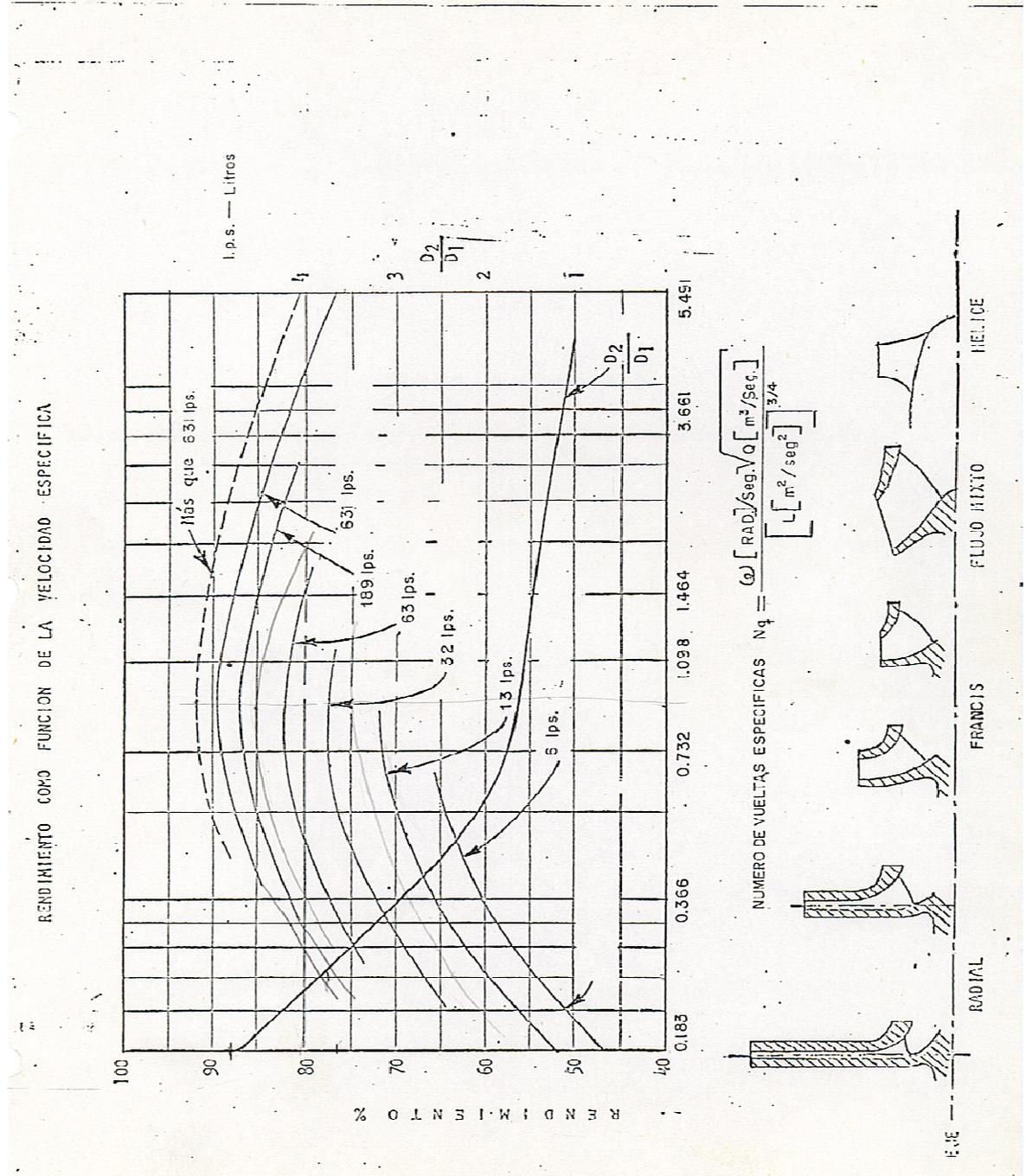
Automatizar el cambio de disposición de los equipos de bombeo de paralelo a serie, de manera tal que no influya el error humano en esta operación.

Impulsar el uso de medidores de agua para regular el consumo de los habitantes de la zona de influencia, así como establecer mecanismos que permiten tener el censo actualizado de los habitantes de la zona de influencia.

