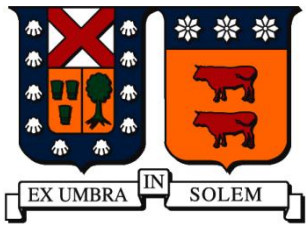
UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO – CHILE




# RECOMENDACIONES DE DISEÑO PARA SISTEMAS DE BOMBEO QUE ALIMENTAN DE MANERA DIRECTA PEQUEÑAS POBLACIONES EN ALTURA

Memoria de titulación presentada por
REGINALD ENRIQUE ALVARADO VICENCIO

Como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Civil

Profesor Guía
Mauricio Correa Cáceres

Octubre de 2018

# AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a toda mi familia en especial a ustedes dos, mis padres quienes fueron siempre mi gran aliciente y apoyo a lo largo de todos estos años, soy el resultado de su esfuerzo e inmenso amor con el que nos criaron junto a mi hermano. Y a ti *guatón*, no puede existir un mejor hermano.

En segundo lugar, quiero agradecer a todas las personas que contribuyeron no solo a mi formación como profesional, sino también humana. En especial dar mi agradecimiento: al CIAC quién fue mi casa durante 5 años de mi vida universitaria, agradecer a ti Xime, Paulino y toda la gente hermosa con la que tuve la dicha de compartir; a los desordenados pero bueno muchachos de Los Cabros, compartí hermosos momentos con ustedes y lo seguimos haciendo, los llevo en el corazón; al depto 103, cuantas tarde de no-estudio con kart y brawl, buenos recuerdos y frases para el bronce: matamoscas, noche de entierro, empujoncito, colgamiento, maleteo de flechas y tecla amarilla; a los AACC de Weed Cookies 607, hicieron de la VA la mejor ciudad del mundo; a mis amigos Javo, Diego, Sami, Juanito y Happy, quienes me siguen enseñando que la amistad no conoce tiempo ni distancia; a todos los que están o estuvieron en Libertad 269, quienes me ayudaron a crecer profesionalmente, siempre llevaré un hermoso recuerdo de los momento vividos en aquel lugar y en las múltiples sedes que tuvimos; a ustedes dos mis grandes amigas Pía y Roci, que tuve la dicha de conocer en la universidad, siempre recordare con cariño las anécdotas compartidas; a LDV que conocí hacia el final de mi vida universitaria, siempre los llevo en el corazón; del profesor Marcos Valdebenito, quién despertó mi amor por las ciencias; a Enrique Ilabaca “el profe de buceo”, de quién aprendí que aunque todo sea adverso siempre se puede enseñar lo que amas de la mejor manera posible.

A ti Tobi y Lulú por hacerme compañía durante mis largas noches de estudio.

A pesar que la vida nos separó, siempre recordaré con profundo cariño los lindos momentos compartidos, espero que la vida te siga sonriendo como hasta hoy lo ha hecho.

Agradecer a mi profesor guía por tener siempre la mejor de las disposiciones, a mi profesor correferente Joaquín Meza por sus rápidas gestiones cuando lo necesite y al profesor Patricio Catalán por haberme guiado cuando más lo necesite. A Francisco Iturriaga de Esval, por haberme facilitado a la información y a José Alvarez de Esval, por haber tenido siempre la mejor de las disposiciones para cuanta medición se nos ocurrió solicitar.

## DEDICATORIA

*En un país donde las diferencia de oportunidades muchas veces define el porvenir, nunca podré terminar de agradecer a mis padres por haberme dado siempre las mejores oportunidades. Dedicado a toda mi familia, sin ustedes nada de esto hubiese sido alguna vez posible y en especial a ti tata, sé que hubieses sido inmensamente feliz haberme visto culminar esta etapa como ahora lo hago.*

# RESUMEN EJECUTIVO

La accidentada topografía de importantes ciudades como Viña del Mar o Valparaíso, plantea un importante reto al abastecimiento de agua potable. Siendo un caso particular, los sectores elevados de baja población en los que la presión entregada por la red no es suficiente y no puede ser instalado un nuevo estanque a mayor cota.

Al no poder disponer de un estanque como solución, se generan dos grandes problemas. Primero la variabilidad del caudal de demanda deberá ser absorbida por el sistema de bombeo a emplear; y segundo, el sistema de bombeo deberá ser capaz de suplir la demanda en todo su rango de variación, que podrían ser desde una fracción de litros por segundo, hasta los 16 [L/s] exigidos en el evento de incendio como mínimo. Con base a la experiencia se ha evidenciado que en los casos en que la población es poco numerosa y además el caudal mínimo de demanda es menor que el caudal mínimo de impulsión de las bombas, se producen repetidas partidas y paradas de las bombas que podrían reducir sustancialmente la vida útil de los equipos.

Se estudia la solución a esta problemática particular, evaluando tres alternativas actuales al problema de demanda variable de agua potable: bomba con variador de frecuencia, bomba con estanque hidroneumático, y bomba con variador de frecuencia y estanque hidroneumático (sistema mixto). A partir de dicha evaluación, se determina que la solución óptima es el sistema mixto.

Se presenta una metodología para el diseño de la solución en función del sistema mixto y una revisión de la formulación clásica para el cálculo del volumen de los estanques hidroneumáticos denominada formulación propuesta, con base en dichas ecuaciones se han propuesto mejoras para el cálculo del estanque hidroneumático, con el objetivo de optimizar su volumen, asegurando así mantener la operación de las bombas (arranques máximos por hora) dentro de los límites indicados por el fabricante. El empleo de la formulación clásica o propuesta para el cálculo del volumen del estanque hidroneumático se encuentra acotada a un rango de aplicación recomendada por el autor de la presente memoria.

Se realizan una serie de simulaciones computacionales de distintos modelos hidráulicos que permiten contar la cantidad de arranques por hora generados en las bombas a fin de evaluar el comportamiento de las bombas sin un estanque hidroneumático, y con un estanque hidroneumático calculado según la formulación clásica y la propuesta. De acuerdo a dichos resultados, se confirma la necesidad de un estanque hidroneumático debido al alto número de arranques por hora generados en las bombas y su sustancial disminución a un número menor al límite máximo recomendado por los fabricantes al agregarlo. Respecto al volumen calculado

del estanque hidroneumático, los resultados muestran que siempre se obtiene un volumen menor al emplear ya sea la formulación clásica o la propuesta dentro del rango de aplicación recomendado.

Finalmente, debido a que no se pudo conseguir datos de medición que permitiesen confirmar la hipótesis del planteamiento base para la formulación propuesta, la que considera que se puede despreciar el tiempo de llenado del estanque hidroneumático al ser mucho menor al tiempo de vaciado ($T_{LL} << T_{va}$), se recomienda para validar de manera robusta lo planteado realizar mediciones reales en un sistema del tipo descrito que permitan contrastar lo planteado.

## ABSTRACT

The hilly topography of important cities as Viña del Mar or Valparaíso, propose an important challenge to the supply of drinking water. A particular case is the low population that is on elevated neighborhood, in which the pressure delivered by the water supply network doesn't meet the minimum requirements and cannot be installed an elevated water tank.

Because there is not possibility of an elevated water tank as a solution, two big problems are generated. First, the high variability in the water demand by the population must be absorbed by the pumps; and second, the pumping station must be able to supply the demand in the all variation range, this could be from a fraction of liters per second to the minimum request of 16 [L/s] in a fire event. Based on experience it have been show that in low population case and the minimum demand flow is lower than the minimum pumping flow, are produced repeatedly stars in the pump that could reduce the service life.

The solution of this particular problem is studied evaluating three current alternatives of solution: pumping station with variable-frequency drive, pump station with a hydropneumatic tank, and pumping station with variable-frequency drive and with a hydropneumatic tank (mixed system). From this evaluation is determined that the optimal solution is the mixed system.

A methodology is presented for the design of the mixed system and an overhaul to the classic equations of the hydropneumatic tank volume calculation, based on these equations improvements have been proposed (proposed equations), with the aim of optimizing (reducing) the hydropneumatic tank volume, thus ensuring the pump operation (star per hour) within the limits recommended by the manufacturer. The use of the classic equations or the proposed equations for the hydropneumatic tank volume calculation is bounded to an application range recommended by the author of this document.

A series of computer simulation of different hydraulic models are carried out to evaluate the quantity of star per hour generated in the pumps with the aim of evaluated the behavior of the pumps without a hydropneumatic tank, and with a hydropneumatic tank calculated according with classic equations and the proposed equations. In agreement with those results, the need for a hydropneumatic tank is confirmed due the high number of stars per hour generated in the pumps and their substantial decrease to number lower than the manufacturer's limit when it's added. Regarding the calculated volume of the hydropneumatic tank, the results show that always a smaller volume is obtained either when using the classic equations or the proposed equations within the recommended application range.

Finally, due the fact that was not possible to obtain measurement data that would allow to confirm the hypothesis of the base approach for the proposed equations, which considers that

the filling time of the hydropneumatic tank can be neglected owing is much shorter that the emptying time ($T_{LL} << T_{va}$), it is recommended to validate in a robust way what is proposed carry out real measurements in a system of the described type that allows to contrasting the proposed.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

**1. INTRODUCCIÓN ..... 1**

1.1. ALCANCE ..... 2

1.2. ANTECEDENTES ..... 3

**2. ESTADO DEL ARTE ..... 5**

2.1. EL PROBLEMA DE DEMANDA VARIABLE DE AGUA POTABLE PARA SECTORES EN ALTURA ..... 5

2.2. REQUISITOS DE CAUDAL Y PRESIÓN PARA UNA RED DE AGUA POTABLE EN CHILE ..... 7

2.3. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE DEMANDA VARIABLE EN ESTUDIO ..... 9

2.3.1. Bombas centrífugas con sistema variador de frecuencia (VDF) ..... 10

2.3.2. Bombas centrífugas con estanque hidroneumático. ..... 11

2.3.3. Bombas centrífugas con variador de frecuencia junto a una bomba pequeña de apoyo ..... 12

2.3.4. Bombas centrífugas con variador de frecuencia junto a un estanque hidroneumático ..... 12

2.4. CÁLCULO DEL VOLUMEN DE UN ESTANQUE HIDRONEUMÁTICO ..... 12

2.4.1. Filosofía de operación de un estanque hidroneumático ..... 12

2.4.2. Formulación clásica ..... 14

2.4.3. Deducción del volumen útil del estanque hidroneumático ..... 15

2.4.4. Comentarios del volumen útil del estanque hidroneumático según la formulación clásica ..... 17

**3. OBJETIVOS ..... 19**

3.1. GENERAL ..... 19

3.2. ESPECÍFICO ..... 19

**4. METODOLOGÍA ..... 20**

4.1. RECOMENDACIONES DE DISEÑO PARA UN SISTEMA DE BOMBEO CON VARIADOR DE FRECUENCIA JUNTO A UN ESTANQUE HIDRONEUMÁTICO 20

4.1.1. Puntos de funcionamiento del sistema y restricciones ..... 20

4.1.2. Consideraciones de diseño para las bombas con variador de frecuencia 21

*4.1.2.1. Caudal y frecuencia mínima nominal de la bomba ..... 22*

*4.1.2.2. Caudal y frecuencia mínima de funcionamiento de la bomba en operación junto a un estanque hidroneumático ..... 22*

*4.1.2.3. Máximas partidas por hora ..... 23*

4.1.3. Ventana de presión para estanque hidroneumático ..... 24

4.1.4. Formulación propuesta para el cálculo del volumen del estanque hidroneumático ..... 25

*4.1.4.1. Estudio de la ecuación del tiempo mínimo entre partidas del sistema ($T_p$)25*

*4.1.4.2. Ecuaciones propuestas para el cálculo del volumen del estanque hidroneumático ..... 27*

4.2. DISEÑO DE MODELOS HIDRÁULICOS COMPUTACIONALES ..... 28

4.2.1. Nomenclatura y justificación de parámetros de los modelos ..... 28

4.2.2. Caudales ingresados a los modelos ..... 31

4.2.3. Características de la red para los modelos ..... 34

4.2.4. Volúmenes comerciales adoptados para los estanques hidroneumáticos 37

**5. RESULTADOS ..... 39**

5.1. VOLUMENES DE ESTANQUES HIDRONEUMÁTICOS ..... 39

5.2. VOLUMEN DEL ESTANQUE HIDRONEUMÁTICO VERSUS NÚMERO DE ARRANQUES EN LAS BOMBAS ..... 41

**6. DISCUSIÓN ..... 45**

**7. CONCLUSIONES ..... 49**

**8. REFERENCIAS ..... 51**

**9. ANEXOS ..... 53**

**A. ANEXO 1: DEDUCCIÓN DE LAS ECUACIONES PARA UN ESTANQUE HIDRONEUMÁTICO ..... 54**

**B. ANEXO 2: RECOMENDACIONES Y POSIBLES PROBLEMAS EN EL DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO CON VARIADOR DE FRECUENCIA JUNTO A UN ESTANQUE HIDRONEUMÁTICO ..... 58**

B.1. CARACTERÍSTICAS DE LA RED DE AGUA POTABLE ..... 58

B.1.1. Red AP con altas y bajas pérdidas de energía ..... 58

B.1.2. Curva característica del sistema y puntos de funcionamiento ..... 60

B.1.3. Restricciones por presión ..... 62

*B.1.3.1. Límites de presión ..... 62*

*B.1.3.2. Presión aguas arriba del equipo de bombeo ..... 64*

B.1.4. Máximas partidas por hora ..... 65

B.1.5. Ventana de presión para estanque hidroneumático ..... 66

*B.1.5.1. Criterios de diseño para presión mínima (Pb) ..... 66*

*B.1.5.2. Criterios de diseño para presión máxima (Pa) ..... 67*

**C. ANEXO 3: DISEÑO DE MODELOS HIDRÁULICOS COMPUTACIONAL 69**

C.1. PUNTOS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA PARA MODELOS HIDRÁULICOS ..... 69

C.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO PARA MODELOS HIDRÁULICOS 72

C.2.1. Análisis de la selección del equipo de bombeo ..... 72

C.2.2. Bombas seleccionadas para los modelos ..... 77

C.3. DISEÑO DEL SISTEMA HIDRONEUMÁTICO PARA MODELOS HIDRÁULICOS ..... 79

C.3.1. Diseño de la ventana de presión para modelos con la formulación propuesta 81

C.3.2. Diseño de la ventana de presión para modelos con la formulación clásica 86

C.3.3. Diseño del volumen del estanque hidroneumático para modelos hidráulicos ..... 86

C.4. DIFICULTADES EN LA ADAPTACIÓN DE LA REALIDAD A UN MODELO TEÓRICO ..... 91

C.5. DESCRIPCIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS TEÓRICOS .. 92

C.5.1. Tipos de modelos implementados ..... 92

C.5.2. Elementos de los modelos ..... 92

C.5.3. Contraste del modelo teórico con la realidad ..... 93

C.6. CONSIDERACIONES DE MODELACIÓN ..... 95

C.6.1. Modelación de partidas/Paradas de los equipos de bombeo ..... 95

*C.6.1.1. Bombas con variador de frecuencia (Figura 9.20) ..... 95*

*C.6.1.2. Bombas con variador de frecuencia junto a estanque hidroneumático (Figura 9.21) 99*

C.6.2. Modelación de pérdidas de carga ..... 99

C.6.3. Modelación de la fuente de agua..... 99

C.6.4. Modelación de la demanda de población ..... 100

C.7. INGRESO DE DATOS AL MODELO..... 100

C.7.1. Demanda de la población..... 100

C.7.2. Curvas de las bombas..... 100

C.7.3. Volumen de estanque hidroneumático ..... 101

C.8. CONTROLES LÓGICOS IMPLEMENTADOS EN EL MODELO ..... 101

C.8.1. Controles lógicos para un modelo tipo VF ..... 102

C.8.2. Controles lógicos para un modelo tipo VF+HT ..... 103

**D. ANEXO 4: RESULTADOS EN EXTENSO DE MODELOS HIDRÁULICOS COMPUTACIONALES..... 105**

D.1. NOMENCLATURA PARA LAS TABLAS DE RESULTADOS ..... 105

D.2. RESULTADOS PARA LOS MODELOS DE LA BOMBA TIPO 1 (B1)..... 106

D.2.1. Arranques por hora y volumen de hidroneumático para modelos B1-Q1-BP-VF y B1-Q1-BP-VF+HT ..... 106

D.2.2. Arranques por hora y volumen de hidroneumático para modelos B1-Q1-AP-VF y B1-Q1-AP-VF+HT ..... 109

D.2.3. Arranques por hora y volumen de hidroneumático para modelos B1-Q2-BP-VF y B1-Q2-BP-VF+HT ..... 112

D.2.4. Arranques por hora y volumen de hidroneumático para modelos B1-Q2-AP-VF y B1-Q2-AP-VF+HT ..... 114

D.2.5. Resumen de resultados para los modelos de la bomba tipo 1..... 117

D.2.6. Comparación de resultados para los modelos con altas y bajas pérdidas de la bomba tipo 1 ..... 118

D.3. RESULTADOS PARA LOS MODELOS DE LA BOMBA TIPO 2 (B2)..... 119

D.3.1. Arranques por hora y volumen de hidroneumático para modelos B2-Q1-BP-VF y B2-Q1-BP-VF+HT ..... 119

D.3.2. Arranques por hora y volumen de hidroneumático para modelos B2-Q1-AP-VF y B2-Q1-AP-VF+HT ..... 122

D.3.3. Arranques por hora y volumen de hidroneumático para modelos B2-Q2-BP-VF y B2-Q2-BP-VF+HT ..... 125

D.3.4. Arranques por hora y volumen de hidroneumático para modelos B2-Q2-AP-VF y B2-Q2-AP-VF+HT ..... 127

D.3.5. Resumen de resultados para los modelos de la bomba tipo 2..... 130

D.3.6. Comparación de resultados para los modelos con altas y bajas pérdidas de la bomba tipo 2 ..... 131

D.4. RESULTADOS PARA LOS MODELOS DE LA BOMBA TIPO 3 (B3)..... 132

D.4.1. Arranques por hora y volumen de hidroneumático para modelos B3-Q1-BP-VF y B3-Q1-BP-VF+HT ..... 132

D.4.2. Arranques por hora y volumen de hidroneumático para modelos B3-Q1-AP-VF y B3-Q1-AP-VF+HT ..... 136

D.4.3. Arranques por hora y volumen de hidroneumático para modelos B3-Q2-BP-VF y B3-Q2-BP-VF+HT ..... 138

D.4.4. Arranques por hora y volumen de hidroneumático para modelos B3-Q2-AP-VF y B3-Q2-AP-VF+HT ..... 141

D.4.5. Resumen de resultados para los modelos de la bomba tipo 3..... 143

D.4.6. Comparación de resultados para los modelos con altas y bajas pérdidas de la bomba tipo 3 ..... 145

# ÍNDICE TABLAS

Tabla 2.1 - Caudales y presiones de diseño en agua potable urbana y rural ..... 8

Tabla 2.2 - Resumen de problemas y soluciones junto a observaciones ..... 10

Tabla 4.1 - Partidas por hora para bombas tipo pozo profundo y tipo en línea vertical (marcas KSB y Grundfos) ..... 24

Tabla 4.2 - Nomenclatura para los modelos hidráulicos ..... 29

Tabla 4.3 - Justificación de los parámetros para los modelos hidráulicos ..... 30

Tabla 4.4 - Modelos hidráulicos para la bomba tipo 1 (B1) ..... 31

Tabla 4.5 – Valores empleados para una red con altas pérdidas (AP) y una red con bajas pérdidas (BP) ..... 36

Tabla 4.6 – Volúmenes comerciales de estanques hidroneumáticos utilizados en los modelos de análisis ..... 38

Tabla 5.1 - Definición de parámetros utilizados en la Tabla 5.2, Tabla 5.3 y Tabla 5.4 ..... 39

Tabla 5.2 - Detalle de los parámetros de las bombas y estanques hidroneumáticos empleados en los modelos con bomba tipo 1 (B1) ..... 40

Tabla 5.3 - Detalle de los parámetros de las bombas y estanques hidroneumáticos empleados en los modelos con bomba tipo 2 (B2) ..... 40

Tabla 5.4 - Detalle de los parámetros de las bombas y estanques hidroneumáticos empleados en los modelos con bomba tipo 3 (B3) ..... 41

Tabla 6.1 - Cálculo del cociente caudal de demanda sobre caudal de bombeo (Qd/Qb) ..... 47

Tabla 6.2 – Comparación de número de arranques por hora máximos y volumen de estanque hidroneumático para los tres tipos de bombas ..... 47

Tabla 9.1 - Partidas por hora para distintos modelos de bombas (marcas KSB y Grundfos) 66

Tabla 9.2 - Puntos de funcionamiento para la Bomba tipo 1 ..... 69

Tabla 9.3 - Puntos de funcionamiento para la Bomba tipo 2 ..... 70

Tabla 9.4 - Puntos de funcionamiento para la Bomba tipo 3 ..... 70

Tabla 9.5 - Detalle de bombas empleadas en los modelos con bomba tipo 1 (B1) ..... 77

Tabla 9.6 - Detalle de bombas empleadas en los modelos con bomba tipo 2 (B2) ..... 78

Tabla 9.7 - Detalle de bombas empleadas en los modelos con bomba tipo 3 (B3) ..... 79

Tabla 9.8 - Detalle de los parámetros de las bombas empleadas en los modelos con bomba tipo 1 (B1) ..... 80

Tabla 9.9 - Detalle de los parámetros de las bombas empleadas en los modelos con bomba tipo 2 (B2) ..... 80

Tabla 9.10 - Detalle de los parámetros de las bombas empleadas en los modelos con bomba tipo 3 (B3) ..... 81

Tabla 9.11 - Definición de parámetros utilizados en la Tabla 9.12, Tabla 9.13 y Tabla 9.14 87

Tabla 9.12 - Detalle de los parámetros de las bombas y estanques hidroneumáticos empleados en los modelos con bomba tipo 1 (B1)..... 88

Tabla 9.13 - Detalle de los parámetros de las bombas y estanques hidroneumáticos empleados en los modelos con bomba tipo 2 (B2)..... 89

Tabla 9.14 - Detalle de los parámetros de las bombas y estanques hidroneumáticos empleados en los modelos con bomba tipo 3 (B3)..... 90

Tabla 9.15 - Descripción de los elementos de los modelos ..... 93

Tabla 9.16 - Hidroneumáticos virtuales para simulación de red de agua potable..... 97

Tabla 9.17 - Resumen de bombas empleados en los modelos ..... 101

Tabla 9.18 - Nomenclatura para las tablas de los resultados de los modelos para los distintos tipos de bombas..... 105

Tabla 9.19 - Resumen de arranques totales por cada hora para los modelos B1-Q1-BP-VF y B1-Q1-BP-VF+HT ..... 106

Tabla 9.20 - Diferencias en los arranques por hora para los modelos B1-Q1-BP-VF y B1-Q1-BP-VF+HT ..... 107

Tabla 9.21 - Diferencias en el volumen del estanque hidroneumático para los modelos B1-Q1-BP-VF y B1-Q1-BP-VF+HT ..... 108

Tabla 9.22 - Resumen de arranques totales por cada hora los modelos B1-Q1-AP-VF y B1-Q1-AP-VF+HT..... 109

Tabla 9.23 - Diferencias en los arranques por hora para los modelos B1-Q1-AP-VF y B1-Q1-AP-VF+HT ..... 110

Tabla 9.24 - Diferencias en el volumen del estanque hidroneumático para los modelos B1-Q1-AP-VF y B1-Q1-AP-VF+HT ..... 110

Tabla 9.25 - Resumen de arranques totales por cada hora para los modelos B1-Q2-BP-VF y B1-Q2-BP-VF+HT ..... 113

Tabla 9.26 - Diferencias en los arranques por hora para los modelos B1-Q2-BP-VF y B1-Q2-BP-VF+HT ..... 114

Tabla 9.27 - Diferencias en el volumen del estanque hidroneumático para los modelos B1-Q2-BP-VF y B1-Q2-BP-VF+HT ..... 114

Tabla 9.28 - Resumen de arranques totales por cada hora para los modelos B1-Q2-AP-VF y B1-Q2-AP-VF+HT ..... 116

Tabla 9.29 - Diferencias en los arranques por hora para los modelos B1-Q2-AP-VF y B1-Q2-AP-VF+HT ..... 116

Tabla 9.30 - Diferencias en el volumen del estanque hidroneumático para los modelos B1-Q2-AP-VF y B1-Q2-AP-VF+HT ..... 117

Tabla 9.31 - Resumen de resultados para los modelos de la bomba tipo 1 ..... 117

Tabla 9.32 - Detalle de los parámetros de las bombas empleadas en los modelos con bomba tipo 1 (B1) ..... 118

Tabla 9.33 – Comparación resultados de arranques por hora entre modelos con altas y bajas pérdidas sin estanque hidroneumático..... 119

Tabla 9.34 - Resumen de arranques totales por cada hora para los modelos B2-Q1-BP-VF y B2-Q1-BP-VF+HT ..... 120

Tabla 9.35 - Diferencias en los arranques por hora para los modelos B2-Q1-BP-VF y B2-Q1-BP-VF+HT ..... 121

Tabla 9.36 - Diferencias en el volumen del estanque hidroneumático para los modelos B2-Q1-BP-VF y B2-Q1-BP-VF+HT ..... 121

Tabla 9.37 - Resumen de arranques totales por cada hora los modelos B2-Q1-AP-VF y B2-Q1-AP-VF+HT..... 123

Tabla 9.38 - Diferencias en los arranques por hora para los modelos B2-Q1-AP-VF y B2-Q1-AP-VF+HT ..... 123

Tabla 9.39 - Diferencias en el volumen del estanque hidroneumático para los modelos B2-Q1-AP-VF y B2-Q1-AP-VF+HT ..... 124

Tabla 9.40 - Resumen de arranques totales por cada hora para los modelos B2-Q2-BP-VF y B2-Q2-BP-VF+HT ..... 126

Tabla 9.41 - Diferencias en los arranques por hora para los modelos B2-Q2-BP-VF y B2-Q2-BP-VF+HT ..... 127

Tabla 9.42 - Diferencias en el volumen del estanque hidroneumático para los modelos B2-Q2-BP-VF y B2-Q2-BP-VF+HT ..... 127

Tabla 9.43 - Resumen de arranques totales por cada hora para los modelos B2-Q2-AP-VF y B2-Q2-AP-VF+HT ..... 129

Tabla 9.44 - Diferencias en los arranques por hora para los modelos B2-Q2-AP-VF y B2-Q2-AP-VF+HT ..... 129

Tabla 9.45 - Diferencias en el volumen del estanque hidroneumático para los modelos B2-Q2-AP-VF y B2-Q2-AP-VF+HT ..... 130

Tabla 9.46 - Resumen de resultados para los modelos de la bomba tipo 2 ..... 130

Tabla 9.47 - Detalle de los parámetros de las bombas empleadas en los modelos con bomba tipo 2 (B2) ..... 131

Tabla 9.48 – Comparación resultados de arranques por hora entre modelos con altas y bajas pérdidas ..... 132

Tabla 9.49 - Resumen de arranques totales por cada hora para los modelos B3-Q1-BP-VF y B3-Q1-BP-VF+HT ..... 134

Tabla 9.50 - Diferencias en los arranques por hora para los modelos B3-Q1-BP-VF y B3-Q1-BP-VF+HT ..... 134

Tabla 9.51 - Diferencias en el volumen del estanque hidroneumático para los modelos B3-Q1-BP-VF y B3-Q1-BP-VF+HT ..... 135

Tabla 9.52 - Resumen de arranques totales por cada hora los modelos B3-Q1-AP-VF y B3-Q1-AP-VF+HT ..... 136

Tabla 9.53 - Diferencias en los arranques por hora para los modelos B3-Q1-AP-VF y B3-Q1-AP-VF+HT ..... 137

Tabla 9.54 - Diferencias en el volumen del estanque hidroneumático para los modelos B3-Q1-AP-VF y B3-Q1-AP-VF+HT ..... 137

Tabla 9.55 - Resumen de arranques totales por cada hora para los modelos B3-Q2-BP-VF y B3-Q2-BP-VF+HT ..... 139

Tabla 9.56 - Diferencias en los arranques por hora para los modelos B3-Q2-BP-VF y B3-Q2-BP-VF+HT ..... 140

Tabla 9.57 - Diferencias en el volumen del estanque hidroneumático para los modelos B3-Q2-BP-VF y B3-Q2-BP-VF+HT ..... 140

Tabla 9.58 - Resumen de arranques totales por cada hora para los modelos B3-Q2-AP-VF y B3-Q2-AP-VF+HT ..... 141

Tabla 9.59 - Diferencias en los arranques por hora para los modelos B3-Q2-AP-VF y B3-Q2-AP-VF+HT ..... 142

Tabla 9.60 - Diferencias en el volumen del estanque hidroneumático para los modelos B3-Q2-AP-VF y B3-Q2-AP-VF+HT ..... 143

Tabla 9.61 - Resumen de resultados para los modelos de la bomba tipo 3 ..... 144

Tabla 9.62 - Detalle de los parámetros de las bombas empleadas en los modelos con bomba tipo 3 (B3) ..... 144

Tabla 9.63 – Comparación resultados de arranques por hora entre modelos con altas y bajas pérdidas ..... 145

# ÍNDICE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema del problema de baja presión para sectores en altura..... 5

Figura 2.2 - Esquema básico de un estanque hidroneumático ..... 13

Figura 2.3 - Presión máxima y mínima de un estanque hidroneumático asociado a la curva de una bomba centrífuga ..... 14

Figura 2.4 - Esquema de interacción del volumen útil del estanque hidroneumático..... 16

Los límites de presión máxima y mínima son los estipulados en la NCh691:2015, según se indicó en el punto 2.2.4.1 del tipo 2+1 junto a un ..... 21

Figura 4.2 – Ejemplo de frecuencia mínima de funcionamiento de la bomba para un sistema de bombeo con estanque hidroneumático ..... 23

Figura 4.3 – Rango de operación de caudales del tipo 2+1 junto a un..... 26

Figura 4.4 - Caudal de demanda de la Población 1 (Q1)..... 32

Figura 4.5 - Caudal de demanda de la Población 2 (Q2)..... 33

Figura 4.6 - Caudal de demanda de la Población 1 más evento de Incendio..... 34

Figura 4.7 - Caudal de demanda de la Población 2 más evento de Incendio..... 34

Figura 4.8 – Curva característica de la tubería (CCT) para red con Altas Pérdidas y Bajas Pérdidas..... 37

Figura 5.1 - Volumen del estanque hidroneumático vs número de arranques/hora-máx para los modelos con caudal tipo 1 (Q1) y bajas pérdidas (BP) para los tres tipos de bombas.... 42

Figura 5.2 - Volumen del estanque hidroneumático vs número de arranques/hora-máx para los modelos con caudal tipo 1 (Q1) y altas pérdidas (AP) para los tres tipos de bombas..... 43

Figura 5.3 - Volumen del estanque hidroneumático vs número de arranques/hora-máx para los modelos con caudal tipo 2 (Q2) y bajas pérdidas (BP) para los tres tipos de bombas.... 43

Figura 5.4 - Volumen del estanque hidroneumático vs número de arranques/hora-máx para los modelos con caudal tipo 2 (Q2) y altas pérdidas (AP) para los tres tipos de bombas..... 44

Figura 9.1 - Diagrama de estanque hidroneumático..... 54

Figura 9.2 - Curva característica del sistema para red con altas pérdidas y puntos de funcionamiento (2) y (3)..... 59

Figura 9.3 - Curva característica del sistema para red con altas pérdidas y puntos de funcionamiento (2) y (3)..... 60

Figura 9.4 - Curva característica del sistema para red con bajas pérdidas y puntos de funcionamiento..... 61

Figura 9.5 - Curva característica del sistema para red con altas pérdidas y puntos de funcionamiento..... 62

Figura 9.6 - Restricciones por presión utilizando la curva característica del sistema ..... 63

Figura 9.7 - Restricciones por presión sin curva característica del sistema y utilizando los puntos de funcionamiento ..... 64

Figura 9.8 - Banda de presión máxima y mínima para el estanque hidroneumático, en una red con bajar pérdidas..... 68

Figura 9.9 - Puntos de funcionamiento para el modelo B1-Q1-BP-VF ..... 71

Figura 9.10 - Puntos de funcionamiento para el modelo B1-Q1-AP-VF ..... 72

Figura 9.11 – Modelo B1-Q1-BP-VF (Caso 1 y Caso 2): Curva del sistema y bombas para varias frecuencias (3 bombas)..... 73

Figura 9.12 - Modelo B1-Q1-AP-VF (Caso 1 y Caso 2): Curva del sistema y bombas para varias frecuencias (3 bombas)..... 74

Figura 9.13 - Modelo B1-Q2-BP-VF (Caso 1 y Caso 2): Curva del sistema y bombas para varias frecuencias (3 bombas)..... 75

Figura 9.14 - Modelo B1-Q2-AP-VF (Caso 1 y Caso 2): Curva del sistema y bombas para varias frecuencias (3 bombas)..... 76

Figura 9.15 - Modelo B1-Q1-BP-VF (Caso 1): Curva del sistema, bomba para varias frecuencias (1 bomba en operación) y banda de presión para estanque hidroneumático .... 82

Figura 9.16 - Modelo B1-Q1-AP-VF (Caso 1): Curva del sistema, bomba para varias frecuencias (1 bomba en operación) y banda de presión para estanque hidroneumático .... 83

Figura 9.17 - Modelo B1-Q2-BP-VF (Caso 1): Curva del sistema, bomba para varias frecuencias (1 bomba en operación) y banda de presión para estanque hidroneumático .... 84

Figura 9.18 - Modelo B1-Q2-AP-VF (Caso 1): Curva del sistema, bomba para varias frecuencias (1 bomba) y banda de presión para estanque hidroneumático ..... 85

Figura 9.19 – Identificación de los elementos de los modelos ..... 92

Figura 9.20 - Identificación de elementos existentes en la realidad para el caso en que se emplean bombas con variador de frecuencia sin estanque hidroneumático ..... 94

Figura 9.21 - Identificación de elementos existentes en la realidad para el caso en que se emplean bombas con variador de frecuencia junto a un estanque hidroneumático..... 95

Figura 9.22 - Indicar de control lógico en los elementos de los modelos ..... 102

Figura 9.23 - Arranques totales por cada hora para los modelos B1-Q1-BP-VF y B1-Q1-BP-VF+HT ..... 106

Figura 9.24 - Arranques totales por cada hora para los modelos B1-Q1-AP-VF y B1-Q1-AP-VF+HT ..... 109

Figura 9.25 - Arranques totales por cada hora para los modelos B1-Q2-BP-VF y B1-Q2-BP-VF+HT ..... 112

Figura 9.26 - Zoom arranques totales por cada hora para los modelos B1-Q2-BP-VF y B1-Q2-BP-VF+HT ..... 113

Figura 9.27 - Arranques totales por cada hora para los modelos B1-Q2-AP-VF y B1-Q2-AP-VF+HT ..... 115

Figura 9.28 - Zoom arranques totales por cada hora para los modelos B1-Q2-AP-VF y B1-Q2-AP-VF+HT ..... 115

Figura 9.29 - Arranques totales por cada hora para los modelos B2-Q1-BP-VF y B2-Q1-BP-VF+HT ..... 120

Figura 9.30 - Arranques totales por cada hora para los modelos B2-Q1-AP-VF y B2-Q1-AP-VF+HT ..... 122

Figura 9.31 - Arranques totales por cada hora para los modelos B2-Q2-BP-VF y B2-Q2-BP-VF+HT ..... 125

Figura 9.32 - Zoom arranques totales por cada hora para los modelos B2-Q2-BP-VF y B2-Q2-BP-VF+HT ..... 126

Figura 9.33 - Arranques totales por cada hora para los modelos B2-Q2-AP-VF y B2-Q2-AP-VF+HT ..... 128

Figura 9.34 - Zoom arranques totales por cada hora para los modelos B2-Q2-AP-VF y B2-Q2-AP-VF+HT ..... 128

Figura 9.35 - Arranques totales por cada hora para los modelos B3-Q1-BP-VF y B3-Q1-BP-VF+HT ..... 133

Figura 9.36- Zoom arranques totales por cada hora para los modelos B3-Q1-BP-VF y B3-Q1-BP-VF+HT ..... 133

Figura 9.37 - Arranques totales por cada hora para los modelos B3-Q1-AP-VF y B3-Q1-AP-VF+HT ..... 136

Figura 9.38 - Arranques totales por cada hora para los modelos B3-Q2-BP-VF y B3-Q2-BP-VF+HT ..... 139

Figura 9.39 - Arranques totales por cada hora para los modelos B3-Q2-AP-VF y B3-Q2-AP-VF+HT ..... 141

# 1. INTRODUCCIÓN

La accidentada orografía de ciudades como Viña del Mar o Valparaíso plantea importantes retos técnicos para cumplir los requisitos de presión que exige la normativa chilena actual para el servicio de agua potable. Un caso particular, en la ciudad, son los sectores elevados con poblaciones poco numerosas que presentan problemas de baja presión. Comúnmente este problema se resuelve con la instalación de un estanque a mayor cota. No obstante, existen casos en los que esta solución no es posible por diversas razones: económicas, estéticas, técnicas, entre otras; por lo que se debe recurrir a soluciones alternativas.