Apéndice 1. Grafica de la bomba WKL 150



Apéndice 2. Abaco de rendimiento como función de la velocidad específica



Apéndice 3. Diagrama de Moody

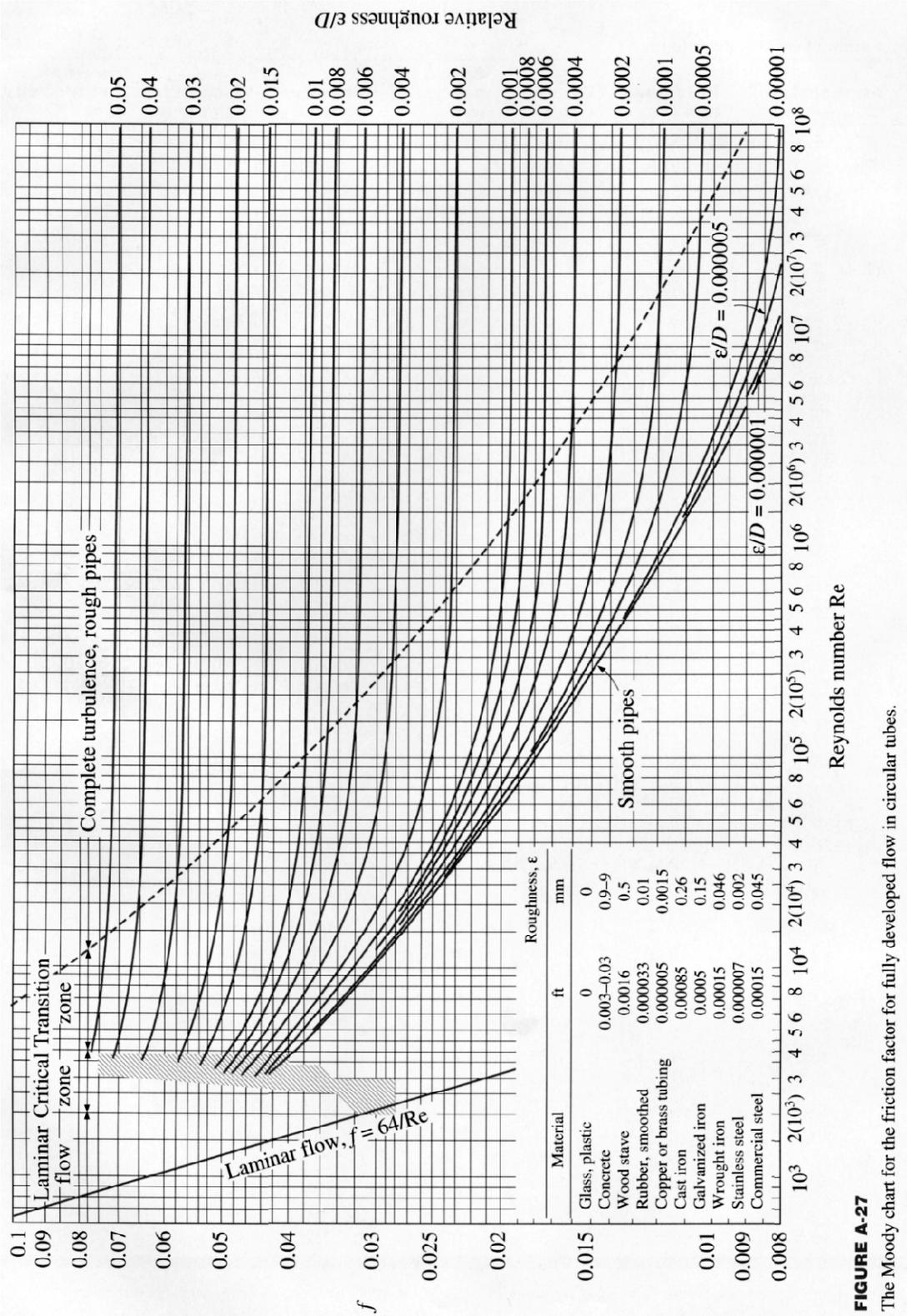
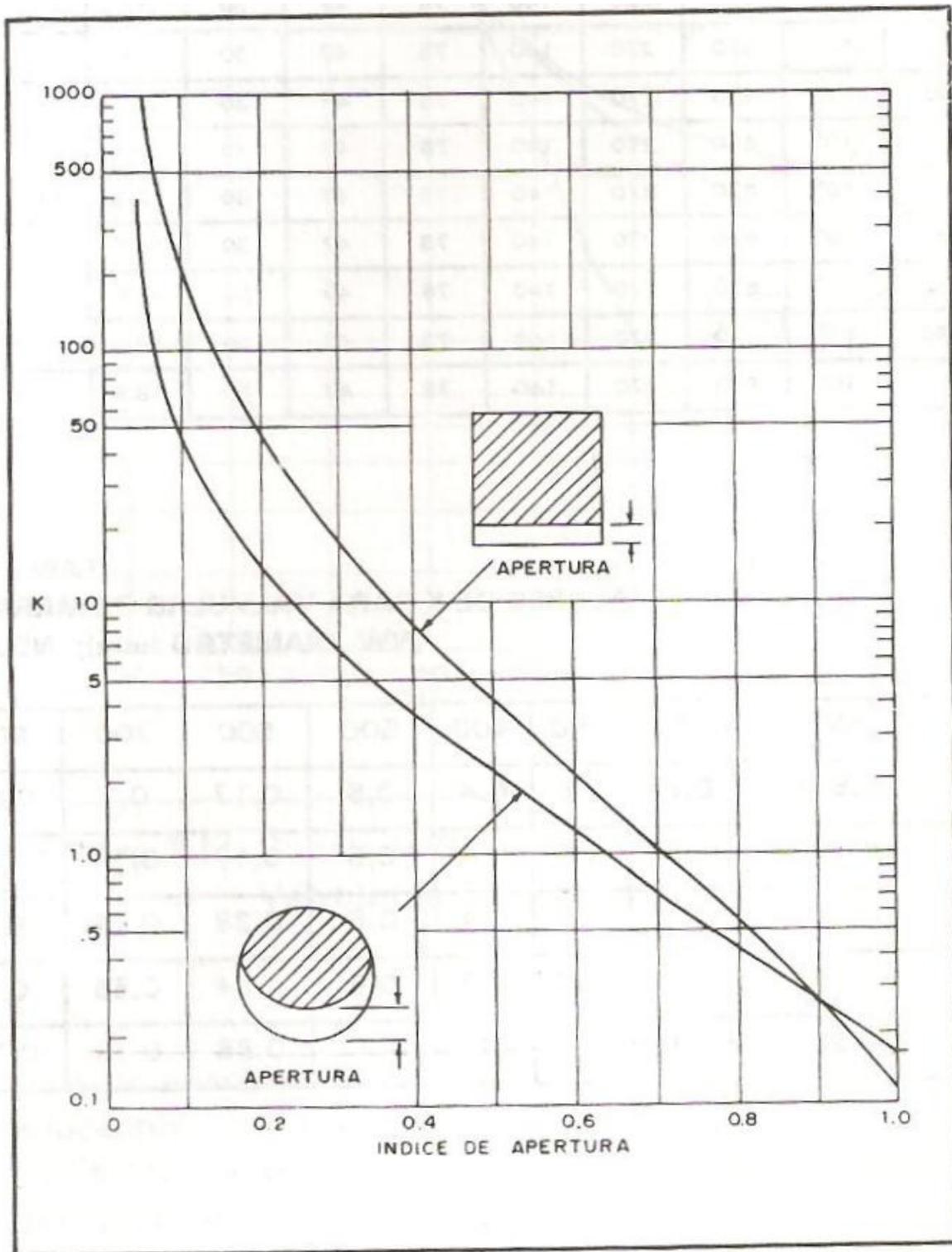