En la actualidad este problema usualmente es resuelto empleando bombas con variador de frecuencia que impulsan de manera directa a la red de agua potable del sector elevado. Se ha detectado en observaciones en terreno que en algunos de estos sistemas la operación de la bomba durante la noche tiene un comportamiento de constantes partidas y paradas, lo que se atribuye al bajo caudal de demanda del sector (población poco numerosa) y que alcanza valores menores al caudal mínimo de impulsión de la bomba, forzando su detención [1]. Este comportamiento puede conducir a una fatiga de material por sobrecalentamiento lo que disminuye su vida útil [2]. Por esta razón los principales fabricantes de bombas especifican en sus manuales de operación el tiempo mínimo entre dos arranques consecutivos de la bomba, definiendo la máxima cantidad de arranques por hora.

Para solucionar este problema se puede adicionar un elemento o dispositivo que permita aumentar el tiempo entre dos arranques consecutivos, analizándose la inclusión de un estanque hidroneumático cuyo objetivo son dos: 1) suplir la demanda que es menor al caudal mínimo de impulsión de la bomba [3] y 2) aumentar el tiempo entre dos arranques consecutivos de una misma bomba. Queda fuera de los alcances de la memoria el estudio de otros elementos que cumplan la misma función tales como, bomba pequeña auxiliar para suplir los bajos caudales de demanda, pequeñas sentinas de acumulación, etc.

El empleo de plantas elevadoras de agua potable compuestas por bombas con variador de frecuencia junto a estanques hidroneumáticos impulsando a redes de agua potable con problemas de baja presión y poblaciones poco numerosas no es nuevo y ha sido empleado por Esval en el pasado [4], aunque el diseño de estos sistemas es poco frecuente [3]. Si bien el diseño de esta planta elevadora es similar a la de un edificio, se diferencia de ésta en que la red pública de agua potable se rige por la norma chilena NCh691:2015, distinto de la red húmeda de un edificio que se rige por el reglamento de instalaciones domiciliarias de agua potable y alcantarillado (RIDAA). Esto implica que la red de agua potable pública se encuentra

afecta a cumplir con el caudal de incendio[1], no así la red húmeda de un edificio, lo que genera una importante diferencia en el diseño, ya que el caudal de incendio es mucho mayor que el caudal máximo horario[2] para el caso de una población poco numerosa. En consecuencia las bombas se encuentran sobredimensionadas para la mayor parte de su tiempo de operación.

La formulas clásicas para el cálculo, tanto del volumen útil como del volumen total de los estanques hidroneumáticos en la literatura actual no es explicada ni referenciada [1] [5]. Esta misma situación ocurre en otras fuentes: catálogos técnicos de fabricantes nacionales [6] e internacionales [7], manuales elaborados por empresas fabricantes [8], etc. Como se verá más adelante, éstas fórmulas aplicadas al caso en análisis tienden a sobredimensionar los volúmenes en ciertas condiciones.

Con base en los apuntes del profesor Stöwhas [9], se demostrará la derivación de la formulas clásicas para el cálculo del volumen de un estanque hidroneumático y se propone una modificación a las formulas clásicas para el cálculo del volumen de regulación, denominada formulas propuestas, que cumplen dos objetivos: 1) reducir su tamaño (reducción del costo económico inicial) y 2) asegurar que la bomba no supere la cantidad máxima de partidas por hora permitidas. Se evalúan ambos objetivos a través de una simulación computacional (tipo Epanet), que permite obtener la cantidad de arranques por hora que se generan en la bomba al operar en conjunto con un estanque hidroneumático de un determinado volumen, para ser comparados los resultados y determinar la efectividad de lo propuesto.

## 1.1. ALCANCE

Se contempla el análisis de manera cualitativa y/o cuantitativa de tres sistemas de elevación de agua potable, para el problema planteado, los que se diferencian en la combinación de equipos empleados. Estos son:

1) Solución 1 : Sistema de elevación de agua potable empleando bombas con variador de frecuencia.
2) Solución 2 : Sistema de elevación de agua potable empleando bombas sin variador de frecuencia y un estanque hidroneumático.

[1] Indicada en NCh 691:2015, siendo 16 [L/s] por cada grifo en operación para una población menor a 6000 habitantes.

[2] Caudal máximo horario (Qmh): consumo máximo de agua potable durante una hora en el día de máximo consumo, sin considerar la demanda de incendio. Se define en la normativa NCh691.

3) Solución 3 : Sistema de elevación de agua potable empleando bombas con variador de frecuencia y un estanque hidroneumático.

Para la solución 1 y solución 3 se realiza un análisis cuantitativo, y para la solución 2 se realiza un análisis cualitativo. El análisis cuantitativo contempla la elaboración de un modelo computacional, tipo Epanet, que permite obtener como resultado los arranques por hora de las bombas a evaluar, ya sea operando la bomba en solitario (solución 1) u operando en conjunto a distintos volúmenes de estanques hidroneumáticos (solución 3), calculados según las fórmulas clásicas y propuestas. El análisis cualitativo contempla la comparación de las ventajas y desventajas de las tres soluciones.

La elección de los equipos de bombeo empleados en el modelo computacional, será con base en las condiciones técnicas del problema. Se trabaja en base a una misma población objetivo, con el fin de que sean comparables los resultados de las distintas soluciones.

Queda fuera del alcance de la presente memoria la evaluación de otros tipos de solución que permitan aumentar el tiempo entre dos arranques consecutivos de una misma bomba, como por ejemplo las bombas *jockey*, pequeñas sentinas de acumulación, etc.

## 1.2. ANTECEDENTES

La historia del abastecimiento de agua potable a pequeñas poblaciones en altura no se encontró documentada, no así para el abastecimiento de agua potable para edificios. El problema que es bastante similar en ambas situaciones, salvo algunos detalles. No obstante, la historia del abastecimiento de agua potable para edificios nos permite tener una idea de la evolución de la tecnología en los sistemas de impulsión de agua.

Hace unos cuarenta años atrás, algunas de las opciones disponibles en aquella época para el abastecimiento de agua potable en los edificios era [10]:

1) Si la presión en la red pública de agua potable era lo suficientemente alta, se alimentaba de manera directa la red húmeda del edificio. Hoy en día, aún existen algunos edificios que son alimentados de esta manera en Chile.
2) Una bomba de frecuencia fija impulsaba agua a un estanque de acumulación abierto a la atmósfera en la azotea o en el piso superior.
3) Una bomba de frecuencia fija impulsaba a un estanque de abastecimiento presurizado (sin membrana) o también llamado estanque hidroneumático con compresor de aire, en la azotea o en el subterráneo.

En estos tres casos, el propósito de la bomba es llenar el estanque y no presurizar la red de agua potable del edificio de manera directa.

Con el devenir del tiempo se propusieron diversos sistemas, enfocados en la alimentación de un edificio, que apuntaban a mantener una presión constante. Empleando por ejemplo válvulas reguladoras de presión operando contra bombas de frecuencia fija, apoyado de una pequeña bomba auxiliar (jockey pump) para suplir los bajos caudales de demanda. Sin embargo, el problema de la bomba *jockey* es que durante las noches, cuando el consumo es bajo, su operación sufre de constantes partidas y paradas. La incorporación de una membrana interior (bladder) en los estanques hidroneumáticos, como mejora tecnológica, permitió perfeccionar tanto su eficiencia energética como operacional [10], lo que hizo esta alternativa de solución nuevamente atractiva frente a las bombas *jockey*.

A principios de los años 90 comenzaron a llegar a Chile los variadores de velocidad para los motores de corriente alterna de manera masiva como solución, permitiendo que las bombas centrífugas, otrora de frecuencia fija, pudieran adaptarse a las variaciones de caudal en la demanda. Así se pudo aplicar esta nueva tecnología para solucionar el problema de abastecimiento de agua potable a pequeñas poblaciones en altura o edificios, prescindiendo de los grandes estanques de acumulación. Y aunque si bien la primera tecnología de los variadores de velocidad en motores de corriente alterna no era del todo eficiente[11] [12], la Ley de Política Energética de 1992 (Energy Policy Act of 1992) promulgada en EEUU puso su foco en la eficiencia energética[13]. Esto permitió una rápida adopción de nuevas tecnologías para los variadores de velocidad, con lo cual los variadores de tipo modulación por ancho de pulso (PWM en inglés) se masificaron, permitiendo un notable aumento en la eficiencia de estos sistemas y una reducción en sus costos.

Por su parte, los estanques hidroneumáticos no han sufrido mayores mejoras en su tecnología desde la inclusión de la membrana interior (bladder). No obstante, hace varios años ya, han sido encontrada nuevas aplicaciones para estos dispositivos, sobre todo para sistemas elevadores de presión en edificios del tipo *plug and play* o también conocidos como *skid*, los que cuentan con bombas con variador de frecuencia junto a un pequeño estanque hidroneumático que permite amortiguar los cambios de presión debido a fluctuaciones en la demanda, ahorro en el consumo eléctrico y a suplir los bajos caudales de demanda.

Surge la inquietud de poder aplicar una solución de tipo similar al abastecimiento de redes de agua potable pública (afecta a caudal de incendio) para pequeñas poblaciones en altura y así prescindir de un estanque de acumulación.

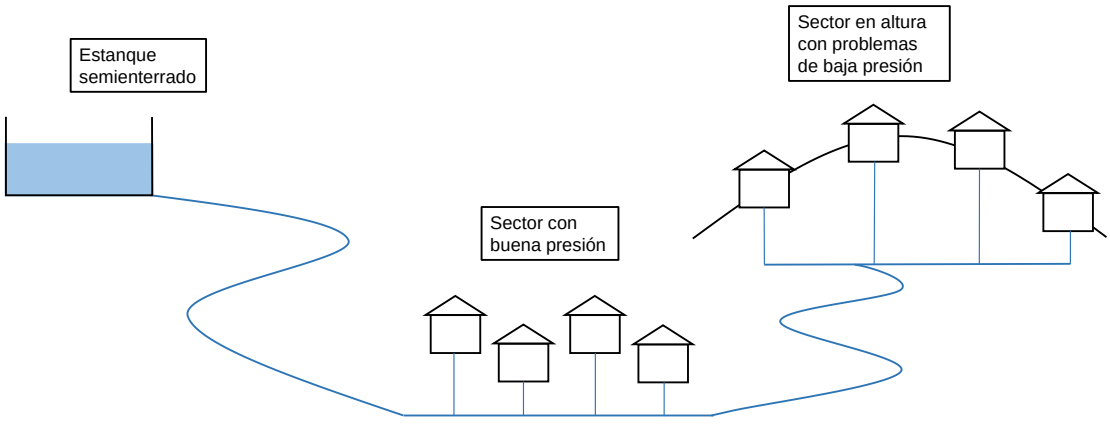
# 2. ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se explicará con mayor detalle la problemática planteada de manera acotada en la introducción, justificando la importancia de su estudio. Posteriormente se revisará de manera breve los requisitos actuales para las redes de agua potable urbana y rural. Sigue un resumen de las soluciones actuales de diseño para la elevación de agua potable para pequeñas poblaciones en altura, considerando los casos en que no es posible proyectar un estanque de acumulación. Finalmente se identifica lo que falta por hacer y en qué contribuirá el presente estudio.

## 2.1. EL PROBLEMA DE DEMANDA VARIABLE DE AGUA POTABLE PARA SECTORES EN ALTURA

Hoy en día las ciudades son abastecidas principalmente por múltiples estanques de acumulación que al ser ubicados de manera estratégica, permiten cumplir los requisitos de presión de la normativa chilena actual. Sin embargo, en ciertos sectores de alta cota topográfica la presión entregada por dichos estanques no cumple los requisitos mínimos exigidos por la norma. Esto puede conducir a un problema de baja presión que se genera cuando la presión está bajo el límite exigido por la norma vigente. En la Figura 2.1 se muestra de manera esquemática el problema descrito.

Figura 2.1 - Esquema del problema de baja presión para sectores en altura




Existen situaciones en las que la instalación de un estanque no es posible, algunas de las razones son:

- Económica: por normativa se requiere un volumen mínimo del estanque de 60 [$m^3$]. Por otro lado, las poblaciones poco numerosas requieren un volumen de regulación mucho menor al volumen mínimo descrito, haciendo inviable la justificación económica para la construcción del estanque.
- Técnica: en algunas ocasiones es imposible la construcción de un estanque. Esta situación se presenta, por ejemplo, en sectores insertos en la ciudad y donde no existen terrenos aledaños o cercanos que permitan la instalación de un estanque de agua potable.
- Estéticas: en algunos sectores debido al valor económico asociado a su plusvalía no es deseada la existencia de un estanque (sobre todo uno de tipo elevado), por lo que se requiere una solución que no quede a la vista (cámara subterránea).

Al no existir un estanque de acumulación que regule la demanda, la solución a plantear debe lidiar con la variabilidad en el caudal de demanda, es decir, debe ser capaz de aumentar la presión sobre el mínimo exigido en la normativa a la vez que es capaz de ajustarse a los cambios de la demanda del caudal. Esto deja como única alternativa de solución un sistema de presurización conectado de manera directa a la red de agua potable. Hoy en día estos sistemas se componen básicamente de bombas centrífugas y opcionalmente algún otro elemento de presurización (por ejemplo, un estanque hidroneumático).

La falta de capacidad de las bombas para mantener una presión constante a distintos caudales de impulsión se puede solucionar con la adición de un variador de frecuencia, lo que permite variar el caudal de impulsión de acuerdo al caudal de demanda de la población. Aun así existe un caudal mínimo al que la bomba puede operar, conocido como el caudal mínimo de impulsión de la bomba. Con base en la experiencia se ha evidenciado que en poblaciones de reducido tamaño en las que el caudal de consumo desciende a valores menores a este caudal mínimo de impulsión, se producen repetidas partidas y paradas de las bombas que podrían reducir la vida útil de los equipos.

Se requiere por tanto de una solución que sea capaz de: 1) aumentar el tiempo entre dos arranques consecutivos de una misma bomba, 2) suplir la demanda de la población y 3) cumplir el caudal y presión requerido por la normativa NCh691:2015. La adición de un estanque hidroneumático a las bombas con variador de frecuencia, puede solucionar el problema al cumplir estos tres objetivos. No es claro cómo se realiza el diseño de este sistema compuesto por bombas con variador de frecuencia junto a un estanque hidroneumático, ya que la literatura actual no lo hace en detalle [1] [5].

En resumen, el problema se acota a la alimentación de sectores en altura con problemas de baja presión, sin la posibilidad de la construcción de un estanque de acumulación a mayor cota, con poblaciones poco numerosas en las que el caudal mínimo de demanda puede llegar a ser menor que el caudal mínimo de impulsión de la bomba.

## 2.2. REQUISITOS DE CAUDAL Y PRESIÓN PARA UNA RED DE AGUA POTABLE EN CHILE

Es importante antes de describir las soluciones actuales al problema, realizar un breve repaso de los requisitos de caudal y presión mínimos exigidos en la norma chilena, ya que algunos puntos de operación en la redes de agua potable se fijan con base en dichas normas. Se hará a su vez una comparación con la norma norteamericana, con el fin de tener una noción del panorama internacional.

Se entenderá por sistema de agua potable para los alcances de esta memoria, a la red de agua potable ubicada aguas abajo del estanque de regulación o sistema de presurización. Los requisitos para el Agua Potable Urbana (AP) en Chile son regidos por la NCh691:2015, la cual regula el diseño de los sistemas de AP en su conducción, regulación y distribución, estableciendo procedimientos de tipo general para su cálculo.

Según el “Manual de Soluciones de Saneamiento Sanitario para Zonas Rurales” [14], no existe para el Agua Potable Rural (APR) una normativa y tampoco una institución del estado con competencia exclusiva en materia de servicios sanitarios en el sector rural. Debido a que las localidades rurales no fueron incluidas en la ley sanitaria que regula los servicios sanitarios urbanos, el sistema funciona por medio de comités y cooperativas, que son reguladas por el estado. Para solucionar parte de esta carencias, el año 2009 la División Regional de la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo, en el marco del Programa de Infraestructura Rural para el Desarrollo Territorial (PIRDT) dependiente de la División de Desarrollo Regional de la SUBDERE impulsó el desarrollo y publicación del estudio “Manual de Soluciones de Saneamiento Sanitario para Zonas Rurales” [14], el que tiene como objetivo principal normalizar las soluciones de carácter sanitario en asentamiento rurales (poblaciones con menos de 1000 habitantes).

En la siguiente tabla se indican los caudales y presiones de diseño en redes de agua potable urbana y rural para Chile y Estados Unidos.

*Tabla 2.1 - Caudales y presiones de diseño en agua potable urbana y rural*

| | País | Chile | | EEUU |
|---|---|---|---|---|
| | Clasificación de AP | Urbana | Rural | Urbana |
| | Normativa o Manual | NCh 691 Of2015 | Manual de Soluciones de Saneamiento Sanitario para Zonas Rurales(1) (2) | AWWA M-31 [15] y AWWA M-32 [16] |
| Caudales de diseño | Consumo | • Caudal medio diario de agua potable (Qmd).<br>• Caudal máximo diario (Qmáxd).<br>• Caudal máximo horario (Qmáxh). | • Caudal medio diario de agua potable (Qmd).<br>• Caudal máximo diario (Qmáxd).<br>• Caudal máximo horario (Qmáxh). | • Caudal medio diario de agua potable (Qmd).<br>• Caudal máximo diario (Qmáxd).<br>• Caudal máximo horario (Qmáxh). |
| | Incendio | • Caudal incendio (Qincen)= 16 [L/s] (en un grifo). | n/e(4) | • Caudal incendio (Qincen)= 32 [L/s] (en un grifo). |
| Presiones de diseño | Consumo | • Presión máxima= 70 [mca].<br>• Presión mínima= 15 [mca]. | • Presión máxima= 40 [mca].<br>• Presión mínima= 8 [mca] (3). | • Presión máxima= 63-77 a 70-91 [mca].<br>• Presión mínima= 25-35 [mca]. |
| | Incendio | • Presión mínima= 5 [mca]. | n/e(4) | • Presión mínima= 14 [mca]. |

n/e: no especificado.

Notas:

(1) El “Manual de Soluciones de Saneamiento Sanitario para Zonas Rurales” [14] no es una normativa ni una ley, son recomendaciones para la normalización de las alternativas técnicas de solución empleadas usualmente en las APR en Chile.

(2) El “Manual de Soluciones de Saneamiento Sanitario para Zonas Rurales” [14] adopta los mismos caudales definidos para el agua potable urbana, variando el factor del día de máximo consumo y el factor de la hora de máximo consumo.

(3) La presión mínima indicada por el “Manual de Soluciones de Saneamiento Sanitario para Zonas Rurales” [14] es insuficiente, debido a que hoy en día las viviendas rurales

conectan equipos domésticos tales como calefón, baño, entre otros, los que requieren de una mínima presión más elevada para su correcto funcionamiento. Se recomienda una presión mínima de 12 [mca].

(4) El “Manual de Soluciones de Saneamiento Sanitario para Zonas Rurales” [14] no entrega ninguna recomendación para los eventos de incendio. No obstante, el riesgo de incendio en una comunidad rural debe analizar caso a caso, de manera de adoptar soluciones técnico-económicas óptimas.

Para el caudal máximo horario, la presión mínima a cumplir en la red es de 15 [mca]. Así mismo, para el caudal coincidente, definido como el caudal máximo diario más el caudal de incendio, la presión mínima a cumplirá a la salida de un grifo es de 5 [mca].

Se define el concepto de mayor punto de operación, como el punto cuyos valores de caudal y presión sean dominantes en la selección de la curva de la bomba. Por consiguiente, bajo el supuesto que se diseña para un sector de reducida población, casi siempre el mayor punto de operación será determinado con el caudal coincidente y no con el caudal máximo horario. Por lo tanto, para este caso las bombas se encontrarán sobreestimadas para la mayor parte del tiempo de su operación.

## 2.3. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE DEMANDA VARIABLE EN ESTUDIO

En el presente punto se explicarán distintas alternativas de solución para el problema en estudio, comenzando por un resumen cualitativo de las problemáticas identificadas en el capítulo 2.1 y su solución. Posteriormente será explicada cada solución en mayor detalle junto a sus ventajas/desventajas, para finalmente escoger la mejor solución.

Los sistemas de presurización para agua potable se componen de algunos de los siguientes elementos [3]: bombas centrífugas, bombas centrífugas con sistema variador de frecuencia y estanques hidroneumáticos. Dependiendo de las particularidades del problema se pueden emplear algunos de estos elementos o una combinación de los mismos. Con el fin de evaluar y acotar los elementos necesarios para resolver lo planteado en el punto 2.1, en la siguiente tabla se listan los problemas identificados, su solución y una observación.

*Tabla 2.2 - Resumen de problemas y soluciones junto a observaciones*

| N° | Problema | Solución | Observación |
|---|---|---|---|
| 1 | Sector en altura con problemas de baja presión. | Estanque elevado o Sistema presurizado (bombas centrífugas). | - |
| 2 | Imposibilidad de utilizar un estanque elevado. | Sistema presurizado (bombas centrífugas). | Usualmente la instalación de un sistema presurizado se hace en cámara subterránea, por lo que la cantidad de equipos a instalar debe ser acotada por el costo económico asociado de la obra civil. |
| 3 | Suministro directo a la red de agua potable. | Bombas centrífugas+Sistema Variador de Frecuencia (VDF). | La variabilidad en el caudal de demanda (población) al que serán sometidas las bombas, obliga la instalación de un sistema variador de frecuencia, de manera que estas puedan adaptarse a los cambios en la demanda (caudal). |
| 4 | Número reducido de habitantes | Bombas centrífugas+Sistema Variador de Frecuencia (VDF)+Estanque Hidroneumático. | Al tener un reducido número de habitantes, el caudal de demanda de la población puede ser en algún instante menor al caudal mínimo que impulsa la bomba. Se ha observado que durante la noche este fenómeno se intensifica, por lo que se requiere de un elemento que permita aumentar el tiempo entre dos arranques consecutivos de una misma bomba. |

De esta manera las alternativas de solución existentes a evaluar son cuatro:

1) Bombas centrífugas con sistema variador de frecuencia.
2) Bombas centrífugas con estanque hidroneumático.
3) Bombas centrífugas con variador de frecuencia junto a una bomba pequeña de apoyo.
4) Bombas centrífugas con variador de frecuencia junto a un estanque hidroneumático.

### 2.3.1. Bombas centrífugas con sistema variador de frecuencia (VDF)

El problema descrito puede ser solucionado con un sistema de presurización compuesto de bombas centrífugas con variador de frecuencia. Hoy en día las bombas centrífugas son fabricadas en su mayoría con motores del tipo asincrónico, debido a su alta disponibilidad, alta confiabilidad, excelente rendimiento y fácil reparación [1]. Sin embargo, su versatilidad es baja debido a que la fuente de alimentación define el voltaje y frecuencia de la bomba, es decir, la curva de la bomba es única. Este problema se soluciona actualmente con la adición de un variador de velocidad a la bomba, que en el caso de los motores de corriente alterna (CA)

corresponde a un variador de frecuencia, que permite variar la curva de la bomba por medio de la *Ley de Afinidad* o *Leyes de Semejanza* [3]. Para el caso en que el diámetro del impulsor (D) es constante, las ecuaciones son:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \; ; \; \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \; ; \; \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \tag{2.1}$$

Donde las variables son:

- $Q_x$ Caudal que la bomba impulsa en el punto “x”.
- $N_x$ Velocidad del eje en el punto “x”.
- $H_x$ Presión de la bomba en el punto “x”.
- $P_x$ Potencia absorbida por el motor de la bomba en el punto “x”.
- $D_x$ Diámetro del impulsor en el punto “x”.

Esto permite que la bomba sea capaz de entregar distintos caudales manteniendo una presión constante o un caudal constante para distintas presiones, según lo requiera el sistema. No obstante, se ha detectado que en sectores alimentados donde la población es baja y el caudal mínimo de demanda es menor al caudal mínimo de impulsión de la bomba, se producen durante la noche constantes partidas y paradas de las bombas. Produciendo un deterioro prematuro en los equipos de bombeo, que según indicación de personal de mantención de Grundfos (comunicación personal), puede reducir la vida útil desde 10 años a 2 años o 6 meses inclusive. Por cuanto esta solución, adolece de ciertas fallas y se hace necesario buscar otra alternativa o adicionar algún elemento que permita aumentar el tiempo entre dos arranques sucesivos de una misma bomba.

### 2.3.2. Bombas centrífugas con estanque hidroneumático.

El diseño de sistemas de presurización empleando estanques hidroneumáticos junto a bombas centrífugas para sistemas residenciales de agua potable (edificios, condominios, etc.) es de común práctica [17]. No obstante, el problema de esta solución aplicada en redes de agua potable urbana radica en que las bombas se deben diseñar como mínimo para el punto de operación obtenido con el caudal de incendio (16 [L/s]), en consecuencia, el volumen del estanque hidroneumático será de un tamaño tal que hará poco atractiva esta solución desde un punto de vista económico.

### 2.3.3. Bombas centrífugas con variador de frecuencia junto a una bomba pequeña de apoyo

El problema puede ser solucionado con bombas centrífugas con variador de frecuencia junto a una bomba pequeña, diseñada para los bajos caudales de demanda de la población y que permite espaciar las partidas por hora de las bombas. Esta solución presenta algunas desventajas las cuales son:

- La bomba pequeña operará gran parte del tiempo. Esto tiene por consecuencia que las bombas más grandes (diseñadas para el evento de incendio) operen rara vez.
- La bomba pequeña debe ser instalada como mínimo en un sistema 1+1, de manera de asegurar una robustez mínima del sistema de bombeo. Esto naturalmente encarece los costos.

Queda fuera del alcance de este documento un estudio más acabado de esta solución.

### 2.3.4. Bombas centrífugas con variador de frecuencia junto a un estanque hidroneumático

Se emplean bombas centrífugas con variador de frecuencia junto a un estanque hidroneumático, diseñado para los bajos caudales de demanda de la población y que permita espaciar el tiempo entre dos arranques consecutivos de una misma bomba. Las ventajas de esta solución es que todas las bombas tendrán una operación constante y el estanque hidroneumático permitirá presurizar la red para bajos caudales.

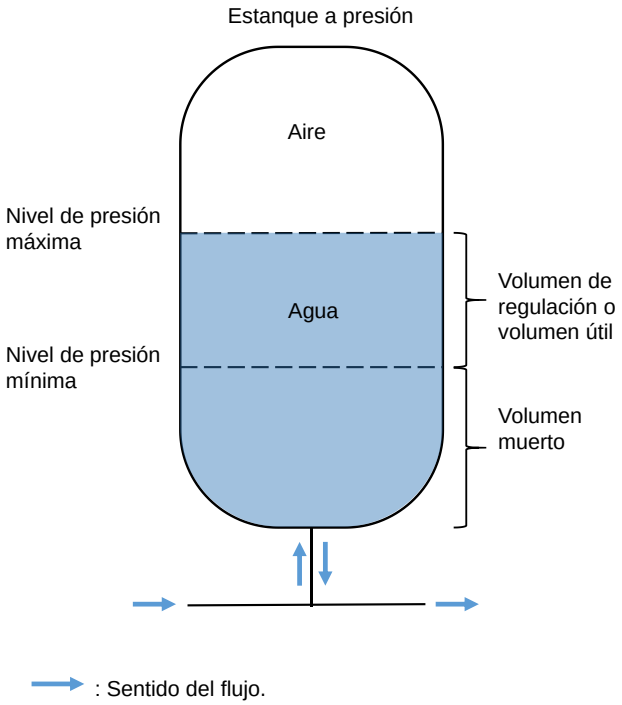
A diferencia de las alternativas de solución descritas en los puntos anteriores, esta solución resuelve los problemas planteados en los puntos 2.1, 2.2 y la Tabla 2.2. Se escoge este sistema como solución para impulsar el agua potable de manera directa a la red.

## 2.4. CÁLCULO DEL VOLUMEN DE UN ESTANQUE HIDRONEUMÁTICO

### 2.4.1. Filosofía de operación de un estanque hidroneumático

Un estanque hidroneumático es un recipiente sellado que contiene en su interior agua y aire, que en algunos casos se encuentran separados por una membrana de caucho. Esto permite almacenar un cierto volumen de agua presurizado, aprovechando la compresibilidad del aire. En el siguiente esquema se muestra la composición básica de un estanque hidroneumático.

Figura 2.2 - Esquema básico de un estanque hidroneumático




El estanque hidroneumático funciona en conjunto con una bomba (sin variador de frecuencia) que se encuentra conectada en línea o paralelo con el estanque. La operación resumida de ambos equipos es la siguiente:

(1) Cuando se detecta una baja presión en la red de agua potable entra en funcionamiento la bomba. Esta alimenta tanto a la población como al estanque hidroneumático.

(2) El caudal entregado por la bomba ($Q_b$) servirá tanto para satisfacer el caudal de demanda ($Q_d$) como para llenar el estanque hidroneumático.

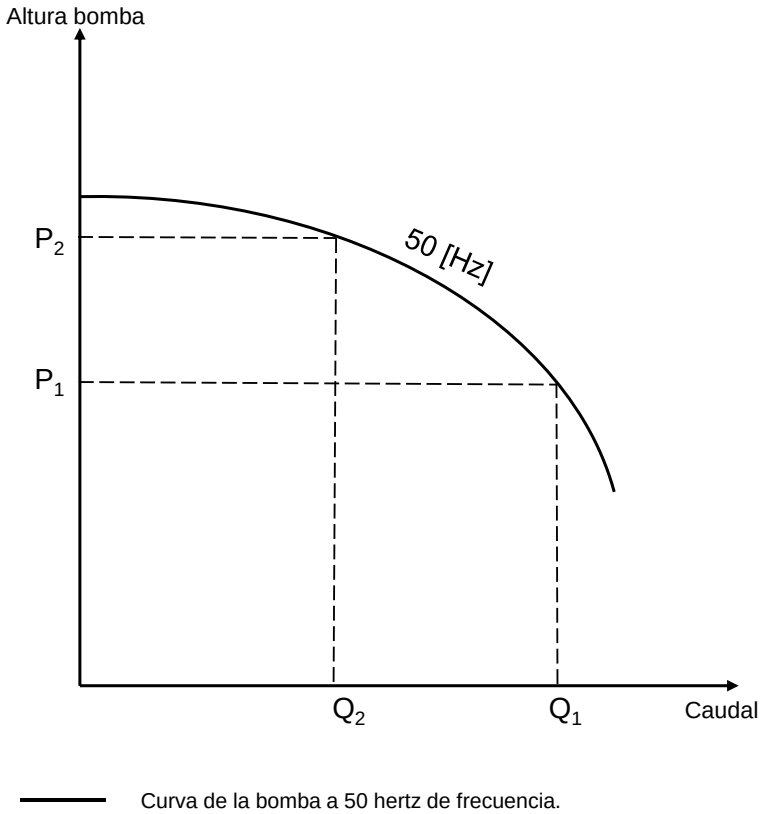
(3) En caso de que el caudal entregado por la bomba fuese superior al caudal de demanda ($Q_b > Q_d$), la presión en la red comenzará a aumentar de manera paulatina mientras se llena y presuriza el estanque hidroneumático. Una vez lleno, el alza de presión en la red será súbita, superando la presión máxima en el estanque hidroneumático y se da la orden para que la bomba se detenga.

(4) Detenida la bomba, la demanda de la población continuará y será el estanque hidroneumático el que alimentará la red. El tiempo que dure esto dependerá del volumen útil del estanque hidroneumático. Una vez que la presión en el estanque hidroneumático descienda bajo la presión mínima, se da la orden de encendido de la bomba y el proceso se vuelve a repetir.

### 2.4.2. Formulación clásica

Se denomina a las formulas existentes como “formulación clásica”. Estas fueron deducidas para el caso en que el estanque hidroneumático opera junto a una bomba sin variador de frecuencia [8], es decir, con una única curva de bomba. Se define en este caso una ventana de operación del estanque hidroneumático, que oscilará entre una presión máxima de parada de la bomba ($P_1$) y una presión mínima de partida de la bomba ($P_2$), las que estarán asociadas a un caudal máximo ($Q_2$) y un caudal mínimo ($Q_1$), lo que se indica de manera esquemática en la Figura 2.3.

Figura 2.3 - Presión máxima y mínima de un estanque hidroneumático asociado a la curva de una bomba centrífuga




Las ecuaciones que permiten calcular el volumen útil y el volumen total de un estanque hidroneumático son las siguientes [8] [1] [3] [9]:

$$Q_m = \frac{Q_1 + Q_2}{2} \tag{2.2}$$

$$V_u = \frac{T_p * Q_m}{4} \tag{2.3}$$

$$V_T = V_u * \frac{(P_2)}{(P_2 - P_1)} \quad (2.4)$$

$$T_p = \frac{1}{N * N_b} \quad (2.5)$$

Donde las variables son:

- $Q_m$ Valor promedio de caudal entregado por la bomba.
- $Q_1$ Caudal entregado por la bomba a la presión $P_1$.
- $Q_2$ Caudal entregado por la bomba a la presión $P_2$.
- $P_2$ Presión absoluta de desconexión o parada de la bomba (presión máxima).
- $P_1$ Presión absoluta de conexión o partida de la bomba (presión mínima).
- $V_u$ Volumen útil o de regulación de agua utilizado por el estanque hidroneumático.
- $V_T$ Volumen total del estanque hidroneumático (suma del volumen de aire+agua).
- $T_p$ Tiempo mínimo entre partidas del sistema.
- $N$ Máxima cantidad de partidas permitida por la bomba.
- $N_b$ Número de bombas instaladas.

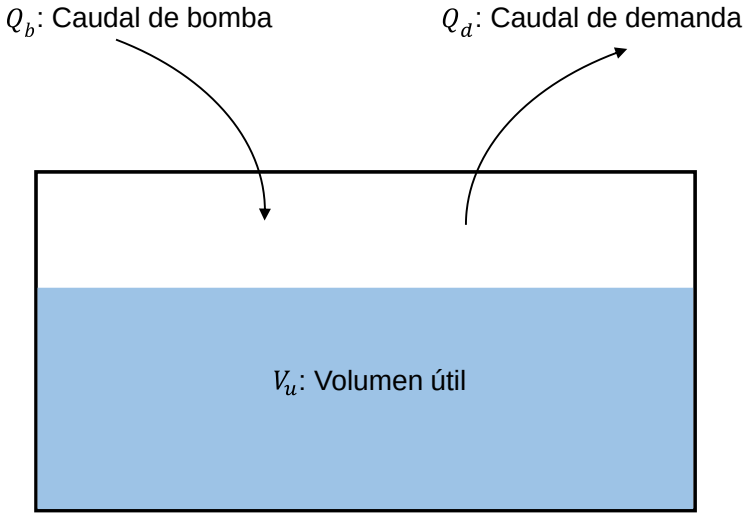
La ecuación (2.2) corresponde al caudal promedio que entrega la bomba asociada a la ventana de operación en el estanque hidroneumático. A su vez, la ecuación (2.5) indica el tiempo mínimo entre partidas del sistema. La ecuación (2.4) se obtiene realizando un análisis sobre un estanque hidroneumático utilizando el volumen total y la ley de gas ideal asumiendo un proceso isotérmico, que se presenta en detalle en el anexo A1. La ecuación (2.3) es citada en catálogos de fabricantes de estanques hidroneumáticos como Vogt [6], Grundfos [7], memorias de título [18], etc. Sin embargo, en ninguno de ellos es citada alguna referencia o se explica el origen de dicha fórmula con excepción de los apuntes del curso Ingeniería Hidráulica del profesor Ludwig Stöwhas [9].

### 2.4.3. Deducción del volumen útil del estanque hidroneumático

Con base en los apuntes del profesor Stöwhas [9], se presenta la deducción del volumen útil de un estanque hidroneumático indicada en la ecuación (2.3).

Si se imagina un volumen dado que se denominará volumen útil ($V_u$), en el que ingresa un caudal impulsado la bomba ($Q_b$) y es extraído un caudal a causa de la demanda de la población ($Q_d$), lo que se representa en el esquema de la Figura 2.4.

Figura 2.4 - Esquema de interacción del volumen útil del estanque hidroneumático




El tiempo mínimo entre partidas del sistema de la bomba depende tanto del ingreso como del egreso de caudal, que puede ser simultáneo. Por lo cual el tiempo mínimo entre partidas del sistema ($T_p$) se puede cuantificar como el tiempo en que se demora la bomba en llenar el volumen útil ($T_{LL}$), más el tiempo que demora la demanda en vaciarlo ($T_{va}$), es decir:

$$T_p = T_{va} + T_{LL} \tag{2.6}$$

Donde las variables son:

$T_p$ Tiempo mínimo entre partidas del sistema.

$T_{va}$ Tiempo de vaciado.

$T_{LL}$ Tiempo de llenado.

Utilizando el volumen útil y los caudales representados en la Figura 2.4, la ecuación (2.6) se puede reescribir como:

$$T_p = \frac{V_u}{Q_d} + \frac{V_u}{Q_b - Q_d} \tag{2.7}$$

Donde las variables son:

$Q_d$ Caudal de demanda (egreso del volumen útil).

$Q_b$ Caudal de la bomba (ingreso al volumen de útil).

Es de interés saber para qué situación ocurrirá el mínimo valor del tiempo mínimo entre partidas del sistema ($T_p$), ya que mientras más pequeño sea este valor, mayor será el número de arranques por hora que experimentará la bomba. Para encontrar cuando se minimiza este valor, se deriva la ecuación de manera parcial respecto al caudal de demanda y se iguala a cero. La razón de por qué se asume el caudal de la bomba constante es desconocida, se cree que dicha suposición se puede atribuir a que la variación del caudal de la bomba es acotada al rango $Q_1$ y $Q_2$, y a que se emplea el caudal promedio de la bomba para el cálculo del volumen del estanque hidroneumático, lo que es equivalente a una constante.

$$\frac{\partial}{\partial Q_d}(T_p) = \frac{\partial}{\partial Q_d}\left(\frac{V_u}{Q_d} + \frac{V_u}{Q_b - Q_d}\right) = 0 \tag{2.8}$$

Resolviendo la ecuación (2.8) se llega a la siguiente condición para que ocurra un mínimo valor del tiempo mínimo entre partidas del sistema ($T_p$).

$$Q_b = 2 * Q_d \tag{2.9}$$

Esto significa que el mínimo valor de tiempo mínimo entre partidas del sistema ocurre cuando el caudal de bombeo es el doble del caudal de demanda. Si se reemplaza la ecuación (2.9) en la ecuación (2.7) se llega a la fórmula:

$$T_p = \frac{V_u}{\left(\frac{Q_b}{2}\right)} + \frac{V_u}{Q_b - \frac{Q_b}{2}}$$

$$T_p = 4 * \frac{V_u}{Q_b}$$

$$V_u = \frac{T_p * Q_b}{4}$$

Resultado que corresponde a la ecuación (2.3).

### 2.4.4. Comentarios del volumen útil del estanque hidroneumático según la formulación clásica

El cálculo del volumen útil del estanque hidroneumático está planteado con una o más bombas sin variador de frecuencia, es decir, al ser única la curva de la bomba, el rango de caudales que entrega está relacionado a la ventana de presiones seleccionada y es acotado. A diferencia del caso cuando el estanque hidroneumático opera con una o más bombas con

variador de frecuencia, la curva de la bomba no es única y en consecuencia existe duda sobre con cual caudal se debe diseñar el estanque hidroneumático. Cómo se indicó anteriormente, la literatura actual no es específica en el procedimiento de diseño para este último caso, limitándose a indicar que es poco común [3]. Se hace necesario por tanto, plantear de manera clara un procedimiento de diseño de estos sistemas.

La ecuación (2.8) hace una derivación parcial respecto al caudal de demanda, lo que asume de manera implícita un caudal constante de la bomba. Como se mencionó en el punto 2.4.3, se cree que dicha suposición se puede atribuir a que la variación del caudal de la bomba es acotada al rango $Q_1$ y $Q_2$, y a que se emplea el caudal promedio de la bomba para el cálculo del volumen del estanque hidroneumático. Para el caso del estanque hidroneumático junto a una bomba con variador de frecuencia, la suposición que el caudal de la bomba sea constante no es cierta, ya que el caudal de la bomba puede variar en un amplio rango gracias al variador de frecuencia. En cambio, bajo la metodología propuesta más adelante, el caudal de demanda que deberá alimentar el estanque hidroneumático se encuentra acotado inferiormente por un caudal nulo y superiormente por el caudal mínimo de impulsión de la bomba, siendo este rango de variación mucho menor al del caudal de la bomba y por lo cual se podría asumir que el caudal de demanda es constante.

Durante el desarrollo de los modelos hidráulicos computacionales, se detectó que el cálculo del volumen de los estanques hidroneumáticos por medio de la formulación clásica tiende a valores mayores que los calculados por la formulación propuesta bajo ciertas condiciones, ya que en otros casos ocurrió la situación contraria. Posteriormente los resultados de los modelos hidráulicos computacionales verificaron que para ninguno de los volúmenes calculados con ambas formulaciones, se superaran la cantidad máxima de arranques por hora en las bombas recomendada por los fabricantes. Esto tiene asociado un aumento innecesario en el costo económico de esta solución que se puede aminorar, por lo cual es pertinente proponer una mejor al cálculo que asegure un tiempo mínimo entre partidas del sistema de la bomba mínimo asociado a la recomendación del fabricante y asegure a la vez una reducción en el volumen del estanque hidroneumático.

# 3. OBJETIVOS

## 3.1. GENERAL

- Entregar recomendaciones de diseño para la alimentación de sectores en altura con problemas de baja presión, sin la posibilidad de la construcción de un estanque de acumulación a mayor cota, para el caso de poblaciones poco numerosas en las que el caudal mínimo de demanda puede llegar a ser menor que el caudal mínimo de impulsión de la bomba, empleando un sistema mixto de bombeo compuesto por bombas con variador de frecuencia operando en conjunto con un estanque hidroneumático.

## 3.2. ESPECÍFICO

- Entregar recomendaciones de diseño para sistemas de presurización compuestos por bombas centrífugas con variador de frecuencia junto a un estanque hidroneumático.
- Proponer una mejora a la formulación clásica para el cálculo del volumen útil del estanque hidroneumático, que reduzca el sobredimensionamiento. Esto se denominara formulación propuesta.
- Cuantificar y comparar las partidas generadas en las bombas al emplear sistemas de elevación de agua potable con y sin estanque hidroneumático, por medio de un modelo computacional.
- Verificar que las partidas generadas en las bombas no superan la cantidad de arranques máximos por hora recomendados por los fabricantes.
- Evaluar las mejoras propuestas a la formulación clásica, a través de la comparación del volumen del estanque hidroneumático calculado con la formulación propuesta y los arranques que se generan en las bombas asociado a dichos volúmenes.

# 4. METODOLOGÍA

## 4.1. RECOMENDACIONES DE DISEÑO PARA UN SISTEMA DE BOMBEO CON VARIADOR DE FRECUENCIA JUNTO A UN ESTANQUE HIDRONEUMÁTICO

El diseño de un sistema de bomba con variador de frecuencia se hará con base en la metodología explicada en el ejemplo 18-5 *Small Distribution System Booster without Reservor* del libro "Pumping Station Design (3th) 2008" [3] y las modificaciones que apliquen según lo recomendado en el siguiente capítulo. Algunas recomendaciones adicionales son indicadas en el Anexo 2.

### 4.1.1. Puntos de funcionamiento del sistema y restricciones

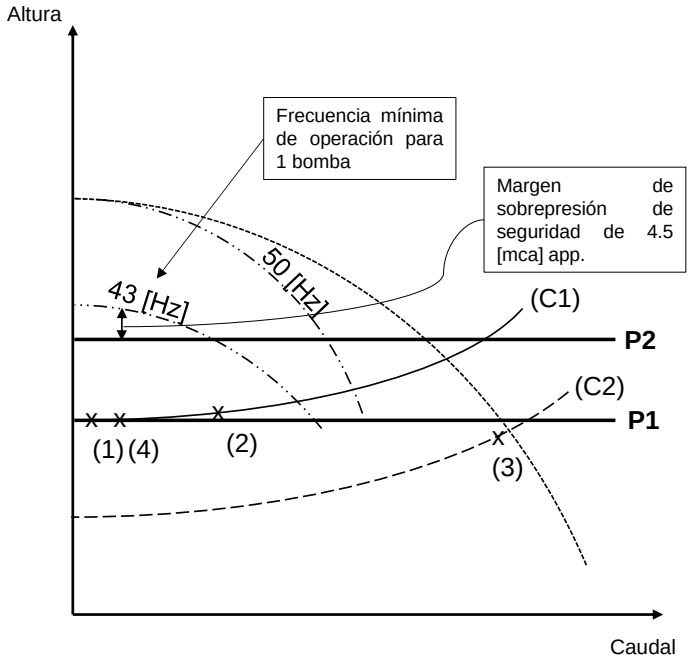
Los puntos de funcionamiento a calcular son cuatro y se definen como:

1) Caudal mínimo (Qmín): se calcula el primer punto de funcionamiento del sistema con el caudal mínimo de consumo de la población y la presión dinámica requerida para el arranque más desfavorable en la red, tal que se obtenga una presión residual mínima de 15 [mca]. Este punto de funcionamiento puede ser proveído por la empresa sanitaria en algunas ocasiones.
2) Caudal máximo horario (Qmáxh): se forma el segundo punto de funcionamiento del sistema con el caudal máximo horario de la población y la presión dinámica requerida para el arranque más desfavorable en la red, tal que se obtenga una presión residual mínima de 15 [mca]. Este punto de funcionamiento puede ser proveído por la empresa sanitaria en algunas ocasiones.
3) Caudal coincidente (Qinc): se forma el tercer punto de funcionamiento del sistema con el caudal de incendio[3] más el caudal máximo diario (Qmáxd) y la presión dinámica requerida para el grifo más desfavorable en la red, tal que se obtenga una presión residual mínima de 5 [mca]. Este punto de funcionamiento puede ser proveído por la empresa sanitaria en algunas ocasiones.
4) Caudal mínimo de bomba (Qmínb): se forma el cuarto punto de funcionamiento del sistema con el caudal mínimo que puede entregar la bomba y la presión dinámica requerida para el arranque más desfavorable en la red, tal que se obtenga una presión residual mínima de 15 [mca]. Este punto de funcionamiento no es proveído por la

[3] El caudal de un grifo son 16 L/s y el número de grifos en operación simultánea sea determina según la tabla 1 de la NCh691:2015).

empresa sanitaria y debe ser obtenido desde el catálogo técnico proveído por el fabricante de la bomba.

Los límites de presión máxima y mínima son los estipulados en la NCh691:2015, según se indicó en el punto 2.2.4.1 del tipo 2+1 junto a un




C1: Curva característica del sistema para alcanzar una presión mínima residual en la red de 15 [mca].

C2: Curva característica del sistema para alcanzar una presión mínima residual en la red de 5 [mca].

Curva para una bomba en operación a la frecuencia indicada.

Curva para dos bombas en operación a 50 [Hz].

P2: máxima presión del estanque hidroneumático.

P1: mínima presión del estanque hidroneumático.

### 4.1.2. Consideraciones de diseño para las bombas con variador de frecuencia

Según información provista por personal operativo de Esval (comunicación personal) se ha comentado que las bombas más utilizadas por ellos y sus razones de dicha elección son las siguientes:

- Bombas de pozo profundo: son utilizadas en este tipo de instalaciones debido a su robustez (baja mantención), poco ruido generado (se instalan en pozos herméticos) y alta seguridad (al ser instaladas en pozos herméticos el riesgo de robo es menor).

- Bombas en línea de tipo vertical: son utilizadas en este tipo de instalaciones debido a su fácil mantención (motor se ubica en la superficie), su robustez y altas prestaciones (soportan una mayor cantidad de arranques por hora).

Para los alcances de esta memoria se han revisado estos dos tipos de bombas. Las curvas de las bombas seleccionadas deben ser comparadas con lo puntos de funcionamiento junto a las curvas características del sistema cuando existan. Una vez definido el punto de funcionamiento con el que se seleccionará la bomba, este punto se debe sobredimensionar entre un 5% a un 10% para asegurar una sobrecapacidad de la bomba y mantener un margen de seguridad respecto al peor escenario de funcionamiento [3].

#### *4.1.2.1. Caudal y frecuencia mínima nominal de la bomba*

Se define el *caudal mínimo nominal de la bomba* como el mínimo caudal que es capaz de impulsar la bomba operando a la frecuencia nominal de 50 [Hz]. Este valor depende de la capacidad de refrigeración del motor de la bomba y generalmente es informado por los fabricantes de las bombas. Si no se cuenta con dicha información, el Hydraulic Institute (HI) y los fabricantes de bombas típicamente recomiendan un caudal mínimo de un 20% del óptimo punto de funcionamiento (best efficiency point o BEP) [19].

La frecuencia mecánica mínima de operación de la bomba es usualmente recomendada por el fabricante, sin embargo, en los casos que no se indique se recomienda una frecuencia mínima de 30 [Hz] para evitar problemas de refrigeración del motor, fuerzas radiales desbalanceadas en la voluta y minimizar la cavitación [3].

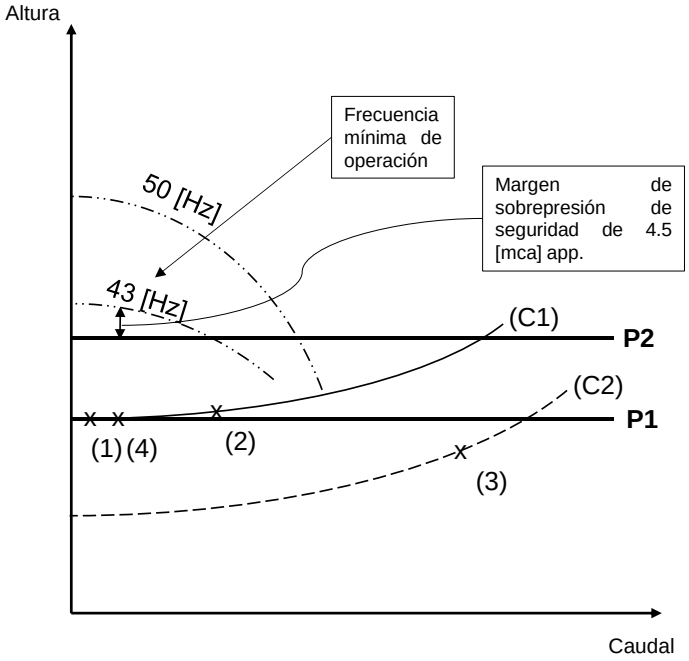
#### *4.1.2.2. Caudal y frecuencia mínima de funcionamiento de la bomba en operación junto a un estanque hidroneumático*

Se define la *frecuencia mínima de operación* como la frecuencia de la bomba que permite entregar una presión mínima superior a la del punto de operación para el caudal mínimo ($Q_{mín}$) y el caudal mínimo de la bomba ($Q_{mínb}$), para el caso en que la bomba opera si un estanque hidroneumático. En el caso contrario, la frecuencia mínima de operación debe ser tal que permita a la bomba presurizar el estanque hidroneumático, tal como se indica en la Figura 4.2. Además se define el *caudal mínimo de la bomba* ($Q_{mínb}$) como el menor caudal que puede impulsar la bomba a la frecuencia mínima de operación.

La presión a la que deberá impulsar la bomba corresponde a la presión dinámica requerida para el arranque más desfavorable en la red tal que se obtenga una presión de 15 [mca] para el caudal mínimo de la bomba, más la ventana del presión del estanque hidroneumático para

permitir su presurización. Con base en la experiencia se recomienda agregar un margen de seguridad de 4.5 [mca] sobre la presión de presurización, para absorber el error de medición o descalibración del manómetro y evitar que la bomba recircule agua en su interior, lo que puede generar grandes esfuerzos en la voluta y disminuyendo su vida útil [3]. Esto se describe de manera cualitativa en la Figura 4.2.

Figura 4.2 – Ejemplo de frecuencia mínima de funcionamiento de la bomba para un sistema de bombeo con estanque hidroneumático




C1: Curva característica del sistema para alcanzar una presión de 15 [mca].

C2: Curva característica del sistema para alcanzar una presión de 5 [mca].

Curva para única bomba en operación.

P2: máxima presión del estanque hidroneumático.

P1: mínima presión del estanque hidroneumático.

Nota: los puntos indicados en la Figura 4.2 son referidos a los descritos en el capítulo 4.1.1.

### *4.1.2.3. Máximas partidas por hora*

Las máximas partidas por hora permitidas para las bombas depende de la inercia del motor, parámetros que tienen una relación inversamente proporcional, es decir, a una mayor inercia (bombas más grandes) menor es la cantidad máxima de partidas por hora permitida [2]. La NEMA (National Electrical Manufacturers Association) en su publicación estándar MG 10 entrega una tabla con las máximas partidas por hora permitidas de acuerdo a la potencia del motor en HP (Horse Power), sin embargo, se sugiere utilizar las recomendaciones del fabricante de la bomba cuando estas existan. En la Tabla 4.1 se detallan las partidas por hora máximas indicadas por el fabricante para las tres bombas incluidas en los modelos hidráulicos computacionales en la presente memoria, bombas de pozo profundo y bombas de tipo vertical.

*Tabla 4.1 - Partidas por hora para bombas tipo pozo profundo y tipo en línea vertical (marcas KSB y Grundfos)*

| **Marca** | **Tipo de bomba** | **Modelo** | **Partidas/Hora*** | | **Partidas/Día*** | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | **Máx** | **Mín** | **Máx** | **Mín** |
| KSB | Pozo profundo | UPA | 20 | 5 | n/e | n/e |
| Grundfos | Bombas en línea tipo vertical | CR/CRN/CRT/ CRE/CRNE | 250 | 50 | n/e | n/e |
| Grundfos | Pozo profundo | SP | 100 | 2 | 300 | 15 |

n/e: no especifica

Una mayor cantidad de partidas por hora equivale a un menor tiempo de funcionamiento del estanque hidroneumático, en consecuencia, un menor volumen total.

### 4.1.3. Ventana de presión para estanque hidroneumático

La ventana de presión hace referencia a la diferencia entre la presión máxima ($P_2$) y mínima ($P_1$) que entrega el estanque hidroneumático. Se recomienda en la literatura una ventana de presión que varía desde 13 [mca] hasta 21 [mca] [3]. Sin embargo, con base en la experiencia del profesor guía y la experiencia nacional de diseño se emplea una ventana de 10 [mca], argumentándose que con dicho diferencial de presión el consumidor final no es capaz de percibir el cambio en la presión de la red, aumentando de esta manera su conforte. Existen casos en los que no se podrá mantener una ventana de 10 [mca] y esta deberá ser menor, se recomienda mantener el mayor valor posible, ya que cualquier disminución en su valor implica

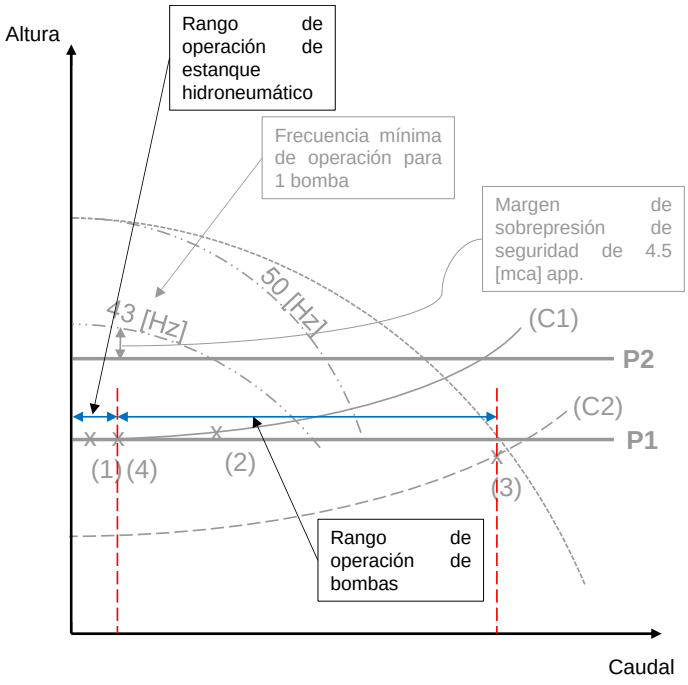
un aumento en el factor que multiplica el volumen útil para la estimación del volumen total del estanque hidroneumático (ver ecuación (2.4)).

### 4.1.4. Formulación propuesta para el cálculo del volumen del estanque hidroneumático

#### *4.1.4.1. Estudio de la ecuación del tiempo mínimo entre partidas del sistema ($T_p$)*

Se detectó durante la elaboración del presente estudio, que la formulación clásica tiende a sobreestimar el volumen para el estanque hidroneumático bajo ciertas condiciones no del todo claras. De acuerdo a lo mencionado en el punto 2.4.4, se cuestiona la validez de los supuestos para deducir la ecuación (2.3) que calcula el volumen útil del estanque hidroneumático, ya que la ecuación (2.8) hace una derivación parcial respecto al caudal de demanda, asumiendo de manera implícita un caudal constante en la bomba, suposición que tiene asidero cuando la bomba opera sin un variador de frecuencia. En el caso en estudio, la bomba opera con un variador de frecuencia, y la detención de la misma estaría comandada por la presión máxima admisible en la red de agua potable y cuando la demanda de la población sea menor al caudal mínimo de la bomba. Bajo estas condiciones, el rango de caudal de demanda en que opera el estanque hidroneumático está acotado inferiormente por un caudal nulo y superiormente por el valor inmediatamente menor al caudal mínimo de la bomba, lo que se indica como “Rango de operación de estanque hidroneumático” en la Figura 4.3; en cambio, el caudal que entrega la bomba al estanque hidroneumático no tiene ninguna restricción, por lo que su rango de variación es amplio y sólo está limitado por el caudal máximo de la bomba, lo que se indica como “Rango de operación de bombas” en la Figura 4.3. Por ende, al ser el rango de operación del caudal del estanque hidroneumático mucho menor al rango de operación de la bomba, es razonable asumir que el caudal de demanda al que estará sometido el estanque hidroneumático es similar a una constante.

Figura 4.3 – Rango de operación de caudales del tipo 2+1 junto a un




C1: Curva característica del sistema para alcanzar una presión mínima residual en la red de 15 [mca].

C2: Curva característica del sistema para alcanzar una presión mínima residual en la red de 5 [mca].

Curva para una bomba en operación a la frecuencia indicada.

Curva para dos bombas en operación a 50 [Hz].

P2: máxima presión del estanque hidroneumático.

P1: mínima presión del estanque hidroneumático.

Cuando el estanque hidroneumático está en operación, se plantea que el tiempo de vaciado ($T_{va}$) será mucho mayor que el tiempo de llenado ($T_{LL}$), debido al gran caudal que puede impulsar la bomba.

$$T_p = T_{va} + \underbrace{T_{LL}}_{\approx 0}\Big|_{T_{va} \gg T_{LL}} \tag{4.1}$$

A diferencia del caso indicado en la ecuación (2.8) en que existe un punto de equilibrio, para el caso en que el caudal de demanda es constante, la ecuación (2.7) tiende a una asíntota cuando el caudal de la bomba se hace infinito, lo que es equivalente a decir, que cuando el caudal de la bomba sea mucho mayor que el caudal de demanda el aporte del término de la derecha en la ecuación (2.7) es prácticamente nulo.

$$T_p = \frac{V_u}{Q_d} + \underbrace{\frac{V_u}{Q_b - Q_d}}_{\approx 0}\Bigg|_{Q_b \gg Q_d} \tag{4.2}$$

Se propone calcular el tiempo mínimo entre partidas del sistema ($T_p$) como el volumen útil ($V_u$) divido por el caudal de demanda ($Q_d$), modificando de esta manera la ecuación (2.3) planteada en la formulación clásica.

$$T_p \approx \frac{V_u}{Q_d} \tag{4.3}$$

De la ecuación (4.3), sólo es conocido el tiempo mínimo entre partidas del sistema ($T_p$) ya que es un dato que se puede calcular a partir de la cantidad de arranques por hora máximos indicados por el fabricante de la bomba y la cantidad de equipos a instalar. Para el caudal de demanda ($Q_d$) del estanque hidroneumático, se asume la peor condición dentro de su rango de operación, que corresponde al caudal mínimo de la bomba, es decir, se asume que desde el estanque hidroneumático se extrae el mayor caudal posible antes que comience a operar la bomba con variador de frecuencia, por lo cual se asume que el caudal de demanda es igual al caudal mínimo de la bomba para efectos de cálculo del volumen del estanque hidroneumático.

$$0 < Q_d < Q_{minb}$$

$$\therefore Q_d = Q_{minb} \tag{4.4}$$

Se recomienda despreciar el aporte del tiempo de llenado cuando el cociente $Q_b/Q_d$ sea menor o igual a 0.05. Solamente para efectos de evaluación de dicho cociente, se considera emplear como caudal de demanda ($Q_d$) el caudal mínimo de la bomba, según lo explicado en el párrafo anterior; y para el caudal de bombeo ($Q_b$) se considera aplicar el mismo criterio que para el caudal de demanda, es decir, se emplea el máximo valor dentro del rango de caudal de la bomba (ver Figura 4.3) que corresponde al caudal coincidente ($Q_{coinc}$). Esto permite evaluar la magnitud entre el valor máximo y mínimo que pueden impulsar las bombas.

#### *4.1.4.2. Ecuaciones propuestas para el cálculo del volumen del estanque hidroneumático*

Con base en lo expuesto, las ecuaciones propuestas para el diseño del estanque hidroneumático se resumen a continuación:

$$V_u = T_p * Q_{minb} \tag{4.5}$$

$$V_T = V_u * \frac{(P_2)}{(P_2 - P_1)} \quad (2.4)$$

$$T_p = \frac{1}{N * N_b} \quad (2.5)$$

Donde las variables son:

$Q_{mínb}$ Caudal mínimo entregado por la bomba.

$P_2$ Presión absoluta de desconexión o parada de la bomba (presión máxima).

$P_1$ Presión absoluta de conexión o partida de la bomba (presión mínima).

$V_u$ Volumen útil o de regulación de agua utilizado por el estanque hidroneumático.

$V_T$ Volumen total del estanque hidroneumático (suma del volumen de aire+agua).

$T_p$ Tiempo mínimo entre partidas del sistema.

$N$ Máxima cantidad de partidas por hora permitida por la bomba.

$N_b$ Número de bombas instaladas.

## 4.2. DISEÑO DE MODELOS HIDRÁULICOS COMPUTACIONALES

Se realizó una simulación tipo EPS (Extended-Period Simulation)[16] de 24 horas de duración, para diversos modelos hidráulicos implementados en un programa computacional tipo Epanet, con el objetivo de contar la cantidad de arranques que se producen en las bombas del sistema de impulsión planteado en 2.3.1 (bombas con variador de frecuencia) y 2.3.4 (bombas con variador de frecuencia junto a un estanque hidroneumático). Esto permite verificar que para los volúmenes de estanque hidroneumáticos, calculados con la formulación clásica (ver 2.4.2) y propuesta (ver 4.1.4), los arranques producidos en las bombas para dichos sistemas no superen lo recomendado por el fabricante. El siguiente capítulo define los parámetros con que fueron diseños los modelos hidráulicos computacionales.

Todos los modelos hidráulicos fueron diseñados en una configuración del tipo 3+1, es decir, tres bombas en operación más una de reserva.

En el ANEXO 3: DISEÑO DE MODELOS HIDRÁULICOS COMPUTACIONAL se detalla el diseño de los modelos hidráulicos computacionales.

### 4.2.1. Nomenclatura y justificación de parámetros de los modelos

Se eligen cuatro parámetros como base para la realización de los modelos hidráulicos. Estos son detallados en la Tabla 4.2 y en la Tabla 4.3 se explican las justificaciones de los parámetros seleccionados.