FIGURE A-27

The Moody chart for the friction factor for fully developed flow in circular tubes.

Apéndice 4. Diagrama de k de los accesorios



Apéndice 5. Cálculos tipo

Calculo de estimación de población

$$P_{2010} = \frac{P_{2009} - P_{2008}}{2009 - 2008} * (2010 - 2009) + P_{2009} = \frac{17280hab - 14400hab}{2009 - 2008} * (2010 - 2009) + 17280hab$$

$$P_{2010} = 20160hab$$

Calculo de caudal medio

$$Q_m = \frac{P_{2017} * Dotacion}{24h * 3600s} = \frac{40320hab * 400l/p/dia}{24h * 3600s} = 205,3 l/s$$

Calculo de consumo máximo diario

$$Q_d = Q_m * K1 = 205,3 l/s * 1,4 = 287,5l/s$$

Calculo de consumo máximo horario

$$Q_h = Q_m * K2 = Q_m * \frac{(275 - \left(\frac{0,75 * P_{2017}}{1000}\right))}{1000} = 205,3l/s * \frac{275 - \left(\frac{0,75 * 40320hab}{1000hab}\right)}{1000} = 502,5l/s$$

Calculo de consumo en caso de incendio

$$Q_i = 1,8 * Q_m + 16l/s = 1,8 * 205,3l/s + 16l/s = 287,5l/s$$

Determinación del número de etapas

$$z = \frac{H}{H_e} = \frac{H}{rpm * \frac{\pi}{30} * \frac{\sqrt{Q_{dis}}}{g^{0,75} * nq_{max}}} = \frac{200 m. c. a}{1800rpm * \frac{\pi}{30} * \frac{\sqrt{0,205 \frac{m^3}{s}}}{9,81m^{0,75} * 0,6}} = 2,6 \approx 3$$

Calculo de velocidad de flujo en tuberías

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0,205 \frac{m^3}{s}}{\frac{\pi * 15'' * 0,0254^2}{4}} = 1,8 \frac{m}{s}$$

Calculo de perdidas en el sistema

$$hf = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * g} = 0,0145 * \frac{2600m}{16'' * 0,0254} * \frac{\left(\frac{1,8m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 38,22 m$$

Calculo de curva del sistema

$$k = \frac{hf}{Q^2} = \frac{38,22m}{\left(\frac{205,3l}{s}\right)^2} = 0,0009 \frac{m}{\frac{l}{s}}$$

$$H = k * Q^2 + He - Ps - hfs = 0,0009 \frac{m}{\frac{l}{s}} * Q^2 + 201m - 45m - 0,3m = 0,0009 \frac{m}{\frac{l}{s}} * Q^2 + 156,3m$$

Calculo de perdidas en accesorios

$$hf = k * \frac{V^2}{2 * g} = 0,2 * \frac{\frac{0,7m^2}{s}}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 0,055m$$