*Tabla 4.2 - Nomenclatura para los modelos hidráulicos*

| **Nomenclatura** | | **Código de Modelo Hidráulico** |
|---|---|---|
| **Abreviatura** | **Significado** | **B1 - Q1 - BP - VF - $Q_{mínb}$** |
| B1 | Bomba tipo 1 (marca: KSB, serie: UPA). | |
| B2 | Bomba tipo 2 (marca: Grundfos, serie: CR). | |
| B3 | Bomba tipo 3 (marca: Grundfos, serie: SP). | |
| Q1 | Caudal demandado por la población 1. | |
| Q2 | Caudal demandado por la población 2. | |
| BP | Red con bajas pérdidas. | |
| AP | Red con altas pérdidas. | |
| VF | Sistema de bombeo con variador de frecuencia. | |
| VF+HT | Sistema de bombeo con variador de frecuencia junto a estanque hidroneumático. | |
| $Q_{mínb}$ | Caudal empleado para el cálculo del volumen del estanque hidroneumático empleando la formulación propuesta y el 100% del caudal mínimo de la bomba. | |
| $75\%Q_{mínb}$ | Caudal empleado para el cálculo del volumen del estanque hidroneumático empleando la formulación propuesta y el 75% del caudal mínimo de la bomba. | |
| $50\%Q_{mínb}$ | Caudal empleado para el cálculo del volumen del estanque hidroneumático empleando la formulación propuesta y el 50% del caudal mínimo de la bomba. | |
| $Q_m$ | Caudal empleado para el cálculo del volumen del estanque hidroneumático empleando la formulación clásica. | |

Se emplean tres tipos de bombas para los modelos hidráulicos:

1) Bomba tipo 1 (B1): bomba de marca KSB tipo UPA (pozo profundo).
2) Bomba tipo 2 (B2): bomba marca Grundfos tipo CR (bomba instalación vertical).
3) Bomba tipo 3 (B3): bombas marca Grundfos tipo SP (pozo profundo).

*Tabla 4.3 - Justificación de los parámetros para los modelos hidráulicos*

| N° | Parámetro | Justificación |
|---|---|---|
| 1 | Q1/Q2 | Se emplean distintos caudales de demanda de la población, para estudiar los resultados en el volumen del estanque hidroneumático y los arranques generados en las bombas. |
| 2 | BP/AP | Se emplean dos configuraciones extremas en la red de agua potable: altas pérdidas y bajas pérdidas de energía. Esto permitirá determinar cómo afecta al volumen del estanque hidroneumático y los arranques generados en las bombas. |
| 3 | VF/VF+HT | Se estudia el sistema de bombeo con y sin estanque hidroneumático para estudiar los resultados en los arranques generados en las bombas y justificar la adición de un estanque hidroneumático. |
| 4 | $Q_{mínb}$/ 75%$Q_{mínb}$/ 50%$Q_{mínb}$/ $Q_m$ | Se emplean distintos valores del caudal con que se calcula el volumen del estanque hidroneumático para contrastar los arranques generados en las bombas. Esto permitirá determinar si dichos volúmenes permiten mantener los arranques bajo el máximo recomendado por el fabricante, y comparar los resultados generados por la formulación clásica y propuesta. |

Se crean 20 modelos para las tres bombas en análisis (bomba tipo 1, bomba tipo 2 y bomba tipo 3), lo que da un total de 60 modelos hidráulicos. En la Tabla 4.4 se muestran los 20 modelosutilizando para la bomba tipo 1, dado que cada bomba tiene los mismos modelos, no se hace necesario describir los 60 modelos totales, la única diferencia será el primer parámetro que variará por B1, B2 o B3.

*Tabla 4.4 - Modelos hidráulicos para la bomba tipo 1 (B1)*

| N° de Modelo Hidráulico | Código de Modelo Hidráulico |
|---|---|
| 1 | B1-Q1-BP-VF |
| 2 | B1-Q1-BP-VF+HT-$Q_{mínb}$ |
| 2.1 | B1-Q1-BP-VF+HT-75%$Q_{mínb}$ |
| 2.2 | B1-Q1-BP-VF+HT-50%$Q_{mínb}$ |
| 2.3 | B1-Q1-BP-VF+HT-$Q_m$ |
| 3 | B1-Q1-AP-VF |
| 4 | B1-Q1-AP-VF+HT |
| 4.1 | B1-Q1-AP-VF+HT-$Q_{mínb}$ |
| 4.2 | B1-Q1-AP-VF+HT-75%$Q_{mínb}$ |
| 4.3 | B1-Q1-AP-VF+HT-$Q_m$ |
| 5 | B1-Q2-BP-VF |
| 6 | B1-Q2-BP-VF+HT-$Q_{mínb}$ |
| 6.1 | B1-Q2-BP-VF+HT-75%$Q_{mínb}$ |
| 6.2 | B1-Q2-BP-VF+HT-50%$Q_{mínb}$ |
| 6.3 | B1-Q2-BP-VF+HT-$Q_m$ |
| 7 | B1-Q2-AP-VF |
| 8 | B1-Q2-AP-VF+HT-$Q_{mínb}$ |
| 8.1 | B1-Q2-AP-VF+HT-75%$Q_{mínb}$ |
| 8.2 | B1-Q2-AP-VF+HT-50%$Q_{mínb}$ |
| 8.3 | B1-Q2-AP-VF+HT-$Q_m$ |

### 4.2.2. Caudales ingresados a los modelos

Los caudales ingresados al modelo con el objetivo de simular la demanda de la población fueron obtenidos de mediciones de caudal facilitadas por Esval. Según información de personal operativo de Esval (comunicación personal), existen dos sectores en la comuna de Quilpué que se asemejan al problema descrito en el punto 2.1 y que además presentan problemas en la operación de su planta elevadora de agua potable (PEAP) por repetidas partidas de las bombas, de las cuales sólo se pudo obtener el caudal de demanda. El caudal de demanda de la población 1 fue obtenido de la PEAP Cardenal Caro y el caudal de demanda de la población 2 fue obtenido de la PEAP Volcán Villarrica, a través de mediciones de caudal efectuados desde el lunes 9 de febrero de 2015 hasta el domingo 15 de febrero de 2015. Se empleó como equipo de medición en ambos sectores un flujómetro de tipo inserción marca Seametrics, cuyos datos con 5 segundos de resolución, fueron enviados vía telemetría y almacenados en la central de información de Esval. De la semana de medición de datos

disponibles de ambas fuentes, se seleccionó un día (24 horas) que presentará la menor cantidad de errores en la lectura del caudal y que a su vez presentará el mayor consumo.

Dado que las mediciones fueron efectuadas durante el verano, es razonable asumir que la medición ingresada al modelo corresponde aproximadamente al día de máximo consumo anual. Esto quiere decir que el promedio de esta medición corresponde al caudal máximo diario (Qmáxd) y el mayor valor de la serie de datos corresponde al caudal máximo horario (Qmáxh).

En la Figura 4.4 se presenta el caudal de demanda de la población 1 (Q1) ingresado al modelo hidráulico, y se indican los valores extremos y promedio de dicho caudal. Análogo para el caudal de demanda de la población 2 (Q2), que es presentado en la Figura 4.5, y se indican los valores extremos y promedio.

Figura 4.4 - Caudal de demanda de la Población 1 (Q1)

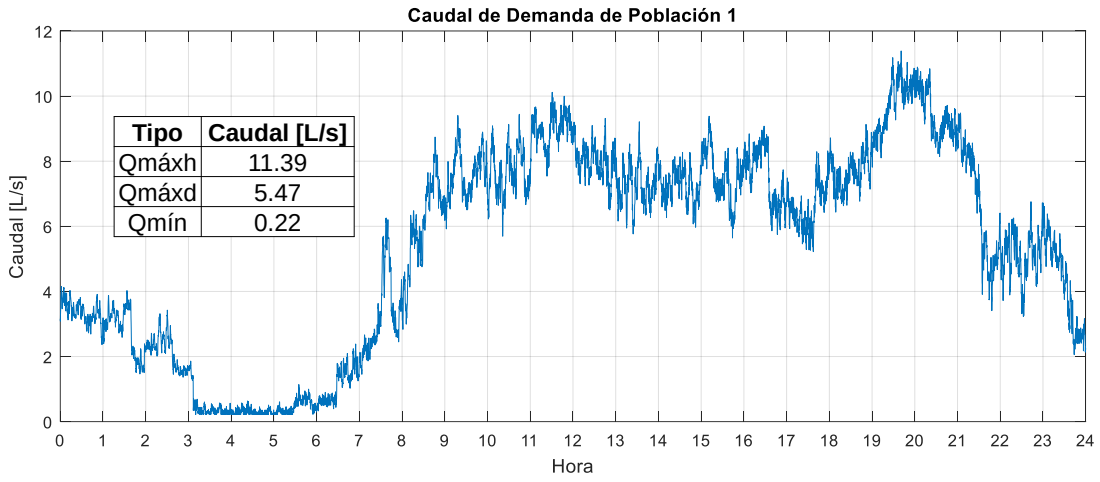
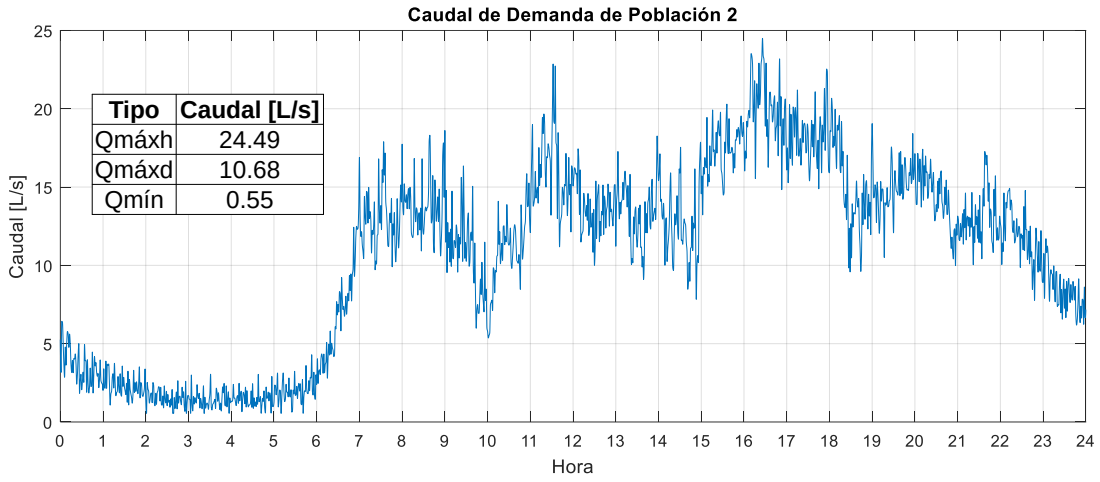


Figura 4.5 - Caudal de demanda de la Población 2 (Q2)




Para evaluar el evento de incendio, debido a que en las mediciones obtenidas no cuentan con dicho registro, se decide emplear lo que indica la norma NCh698:2015, es decir, un caudal coincidente constante de demanda en el grifo de la red que mayor pérdidas de energía asociado durante un determinado período de tiempo. Según información de Esval, el sector cuenta con menos de 6000 habitantes, por lo que se considera un único grifo en operación simultánea con una duración de 2 [hr] y un caudal de 16 [L/s]. El tiempo donde se aplicó el caudal de incendio para la población 1 se ubica en las horas que la demanda de caudal de la población es máxima, para el caso de la población 1 esto corresponde entre las 19 y 21 horas; para la población 2 se ubica el caudal de incendio durante las mismas hora que el caso anterior, con el objetivo que sean comparables los resultados.

En la Figura 4.6 se muestra el caudal de demanda de la población 1 junto a un evento de incendio, obteniendo de esta manera un caudal coincidente (Qcoinc) de 21.47 [L/s]. De manera análoga en la Figura 4.7 se muestra el caudal de demanda de la población 2 junto a un evento de incendio, cuyo caudal coincidente es de 26.68 [L/s].

Figura 4.6 - Caudal de demanda de la Población 1 más evento de Incendio

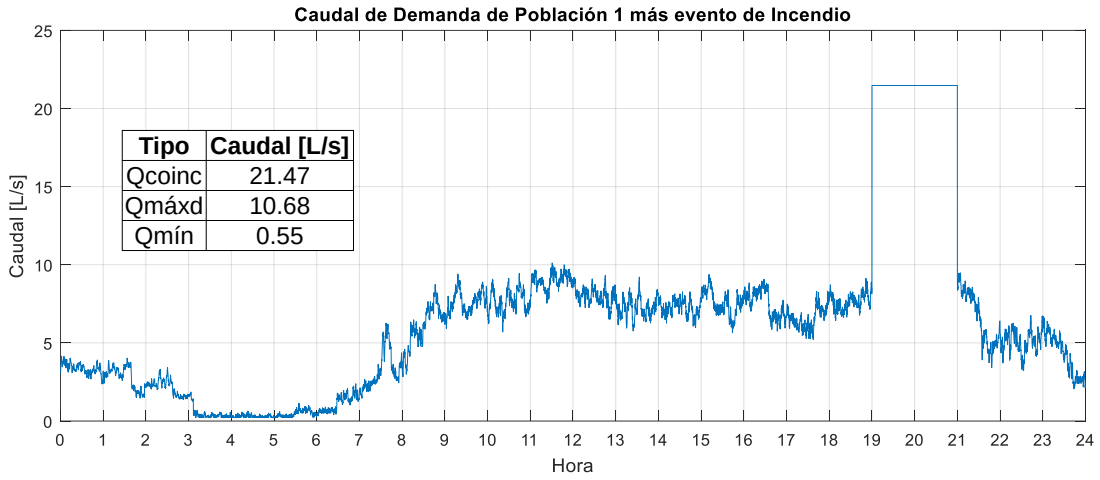
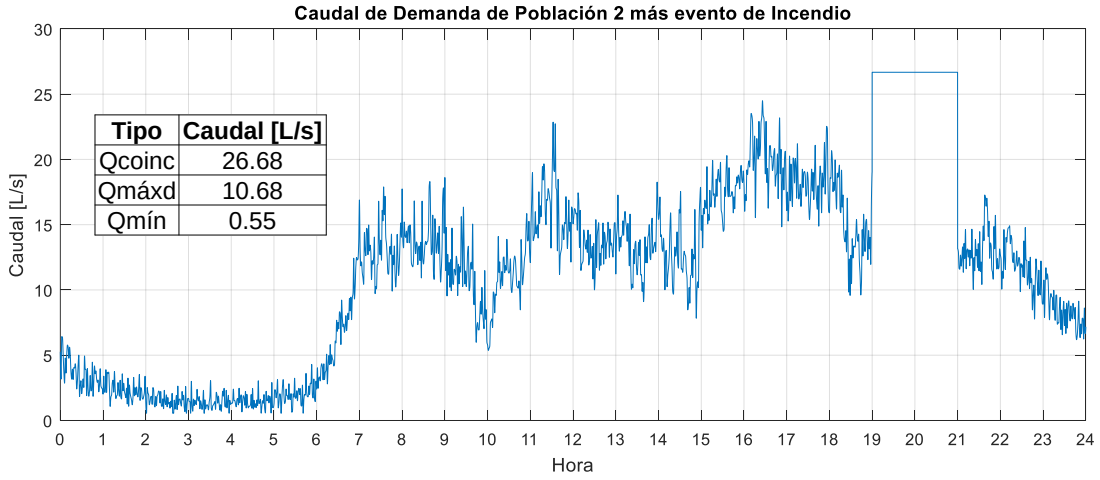



Figura 4.7 - Caudal de demanda de la Población 2 más evento de Incendio




### 4.2.3. Características de la red para los modelos

Se ha escogido basar el diseño de la red de agua potable para el modelo hidráulico en una versión simplificada de la pequeña red abastecida por la planta elevadora de agua potable (PEAP) Ximena Cariola, ubicada en la calle Ximena Cariola, localidad de Guanaqueros, cuya extensión de la red de dicha PEAP no supera las 3 cuadras aproximadamente, la red ha sido simplificada a razón de centrar el estudio en el objetivo de esta memoria.

La razón de emplear una versión simplificada de la red es para centrar el estudio en el objetivo de la memoria, así mismo la justificación de por qué se ha seleccionado esta red se debe a que pequeñas variaciones en sus parámetros físicos, cómo el diámetro de las tuberías,

permiten grandes modificaciones en la curva característica de la tubería. Además, debido a que en la red de la PËAP Ximena Cariola (Guanaqueros) y la red PEAP Cardenal Caro (Quilpué) la cantidad de clientes son 92 y 90 respectivamente, es razonable asumir que el consumo de ambos sectores será similar. Esto no ocurre de igual manera para el consumo de la población Volcán Villarrica, el cual es mayor. No obstante, con el objetivo de poder comparar ambos resultados sobre una misma base, entendiéndose por base a las características físicas de la red de agua potable, se decidió evaluar dicho caudal de demanda en la misma red.

La red ingresada al modelo computacional tiene las siguientes características:

- Se emplea una única red de agua potable en el diseño de los modelos, de manera que los resultados sean comparables, por tanto los valores de: longitud, desnivel y presión residual serán iguales en todos los modelos, a excepción del diámetro de la tubería que será modificado con el objetivo de generar una red con bajas y altas pérdidas de energía.
- Para simplificación del análisis, se usa el mismo punto físico en la red del modelo para definir el peor punto de la red para el evento de máximo consumo horario ($Q_{máxh}$) y el evento caudal coincidente ($Q_{coinc}$). En la realidad estos puntos no necesariamente coinciden.
- Para el cálculo de las pérdidas de energía en la red se utilizó la formulación de Hazen Williams por su simplicidad de cálculo.
- Se generan dos modelos que representen los extremos de las pérdidas de energía en la red de agua potable, es decir, un modelo con altas pérdidas en la red (AP) y un modelo con bajas pérdidas en la red (BP).

Las características de la red empleada en los modelos hidráulicos se detallan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 – Valores empleados para una red con altas pérdidas (AP) y una red con bajas pérdidas (BP)

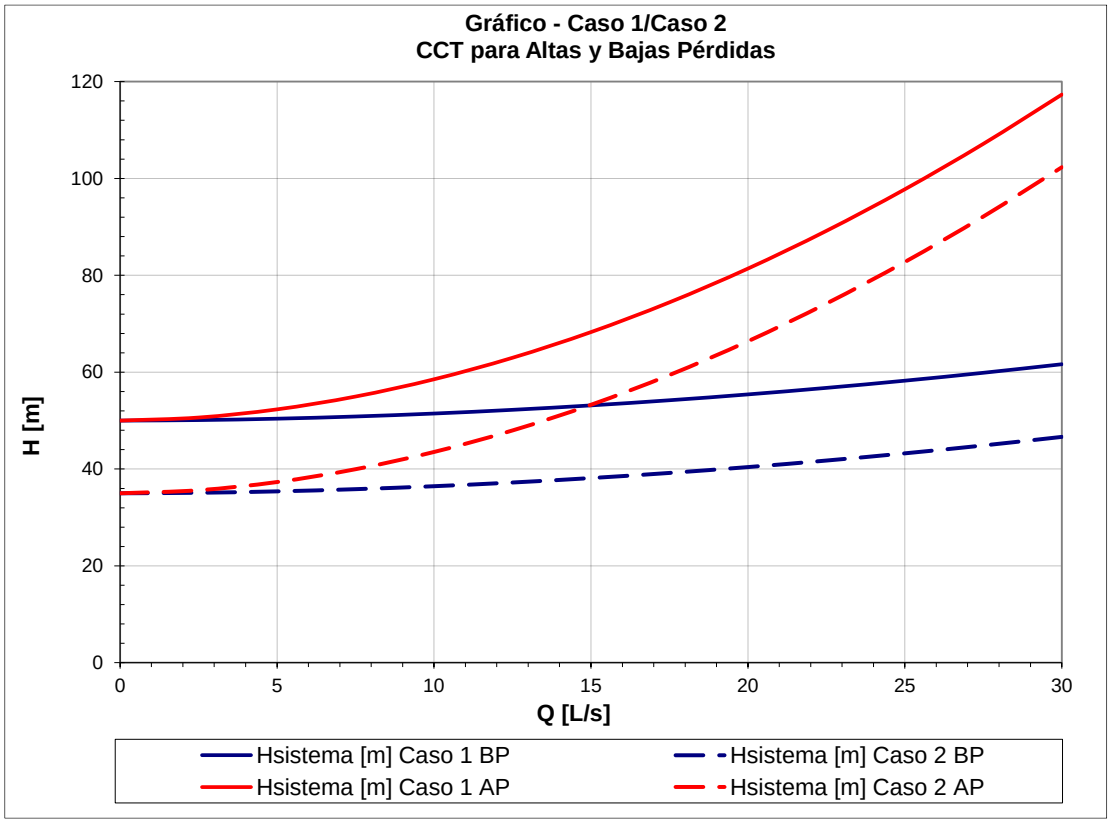
| | | Pérdidas en la red | | |
|---|---|---|---|---|
| **N°** | **Variable** | **Bajas Pérdidas (BP)** | **Altas pérdidas (AP)** | **Unidad** |
| 1 | Longitud red | 360 | 360 | [m] |
| 2 | Material | HDPE PE100 PN10 | HDPE PE100 PN10 | - |
| 3 | Diámetro externo | 160 | 110 | [mm] |
| 4 | Espesor | 9.5 | 6.6 | [mm] |
| 5 | Diámetro interno | 141 | 96.8 | [mm] |
| 6 | $C_{HW}$ | 140 | 140 | - |
| 7 | Desnivel | 30 | 30 | [m] |
| 8 | Presión residual: | | | |
| | Consumo | 20 | 20 | [mca] |
| | Incendio | 5 | 5 | [mca] |

El último punto de la Tabla 4.5, es decir, el punto 8 la presión residual se debe evaluar en dos casos:

- Consumo: corresponde para el normal funcionamiento de la red, según la norma NCh698:2015, esta solicita una presión residual mínima de 15 [mca], sin embargo, se recomienda una presión levemente mayor (20 [mca]) para ofrecer un mejor conforte al usuario.
- Incendio: corresponde para el caso en que ocurra un evento de incendio en cuyo caso la presión residual en la red debe ser de como mínimo 5 [mca] según la normativa NCh698:2015.

Los valores de la Tabla 4.5 permiten graficar las siguientes curvas características de la tubería para los dos casos en análisis.

Figura 4.8 – Curva característica de la tubería (CCT) para red con Altas Pérdidas y Bajas Pérdidas




Nota:

- Caso 1 BP: corresponde a una presión residual de 20 [mca] para el caudal máximo horario en una red con bajas pérdidas de energía.
- Caso 2 BP: corresponde a una presión residual de 5 [mca] para el caudal coincidente en una red con bajas pérdidas de energía.
- Caso 1 AP: corresponde a una presión residual de 20 [mca] para el caudal máximo horario en una red con altas pérdidas de energía.
- Caso 2 AP: corresponde a una presión residual de 5 [mca] para el caudal coincidente en una red con altas pérdidas de energía.

### 4.2.4. Volúmenes comerciales adoptados para los estanques hidroneumáticos

Los estanques hidroneumáticos que son fabricados para la impulsión de agua potable se encuentran acotados a ciertos volúmenes determinados. Estos son seleccionados a partir del valor inmediatamente superior al volumen calculado, ya sea con la formulación clásica o la

propuesta. En la Tabla 4.6 se detallan los volúmenes de estanques hidroneumáticos ofrecidos por dos importantes marcan que venden en el país y que usaron como base para determinar el volumen de diseño de los estanques hidroneumáticos.

*Tabla 4.6 – Volúmenes comerciales de estanques hidroneumáticos utilizados en los modelos de análisis*

| **Marca:** | Grundfos | Grundfos | Vogt |
|---|---|---|---|
| **Modelo:** | GT-U 16 bar | GT-H 16 bar | HV |
| | Capacidad [L] | Capacidad [L] | Capacidad [L] |
| | 12 | 8 | 60 |
| | 25 | 12 | 100 |
| | 80 | 18 | 200 |
| | 100 | 24 | 300 |
| | 180 | 35 | 500 |
| | 300 | 60 | 750 |
| | 400 | 80 | 800 |
| | 500 | | 850 |
| | 600 | | 1000 |
| | 800 | | |
| | 1000 | | |
| | 1500 | | |
| | 2000 | | |
| | 3000 | | |
| | 4000 | | |
| | 5000 | | |

# 5. RESULTADOS

Se obtuvieron una serie de resultados, siendo dos los de mayor relevancia, los volúmenes de los estanques hidroneumáticos y los arranques producidos en las bombas. El primer resultado fue calculado con base en la formulación clásica y la formulación propuesta. El segundo resultado fue obtenido con los modelos computacionales.

Los resultados con mayor detalle de los modelos hidráulicos son especificados en el ANEXO 4: RESULTADOS EN EXTENSO DE MODELOS HIDRÁULICOS COMPUTACIONALES.

## 5.1. VOLUMENES DE ESTANQUES HIDRONEUMÁTICOS

En la Tabla 5.2, Tabla 5.3 y Tabla 5.4 se resumen los resultados de las bombas y estanques hidroneumáticos seleccionados para los diversos modelos hidráulicos que cumplen los requerimientos de la red tanto en presión como en caudal. Además la Tabla 5.1 define los parámetros presentados en dichas tablas. El detalle del código del modelo hidráulico se puede encontrar en la Tabla 4.2.

*Tabla 5.1 - Definición de parámetros utilizados en la Tabla 5.2, Tabla 5.3 y Tabla 5.4*

| Equipo | Parámetro | Observación |
|---|---|---|
| Características Bombas | Marca | Marca de la bomba. |
| | Modelo | Modelo de la bomba empleada. |
| | Modelo Motor | Modelo del motor con el que se identifica la cantidad máxima partidas por hora permitidas para el motor. |
| | Máx. partidas/hora | Máximas partidas por hora permitidas para el motor de la bomba informada por el fabricante. |
| | Frecuencia mín. [Hz] | Mínima frecuencia de operación que puede alcanzar la bomba. |
| | $Q_{mínb}$ [L/s] | Caudal mínimo de impulsión de la bomba. |
| | Tp [s] | Tiempo mínimo entre partidas del sistema. |
| | Config. Bombas | Configuración de las bombas. |
| Características del estanque hidroneumático | Q Hidro [L/s] | Caudal empleado para el cálculo del volumen del estanque hidroneumático. |
| | Vol. calculado Hidro [L] | Volumen total del estanque hidroneumático calculado. |
| | Vol. diseño Hidro [L] | Volumen total de diseño del estanque hidroneumático (seleccionado de la Tabla 4.6) |

*Tabla 5.2 - Detalle de los parámetros de las bombas y estanques hidroneumáticos empleados en los modelos con bomba tipo 1 (B1)*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Características Bombas | | | | | | | | Características Hidroneumático | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Marca | Modelo | Modelo Motor | Máx. partidas/ hora | Frecuencia mín [Hz] | Qmín b [L/s] | Tp [s] | Config. Bombas | Q Hidro [L/s] | Vol. calculado Hidro [L] | Vol. diseño hidro [L] |
| 1 | B1-Q1-BP-VF | KSB | UPA 150C-30/6 DN 100 5,5 | UMA 150E | 15 | 46.2 | 0.77 | - | 3+1 | - | - | - |
| 2 | B1-Q1-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | 50.0 | 0.83 | 60.0 | 3+1 | 0.83 | 357 | 400 |
| 2.1 | B1-Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | 0.63 | 267 | 300 |
| 2.2 | B1-Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | 0.42 | 178 | 180 |
| 2.3 | B1-Q1-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | 4.38 | 468 | 500 |
| 3 | B1-Q1-AP-VF | KSB | UPA 150C-30/10 UMA 150E 9/21 | UMA 150E | 15 | 34.4 | 0.57 | - | 3+1 | - | - | - |
| 4 | B1-Q1-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | 38.2 | 0.64 | 60 | 3+1 | 0.64 | 272 | 300 |
| 4.1 | B1-Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | 0.48 | 204 | 300 |
| 4.2 | B1-Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | 0.32 | 136 | 180 |
| 4.3 | B1-Q1-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | 3.54 | 379 | 400 |
| 5 | B1-Q2-BP-VF | KSB | UPA 150C-30/9 UMA 150E 9/21 | UMA 150E | 15 | 36.7 | 0.61 | - | 3+1 | - | - | - |
| 6 | B1-Q2-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | 40.4 | 0.67 | 60 | 3+1 | 0.68 | 289 | 300 |
| 6.1 | B1-Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | 0.51 | 217 | 300 |
| 6.2 | B1-Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | 0.34 | 145 | 180 |
| 6.3 | B1-Q2-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | 4.03 | 431 | 500 |
| 7 | B1-Q2-AP-VF | KSB | UPA 150C-30/14 UMA 150E 13/21 | UMA 150E | 15 | 29.5 | 0.49 | - | 3+1 | - | - | - |
| 8 | B1-Q2-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | 32.3 | 0.54 | 60 | 3+1 | 0.54 | 230 | 300 |
| 8.1 | B1-Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | 0.40 | 173 | 180 |
| 8.2 | B1-Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | 0.27 | 115 | 180 |
| 8.3 | B1-Q2-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | 6.67 | 713 | 750 |

*Tabla 5.3 - Detalle de los parámetros de las bombas y estanques hidroneumáticos empleados en los modelos con bomba tipo 2 (B2)*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Características Bombas | | | | | | | | Características Hidroneumático | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Marca | Modelo | Modelo Motor | Máx. partidas/ hora | Frecuencia mín [Hz] | Qmín b [L/s] | Tp [s] | Config. Bombas | Qm Hidro [L/s] | Vol. calculado Hidro [L] | Vol. diseño hidro [L] |
| 1 | B2-Q1-BP-VF | Grundfos | CRE 20-6 P-F-A-E-HQQE | 7.5kW | 50 | 33.3 | 0.37 | - | 3+1 | - | - | - |
| 2 | B2-Q1-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | 36.1 | 0.40 | 18 | 3+1 | 0.40 | 52 | 60 |
| 2.1 | B2-Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | 0.30 | 39 | 60 |
| 2.2 | B2-Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | 0.20 | 26 | 35 |
| 2.3 | B2-Q1-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | 3.75 | 120 | 180 |
| 3 | B2-Q1-AP-VF | Grundfos | CR_20-10_A-F-A-E-HQQE | 11kW | 50 | 30.3 | 0.34 | - | 3+1 | - | - | - |
| 4 | B2-Q1-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | 33.3 | 0.56 | 18 | 3+1 | 0.56 | 71 | 80 |
| 4.1 | B2-Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | 0.42 | 54 | 60 |
| 4.2 | B2-Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | 0.28 | 36 | 60 |
| 4.3 | B2-Q1-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | 3.47 | 111 | 180 |
| 5 | B2-Q2-BP-VF | Grundfos | CR_32-6_A-F-A-E-HQQE | 11kW | 50 | 34.2 | 0.61 | - | 3+1 | - | - | - |
| 6 | B2-Q2-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | 37.1 | 0.66 | 18 | 3+1 | 0.66 | 85 | 100 |
| 6.1 | B2-Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | 0.49 | 64 | 80 |
| 6.2 | B2-Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | 0.33 | 42 | 60 |
| 6.3 | B2-Q2-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | 5.07 | 163 | 180 |
| 7 | B2-Q2-AP-VF | Grundfos | CR_32-8_A-F-A-E-HQQE | 15kW | 50 | 30.0 | 0.53 | - | 3+1 | - | - | - |
| 8 | B2-Q2-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | 32.2 | 0.57 | 18 | 3+1 | 0.57 | 73 | 80 |
| 8.1 | B2-Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | 0.43 | 55 | 60 |
| 8.2 | B2-Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | 0.29 | 37 | 60 |
| 8.3 | B2-Q2-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | 4.44 | 143 | 180 |

*Tabla 5.4 - Detalle de los parámetros de las bombas y estanques hidroneumáticos empleados en los modelos con bomba tipo 3 (B3)*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Características Bombas | | | | | | | | Características Hidroneumático | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Marca | Modelo | Modelo Motor | Máx. partidas/ hora | Frecuencia mín [Hz] | Qmín b [L/s] | Tp [s] | Config. Bombas | Qm Hidro [L/s] | Vol. calculado Hidro [L] | Vol. diseño hidro [L] |
| 1 | B3-Q1-BP-VF | Grundfos | SP_30-6 | MS 4000 | 100 | 44.7 | 1.09 | - | 3+1 | - | - | - |
| 2 | B3-Q1-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | 48.9 | 1.19 | 9 | 3+1 | 1.19 | 76 | 80 |
| 2.1 | B3-Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | 0.89 | 57 | 60 |
| 2.2 | B3-Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | 0.59 | 38 | 60 |
| 2.3 | B3-Q1-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | 5.00 | 80 | 100 |
| 3 | B3-Q1-AP-VF | Grundfos | SP_30-9 | MS 6000 | 30 | 36.6 | 2.00 | - | 3+1 | - | - | - |
| 4 | B3-Q1-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | 39.8 | 2.18 | 30 | 3+1 | 2.18 | 467 | 500 |
| 4.1 | B3-Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | 1.64 | 350 | 400 |
| 4.2 | B3-Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | 1.09 | 233 | 300 |
| 4.3 | B3-Q1-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | 3.96 | 212 | 300 |
| 5 | B3-Q2-BP-VF | Grundfos | SP_30-9 | MS 6000 | 30 | 36.4 | 1.99 | - | 3+1 | - | - | - |
| 6 | B3-Q2-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | 39.8 | 2.18 | 30 | 3+1 | 2.18 | 467 | 500 |
| 6.1 | B3-Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | 1.64 | 350 | 400 |
| 6.2 | B3-Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | 1.09 | 233 | 300 |
| 6.3 | B3-Q2-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | 5.07 | 271 | 300 |
| 7 | B3-Q2-AP-VF | Grundfos | SP_46-10 | MS 6000 | 30 | 31.9 | 1.75 | - | 3+1 | - | - | - |
| 8 | B3-Q2-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | 34.8 | 1.91 | 30 | 3+1 | 1.91 | 408 | 500 |
| 8.1 | B3-Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | 1.43 | 306 | 400 |
| 8.2 | B3-Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | 0.95 | 204 | 300 |
| 8.3 | B3-Q2-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | 4.44 | 238 | 300 |

## 5.2. VOLUMEN DEL ESTANQUE HIDRONEUMÁTICO VERSUS NÚMERO DE ARRANQUES EN LAS BOMBAS

Los resultados del número de arranques generados en las bombas y el volumen de los estanques hidroneumáticos según la formulación propuesta y la clásica, son presentados en la Figura 5.1, Figura 5.2, Figura 5.3 y Figura 5.4 donde cada punto representa los resultados de los modelos hidráulicos indicados en la Tabla 5.2, Tabla 5.3 y Tabla 5.4. En el eje de abscisa se indica la mayor cantidad de arranques generados en una hora (N° Arranques/Hora-máx), seleccionados a partir una simulación de 24 horas de duración. Se escoge la unidad arranques/hora, ya que es empleada por los fabricantes de bombas para indicar la máxima cantidad de arranques permitido, así se puede realizar una verificación de dicho límite de manera directa. En el eje de ordenadas se indica el volumen del estanque hidroneumático seleccionado según lo indicado en el punto 4.2.4. Para que los resultados sean comparable, se agrupan según el caudal demandado por la población (Q1 o Q2) y según las pérdidas de energía en la red (BP o AP), esto permite agrupar los 60 modelos en 4 gráficos con 15 modelos cada uno (5 por cada tipo de bomba). Cada modelo hidráulico, que es representado por un punto, se identificó con el número del modelo hidráulico (MH N°) y se encierra en un rectángulo de color asociado al tipo de bomba, para la bomba tipo 1 (B1) se emplea el color celeste, para la bomba tipo 2 (B2) se emplea el color rojo y para la bomba tipo 3 (B3) se emplea el color verde. Finalmente se indica con una línea vertical del color correspondiente al tipo de bomba, el límite máximo de arranques por hora para dicha bomba, tomando en consideración la

cantidad de bombas instaladas, es decir, si la bomba permite 15 [arranques/hora] y la configuración de la bomba es de tipo 3+1, se indica un máximo de 15*(3+1)= 60 [arranques/hora].