Calculo de NPSHd

$$NPSH_d = Ps + Patm - Pv - hf = 45m + 9,1652m - 0,3277m - 0,055m = 53,75m$$

Calculo de celeridad del fluido

$$a = \sqrt{\frac{\frac{E/\rho}{1 + \frac{E * D}{E_c * e} * C}}{\frac{2 * 10^8 / 997,0038 \frac{kg}{m^3}}{1 + \frac{2 * 10^8 * 0,254 m}{2,1 * 10^{10} * 0,009271 m} * 1}}} = 398,86 \frac{m}{s}$$

Calculo del periodo del sistema

$$\tau = 2 * \frac{4900}{a} = 2 * \frac{4900}{398,6} = 13,03 \text{ s}$$

Calculo de la sobrepresión del sistema

$$H = H_0 + \frac{a * V_0}{g} = 298 \text{ m} + \frac{398,86 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 2,33 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 392,74 \text{ m}$$

Calculo de la potencia eléctrica de los motores

$$P_e = 0,9 * \frac{Q * 15,85 * H * 3,28}{3960 * \eta} = 0,9 * \frac{94 \frac{\text{l}}{\text{s}} * 15,85 * 149 \text{ m} * 3,28}{3960 * 0,73} = 280 \text{ Hp}$$

Calculo de la potencia de los transformadores

$$KVA = P_{e_{max}} * N^{\circ} \text{motores} = 400 \text{ KVA} * 2 = 800 \text{ KVA}$$