De manera directa se puede observar en la Figura 5.1, Figura 5.2, Figura 5.3 y Figura 5.4 la comparación entre el volumen de diseño del estanque hidroneumático calculado según la formulación clásica que corresponde a los siguientes números de modelos hidráulicos N°2.3, N°4.3, N°6.3 y N°8.3, para cada uno de los tres tipos de bombas; así mismo los diseñados con la formulación propuesta corresponde a los siguientes números de modelos hidráulicos N°2, N°4, N°6 y N°8, para cada uno de los tres tipos de bombas. El resto de los modelos hidráulicos, calculados según la formulación propuesta, corresponde a variaciones en el cálculo del volumen de diseño del estanque hidroneumático variando en un determinado porcentaje el caudal mínimo de la bomba, esto es explicado con mayor detalle en el punto 4.2.1.

Figura 5.1 - Volumen del estanque hidroneumático vs número de arranques/hora-máx para los modelos con caudal tipo 1 (Q1) y bajas pérdidas (BP) para los tres tipos de bombas

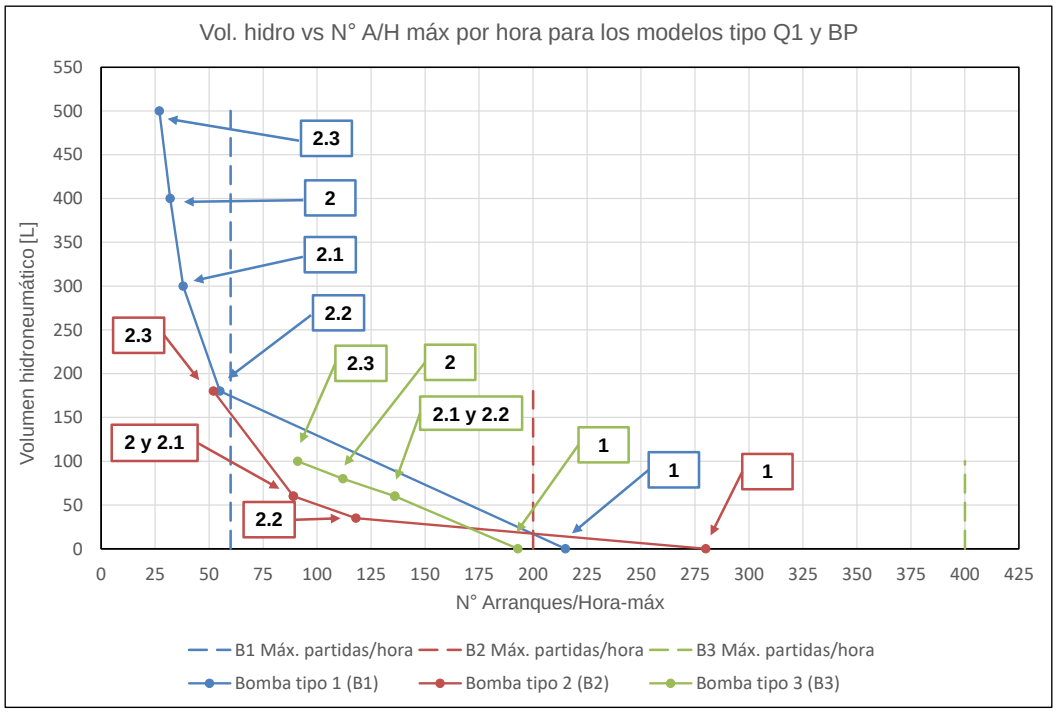


Figura 5.2 - Volumen del estanque hidroneumático vs número de arranques/hora-máx para los modelos con caudal tipo 1 (Q1) y altas pérdidas (AP) para los tres tipos de bombas

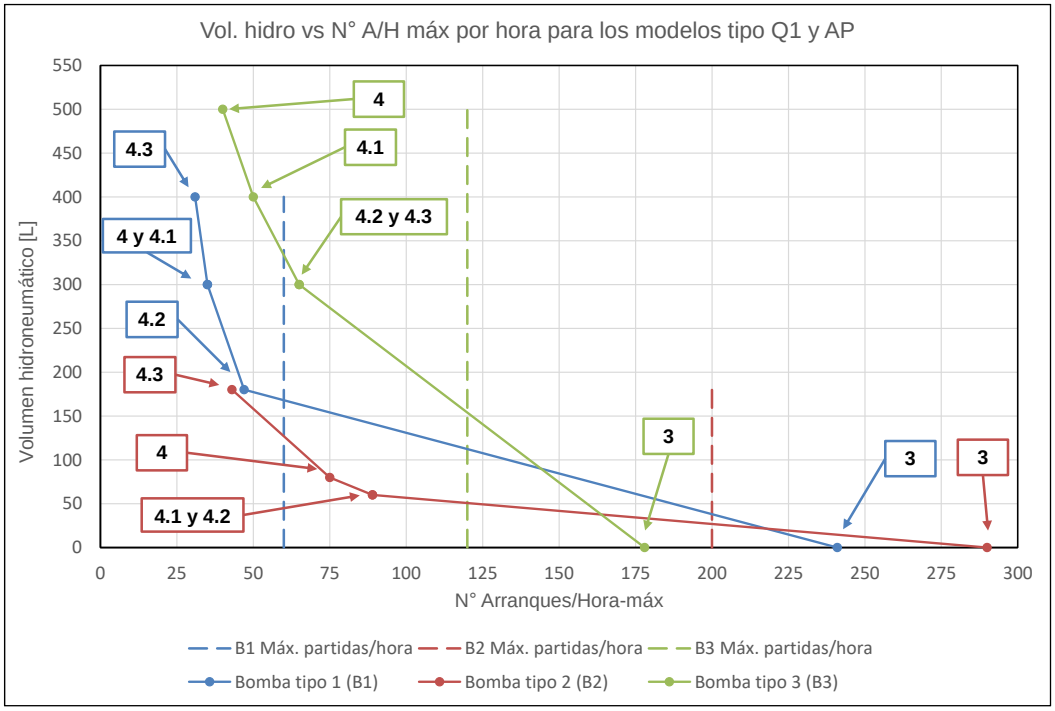



Figura 5.3 - Volumen del estanque hidroneumático vs número de arranques/hora-máx para los modelos con caudal tipo 2 (Q2) y bajas pérdidas (BP) para los tres tipos de bombas

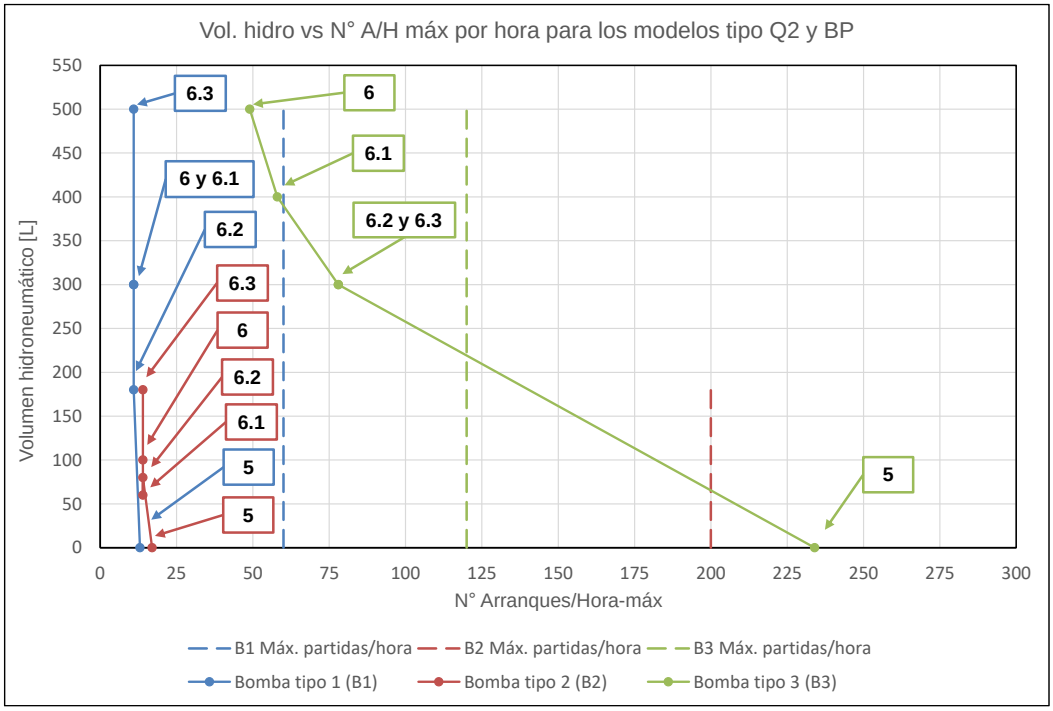
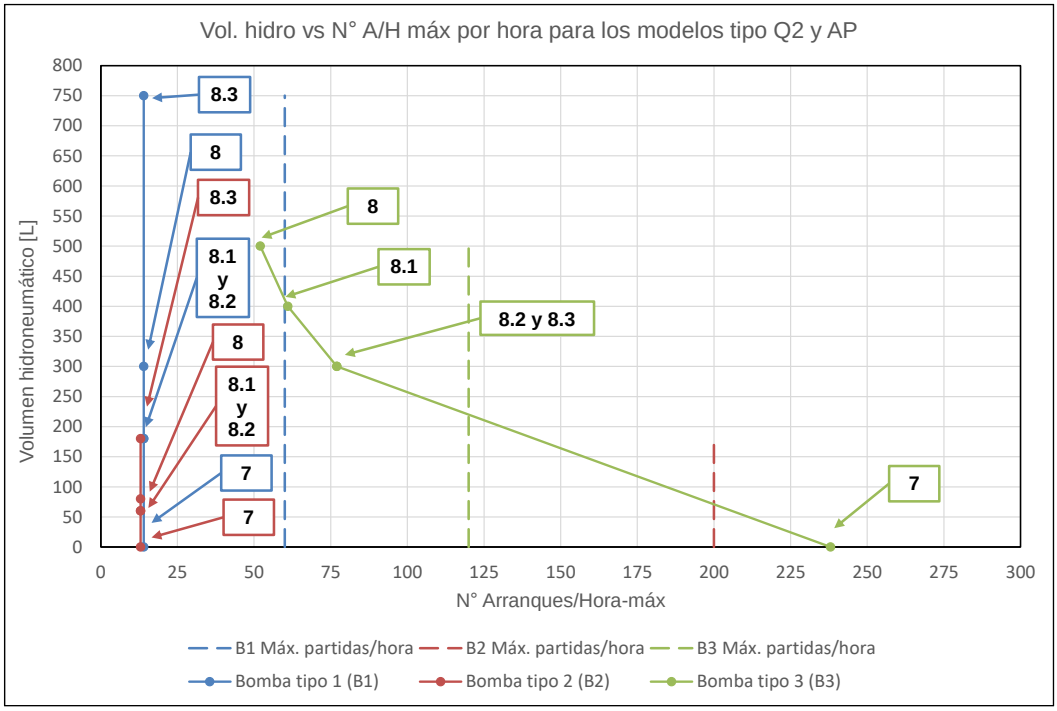


Figura 5.4 - Volumen del estanque hidroneumático vs número de arranques/hora-máx para los modelos con caudal tipo 2 (Q2) y altas pérdidas (AP) para los tres tipos de bombas



# 6. DISCUSIÓN

Los resultados de los modelos hidráulicos indicados en la Figura 5.1, Figura 5.2, Figura 5.3 y Figura 5.4, son resumidos en la Tabla 6.2, por lo cual los resultados pueden ser verificados en las figuras o en la tabla. La Tabla 6.2 indica el número máximo de mayor cantidad de arranques generados en una hora (N° A/H-máx) y a su costado derecho la comparación porcentual respecto al modelo sin estanque hidroneumático. En cambio para el volumen de diseño del estanque hidroneumático (Vol diseño hidro), si bien se realiza la misma comparación porcentual, esta se realiza respecto al volumen del estanque hidroneumático diseñado según la formulación propuesta.

Algunos resultados de los modelos hidráulicos indicados en la Figura 5.1, Figura 5.2, Figura 5.3 y Figura 5.4, tienen resultados idénticos, debido a que si bien existen diferencias en el volumen calculado de estanque hidroneumático, ambos volúmenes se aproximan al mismo volumen de diseño.

Se observa en la Figura 5.1, Figura 5.2, Figura 5.3, Figura 5.4 y Tabla 6.2, que para ninguno de los sistemas diseñados con un estanque hidroneumático se superan en las bombas el número máximo de arranques por hora indicado por el fabricante, inclusive en los que el volumen del estanque hidroneumático fue calculado con un 50% del valor del caudal mínimo de la bomba, lo que se puede en el modelo hidráulico 4.2 para bomba tipo 1 y su respectivo límite de número máximo de arranques por hora Figura 5.2. Sin embargo, al verificar qué sistemas diseñados sin estanque hidroneumático superan en las bombas el número máximo de arranques por hora indicado por el fabricante se observa que los modelos para las bombas tipo 1 (B1), tipo 2 (B2) y tipo 3 (B3) en la Figura 5.1 y Figura 5.2 superan dicho límite, a excepción de la bomba tipo 3 (B3) en la Figura 5.1 lo que se atribuye a que dicha bomba admite una cantidad máxima de arranques por hora altísima de 100 [arranques/hora]. Así mismo, el bajo número de arranques por hora generado en las bombas tipo 1 (B1) y tipo 2 (B2) en la Figura 5.3 y Figura 5.4, se debe a que el caudal demandado por la población 2 (Q2) es en pocas ocasiones menor al caudal mínimo de impulsión de la bomba. Si se examinan las gráficas del anexo D.2.3 y D.3.3, se podrá observar que los arranques por hora producidos en la noche, cuando el consumo es bajo, es comparable a las partidas generadas a lo largo del día, producido por la entrada en operación de bombas adicionales debido a un aumento en el caudal demandado, por lo que el aporte del estanque hidroneumático a disminuir los arranques por hora de las bombas es bajo e insensible al volumen del estanque.

Para las bombas tipo 1 (B1) y tipo 2 (B2) en la Figura 5.1, Figura 5.2, Figura 5.3 y Figura 5.4, se observa que la formulación clásica (modelos hidráulicos N°2.3, N°4.3, N°6.3 y N°8.3)

calcula volúmenes del estanque hidroneumático mayores a los calculados con la formulación propuesta (modelos hidráulicos N°2, N°4, N°6 y N°8), lo que confirma que se puede lograr una reducción del volumen mantenido el número de arranques por hora de las bombas dentro del rango especificado por el fabricante. No obstante, la bomba tipo 3 (B3) presenta resultados contrarios, a excepción del modelo hidráulico N°2.3 indicado en la Figura 5.1. Queda por lo tanto verificar si la aplicabilidad de la formulación propuesta se encuentra dentro del rango recomendado en el punto 4.1.4 para los casos en que la formulación clásica calcula volúmenes para el estanque hidroneumático menores. Para esto se ha elaborado la Tabla 6.1 en la que se calcula el cociente caudal de demanda sobre el caudal de bombeo ($Q_d/Q_b$) para todos los modelos hidráulicos en análisis, observándose que los modelos cuyo cociente aproximadamente es menor o igual a 0.05 o 5% la formulación propuesta estima un volumen para el estanque hidroneumático (ver Tabla 6.2) menor al obtenido con la formulación clásica, contrariamente en los casos cuyo cociente aproximadamente es mayor a 0.05, ocurre la situación contraria. Esto se atribuye a que en el primer caso ($Q_d/Qb \leq 0.05$) es despreciable el tiempo de llenado, por lo cual la formulación propuesta calcula volúmenes del estanque hidroneumático menor al de la formulación clásica, confirmándose la hipótesis planteada en las ecuaciones (4.1) y (4.2); no así en el segundo caso ($Q_d/Qb > 0.05$), en el que no se puede despreciar el tiempo de llenado y al emplear la formulación propuesta, resulta en volúmenes del estanque hidroneumático mayores al calculado con la formulación clásica.

Los resultados de los modelos hidráulicos indicados en la Figura 5.1, Figura 5.2, Figura 5.3 y Figura 5.4, son resumidos en la Tabla 6.2 que indica el número máximo cantidad de arranques generados en una hora (N° A/H-máx) y a su costado derecho la comparación porcentual respecto al modelo sin estanque hidroneumático. Análogamente se realiza lo mismo para el volumen de diseño del estanque hidroneumático (Vol diseño hidro). Complementario a lo ya comentado anteriormente, en la Tabla 6.2 se observa que en algunos modelos hidráulicos pequeñas variaciones en el número de arranques generados en las bombas, requieren de un considerable cambio en el volumen del estanque hidroneumático, por ejemplo, en los modelos hidráulicos N°2 y N°2.3 para la bomba tipo 1, el “N° A/H-máx” son 32 y 27 arranques y el “Vol diseño hidro” son 400 y 500 litros respectivamente, quedando en evidencia que para disminuir solamente en 5 el número de máximos arranques por hora se requiere un aumento de 100 litros en el volumen del estanque hidroneumático.

*Tabla 6.1 - Cálculo del cociente caudal de demanda sobre caudal de bombeo (Qd/Qb)*

| | | | Bomba tipo 1 (B1) | | | Bomba tipo 2 (B2) | | | Bomba tipo 3 (B3) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Qd [L/s] | Qd [L/s] | Qd/Qb | | Qd [L/s] | Qd/Qb | | Qd [L/s] | Qd/Qb | | |
| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Qcoinc [L/s] | Qmínb [L/s] | Qmínb/ Qcoinc | Qmínb/ Qcoinc [%] | Qmínb [L/s] | Qmínb/ Qcoinc | Qmínb/ Qcoinc [%] | Qmínb [L/s] | Qmínb/ Qcoinc | Qmínb/ Qcoinc [%] | |
| 1 | Q1-BP-VF | 21.47 | 0.77 | 0.04 | 3.6% | 0.37 | 0.02 | 1.7% | 1.09 | 0.05 | 5.1% | ver Figura 5.1 |
| 2 | Q1-BP-VF+HT-Qmínb | | 0.83 | 0.04 | 3.9% | 0.40 | 0.02 | 1.9% | 1.19 | 0.06 | 5.5% | |
| 2.1 | Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | | | |
| 2.2 | Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | | | |
| 2.3 | Q1-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | | | |
| 3 | Q1-AP-VF | | 0.57 | 0.03 | 2.7% | 0.34 | 0.02 | 1.6% | 2.00 | 0.09 | 9.3% | ver Figura 5.2 |
| 4 | Q1-AP-VF+HT-Qmínb | | 0.64 | 0.03 | 3.0% | 0.56 | 0.03 | 2.6% | 2.18 | 0.10 | 10.2% | |
| 4.1 | Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | | | |
| 4.2 | Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | | | |
| 4.3 | Q1-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | | | |
| 5 | Q2-BP-VF | 26.68 | 0.61 | 0.02 | 2.3% | 0.61 | 0.02 | 2.3% | 1.99 | 0.07 | 7.5% | ver Figura 5.3 |
| 6 | Q2-BP-VF+HT-Qmínb | | 0.67 | 0.03 | 2.5% | 0.66 | 0.02 | 2.5% | 2.18 | 0.08 | 8.2% | |
| 6.1 | Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | | | |
| 6.2 | Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | | | |
| 6.3 | Q2-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | | | |
| 7 | Q2-AP-VF | | 0.49 | 0.02 | 1.8% | 0.53 | 0.02 | 2.0% | 1.75 | 0.07 | 6.5% | ver Figura 5.4 |
| 8 | Q2-AP-VF+HT-Qmínb | | 0.54 | 0.02 | 2.0% | 0.57 | 0.02 | 2.1% | 1.91 | 0.07 | 7.2% | |
| 8.1 | Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | | | |
| 8.2 | Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | | | |
| 8.3 | Q2-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | | | |

*Tabla 6.2 – Comparación de número de arranques por hora máximos y volumen de estanque hidroneumático para los tres tipos de bombas*

| | | Bomba tipo 1 (B1) | | | | Bomba tipo 2 (B2) | | | | Bomba tipo 3 (B3) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | N° A/H-máx | %N° A/H-máx | Vol diseño hidro [L] | %Vol diseño hidro [L] | N° A/H-máx | %N° A/H-máx | Vol diseño hidro [L] | %Vol diseño hidro [L] | N° A/H-máx | %N° A/H-máx | Vol diseño hidro [L] | %Vol diseño hidro [L] |
| 1 | Q1-BP-VF | **215** | **0%** | - | - | **280** | **0%** | - | - | **193** | **0%** | - | - |
| 2 | Q1-BP-VF+HT-Qmínb | 32 | -85% | **400** | **0%** | 89 | -68% | **60** | **0%** | 112 | -42% | **80** | **0%** |
| 2.1 | Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | 38 | -82% | 300 | -25% | 89 | -68% | 60 | 0% | 136 | -30% | 60 | -25% |
| 2.2 | Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | 55 | -74% | 180 | -55% | 118 | -58% | 35 | -42% | 136 | -30% | 60 | -25% |
| 2.3 | Q1-BP-VF+HT-Qm | 27 | -87% | 500 | 25% | 52 | -81% | 180 | 200% | 91 | -53% | 100 | 25% |
| 3 | Q1-AP-VF | **241** | **0%** | - | - | **290** | **0%** | - | - | **178** | **0%** | - | - |
| 4 | Q1-AP-VF+HT-Qmínb | 35 | -85% | **300** | **0%** | 75 | -74% | **80** | **0%** | 40 | -78% | **500** | **0%** |
| 4.1 | Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | 35 | -85% | 300 | 0% | 89 | -69% | 60 | -25% | 50 | -72% | 400 | -20% |
| 4.2 | Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | 47 | -80% | 180 | -40% | 89 | -69% | 60 | -25% | 65 | -63% | 300 | -40% |
| 4.3 | Q1-AP-VF+HT-Qm | 31 | -87% | 400 | 33% | 43 | -85% | 180 | 125% | 65 | -63% | 300 | -40% |
| 5 | Q2-BP-VF | **13** | **0%** | - | - | **17** | **0%** | - | - | **234** | **0%** | - | - |
| 6 | Q2-BP-VF+HT-Qmínb | 11 | -15% | **300** | **0%** | 14 | -18% | **100** | **0%** | 49 | -79% | **500** | **0%** |
| 6.1 | Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | 11 | -15% | 300 | 0% | 14 | -18% | 80 | -20% | 58 | -75% | 400 | -20% |
| 6.2 | Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | 11 | -15% | 180 | -40% | 14 | -18% | 60 | -40% | 78 | -67% | 300 | -40% |
| 6.3 | Q2-BP-VF+HT-Qm | 11 | -15% | 500 | 67% | 14 | -18% | 180 | 80% | 78 | -67% | 300 | -40% |
| 7 | Q2-AP-VF | **14** | **0%** | - | - | **13** | **0%** | - | - | **238** | **0%** | - | - |
| 8 | Q2-AP-VF+HT-Qmínb | 14 | 0% | **300** | **0%** | 13 | 0% | **80** | **0%** | 52 | -78% | **500** | **0%** |
| 8.1 | Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | 14 | 0% | 180 | -40% | 13 | 0% | 60 | -25% | 61 | -74% | 400 | -20% |
| 8.2 | Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | 14 | 0% | 180 | -40% | 13 | 0% | 60 | -25% | 77 | -68% | 300 | -40% |
| 8.3 | Q2-AP-VF+HT-Qm | 14 | 0% | 750 | 150% | 13 | 0% | 180 | 125% | 77 | -68% | 300 | -40% |

Se descartó la realización de un análisis técnico-económico, debido a las múltiples variables que influyen en el costo de un sistema de bombeo con variador de frecuencia con y sin estanque hidroneumático, además de la incertidumbre respecto a la posibilidad de falla de las bombas. No obstante, grosso modoe, los volúmenes de estanques hidroneumáticos presentados en la Tabla 6.2 no son de un tamaño que implique un gran costo económico inicial extra respecto a la solución sin estanque hidroneumático, comparado al potencial beneficio que tiene su implementación. Asimismo, se observa que si bien existen diferencias porcentuales a considerar en los volúmenes calculados de los estanques hidroneumáticos con la formulación clásica o propuesta, la diferencia en el costo económico no es relevante.

Finalmente, debido a que no se pudo conseguir datos de medición que permitiesen confirmar la hipótesis planteada en el punto 4.1.4.1 ($T_{LL} << T_{va}$), para validar de manera robusta lo expuesto y los resultados obtenidos, se recomienda a juicio del autor de la presente memoria realizar mediciones de caudal a la tubería que sale de sistema impulsión con una resolución al segundo durante una semana, en época estival (alta demanda) y época invernal (baja demanda). Esto para una red que cumpla con lo planteado en el punto 2.1 y su sistema de bombeo sea según lo indicado en el punto 2.3.4. De los datos medidos, se debe analizar el tiempo que operan las bombas entre dos arranques consecutivos del sistema ($T_p$) y el tiempo que están fuera de operación, que corresponde al tiempo de vaciado del estanque hidroneumático ($T_{va}$). La resta de ambos valores permitirá calcular el tiempo de llenado ($T_{LL}$) del estanque hidroneumático y se podrá verificar si dicho tiempo es despreciable.

# 7. CONCLUSIONES

Se realizó una revisión de la deducción teórica de las ecuaciones para el cálculo del volumen de los estanques hidroneumáticos operando junto a una bomba de frecuencia fija, con base en los apuntes del profesor Ludwig Stöwhas[9]. Esto permite aclarar los supuestos empleados en la deducción de la formulación clásica, lo que sirve como base para plantear la formulación propuesta para el cálculo del volumen del estanque hidroneumático.

La metodología que se propuso entrega recomendaciones de diseño para sistemas de presurización compuestos por bombas con variador de frecuencia operando junto a estanques hidroneumáticos. Además, en dicho apartado se propone una nueva fórmula para el cálculo del volumen del estanque hidroneumático, denominada formulación propuesta, y además se entrega una recomendación sobre su rango de aplicación (formulación propuesta).

Se realizaron modelos hidráulicos computacionales que permitieron cuantificar los arranques generados en las bombas para sistemas impulsión sin estanque hidroneumático, con estanque hidroneumático calculado según la formulación clásica y con estanque hidroneumático calculado según la formulación propuesta. Los resultados de los modelos hidráulicos computacionales sin estanque hidroneumático muestran que la operación de la bomba durante la noche tiene un comportamiento de constantes partidas y paradas que superan la cantidad máxima de arranques por hora recomendados por los fabricantes de las bombas, lo que se correlaciona con lo observado en terreno. Esto justifica de manera clara la necesidad de implementar algún sistema que permita disminuir los arranques generados en las bombas, ya que según lo indicado por personal de mantención de Grundfos (comunicación personal), esta situación puede reducir la vida útil de las bombas desde 10 años a 2 años o 6 meses inclusive.

En los resultados de los modelos hidráulicos computacionales con estanque hidroneumático se observa una considerable disminución en la cantidad de arranques generados en las bombas, cuyo valor es siempre menor al límite máximo recomendado por el fabricante independiente de la formulación empleada para el cálculo del volumen del estanque hidroneumático. Por otro lado, dichos resultados se correlacionan con la recomendación sobre el rango de aplicación de la formulación propuesta y clásica, prácticamente en su totalidad, observándose que cuando dicho rango se cumple la formulación correspondiente siempre calcula un menor volumen para el estanque hidroneumático respecto a la formulación fuera del rango de aplicación. A pesar de esto, debido a que no se pudo conseguir datos de medición que permitiesen confirmar la hipótesis del planteamiento base para la formulación propuesta, la que considera que se puede despreciar el tiempo de llenado del estanque hidroneumático

al ser mucho menor al tiempo de vaciado ($T_{LL} << T_{va}$), se recomienda para validar de manera robusta lo planteado, realizar mediciones reales en un sistema del tipo descrito que permitan contrastar lo planteado.

Finalmente la presión máxima ($P_1$) y mínima ($P_2$) para el estanque hidroneumático, quedan determinadas por las características particulares del problema en análisis, por tanto, para efectos de diseño dichas presiones se comportan como una constante. La importancia de estas variables radica en que a mayor presión, mayor tamaño de las bombas y del estanque hidroneumático, lo que naturalmente aumenta sus costos iniciales, de operación y mantención.

## 8. REFERENCIAS


1. Karassik, I., et al., *Pump Handbook*. Third Edition ed. 2001: McGraw-Hill Education.
2. NEMA, *Energy management guide for selection and use of fixed frequency medium AC squirrel-cage polyphase induction motors*. Vol. MG-10. 2001: National Electrical Manufacturers Association.
3. Garr M. Jones, P.E.D.E.E. and P.D.P.E. Robert L. Sanks, *Pumping Station Design: Revised 3rd Edition*. 2008: Elsevier Science.
4. S.A., E., *Informe Técnico: Estudio Red Distribución Agua Potable Papudo*, in *Optimización del Rendimiento Operacional de las Redes AP en Esval*, G.d. Operaciones, Editor. 2006. Noviembre, Unidad de Modelo Hidráulicos Esval S.A.: Viña del Mar. p. 8.
5. Jones, G.M., et al., *Pumping station design*. 2006: Gulf Professional Publishing.
6. Vogt, *Estanques - Catálogo Técnico de Estanque Hidroneumáticos*, Vogt, Editor.: Chile, Santiago.
7. Grundfos, *GT tanks For cold-water and heating applications*, in *Grundfos Data Booklet*, Grundfos, Editor.: Bjerringbro, Denmark.
8. Sistemas Hidroneumáticos C.A., *Manual de procedimiento para el cálculo y selección de sistema de bombeo*. 1995: Sistemas Hidroneumáticos C.A.
9. Stöwhas, L., *"Apuntes de clases". Hidráulica Aplicada (CIV346)*. Primer semestre, 2011, UTFSM: Valparaíso.
10. RL Deppmann, *Hydropneumatic Tanks for Variable - Speed Pressure Boosters* in *Deppmann Monday Morning Minute!* 2015, RL Deppmann: http://www.deppmann.com.
11. Lee, E.C. *Review of variable speed drive technology*. in *Wire World Internet, Brantford, Ontario, Canada. Available at: http://www. wireworld. com/seminar/drives/. Accessed*. 2003.
12. Square D Company, *Overview of Adjustable Frequency Control (Inverters)*. 1984. p. 1 of 14.
13. Bonnett, A.H. *An overview of how AC induction motor performance has been affected by the October 24, 1997 implementation of the Energy Policy Act of 1992*. in *Petroleum and Chemical Industry conference, 1998. Industry Applications Society 45th Annual*. 1998. IEEE.
14. Departamento de Gestión de Inversiones, *Manual de Soluciones de Saneamiento Sanitario para Zonas Rurales*. Programa PIRDT. 2009: Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo.
15. American Water Works Association, *M31-Distribution system requirements for fire protection*. Fourth Edition ed. Vol. 31. 2008: American Water Works Association.
16. American Water Works Association, *M32-Computer Modeling of Water Distribution Systems*. Third Edition ed. Vol. 32. 2005: American Water Works Association (AWWA).

17. EBM Construcción, *SISTEMAS DE IMPULSIÓN DE AGUA PARA EDIFICIOS - Un mercado con grandes oportunidades de negocios* O. Touch, Editor. Año XV, Grupo Editorial EMB: www.embconstruccion.cl.

18. Gomez Munoz, M., A. Herrera Jimenez, and M. Resendiz Gonzalez, *Cálculo Y Selección Del Tanque Hidroneumático Para El Abastecimiento De Agua Potable Al Hospital Cundallini*, in *Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica*. 2009, Instituto Politécnico Nacional: Unidad Profesional Azcapotzalco.