Potencia eléctrica ahorrada

$$P_{mot}: 234 \frac{\text{hp}}{0.9} = 260 \text{ hp}$$

Consumo eléctrico

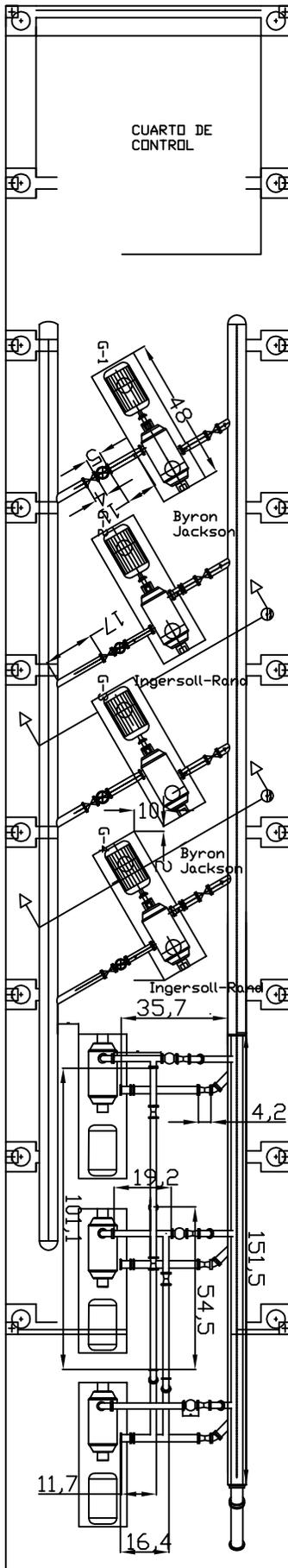
$$C_{elc} = 193,96 \text{ Kw}$$

Consumo eléctrico anual

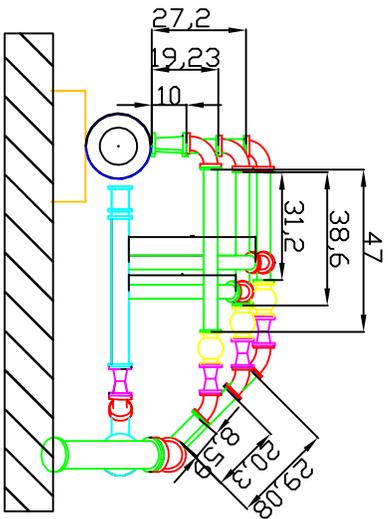
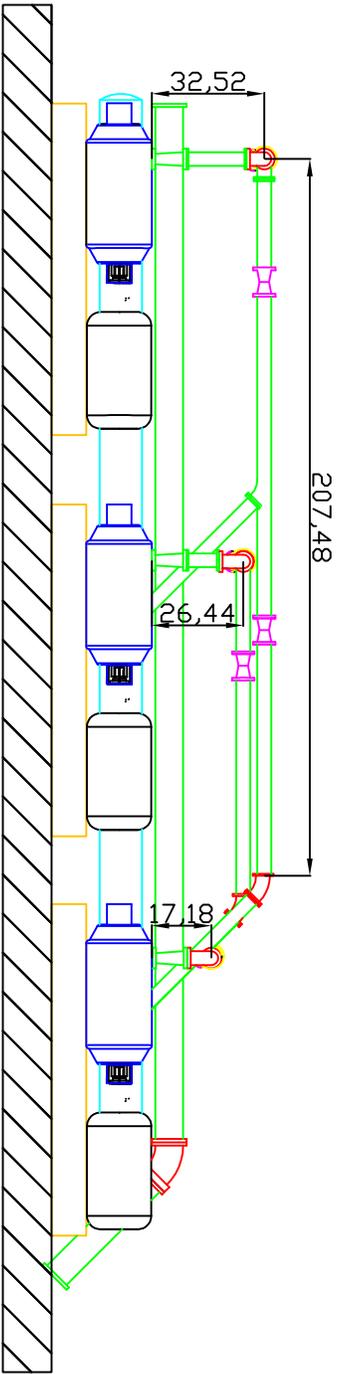
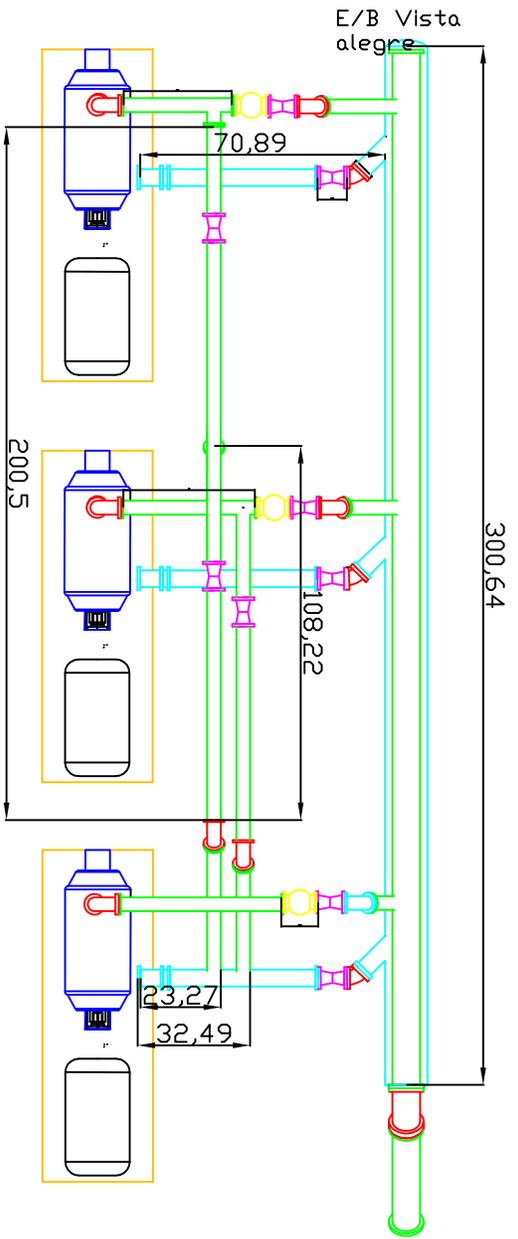
$$\frac{C_{elc}}{\text{año}} = 193,96 \text{ kw} * \frac{8769 \text{ hr}}{\text{año}} = 1699089,6 \text{ kwhr/año}$$

Ahorro económico anual

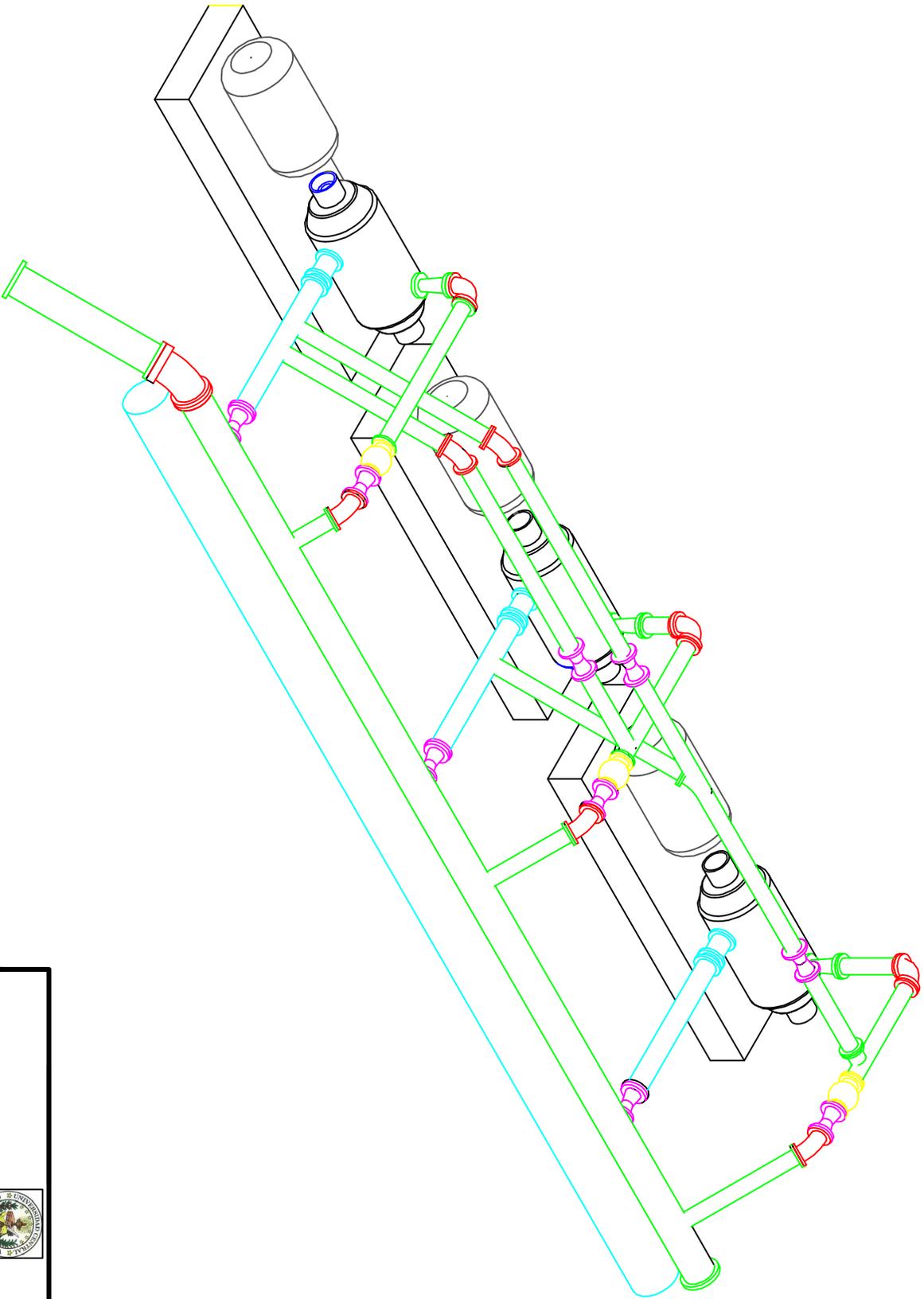
$$\frac{C_{st}}{\text{año}} = 1699089,6 * \frac{0,37 \text{ Bs f}}{\text{Kwhr}} = 628663 \text{ Bs f/año}$$



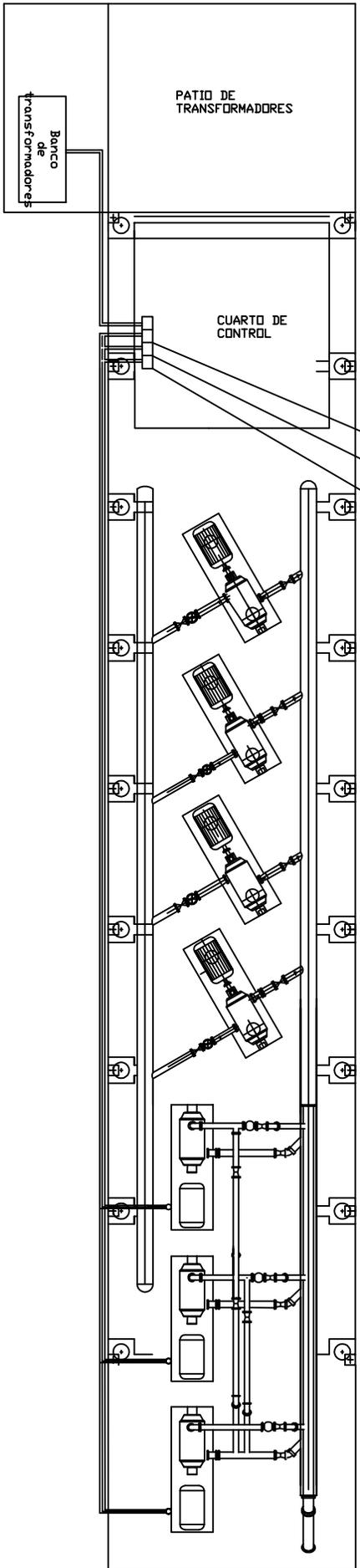
Fecha	Realizado por	
Escala	Revisado por	
Hoja N°	Aprobado por	Proyecto de refuerzo Vial Alto
		Contenido



		Fecha	Realizado por
		Escala	Revisado por
Hoja	Nº	Proyecto	Proyecto de refuerzo Vista Alegre
Rev.		Contenido	