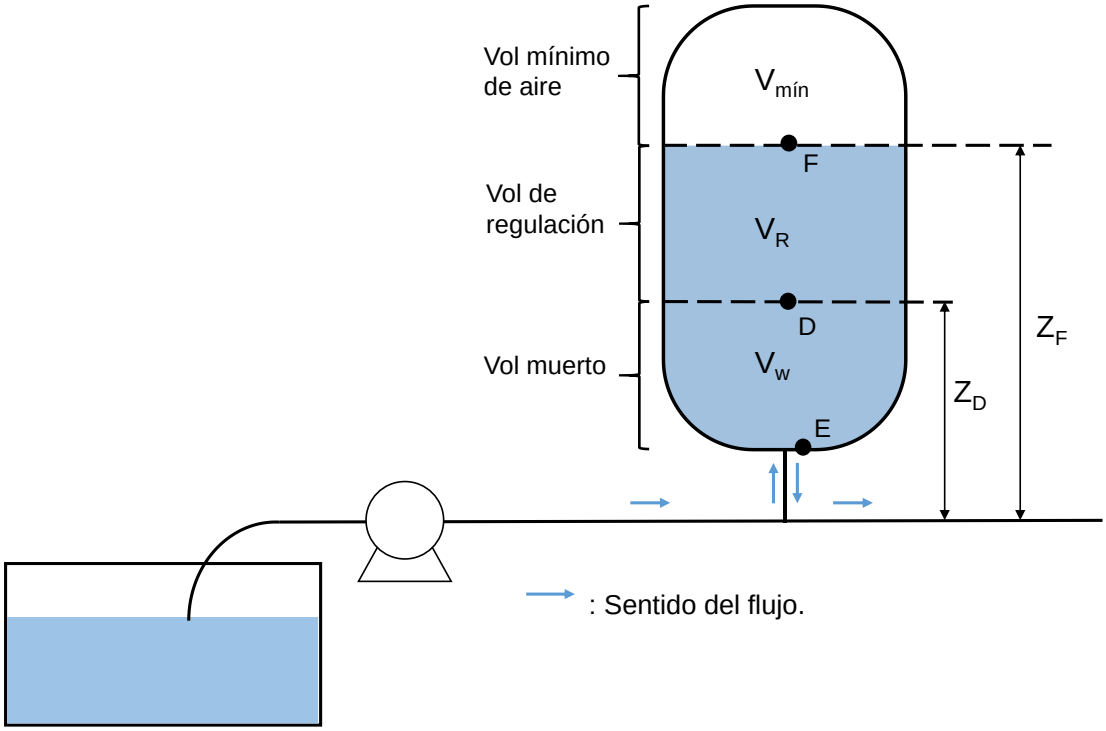
19. Treddinick, S., *Variable Speed Pumping: How Low Can You Go.* Affiliated Engineers Inc. District Energy, Third Quarter, 2006.

# 9. ANEXOS

# A. ANEXO 1: DEDUCCIÓN DE LAS ECUACIONES PARA UN ESTANQUE HIDRONEUMÁTICO

En el siguiente anexo se mostrarán las deducciones para el cálculo del volumen total del estanque hidroneumático, sintetizada en la ecuación (2.4).

Figura 9.1 - Diagrama de estanque hidroneumático




Sea el volumen total ($V_T$):

$$V_T = V_R + V_{mín} + V_w \quad \text{(A.1)}$$

Donde las variables son:

- $V_T$ Volumen total en el estanque hidroneumático [$m^3$].
- $V_R$ Volumen de regulación de agua en el estanque hidroneumático [$m^3$].
- $V_{mín}$ Volumen mínimo de aire en el estanque hidroneumático [$m^3$].
- $V_w$ Volumen muerto de agua en el estanque hidroneumático [$m^3$].

Y asumiendo un proceso isotérmico (P*V= cte) y sean:

$$\frac{P_D}{\gamma} = H_D - Z_D \quad \text{(A.2)}$$

$$\frac{P_F}{\gamma} = H_F - Z_F \quad \text{(A.3)}$$

Donde las variables son:

$P_D$ Presión relativa en el punto D en [N/m$^2$].

$P_F$ Presión relativa en el punto F en [N/m$^2$].

$H_D$ Cota piezométrica en el punto D en [mca].

$H_F$ Cota piezométrica en el punto F en [mca].

$Z_D$ Cota topográfica en el punto D en [m].

$Z_F$ Cota topográfica en el punto F en [m]

$\gamma$ Peso específico del agua en [N/m$^3$].

Como es un proceso isotérmico, el gas comprimido al nivel del punto F multiplicado por su presión absoluta en dicho punto, debe ser igual al gas sin comprimir en el punto D.

$$P_{aD} * (V_R + V_{mín}) = P_{aF} * V_{mín} \quad \text{(A.4)}$$

Donde las variables son:

$P_{aD}$ Presión absoluta en el punto D en [N/m$^2$].

$P_{aF}$ Presión absoluta en el punto F en [N/m$^2$].

Ajustando la ecuación (A.4):

$$V_{mín} = \frac{P_{aD}}{P_{aF} - P_{aD}} * V_R \quad \text{(A.5)}$$

Y sean las siguientes igualdades:

$$P_{aD} = P_D + P_{atm} \quad \text{(A.6)}$$

$$P_{aF} = P_F + P_{atm} \quad \text{(A.7)}$$

Donde las variables son:

$P_{atm}$ Presión atmosférica.

$P_{aD}$ Presión absoluta en el punto D en [N/m$^2$].

$P_{aF}$ Presión absoluta en el punto F en [N/m$^2$].

Reemplazando las ecuaciones (A.2), (A.3), (A.6) y (A.7) en la ecuación (A.5), y trabajando un poco el álgebra, se puede llegar a la siguiente ecuación:

$$V_{mín} = \frac{(H_D - Z_D) + \frac{P_{atm}}{\gamma}}{(H_F - H_D) - (Z_F - Z_D)} * V_R \tag{A.8}$$

Con esta variable despejada, se procede a reemplazar el Vmín en la ecuación (A.1):

$$V_T = \left[\frac{(H_F - Z_F) + \frac{P_{atm}}{\gamma}}{(H_F - H_D) - (Z_F - Z_D)}\right] * V_R + V_w \tag{A.9}$$

Luego dado que los puntos D y F representan la ventana de presión en que será presurizado el estanque hidroneumático, si el estanque es presurizado a la presión absoluta del punto D el volumen necesario de agua muerta ($V_w$) se haría cero, por lo tanto la ecuación (A.9) se reduciría a:

$$V_T = \left[\frac{P_F + P_{atm}}{P_F - P_D}\right] * V_R \tag{A.10}$$

Esta es la clásica ecuación para el estanque hidroneumático que se puede encontrar en la literatura [8] y que se representa en la ecuación (2.4).

Si el estanque hidroneumático no es presurizado, es decir, se asume que se la presión absoluta en el punto E es la presión atmosférica, se puede decir entonces:

$$P_{aE} * V_T = P_{aD} * (V_{mín} + V_R) \tag{A.11}$$

Donde las variables son:

$P_{aE}$ Presión absoluta en el punto E en [N/m$^2$].

Dejando la ecuación anterior en términos del volumen muerto y el volumen total:

$$P_{aE} * V_T = P_{aD} * (V_T - V_w) \tag{A.12}$$

Reemplazando la ecuación (A.2) y (A.6) en la ecuación (A.12), se puede llegar a la siguiente igualdad:

$$V_w = \frac{(H_D - Z_D)\gamma}{(H_D - Z_D)\gamma + P_{atm}} * V_T \tag{A.13}$$

Finalmente reemplazando la ecuación (A.13) en la ecuación (A.9) se obtiene:

$$V_T = \frac{\left(H_F - Z_F + \frac{P_{atm}}{\gamma}\right) * \left(H_D - Z_D + \frac{P_{atm}}{\gamma}\right)}{\frac{P_{atm}}{\gamma} * [(H_F - H_D) - (Z_F - Z_D)]} * V_R \quad \text{(A.14)}$$

Siendo esta la ecuación para un estanque hidroneumático no presurizado agua-aire.

# B. ANEXO 2: RECOMENDACIONES Y POSIBLES PROBLEMAS EN EL DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO CON VARIADOR DE FRECUENCIA JUNTO A UN ESTANQUE HIDRONEUMÁTICO

## B.1. CARACTERÍSTICAS DE LA RED DE AGUA POTABLE

El estudio de la red de agua potable (AP) se debe realizar a través de la Curva Característica de la Tubería (CCT).

Dependiendo del escenario que se desea a estudiar: alta presión, baja presión o alguna presión intermedia, se deben ubicar los puntos físicos de la red que generen la peor condición para dichos escenarios. Se analizarán dos casos extremos: altas y bajas perdidas de energía. En cada uno de estos dos casos, se analizarán los puntos de funcionamiento generados, en una primera aproximación. Se citan los siguientes dos puntos de funcionamiento, los cuales fueron definidos en el numeral 4.1.1:

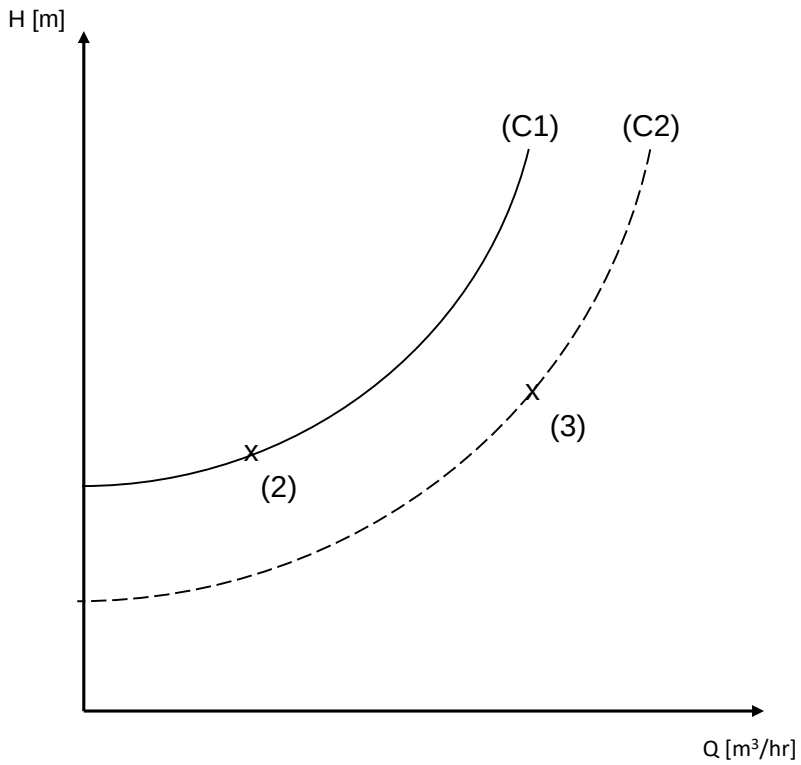
5) Caudal máximo horario (Qmáxh): se forma el segundo punto de funcionamiento del sistema con el caudal máximo horario de la población y la presión dinámica requerida para el arranque más desfavorable en la red, tal que se obtenga una presión residual mínima de 15 [mca]. Este punto de funcionamiento puede ser proveído por la empresa sanitaria en algunas ocasiones.
6) Caudal coincidente (Qinc): se forma el tercer punto de funcionamiento del sistema con el caudal de incendio[4] más el caudal máximo diario (Qmáxd) y la presión dinámica requerida para el grifo más desfavorable en la red, tal que se obtenga una presión residual mínima de 5 [mca]. Este punto de funcionamiento puede ser proveído por la empresa sanitaria en algunas ocasiones.

### B.1.1. Red AP con altas y bajas pérdidas de energía

Cuando las pérdidas en la red son altas, se produce que el punto de funcionamiento (2) quede muy por debajo del punto de funcionamiento (3) y por tanto la sobredimensión en el caudal demandado por la población debido al evento de incendio puede dificultar el diseño.

[4] El caudal de un grifo son 16 L/s y el número de grifos en operación simultánea sea determina según la tabla 1 de la NCh691:2015).

Figura 9.2 - Curva característica del sistema para red con altas pérdidas y puntos de funcionamiento (2) y (3)




C1: Curva característica del sistema para alcanzar una presión de 15 [mca].

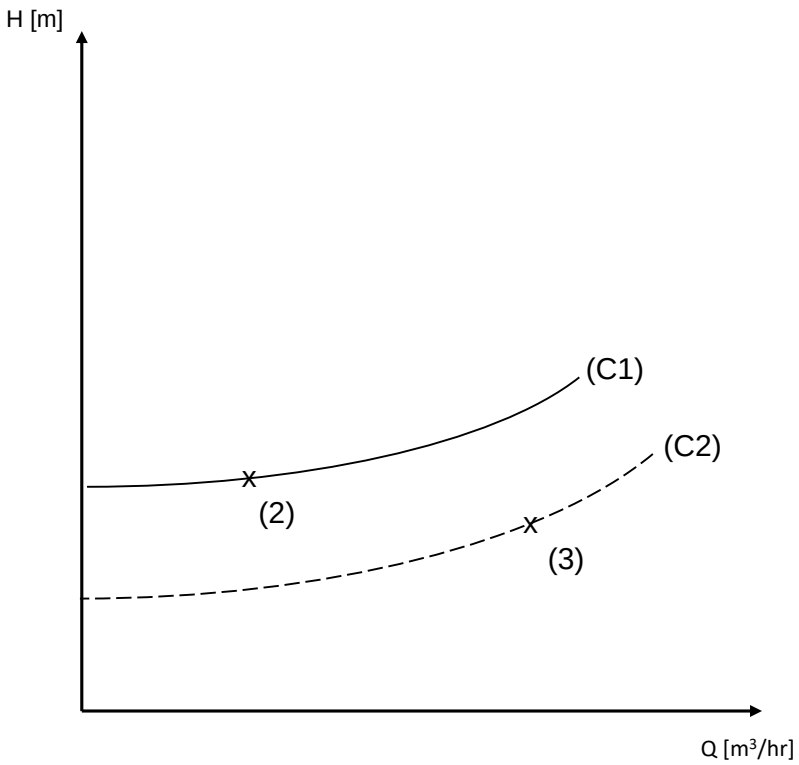
C2: Curva característica del sistema para alcanzar una presión de 5 [mca].

Como se observa el punto (3) es el que domina el diseño al presentar las mayores demandas de caudal y presión, sin embargo, dicho caso ocurre rara vez (evento de incendio) y la demanda de la población se ubicará bajo el punto (2) la mayoría del tiempo.

El problema se genera para los caudales bajos, el caudal podría inclusive ser nulo durante la noche, por cuanto el sistema de presurización debe ser capaz de suplir para todo el rango de caudales entre casi cero y el punto de funcionamiento (3).

Cuando las pérdidas en la red son bajas, se produce que el punto de funcionamiento (2) no quede por debajo del punto de funcionamiento (3) y por tanto la sobredimensión en el caudal demandado por la población debido al evento de incendio no dificulta el diseño, inclusive una misma curva de bomba podría cumplir para ambos puntos de funcionamiento.

Figura 9.3 - Curva característica del sistema para red con altas pérdidas y puntos de funcionamiento (2) y (3)




C1: Curva característica del sistema para alcanzar una presión de 15 [mca].

C2: Curva característica del sistema para alcanzar una presión de 5 [mca].

Como se observa no es claro el punto que domina el diseño ya que si bien, el punto (2) demanda una mayor presión, el punto (3) demanda un mayor caudal.

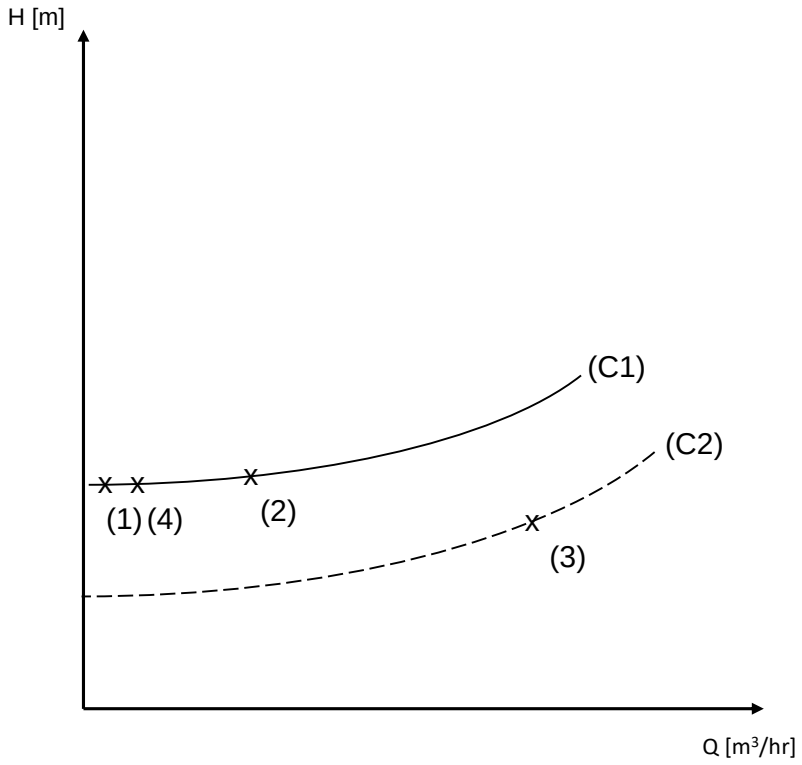
### B.1.2. Curva característica del sistema y puntos de funcionamiento

En las siguientes figuras se podrán ver los puntos de funcionamiento del sistema junto a la curva característica de la red de manera cualitativa.

Es importante notar que no siempre se podrá obtener la curva característica del sistema, en algunos casos sólo se tendrán los puntos y se deberá trabajar en base a estos.

Los puntos de funcionamiento a los que se hace mención en las siguientes figuras son los mencionados en el punto 4.1.1.

Figura 9.4 - Curva característica del sistema para red con bajas pérdidas y puntos de funcionamiento



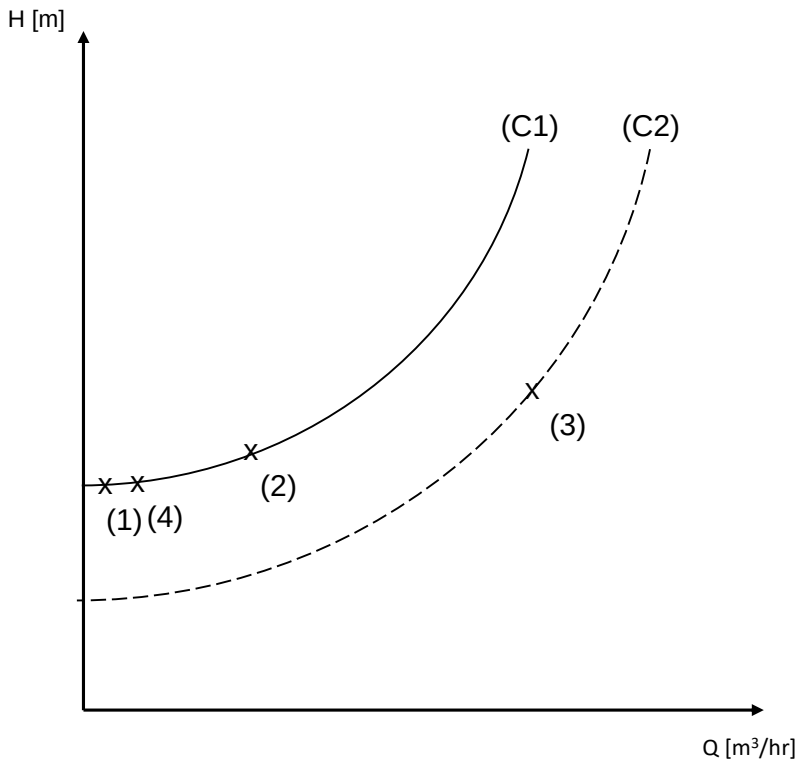

C1: Curva característica del sistema para alcanzar una presión de 15 [mca].

C2: Curva característica del sistema para alcanzar una presión de 5 [mca].

Como se advierte en la Figura 9.4, cuando las pérdidas en la red son bajas no es claro cuál es el punto dominante para la elección de la bomba. El punto (2) demanda una mayor presión, sin embargo, el punto (3) demanda un mayor caudal. Lo recomendado en estos casos es elegir la curva de una bomba y contrastarla con los puntos de funcionamiento.

En algunas ocasiones podría ocurrir que la misma curva de una bomba sirva tanto para el punto (2) y (3).

Figura 9.5 - Curva característica del sistema para red con altas pérdidas y puntos de funcionamiento




C1: Curva característica del sistema para alcanzar una presión de 15 [mca].

C2: Curva característica del sistema para alcanzar una presión de 5 [mca].

Como se advierte en la Figura 9.5, cuando las pérdidas en la red son altas el mayor valor de presión y caudal es solicitado por el punto (3), en estos casos es claro cuál punto es dominante en el diseño para la bomba.

## B.1.3. Restricciones por presión

### *B.1.3.1. Límites de presión*

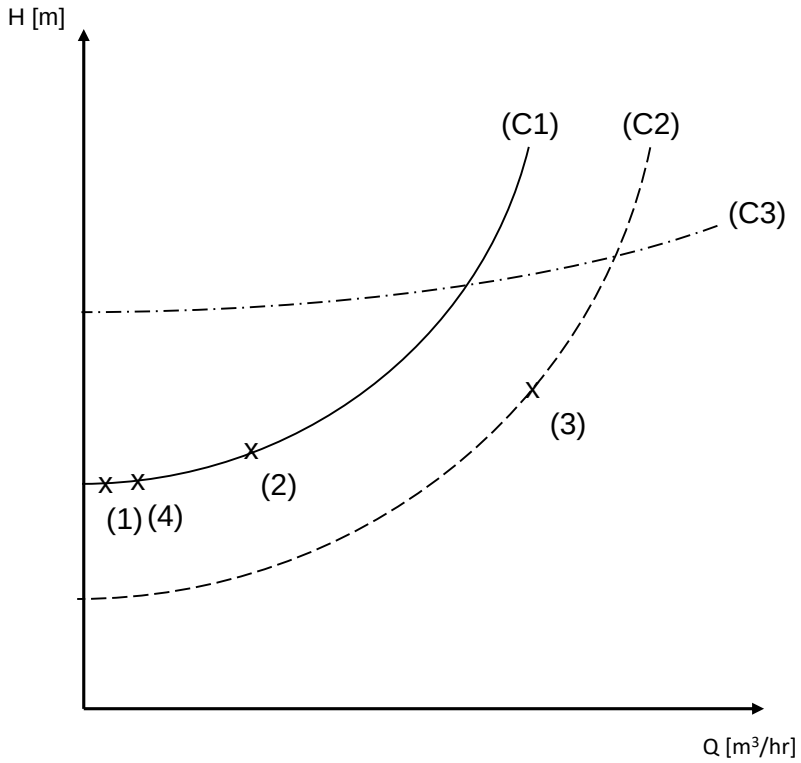
Los límites de presión máxima y mínima son los estipulados en la NCh 691 Of.2015, en consecuencia, lo que se deberá ajustar a la topografía del sector es la presión entregada por el equipo de bombeo. Se debe tener cuidado de no sobrepasar el límite máximo actual de la normativa (70 [mca]) y a su vez estar por sobre el límite mínimo actual de la normativa (15 [mca]).

Para la presión máxima se deberá ubicar el arranque que necesite la menor altura dinámica y por tanto sea más susceptible a una alta presión.

Para la presión mínima se deberá ubicar el arranque que necesite la mayor altura dinámica y por tanto sea más susceptible a una baja presión.

Las restricciones por presión se podrían visualizar de dos maneras:

Figura 9.6 - Restricciones por presión utilizando la curva característica del sistema




C1: Curva característica del sistema para alcanzar una presión de 15 [mca].

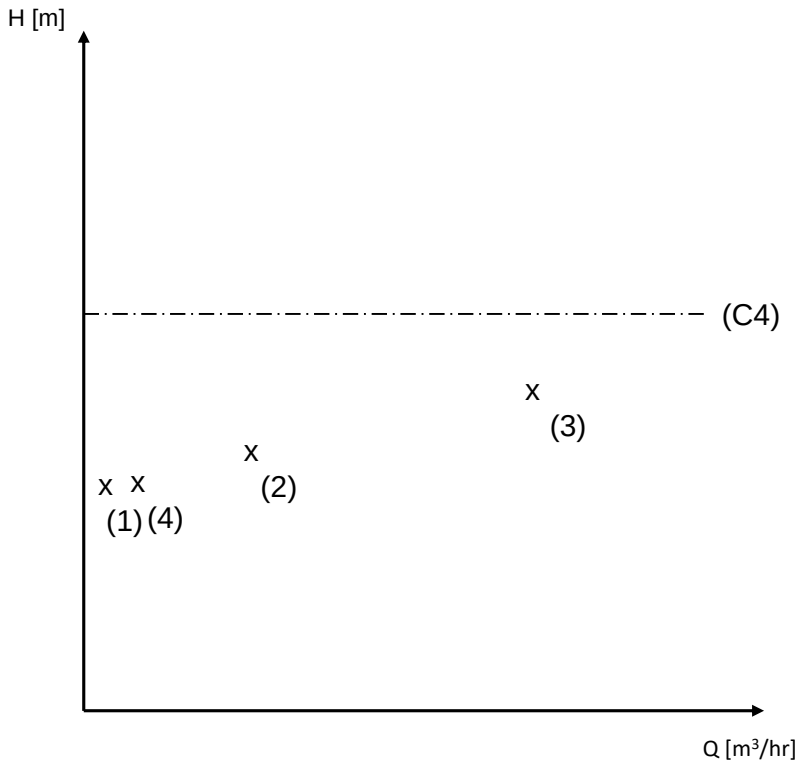
C2: Curva característica del sistema para alcanzar una presión de 5 [mca].

C3: Curva característica del sistema para alcanzar una presión de 70 [mca] en el punto más desfavorable.

En estos casos como son conocidas las características de la red es posible graficar la curva característica del sistema para el punto más desfavorable de la red (C3), este corresponde al arranque que requiere la menor altura dinámica, es decir, tenga una menor pérdida (menor pendiente de la curva) y menor cota respecto al equipo de bombeo (altura de la curva).

Cuando no son conocidas las características de la red, pero son entregados los puntos de funcionamiento el análisis se puede realizar de la siguiente manera el análisis de la presión máxima admisible.

Figura 9.7 - Restricciones por presión sin curva característica del sistema y utilizando los puntos de funcionamiento




C4: Presión de 70 [mca] en el punto más desfavorable.

Los puntos de funcionamiento se mantienen, pero no es posible construir la curva característica del sistema debido a la falta de datos, por tanto a partir de la información provista se traza la máxima presión a la que pueden impulsar las bombas en la curva (C4).

Se recomienda utilizar el enfoque más conservador de la Figura 9.7, excepto en los casos que se tenga una absoluta certeza de las características de la red.

### *B.1.3.2. Presión aguas arriba del equipo de bombeo*

En algunos casos los equipos de bombeo se encontrarán conectados de manera directa a la red, esto se traduce en que la altura relativa a impulsar por las bombas se verá reducida,

comparado a que tuviesen que impulsar desde un estanque (equivalente a una presión nula en la red aguas arriba de las bombas).

Esto es un factor a tener en cuenta en la elección del equipo de bombeo debido a que modificará la curva característica del sistema (desplazándola hacía el eje “x”).

La solución a este problema depende de los datos disponibles:

- Cuando se dispone de las características de la red se debe verificar que la curva de la bomba a la mínima frecuencia de funcionamiento es capaz de alcanzar los puntos de funcionamientos y no entregue una excesiva sobrepresión.
- Cuando se dispone de los puntos de funcionamiento entregados por la sanitaria o el mandante, estos deberán identificar claramente los escenarios que se desean cumplir junto a sus respectivas presiones requeridas aguas arriba y aguas abajo del equipo de bombeo.

### B.1.4. Máximas partidas por hora

Las máximas partidas por hora permitidas para las bombas depende de la inercia del motor, parámetros que tienen una relación inversamente proporcional, es decir, a una mayor inercia (bombas más grandes) menor es la cantidad máxima de partidas por hora permitida.

La NEMA (National Electrical Manufacturers Association) en su publicación estándar MG 10 [11] entrega una tabla con las máximas partidas por hora permitidas de acuerdo a la potencia del motor en HP (Horse Power), sin embargo, es preferible siempre utilizar las recomendaciones del fabricante de la bomba cuando estas existan.

En la siguiente tabla se detallan las partidas por hora permitidas para ciertos modelos de bombas de dos marcas utilizadas actualmente por las empresas sanitarias en Chile:

*Tabla 9.1 - Partidas por hora para distintos modelos de bombas (marcas KSB y Grundfos)*

| Marca | Tipo de bomba | Modelo | Partidas/Hora* | | Partidas/Día* | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Máx | Mín | Máx | Mín |
| KSB | Electrobomba monoetapa o multietapa sumergible (pozo profundo) | UPA | 20 | 5 | n/i | n/i |
| KSB | Bomba monobloc monoetapa de voluta | Etabloc | 15 | 6 | n/i | n/i |
| KSB | Bomba in-line vertical monobloc | Etaline-R | 15 | - | n/i | n/i |
| KSB | Bomba monobloc monoetapa de voluta | Etanorm | 15 | 6 | n/i | n/i |
| KSB | Bomba centrífuga vertical de alta presión | Movitec | 25 | 15 | n/i | n/i |
| KSB | Bomba centrífuga multicelular | Multitec | 20 | 5 | n/i | n/i |
| Grundfos | Bomba centrífuga multicelular vertical | CR/CRN/CRT/ CRE/CRNE | 250 | 50 | n/i | n/i |
| Grundfos | Electrobomba sumergible para pozos | SP | 100 | 2 | 300 | 15 |

n/i: no informado

* Los valores informados se obtuvieron de los catálogos oficiales publicados por las respectivas empresas a febrero de 2017.

Este parámetro es determinante en el tamaño final del hidroneumático debido a que una mayor cantidad de partidas por hora exige un menor tiempo de funcionamiento del hidroneumático, en consecuencia, un menor volumen total.

### B.1.5. Ventana de presión para estanque hidroneumático

La explicación para la ventana de presión fue indicada en el punto 4.1.3, no obstante, se ahonda un poco más en los límites que se podrían encontrar al valor mínimo y máximo de las presiones del estanque hidroneumático.

#### *B.1.5.1. Criterios de diseño para presión mínima (Pb)*

La presión mínima a entregar por el estanque hidroneumático debe ser igual o superior a la mínima presión admisible en la red para el caudal mínimo de la bomba. Se debe cumplir el punto de funcionamiento (4) explicado en el apartado 4.1.1 Puntos de funcionamiento del sistema.

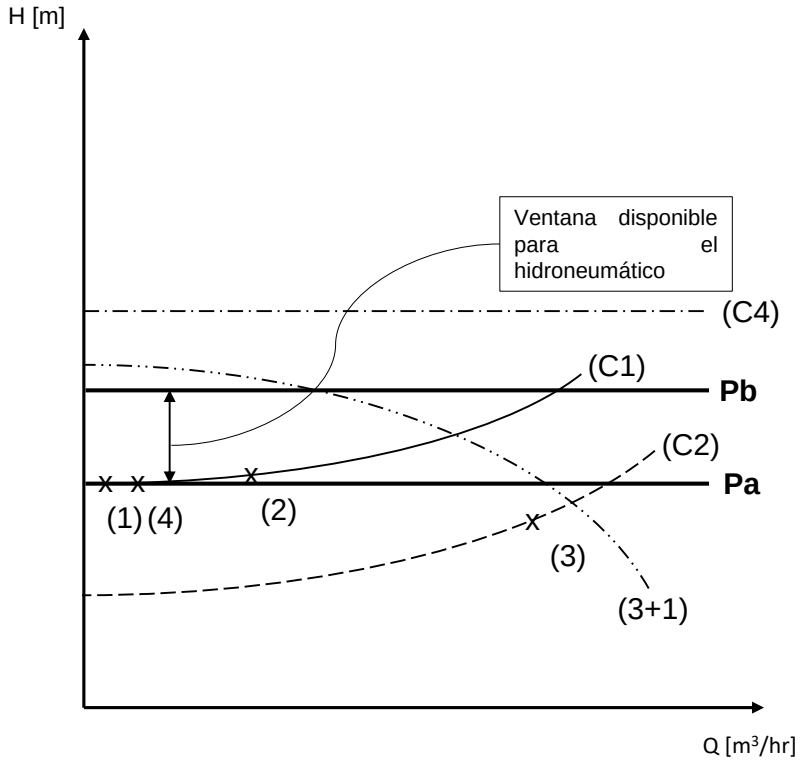
### *B.1.5.2. Criterios de diseño para presión máxima (Pa)*

El límite para la presión máxima del sistema se debe determinar a partir del menor valor de los siguientes casos:

1) La normativa chilena actual establece un límite de presión máxima de 70 [mca] en la red. Se debe ubicar el punto de la red más desfavorable para la presión máxima.
2) La presión máxima que entregan las bombas puede ser menor que la máxima presión admisible por el sistema, en estos casos, la máxima presión de presurización del estanque hidroneumático se encontrará limitado por el equipo de bombeo. Esto tiene más posibilidades de ocurrencia en redes con bajas pérdidas.

En la siguiente figura se representan los criterios para la presión máxima explicados anteriormente.

Figura 9.8 - Banda de presión máxima y mínima para el estanque hidroneumático, en una red con bajar pérdidas




C1: Curva característica del sistema para alcanzar una presión de 15 [mca].

C2: Curva característica del sistema para alcanzar una presión de 5 [mca].

C4: Presión de 70 [mca] en el punto más desfavorable.

(xx+1): Curva de la bomba analizada en configuración x+1.

Pb: máxima presión del estanque hidroneumático.

Pa: mínima presión del estanque hidroneumático.

Se observa que el punto (4) corresponde al punto de la mínima presión que debe entregar el estanque hidroneumático ($P_a$), a su vez se observa que la presión máxima entregada por las bombas es menor que la presión máxima admisible por la red (C4), por tanto en estos casos es imposible superar dicho límite.