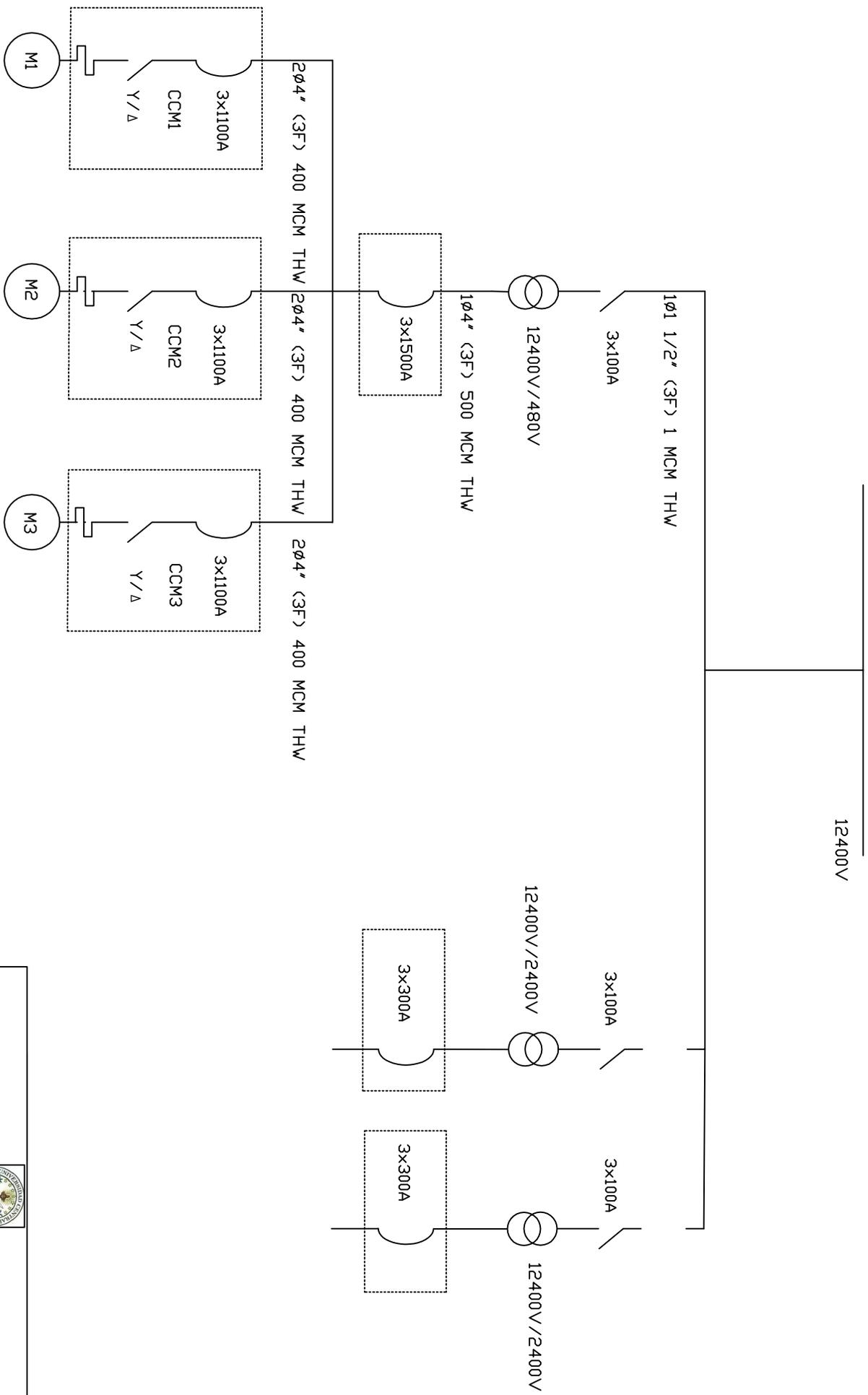


	 <p>Facultad de Ingeniería Mecánica Universidad de Cienfuegos</p>
 <p>Fecha</p>	<p>Realizado por</p>
 <p>Revisado por</p>	<p>Contenido</p>
 <p>Aprobado por</p>	<p>Fecha</p>

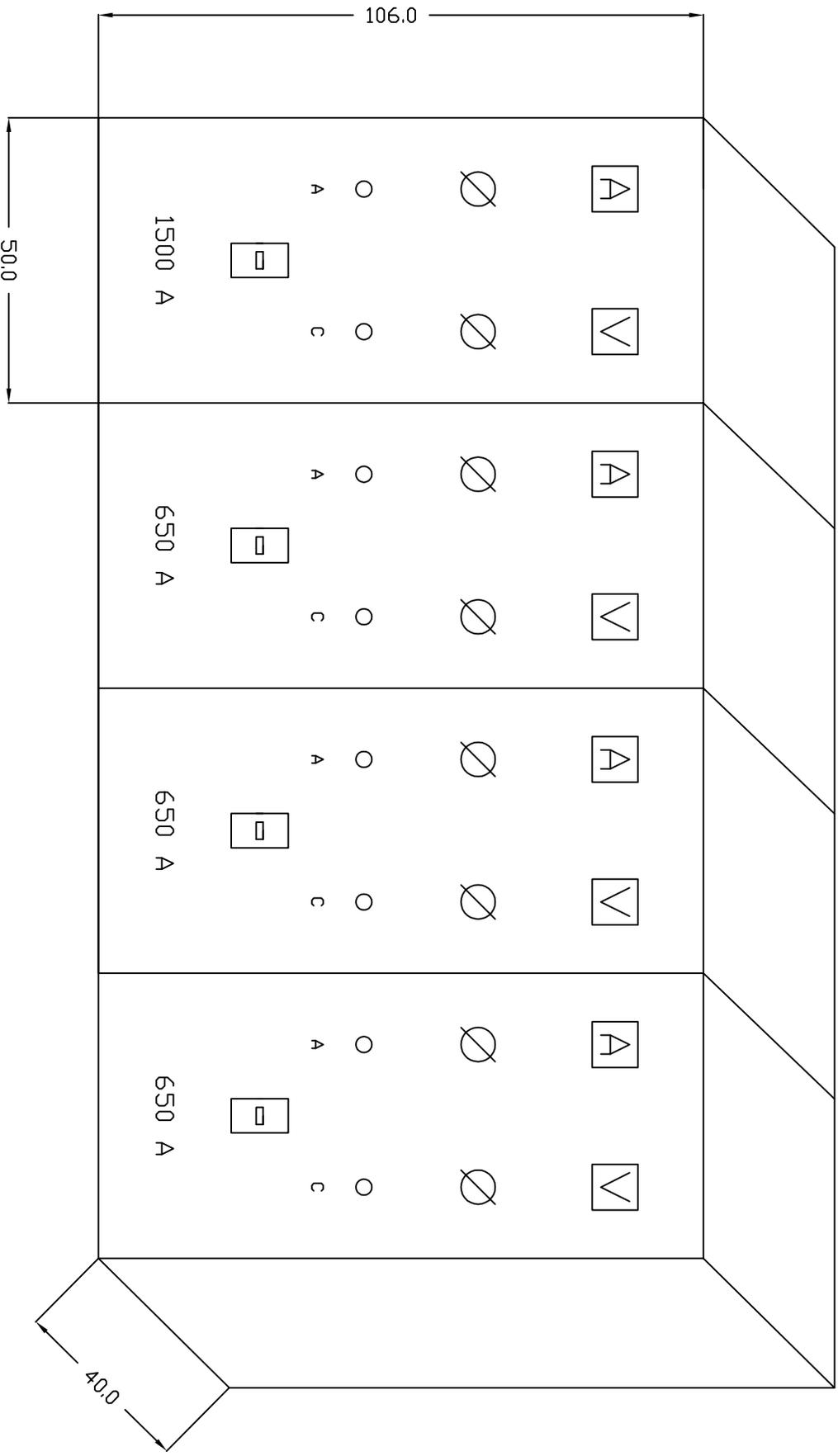


CCM 1CCM 2CCM 3

		Fecha	realizado por	Proyecto
		revisado por	Carretera	
		Aprobado por		



Fecha Realizado por Escala Revisado por Mts. Revis. Aprobado por		Proyecto Contenido
--	--	-----------------------



Fecha		Realizado por	Proyecto de refuerzo Vista Alegre
Escala		Revisado por	
Materia		Aprobado por	Contenido
Nº de			

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] BASURTO, Lorenzo. *Viscosidad*. Perú. Disponible en línea: taninos.tripod.com/viscosidad.htm. Citado 13 marzo 2009.
- [2] CENGEL, Yunus A. *Mecánica de Fluidos, fundamentos y aplicaciones*. Quinta Edición. 2004. México, Editorial MC Graw Hill
- [3] CISNEROS, Boris. *Cavitación, Un ataque al corazón de las Bombas Centrifugas*. Disponible en línea: <http://www.mch.cl/documentos/pdf>. Citado 15 de marzo 2009.
- [4] CRANE. *Flow of fluids through valves, fittings and pipe*. 1965. Chicago. Crane Co.
- [5] DIEZ, Pedro. *Golpe de ariete*. Disponible en línea: personales.ya.com/universal/TermoWeb/MecanicaFluidos/PDFs. Citado 13 marzo 2009.
- [6] DIEZ, Pedro. *Teoría elemental de la capa límite bidimensional*. Disponible en línea: personales.ya.com/universal/TermoWeb/MecanicaFluidos/PDFs. Citado 13 marzo 2009.
- [7] HARPER, Enríquez. *Guía Práctica para el cálculo de Instalaciones Eléctricas*. 2008. México. Editorial Limusa.
- [8] HARPER, Enríquez. *Guía para el diseño de instalaciones eléctricas residenciales, industriales y comerciales*. Segunda Edición. 2008. México. Editorial Limusa
- [9] Hydraulic Institute. *Hydraulic Institute standards for centrifugal, rotary and reciprocating pumps*. 14th Edition. 1983. Ohio.
- [10] KARASSIK, Igor y otros. *Pump Handbook*. 1976. New York. Editorial Mc Graw Hill.

Referencias Bibliograficas

- [11] MÉNDEZ, Manuel. *Tuberías a presión en los sistemas de abastecimiento de agua*. 1995. Caracas. Fundación Polar. Universidad Católica Andrés Bello.
- [12] ROCA VILA, R. *Introducción a la Mecánica de Fluidos*. 1974. Caracas, Ediciones Aranda
- [13] WESTAWAY, C.R. LOOMIS, A.W. *Cameron Hydraulic Data*. 16th Edition. 1984. New Jersey. Ingersoll Rand.