# C. ANEXO 3: DISEÑO DE MODELOS HIDRÁULICOS COMPUTACIONAL

## C.1. PUNTOS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA PARA MODELOS HIDRÁULICOS

Se procede a indicar en la Tabla 9.2, Tabla 9.3 y Tabla 9.4 los puntos de funcionamiento del sistema para los modelos, según se explicó en el punto 4.1, con base en lo indicado en el punto 4.2.

*Tabla 9.2 - Puntos de funcionamiento para la Bomba tipo 1*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Puntos de Funcionamiento | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Qmínb | | Qmáxh | | Qcoinc | |
| | | Q [L/s] | H [m] | Q [L/s] | H [m] | Q [L/s] | H [m] |
| 1 | B1-Q1-BP-VF | 0.77 | 50.01 | 11.39 | 51.89 | 21.47 | 41.28 |
| 2 | B1-Q1-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | | |
| 2.1 | B1-Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | |
| 2.2 | B1-Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | |
| 2.3 | B1-Q1-BP-VF+HT-Qm | | | | | | |
| 3 | B1-Q1-AP-VF | 0.57 | 50.04 | 11.39 | 61.01 | 21.47 | 71.32 |
| 4 | B1-Q1-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | | |
| 4.1 | B1-Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | |
| 4.2 | B1-Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | |
| 4.3 | B1-Q1-AP-VF+HT-Qm | | | | | | |
| 5 | B1-Q2-BP-VF | 0.61 | 50.01 | 24.49 | 58.06 | 26.67 | 44.47 |
| 6 | B1-Q2-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | | |
| 6.1 | B1-Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | |
| 6.2 | B1-Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | |
| 6.3 | B1-Q2-BP-VF+HT-Qm | | | | | | |
| 7 | B1-Q2-AP-VF | 0.49 | 50.03 | 24.49 | 96.55 | 26.67 | 89.63 |
| 8 | B1-Q2-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | | |
| 8.1 | B1-Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | |
| 8.2 | B1-Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | |
| 8.3 | B1-Q2-AP-VF+HT-Qm | | | | | | |

*Tabla 9.3 - Puntos de funcionamiento para la Bomba tipo 2*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Puntos de Funcionamiento | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Qmínb | | Qmáxh | | Qcoinc | |
| | | Q [L/s] | H [m] | Q [L/s] | H [m] | Q [L/s] | H [m] |
| 1 | B2-Q1-BP-VF | 0.37 | 50.00 | 11.39 | 51.89 | 21.47 | 41.28 |
| 2 | B2-Q1-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | | |
| 2.1 | B2-Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | |
| 2.2 | B2-Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | |
| 2.3 | B2-Q1-BP-VF+HT-Qm | | | | | | |
| 3 | B2-Q1-AP-VF | 0.34 | 50.02 | 11.39 | 61.01 | 21.47 | 71.32 |
| 4 | B2-Q1-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | | |
| 4.1 | B2-Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | |
| 4.2 | B2-Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | |
| 4.3 | B2-Q1-AP-VF+HT-Qm | | | | | | |
| 5 | B2-Q2-BP-VF | 0.61 | 50.01 | 24.49 | 58.06 | 26.67 | 44.47 |
| 6 | B2-Q2-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | | |
| 6.1 | B2-Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | |
| 6.2 | B2-Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | |
| 6.3 | B2-Q2-BP-VF+HT-Qm | | | | | | |
| 7 | B2-Q2-AP-VF | 0.53 | 50.04 | 24.49 | 96.55 | 26.67 | 89.63 |
| 8 | B2-Q2-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | | |
| 8.1 | B2-Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | |
| 8.2 | B2-Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | |
| 8.3 | B2-Q2-AP-VF+HT-Qm | | | | | | |

*Tabla 9.4 - Puntos de funcionamiento para la Bomba tipo 3*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Puntos de Funcionamiento | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Qmínb | | Qmáxh | | Qcoinc | |
| | | Q [L/s] | H [m] | Q [L/s] | H [m] | Q [L/s] | H [m] |
| 1 | B1-Q1-BP-VF | 1.09 | 50.02 | 11.39 | 51.89 | 21.47 | 41.28 |
| 2 | B1-Q1-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | | |
| 2.1 | B1-Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | |
| 2.2 | B1-Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | |
| 2.3 | B1-Q1-BP-VF+HT-Qm | | | | | | |
| 3 | B1-Q1-AP-VF | 2.00 | 50.42 | 11.39 | 61.01 | 21.47 | 71.32 |
| 4 | B1-Q1-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | | |
| 4.1 | B1-Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | |
| 4.2 | B1-Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | |
| 4.3 | B1-Q1-AP-VF+HT-Qm | | | | | | |
| 5 | B1-Q2-BP-VF | 1.99 | 50.07 | 24.49 | 58.06 | 26.67 | 44.47 |
| 6 | B1-Q2-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | | |
| 6.1 | B1-Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | |
| 6.2 | B1-Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | |
| 6.3 | B1-Q2-BP-VF+HT-Qm | | | | | | |
| 7 | B1-Q2-AP-VF | 1.75 | 50.33 | 24.49 | 96.55 | 26.67 | 89.63 |
| 8 | B1-Q2-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | | |
| 8.1 | B1-Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | |
| 8.2 | B1-Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | |
| 8.3 | B1-Q2-AP-VF+HT-Qm | | | | | | |

Se observa que los puntos de funcionamiento para el Qmáxh y el Qcoinc son iguales para los tres tipos de bombas, esto se debe a que dichos puntos corresponde a las características de

la red y no a la bomba empleada, no así, para el Qmínb, variable en la que si es determinante el caudal mínimo que puede entregar la bomba.

A manera de ejemplo se ilustrarán los puntos de funcionamiento para los modelos: B1-Q1-BP-VF y B1-Q1-AP-VF.

Figura 9.9 - Puntos de funcionamiento para el modelo B1-Q1-BP-VF

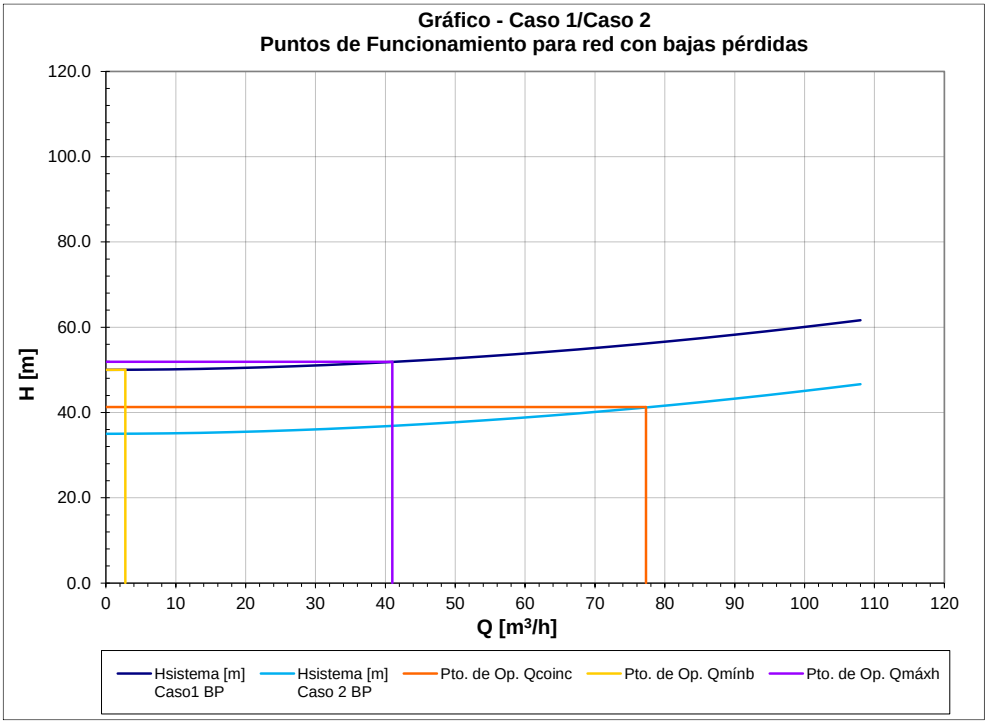
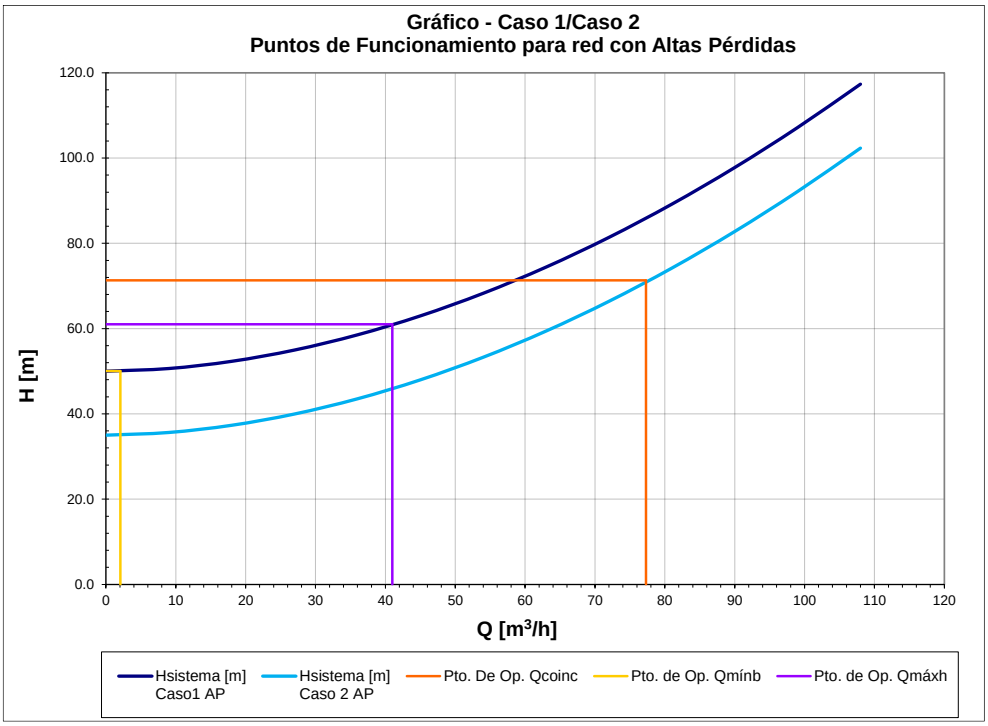


Figura 9.10 - Puntos de funcionamiento para el modelo B1-Q1-AP-VF




Se observa que tanto en las tablas como en los gráficos, no es informado el caudal mínimo de demanda de la población (Qmín). Esto se debe a que el Qmín debe ser menor al Qmínb por para que tenga sentido implementar un estanque hidroneumático.

Los gráficos de los puntos de funcionamiento para los otros modelos son análogos a lo presentado en la Figura 9.9 y Figura 9.10.

## C.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO PARA MODELOS HIDRÁULICOS

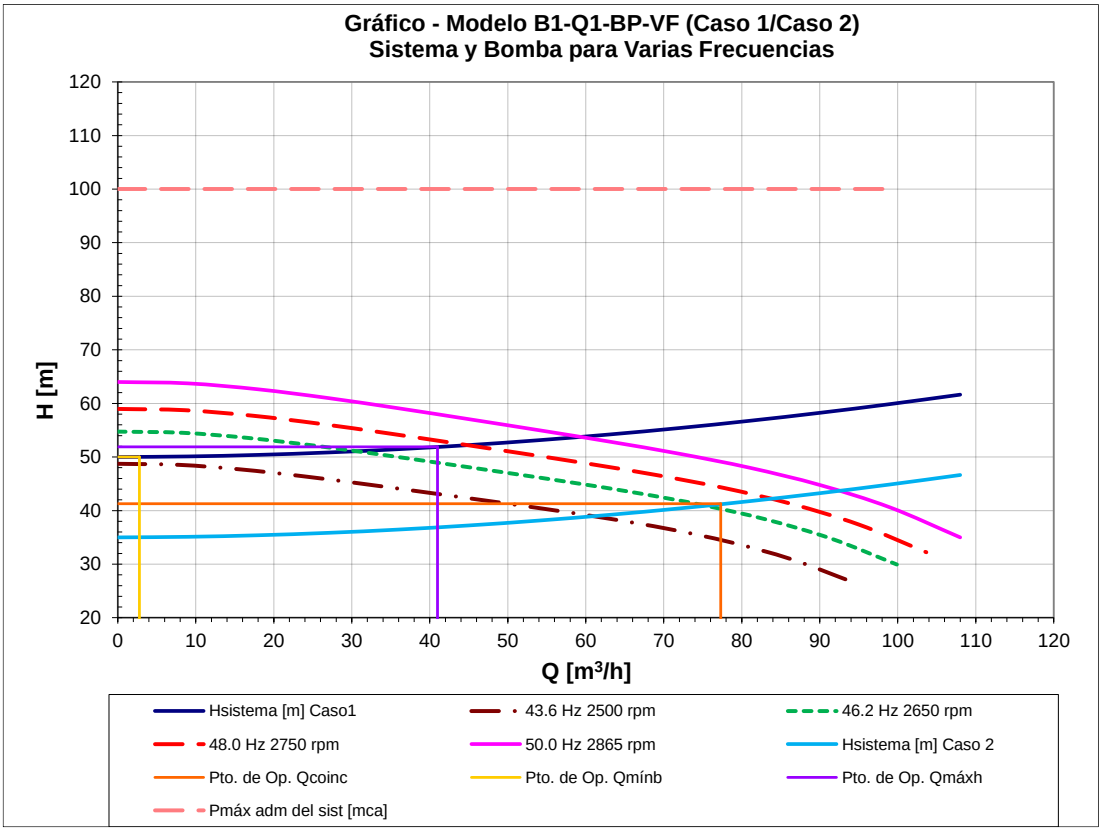
### C.2.1. Análisis de la selección del equipo de bombeo

Se presentan sólo las gráficas para los modelos de la bomba tipo 1, debido a que el análisis para los otros modelos de bombas es análogo. De igual manera se deben tener algunas consideraciones en cuenta que son comunes a todas las gráficas:

- La gráfica de las bombas corresponde a una configuración 3+1. De manera de minimizar el volumen del estanque hidroneumático.
- La presión máxima admisible es única para todos los modelos (altas y bajas pérdidas). Se decidió emplear un valor alto para asegurar que en todos los modelos exista una solución física.

- El caso 1 corresponde a la curva del sistema para que en la red exista una presión residual de 15 [mca]. Análogamente, la curva para el caso 2 corresponde a una tal que en la red existe una sobrepresión de 5 [mca].

Figura 9.11 – Modelo B1-Q1-BP-VF (Caso 1 y Caso 2): Curva del sistema y bombas para varias frecuencias (3 bombas)



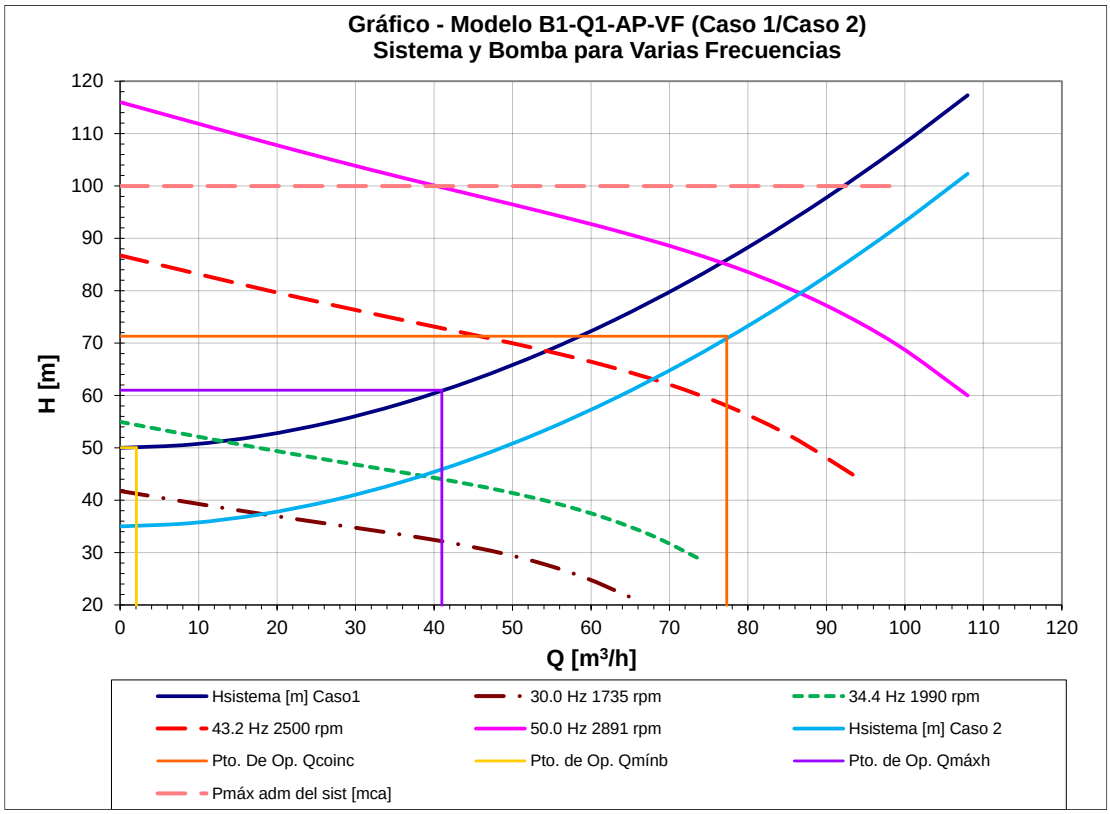

Se observa en la Figura 9.11 que no es claro el punto de funcionamiento dominante en la elección del equipo de bombeo, por lo que se deben probar distintas curvas de bombas que sean capaces de satisfacer ambos puntos de operación.

Además en la presente figura se observa:

- Se define la frecuencia mínima de funcionamiento de la bomba (curva verde a 46.2 [Hz]) de manera tal que la presión entregada por la bomba quede aproximadamente 4.5 [m] sobre el punto de funcionamiento para el Qmínb, esto se realiza a manera de tener un margen de seguridad para que la bomba no bata cuando llegue a su mínimo caudal.

- Debido a que la presión entregada por la bomba no rebasa el límite de presión máxima, no existe alguna reserva con la presión objetivo a recomendar para el equipo de bombeo.

Figura 9.12 - Modelo B1-Q1-AP-VF (Caso 1 y Caso 2): Curva del sistema y bombas para varias frecuencias (3 bombas)

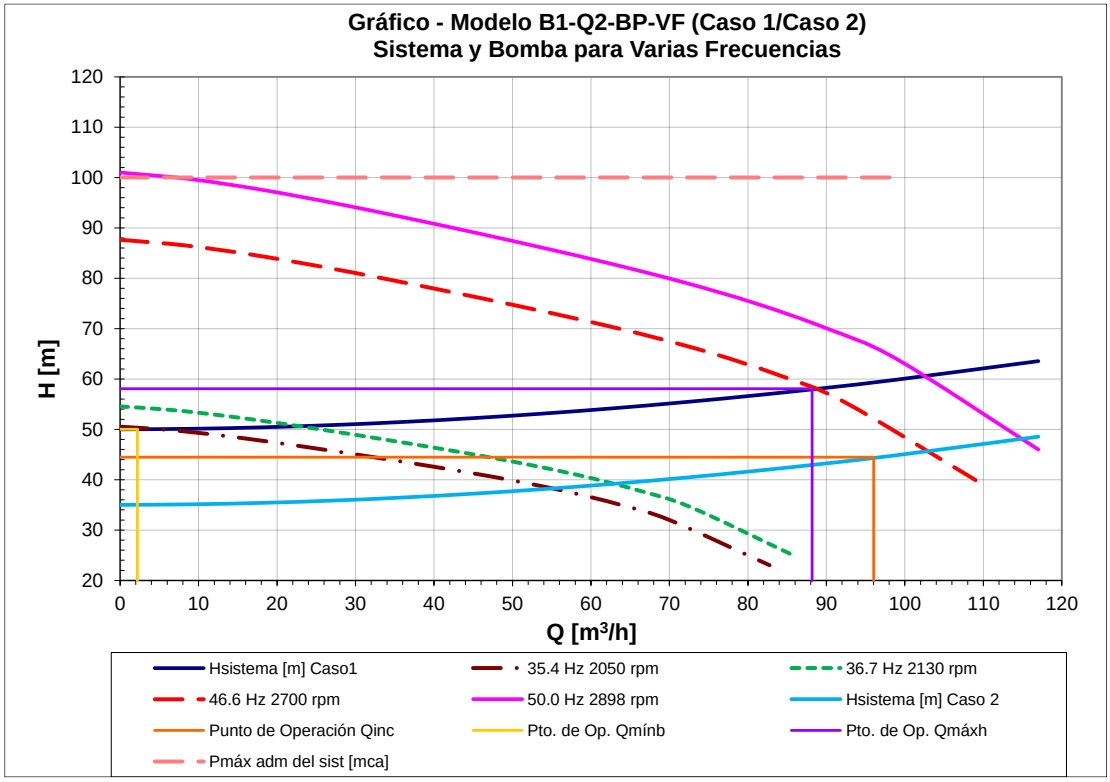



Se observa en la Figura 9.12 claramente que el punto de funcionamiento dominante en la elección del equipo de bombeo es para el caudal coincidente.

Además en la presente figura se observa:

- Se define la frecuencia mínima de funcionamiento de la bomba (curva verde a 34.4 [Hz]) de manera tal que la presión entregada por la bomba quede aproximadamente 4.5 [m] sobre el punto de funcionamiento para el Qmínb, esto se realiza a manera de tener un margen de seguridad para que la bomba no bata cuando llegue a su mínimo caudal.
- Debido a que la presión entregada por la bomba rebasa el límite de presión máxima, se debe tener alguna reserva en la presión objetivo (consigna) a recomendar para el equipo de bombeo.

Figura 9.13 - Modelo B1-Q2-BP-VF (Caso 1 y Caso 2): Curva del sistema y bombas para varias frecuencias (3 bombas)

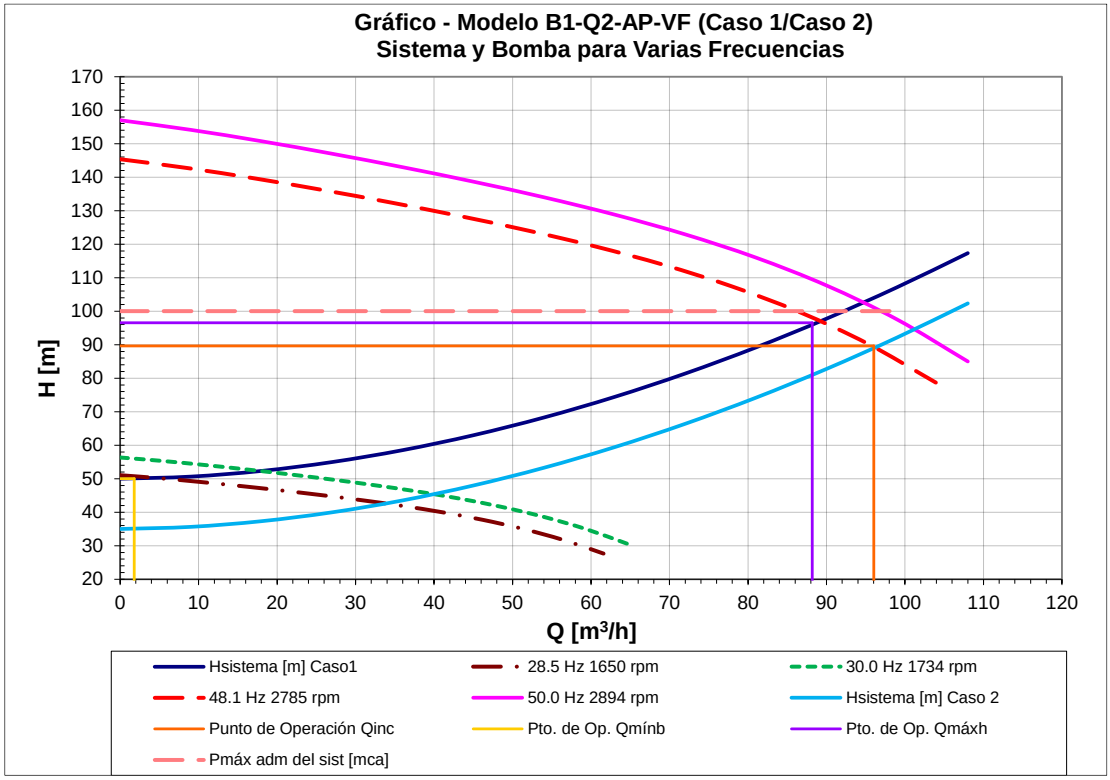



Se observa en la Figura 9.13 que no es claro el punto de funcionamiento dominante en la elección del equipo de bombeo, por lo que se deben probar distintas curvas de bombas que sean capaces de satisfacer ambos puntos de operación.

Además en la presente figura se observa:

- Se define la frecuencia mínima de funcionamiento de la bomba (curva verde a 36.7 [Hz]) de manera tal que la presión entregada por la bomba quede aproximadamente 4.5 [m] sobre el punto de funcionamiento para el Qmínb, esto se realiza a manera de tener un margen de seguridad para que la bomba no bata cuando llegue a su mínimo caudal.
- Debido a que la presión entregada por la bomba esta justo en el límite de presión máxima, no existe alguna reserva con la presión objetivo a recomendar para el equipo de bombeo.
- Se observa que para el caudal Q2, la diferencia entre el Qmáxh y el Qcoinc es bastante estrecha, por lo que sería natural pensar que no se hace necesario un estanque hidroneumático.

Figura 9.14 - Modelo B1-Q2-AP-VF (Caso 1 y Caso 2): Curva del sistema y bombas para varias frecuencias (3 bombas)




Se observa en la Figura 9.14 que no es claro el punto de funcionamiento dominante en la elección del equipo de bombeo, por lo que se deben probar distintas curvas de bombas que sean capaces de satisfacer ambos puntos de operación.

Además en la presente figura se observa:

- Se define la frecuencia mínima de funcionamiento de la bomba (curva verde a 30.0 [Hz]) de manera tal que la presión entregada por la bomba quede aproximadamente 6.3 [m] sobre el punto de funcionamiento para el Qmínb, esto se realiza a manera de tener un margen de seguridad para que la bomba no bata cuando llegue a su mínimo caudal y además porque no se recomienda descender la frecuencia más allá de este valor límite (30 [Hz]), no obstante, algunos fabricantes permiten menores frecuencias de funcionamiento sin comprometer el funcionamiento del equipo.
- Debido a que la presión entregada por la bomba podría rebasar el límite de presión máxima, en este caso lo hace por un amplio margen, se debe tener precaución con la presión objetivo a recomendar para el equipo de bombeo.

- Se observa que para el caudal Q2, la diferencia entre el Qmáxh y el Qcoinc es bastante estrecha, por lo que sería natural pensar que no se hace necesario un estanque hidroneumático.

### C.2.2. Bombas seleccionadas para los modelos

Las bombas empleadas en los modelos se resumen en la Tabla 9.5

*Tabla 9.5 - Detalle de bombas empleadas en los modelos con bomba tipo 1 (B1)*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Características Bombas | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Marca | Modelo | Modelo Motor |
| 1 | B1-Q1-BP-VF | KSB | UPA 150C-30/6 DN 100 5,5 | UMA 150E |
| 2 | B1-Q1-BP-VF+HT-Qmínb | | | |
| 2.1 | B1-Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | |
| 2.2 | B1-Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | |
| 2.3 | B1-Q1-BP-VF+HT-Qm | | | |
| 3 | B1-Q1-AP-VF | KSB | UPA 150C-30/10 UMA 150E 9/21 | UMA 150E |
| 4 | B1-Q1-AP-VF+HT-Qmínb | | | |
| 4.1 | B1-Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | |
| 4.2 | B1-Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | |
| 4.3 | B1-Q1-AP-VF+HT-Qm | | | |
| 5 | B1-Q2-BP-VF | KSB | UPA 150C-30/9 UMA 150E 9/21 | UMA 150E |
| 6 | B1-Q2-BP-VF+HT-Qmínb | | | |
| 6.1 | B1-Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | |
| 6.2 | B1-Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | |
| 6.3 | B1-Q2-BP-VF+HT-Qm | | | |
| 7 | B1-Q2-AP-VF | KSB | UPA 150C-30/14 UMA 150E 13/21 | UMA 150E |
| 8 | B1-Q2-AP-VF+HT-Qmínb | | | |
| 8.1 | B1-Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | |
| 8.2 | B1-Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | |
| 8.3 | B1-Q2-AP-VF+HT-Qm | | | |

*Tabla 9.6 - Detalle de bombas empleadas en los modelos con bomba tipo 2 (B2)*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Características Bombas | | |
|---|---|---|---|---|
| | | **Marca** | **Modelo** | **Modelo Motor** |
| 1 | B2-Q1-BP-VF | Grundfos | CRE 20-6 P-F-A-E-HQQE | 7.5kW |
| 2 | B2-Q1-BP-VF+HT-Qmínb | | | |
| 2.1 | B2-Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | |
| 2.2 | B2-Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | |
| 2.3 | B2-Q1-BP-VF+HT-Qm | | | |
| 3 | B2-Q1-AP-VF | Grundfos | CR_20-10_A-F-A-E-HQQE | 11kW |
| 4 | B2-Q1-AP-VF+HT-Qmínb | | | |
| 4.1 | B2-Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | |
| 4.2 | B2-Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | |
| 4.3 | B2-Q1-AP-VF+HT-Qm | | | |
| 5 | B2-Q2-BP-VF | Grundfos | CR_32-6_A-F-A-E-HQQE | 11kW |
| 6 | B2-Q2-BP-VF+HT-Qmínb | | | |
| 6.1 | B2-Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | |
| 6.2 | B2-Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | |
| 6.3 | B2-Q2-BP-VF+HT-Qm | | | |
| 7 | B2-Q2-AP-VF | Grundfos | CR_32-8_A-F-A-E-HQQE | 15kW |
| 8 | B2-Q2-AP-VF+HT-Qmínb | | | |
| 8.1 | B2-Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | |
| 8.2 | B2-Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | |
| 8.3 | B2-Q2-AP-VF+HT-Qm | | | |

*Tabla 9.7 - Detalle de bombas empleadas en los modelos con bomba tipo 3 (B3)*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Características Bombas | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Marca | Modelo | Modelo Motor |
| 1 | B3-Q1-BP-VF | Grundfos | SP_30-6 | MS 4000 |
| 2 | B3-Q1-BP-VF+HT-Qmínb | | | |
| 2.1 | B3-Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | |
| 2.2 | B3-Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | |
| 2.3 | B3-Q1-BP-VF+HT-Qm | | | |
| 3 | B3-Q1-AP-VF | Grundfos | SP_30-9 | MS 6000 |
| 4 | B3-Q1-AP-VF+HT-Qmínb | | | |
| 4.1 | B3-Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | |
| 4.2 | B3-Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | |
| 4.3 | B3-Q1-AP-VF+HT-Qm | | | |
| 5 | B3-Q2-BP-VF | Grundfos | SP_30-9 | MS 6000 |
| 6 | B3-Q2-BP-VF+HT-Qmínb | | | |
| 6.1 | B3-Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | |
| 6.2 | B3-Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | |
| 6.3 | B3-Q2-BP-VF+HT-Qm | | | |
| 7 | B3-Q2-AP-VF | Grundfos | SP_46-10 | MS 6000 |
| 8 | B3-Q2-AP-VF+HT-Qmínb | | | |
| 8.1 | B3-Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | |
| 8.2 | B3-Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | |
| 8.3 | B3-Q2-AP-VF+HT-Qm | | | |

## C.3. DISEÑO DEL SISTEMA HIDRONEUMÁTICO PARA MODELOS HIDRÁULICOS

Una vez seleccionada la bomba que cumple los requisitos de presión y caudal, se deben utilizar algunos de sus parámetros para el diseño del estanque hidroneumático, estos son:

- Tiempo de parada ($T_p$).
- Caudal mínimo de la bomba ($Q_{mínb}$).
- Frecuencia mínima de funcionamiento.

En la siguiente tabla se presentan estos parámetros para los modelos.

*Tabla 9.8 - Detalle de los parámetros de las bombas empleadas en los modelos con bomba tipo 1 (B1)*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Características Bombas | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Marca | Modelo | Modelo Motor | Máx. partidas/ hora | Frecuencia mín [Hz] | Qmín b [L/s] | Tp [s] | Config. Bombas |
| 1 | B1-Q1-BP-VF | KSB | UPA 150C-30/6 DN 100 5,5 | UMA 150E | 15 | 46.2 | 0.77 | - | 3+1 |
| 2 | B1-Q1-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | 50.0 | 0.83 | 60 | 3+1 |
| 2.1 | B1-Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | |
| 2.2 | B1-Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | |
| 2.3 | B1-Q1-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | |
| 3 | B1-Q1-AP-VF | KSB | UPA 150C-30/10 UMA 150E 9/21 | UMA 150E | 15 | 34.4 | 0.57 | - | 3+1 |
| 4 | B1-Q1-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | 38.2 | 0.64 | 60 | 3+1 |
| 4.1 | B1-Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | |
| 4.2 | B1-Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | |
| 4.3 | B1-Q1-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | |
| 5 | B1-Q2-BP-VF | KSB | UPA 150C-30/9 UMA 150E 9/21 | UMA 150E | 15 | 36.7 | 0.61 | - | 3+1 |
| 6 | B1-Q2-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | 40.4 | 0.67 | 60 | 3+1 |
| 6.1 | B1-Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | |
| 6.2 | B1-Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | |
| 6.3 | B1-Q2-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | |
| 7 | B1-Q2-AP-VF | KSB | UPA 150C-30/14 UMA 150E 13/21 | UMA 150E | 15 | 29.5 | 0.49 | - | 3+1 |
| 8 | B1-Q2-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | 32.3 | 0.54 | 60 | 3+1 |
| 8.1 | B1-Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | |
| 8.2 | B1-Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | |
| 8.3 | B1-Q2-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | |

*Tabla 9.9 - Detalle de los parámetros de las bombas empleadas en los modelos con bomba tipo 2 (B2)*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Características Bombas | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Marca | Modelo | Modelo Motor | Máx. partidas/ hora | Frecuencia mín [Hz] | Qmín b [L/s] | Tp [s] | Config. Bombas |
| 1 | B2-Q1-BP-VF | Grundfos | CRE 20-6 P-F-A-E-HQQE | 7.5kW | 50 | 33.3 | 0.37 | - | 3+1 |
| 2 | B2-Q1-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | 36.1 | 0.40 | 18 | 3+1 |
| 2.1 | B2-Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | |
| 2.2 | B2-Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | |
| 2.3 | B2-Q1-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | |
| 3 | B2-Q1-AP-VF | Grundfos | CR_20-10_A-F-A-E-HQQE | 11kW | 50 | 30.3 | 0.34 | - | 3+1 |
| 4 | B2-Q1-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | 33.3 | 0.56 | 18 | 3+1 |
| 4.1 | B2-Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | |
| 4.2 | B2-Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | |
| 4.3 | B2-Q1-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | |
| 5 | B2-Q2-BP-VF | Grundfos | CR_32-6_A-F-A-E-HQQE | 11kW | 50 | 34.2 | 0.61 | - | 3+1 |
| 6 | B2-Q2-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | 37.1 | 0.66 | 18 | 3+1 |
| 6.1 | B2-Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | |
| 6.2 | B2-Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | |
| 6.3 | B2-Q2-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | |
| 7 | B2-Q2-AP-VF | Grundfos | CR_32-8_A-F-A-E-HQQE | 15kW | 50 | 30.0 | 0.53 | - | 3+1 |
| 8 | B2-Q2-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | 32.2 | 0.57 | 18 | 3+1 |
| 8.1 | B2-Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | |
| 8.2 | B2-Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | |
| 8.3 | B2-Q2-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | |

*Tabla 9.10 - Detalle de los parámetros de las bombas empleadas en los modelos con bomba tipo 3 (B3)*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Características Bombas | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Marca | Modelo | Modelo Motor | Máx. partidas/ hora | Frecuencia mín [Hz] | Qmín b [L/s] | Tp [s] | Config. Bombas |
| 1 | B3-Q1-BP-VF | Grundfos | SP_30-6 | MS 4000 | 100 | 44.7 | 1.09 | - | 3+1 |
| 2 | B3-Q1-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | 48.9 | 1.19 | 9 | 3+1 |
| 2.1 | B3-Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | |
| 2.2 | B3-Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | |
| 2.3 | B3-Q1-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | |
| 3 | B3-Q1-AP-VF | Grundfos | SP_30-9 | MS 6000 | 30 | 36.6 | 2.00 | - | 3+1 |
| 4 | B3-Q1-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | 39.8 | 2.18 | 30 | 3+1 |
| 4.1 | B3-Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | |
| 4.2 | B3-Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | |
| 4.3 | B3-Q1-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | |
| 5 | B3-Q2-BP-VF | Grundfos | SP_30-9 | MS 6000 | 30 | 36.4 | 1.99 | - | 3+1 |
| 6 | B3-Q2-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | 39.8 | 2.18 | 30 | 3+1 |
| 6.1 | B3-Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | |
| 6.2 | B3-Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | |
| 6.3 | B3-Q2-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | |
| 7 | B3-Q2-AP-VF | Grundfos | SP_46-10 | MS 6000 | 30 | 31.9 | 1.75 | - | 3+1 |
| 8 | B3-Q2-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | 34.8 | 1.91 | 30 | 3+1 |
| 8.1 | B3-Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | |
| 8.2 | B3-Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | |
| 8.3 | B3-Q2-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | |

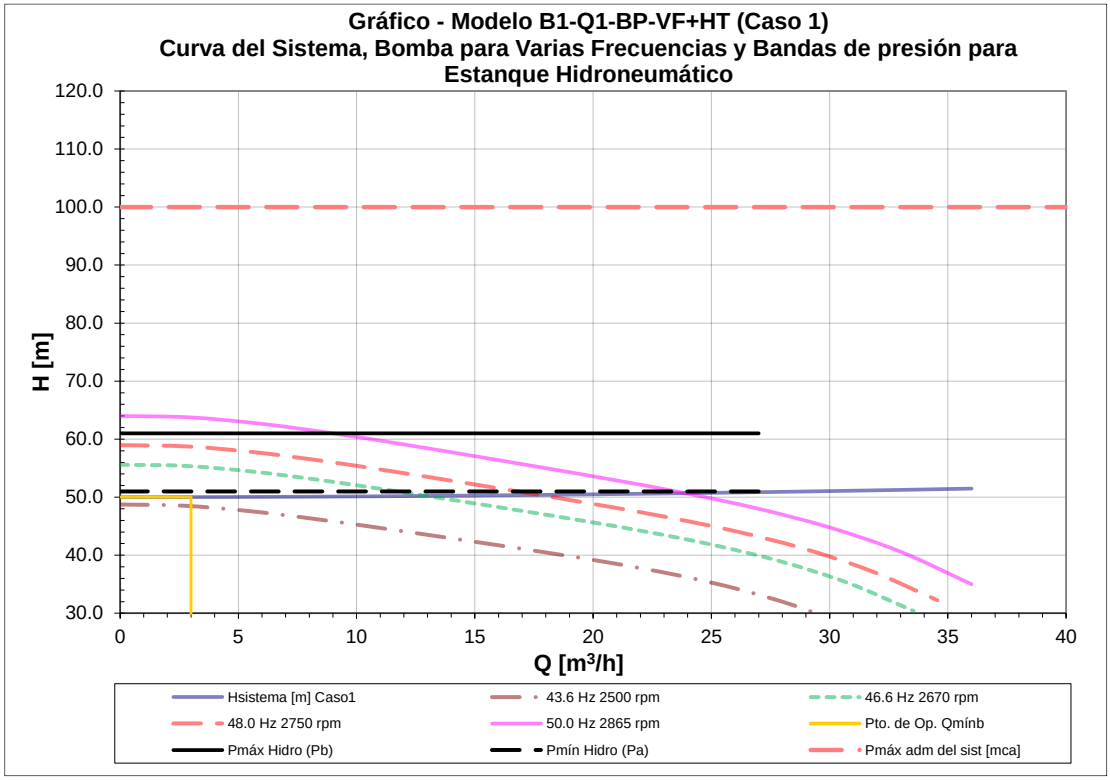
### C.3.1. Diseño de la ventana de presión para modelos con la formulación propuesta

En las siguientes figuras se mostrará el análisis realizado para la determinación de la ventana de operación de los escenarios de los modelos diseñados con base en la formulación propuesta. Como observación general para todos los modelos se debe tener presente:

- Todos los modelos pudieron ser diseñados con una ventana de 10 [mca].
- La presión máxima ($P_b$) y presión mínima ($P_a$) son 61 [mca] y 51 [mca] respectivamente, para todos los modelos. Si bien, existen escenarios con bajas y altas pérdidas, para los bajos caudales (bajas perdidas asociadas), que es donde opera el estanque hidroneumático la presión entre los estos dos modelos es prácticamente la misma.
- Las figuras mostradas corresponden a la bomba tipo 1 (B1), no obstante, el análisis para los otros dos tipos de bombas (B2 y B3) es similar, dado que los requisitos a cumplir por las bombas son exactamente iguales. Las variaciones se observan en el tamaño del estanque hidroneumático debido a las características de cada bomba.

En el siguiente punto serán presentadas tablas con los resúmenes de los parámetros para los modelos de las bombas B1, B2 y B3.

Figura 9.15 - Modelo B1-Q1-BP-VF (Caso 1): Curva del sistema, bomba para varias frecuencias (1 bomba en operación) y banda de presión para estanque hidroneumático

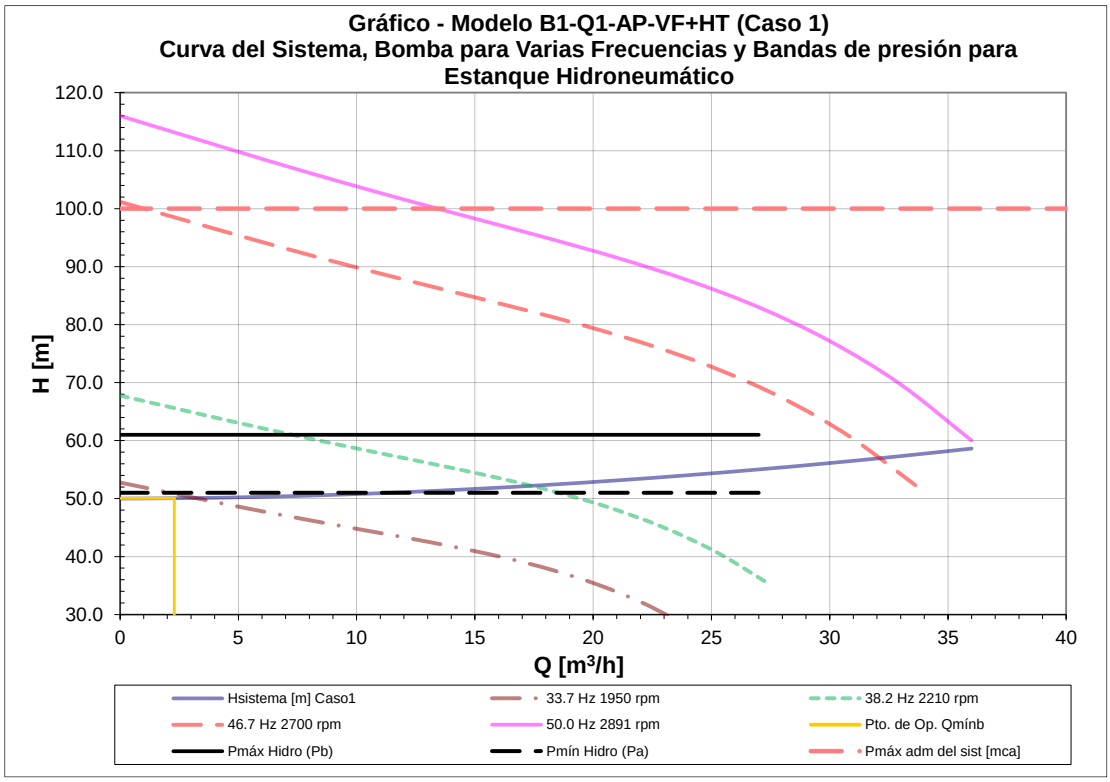



En la Figura 9.15 se observa:

- Se define la frecuencia mínima de funcionamiento de la bomba (curva magenta a 50 [Hz]) de manera tal que la presión entregada por la bomba para el Qmínb quede aproximadamente 4.5 [m] sobre la máxima presión de diseño del estanque hidroneumático, es decir, a una presión de 65.5 [mca] (61 [mca] + 4.5 [mca]) para el Qmínb. Esto se realiza de manera de tener un margen de seguridad para que la bomba se capaz de presurizar el estanque hidroneumático y este opere dentro de la ventana de diseño (10 [mca]).
- En este caso en particular, no se pudo cumplir lo expuesto anteriormente, debido a que la bomba a su frecuencia máxima normal de operación no es capaz de entregar más altura, quedando la presión entregada por la bomba para el Qmínb en 64 [mca], en rigor se debiese buscar el siguiente modelo más grande de bomba, sin embargo, la sobredimensión de dicho equipo no era justificable por esta razón, por lo cual se optó por mantener un menor margen de seguridad.
- A diferencia del caso anterior (Figura 9.11), la frecuencia de la bomba aumenta debido a que debe alcanzar una nueva presión mínima determinada por la presión máxima

del estanque hidroneumático más un margen de seguridad (65.5 [mca]) que es mayor a la presión que se debía alcanzar en el caso anterior. Esto tiene por efecto directo un aumento en el tamaño del estanque hidroneumático debido al aumento del caudal mínimo de la bomba.

Figura 9.16 - Modelo B1-Q1-AP-VF (Caso 1): Curva del sistema, bomba para varias frecuencias (1 bomba en operación) y banda de presión para estanque hidroneumático

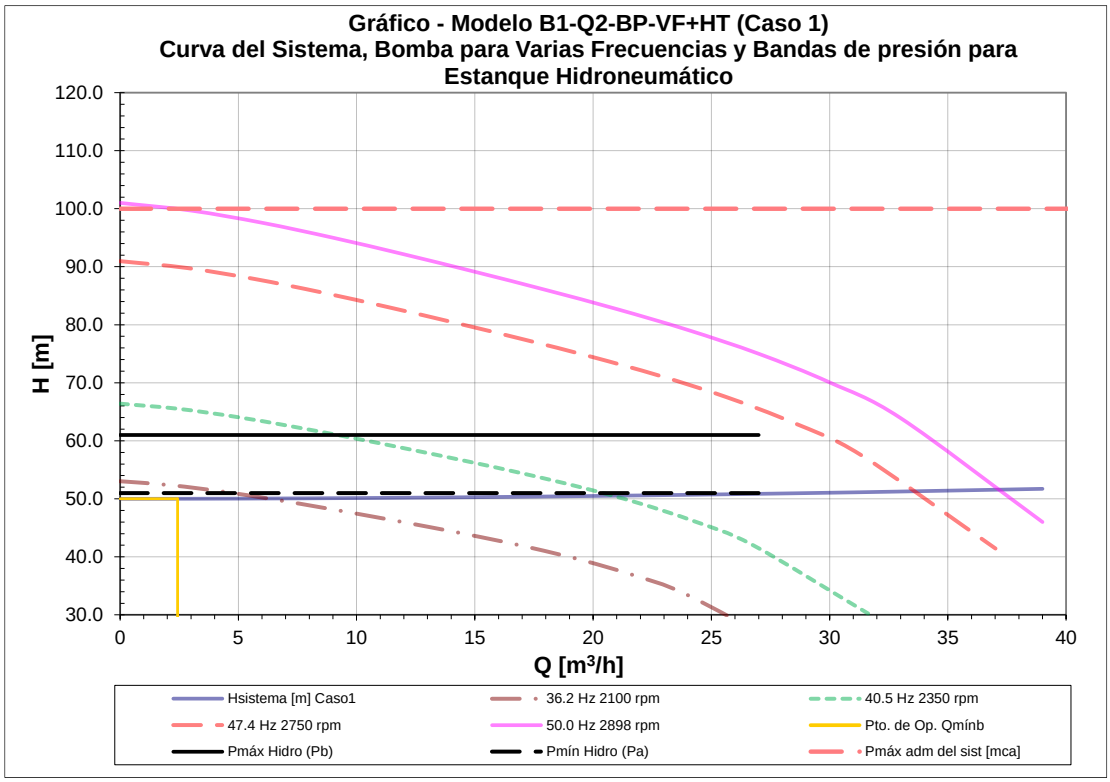



En la Figura 9.16 se observa:

- Se define la frecuencia mínima de funcionamiento de la bomba (curva verde a 38.2 [Hz]) de manera tal que la presión entregada por la bomba para el Qmínb quede aproximadamente 4.5 [m] sobre la máxima presión de diseño del estanque hidroneumático, es decir, a una presión de 65.5 [mca] (61 [mca] + 4.5 [mca]) para el Qmínb. Esto se realiza de manera de tener un margen de seguridad para que la bomba se capaz de presurizar el estanque hidroneumático y este opere dentro de la ventana de diseño (10 [mca]).
- A diferencia del caso anterior (Figura 9.12), la frecuencia de la bomba aumenta debido a que debe alcanzar una nueva presión mínima determinada por la presión máxima del estanque hidroneumático más un margen de seguridad (65.5 [mca]) que es mayor

a la presión que se debía alcanzar en el caso anterior. Esto tiene por efecto directo un aumento en el tamaño del estanque hidroneumático debido al aumento del caudal mínimo de la bomba.

Figura 9.17 - Modelo B1-Q2-BP-VF (Caso 1): Curva del sistema, bomba para varias frecuencias (1 bomba en operación) y banda de presión para estanque hidroneumático

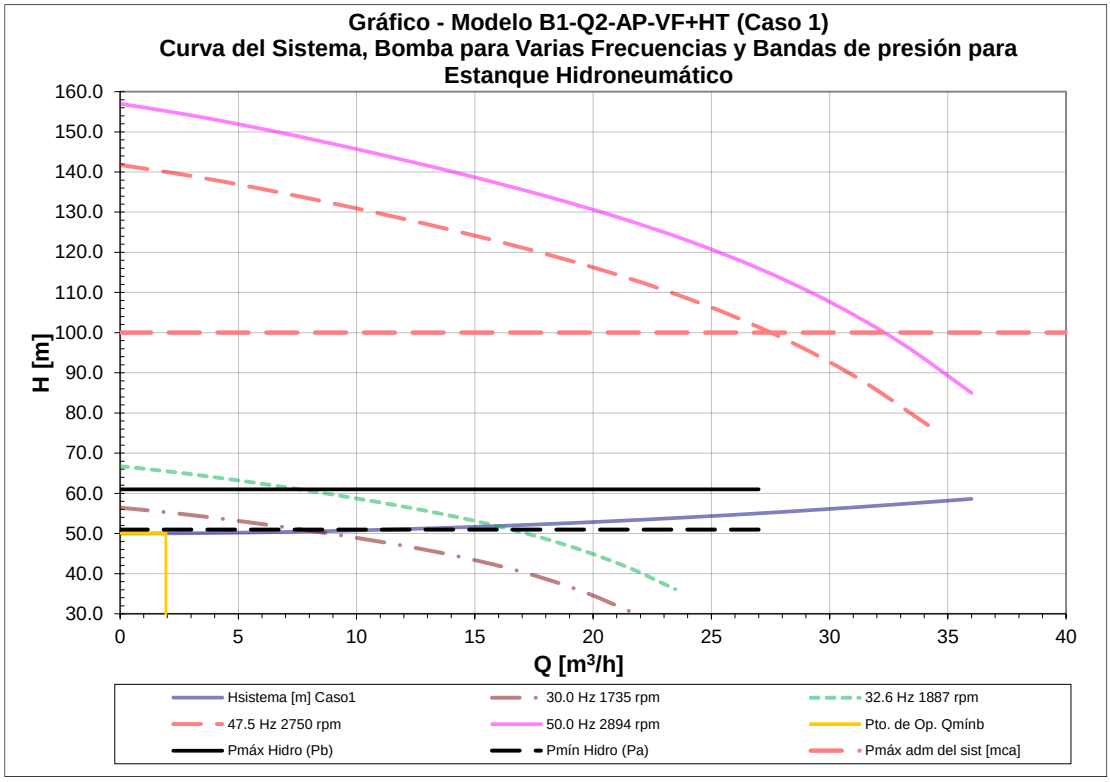



En la Figura 9.17 se observa:

- Se define la frecuencia mínima de funcionamiento de la bomba (curva verde a 40.5 [Hz]) de manera tal que la presión entregada por la bomba para el Qmínb quede aproximadamente 4.5 [m] sobre la máxima presión de diseño del estanque hidroneumático, es decir, a una presión de 65.5 [mca] (61 [mca] + 4.5 [mca]) para el Qmínb. Esto se realiza de manera de tener un margen de seguridad para que la bomba se capaz de presurizar el estanque hidroneumático y este opere dentro de la ventana de diseño (10 [mca]).
- A diferencia del caso anterior (Figura 9.13), la frecuencia de la bomba aumenta debido a que debe alcanzar una nueva presión mínima determinada por la presión máxima del estanque hidroneumático más un margen de seguridad (65.5 [mca]) que es mayor a la presión que se debía alcanzar en el caso anterior. Esto tiene por efecto directo un

aumento en el tamaño del estanque hidroneumático debido al aumento del caudal mínimo de la bomba.

Figura 9.18 - Modelo B1-Q2-AP-VF (Caso 1): Curva del sistema, bomba para varias frecuencias (1 bomba) y banda de presión para estanque hidroneumático




En la Figura 9.18 se observa:

- Se define la frecuencia mínima de funcionamiento de la bomba (curva verde a 32.6 [Hz]) de manera tal que la presión entregada por la bomba para el Qmínb quede aproximadamente 4.5 [m] sobre la máxima presión de diseño del estanque hidroneumático, es decir, a una presión de 65.5 [mca] (61 [mca] + 4.5 [mca]) para el Qmínb. Esto se realiza de manera de tener un margen de seguridad para que la bomba se capaz de presurizar el estanque hidroneumático y este opere dentro de la ventana de diseño (10 [mca]).
- A diferencia del caso anterior (Figura 9.14), la frecuencia de la bomba aumenta debido a que debe alcanzar una nueva presión mínima determinada por la presión máxima del estanque hidroneumático más un margen de seguridad (65.5 [mca]) que es mayor a la presión que se debía alcanzar en el caso anterior. Esto tiene por efecto directo un

aumento en el tamaño del estanque hidroneumático debido al aumento del caudal mínimo de la bomba.

### C.3.2. Diseño de la ventana de presión para modelos con la formulación clásica

Análogo al análisis para el punto anterior, a excepción del diseño del caudal medio (Qm) para el estanque hidroneumático.

El caudal medio (Qm), para la formulación clásica, se determina empleando la curva de mínima frecuencia de funcionamiento de la bomba determinada en el punto anterior. A partir de esta frecuencia (curva de la bomba) se buscan las intersecciones con los límites de presión del estanque hidroneumático y se traza una línea hacía vertical para determinar el caudal correspondiente las dos presiones (51 y 61 [mca]).

Por ejemplo para la Figura 9.18, la curva para la frecuencia mínima de funcionamiento de la bomba se encuentra representada por la línea discontinua verde. Las intersecciones con la banda de presión del estanque hidroneumático y sus respectivos caudales son:

(1) Pb= 61 [mca] y Qb= 7.5 [$m^3$/hr].
(2) Pb= 51 [mca] y Qb= 16.5 [$m^3$/hr].

De esta manera se puede determinar el volumen del estanque hidroneumático con la formulación clásica.

### C.3.3. Diseño del volumen del estanque hidroneumático para modelos hidráulicos

Los volúmenes han sido estimados en su totalidad con las ecuaciones propuestas en el punto 4.1.4 (formulación propuesta), exceptos los modelos números (2.3), (4.3), (6.3) y (8.3) para los tres tipos de bombas, los que fueron diseñados con las ecuaciones del punto 2.4.2 (formulación clásica).

Los parámetros expuestos en la Tabla 9.12, Tabla 9.13 y Tabla 9.14 son explicados en la siguiente tabla:

*Tabla 9.11 - Definición de parámetros utilizados en la Tabla 9.12, Tabla 9.13 y Tabla 9.14*

| Equipo | Parámetro | Observación |
|---|---|---|
| Características Bombas | Marca | Marca del equipo de bombeo. |
| | Modelo | Modelo de la bomba empleada, generalmente en los catálogos de bombas se designa este ítem como "series". |
| | Modelo Motor | Modelo del motor con el que se identifica la cantidad máxima partidas por hora permitidas para el motor. |
| | Máx. partidas/hora | Máximas partidas por hora permitidas para el motor de la bomba informada por el fabricante. |
| | Frecuencia mín. [Hz] | Mínima frecuencia que puede alcanzar el equipo de bombeo para el modelo en análisis. |
| | Qmínb [L/s] | Mínimo caudal que es capaz de impulsar la bomba a la frecuencia mínima. |
| | Tp [s] | Tiempo de parada. |
| | Config. Bombas | Configuración del equipo de bombeo (1+1, 2+1, 3+1, etc). |
| Características Hidroneumático | Qm Hidro [L/s] | Caudal empleado para el cálculo del volumen útil del hidroneumático. |
| | Vol. Calculado Hidro [L] | Volumen total del estanque hidroneumático calculado según la formulación clásica para los modelos (2.3), (4.3), (6.3) y (8.3). Para el resto se empleó la formulación propuesta. |
| | Vol. diseño Hidro [L] | Volumen total de diseño del estanque hidroneumático se escoge de la Tabla 4.6 a partir del valor más cercano inmediatamente superior al valor del “Vol. Total Hidro”. |

*Tabla 9.12 - Detalle de los parámetros de las bombas y estanques hidroneumáticos empleados en los modelos con bomba tipo 1 (B1)*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Características Bombas | | | | | | | | Características Hidroneumático | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Marca | Modelo | Modelo Motor | Máx. partidas/ hora | Frecuencia mín [Hz] | Qmín b [L/s] | Tp [s] | Config. Bombas | Q Hidro [L/s] | Vol. calculado Hidro [L] | Vol. diseño hidro [L] |
| 1 | B1-Q1-BP-VF | KSB | UPA 150C-30/6 DN 100 5,5 | UMA 150E | 15 | 46.2 | 0.77 | - | 3+1 | - | - | - |
| 2 | B1-Q1-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | 50.0 | 0.83 | 60 | 3+1 | 0.83 | 357 | 400 |
| 2.1 | B1-Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | 0.63 | 267 | 300 |
| 2.2 | B1-Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | 0.42 | 178 | 180 |
| 2.3 | B1-Q1-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | 4.38 | 468 | 500 |
| 3 | B1-Q1-AP-VF | KSB | UPA 150C-30/10 UMA 150E 9/21 | UMA 150E | 15 | 34.4 | 0.57 | - | 3+1 | - | - | - |
| 4 | B1-Q1-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | 38.2 | 0.64 | 60 | 3+1 | 0.64 | 272 | 300 |
| 4.1 | B1-Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | 0.48 | 204 | 300 |
| 4.2 | B1-Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | 0.32 | 136 | 180 |
| 4.3 | B1-Q1-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | 3.54 | 379 | 400 |
| 5 | B1-Q2-BP-VF | KSB | UPA 150C-30/9 UMA 150E 9/21 | UMA 150E | 15 | 36.7 | 0.61 | - | 3+1 | - | - | - |
| 6 | B1-Q2-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | 40.4 | 0.67 | 60 | 3+1 | 0.68 | 289 | 300 |
| 6.1 | B1-Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | 0.51 | 217 | 300 |
| 6.2 | B1-Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | 0.34 | 145 | 180 |
| 6.3 | B1-Q2-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | 4.03 | 431 | 500 |
| 7 | B1-Q2-AP-VF | KSB | UPA 150C-30/14 UMA 150E 13/21 | UMA 150E | 15 | 29.5 | 0.49 | - | 3+1 | - | - | - |
| 8 | B1-Q2-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | 32.3 | 0.54 | 60 | 3+1 | 0.54 | 230 | 300 |
| 8.1 | B1-Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | 0.40 | 173 | 180 |
| 8.2 | B1-Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | 0.27 | 115 | 180 |
| 8.3 | B1-Q2-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | 6.67 | 713 | 750 |

*Tabla 9.13 - Detalle de los parámetros de las bombas y estanques hidroneumáticos empleados en los modelos con bomba tipo 2 (B2)*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Características Bombas | | | | | | | | Características Hidroneumático | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Marca | Modelo | Modelo Motor | Máx. partidas/ hora | Frecuencia mín [Hz] | Qmín b [L/s] | Tp [s] | Config. Bombas | Qm Hidro [L/s] | Vol. calculado Hidro [L] | Vol. diseño hidro [L] |
| 1 | B2-Q1-BP-VF | Grundfos | CRE 20-6 P-F-A-E-HQQE | 7.5kW | 50 | 33.3 | 0.37 | - | 3+1 | - | - | - |
| 2 | B2-Q1-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | 36.1 | 0.40 | 18 | 3+1 | 0.40 | 52 | 60 |
| 2.1 | B2-Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | 0.30 | 39 | 60 |
| 2.2 | B2-Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | 0.20 | 26 | 35 |
| 2.3 | B2-Q1-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | 3.75 | 120 | 180 |
| 3 | B2-Q1-AP-VF | Grundfos | CR_20-10_A-F-A-E-HQQE | 11kW | 50 | 30.3 | 0.34 | - | 3+1 | - | - | - |
| 4 | B2-Q1-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | 33.3 | 0.56 | 18 | 3+1 | 0.56 | 71 | 80 |
| 4.1 | B2-Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | 0.42 | 54 | 60 |
| 4.2 | B2-Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | 0.28 | 36 | 60 |
| 4.3 | B2-Q1-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | 3.47 | 111 | 180 |
| 5 | B2-Q2-BP-VF | Grundfos | CR_32-6_A-F-A-E-HQQE | 11kW | 50 | 34.2 | 0.61 | - | 3+1 | - | - | - |
| 6 | B2-Q2-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | 37.1 | 0.66 | 18 | 3+1 | 0.66 | 85 | 100 |
| 6.1 | B2-Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | 0.49 | 64 | 80 |
| 6.2 | B2-Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | 0.33 | 42 | 60 |
| 6.3 | B2-Q2-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | 5.07 | 163 | 180 |
| 7 | B2-Q2-AP-VF | Grundfos | CR_32-8_A-F-A-E-HQQE | 15kW | 50 | 30.0 | 0.53 | - | 3+1 | - | - | - |
| 8 | B2-Q2-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | 32.2 | 0.57 | 18 | 3+1 | 0.57 | 73 | 80 |
| 8.1 | B2-Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | 0.43 | 55 | 60 |
| 8.2 | B2-Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | 0.29 | 37 | 60 |
| 8.3 | B2-Q2-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | 4.44 | 143 | 180 |

*Tabla 9.14 - Detalle de los parámetros de las bombas y estanques hidroneumáticos empleados en los modelos con bomba tipo 3 (B3)*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Características Bombas | | | | | | | | Características Hidroneumático | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Marca | Modelo | Modelo Motor | Máx. partidas/ hora | Frecuencia mín [Hz] | Qmín b [L/s] | Tp [s] | Config. Bombas | Qm Hidro [L/s] | Vol. calculado Hidro [L] | Vol. diseño hidro [L] |
| 1 | B3-Q1-BP-VF | Grundfos | SP_30-6 | MS 4000 | 100 | 44.7 | 1.09 | - | 3+1 | - | - | - |
| 2 | B3-Q1-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | 48.9 | 1.19 | 9 | 3+1 | 1.19 | 76 | 80 |
| 2.1 | B3-Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | 0.89 | 57 | 60 |
| 2.2 | B3-Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | 0.59 | 38 | 60 |
| 2.3 | B3-Q1-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | 5.00 | 80 | 100 |
| 3 | B3-Q1-AP-VF | Grundfos | SP_30-9 | MS 6000 | 30 | 36.6 | 2.00 | - | 3+1 | - | - | - |
| 4 | B3-Q1-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | 39.8 | 2.18 | 30 | 3+1 | 2.18 | 467 | 500 |
| 4.1 | B3-Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | 1.64 | 350 | 400 |
| 4.2 | B3-Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | 1.09 | 233 | 300 |
| 4.3 | B3-Q1-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | 3.96 | 212 | 300 |
| 5 | B3-Q2-BP-VF | Grundfos | SP_30-9 | MS 6000 | 30 | 36.4 | 1.99 | - | 3+1 | - | - | - |
| 6 | B3-Q2-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | 39.8 | 2.18 | 30 | 3+1 | 2.18 | 467 | 500 |
| 6.1 | B3-Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | 1.64 | 350 | 400 |
| 6.2 | B3-Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | 1.09 | 233 | 300 |
| 6.3 | B3-Q2-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | 5.07 | 271 | 300 |
| 7 | B3-Q2-AP-VF | Grundfos | SP_46-10 | MS 6000 | 30 | 31.9 | 1.75 | - | 3+1 | - | - | - |
| 8 | B3-Q2-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | 34.8 | 1.91 | 30 | 3+1 | 1.91 | 408 | 500 |
| 8.1 | B3-Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | | 1.43 | 306 | 400 |
| 8.2 | B3-Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | | 0.95 | 204 | 300 |
| 8.3 | B3-Q2-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | | 4.44 | 238 | 300 |

## C.4. DIFICULTADES EN LA ADAPTACIÓN DE LA REALIDAD A UN MODELO TEÓRICO

El objetivo principal de todo modelo teórico es la reproducción lo más fiel a la realidad del fenómeno físico en estudio.

Existen ciertas dificultades de modelación, debido a que el principal fenómeno físico en estudio, que son las partidas/paradas de los equipos de bombeo con un variador de frecuencia, no tiene una modelación directa en el programa empleado ni en ningún otro programa disponible en la actualidad. El funcionamiento real de las partidas-paradas de un equipo de bombeo con variador de frecuencia ocurre de manera esquemática como se señala:

(1) El equipo de bombeo se encuentra operando a régimen permanente.
(2) Si la demanda disminuye, el variador de frecuencia irá ajustando el punto de funcionamiento de la bomba (caudal y presión) de acuerdo a lo programado.
(3) Si la demanda sigue disminuyendo más allá del mínimo caudal que es capaz de entregar la bomba, el equipo de bombeo detectará el bajo flujo (el mecanismo de detección del bajo flujo varía por marca y/o programación del equipo de bombeo) y cesará el funcionamiento de la bomba. Antes que ocurra la detención del equipo la red posiblemente será presurizada a una presión levemente mayor que la requerida por el punto de funcionamiento para el Qmínb o la presión objetivo a alcanzar por la bomba.
(4) La demanda de la población, aún presente, producirá un rápido descenso en la presión en la red, esto será detectado por los presostatos, los que enviarán la orden de poner en marcha nuevamente las bombas. Toda esta operación ocurrirá en un par de segundos.
(5) Si el valor de la demanda es menor que el Qmínb, el ciclo se repetirá desde el punto (3). En cambio, si el valor de la demanda es mayor que el Qmínb, el ciclo se repetirá desde el punto (2).

El principal problema para la modelación es que el programa funciona a través de una modelación por demanda, esto significa que el caudal no puede ser cero debido a que invalidaría la ecuación de conservación de la masa e invalidando en consecuencia el set de ecuaciones empleado por el programa para resolver la red.

La solución propuesta en el modelo teórico a este problema será expuesta en el punto C.6.1.

## C.5. DESCRIPCIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS TEÓRICOS

El diseño de los modelos ha sido descrito a lo largo de todo el punto 4.2, por lo cual aquí será descrita la implementación del modelo en el programa computacional.

### C.5.1. Tipos de modelos implementados

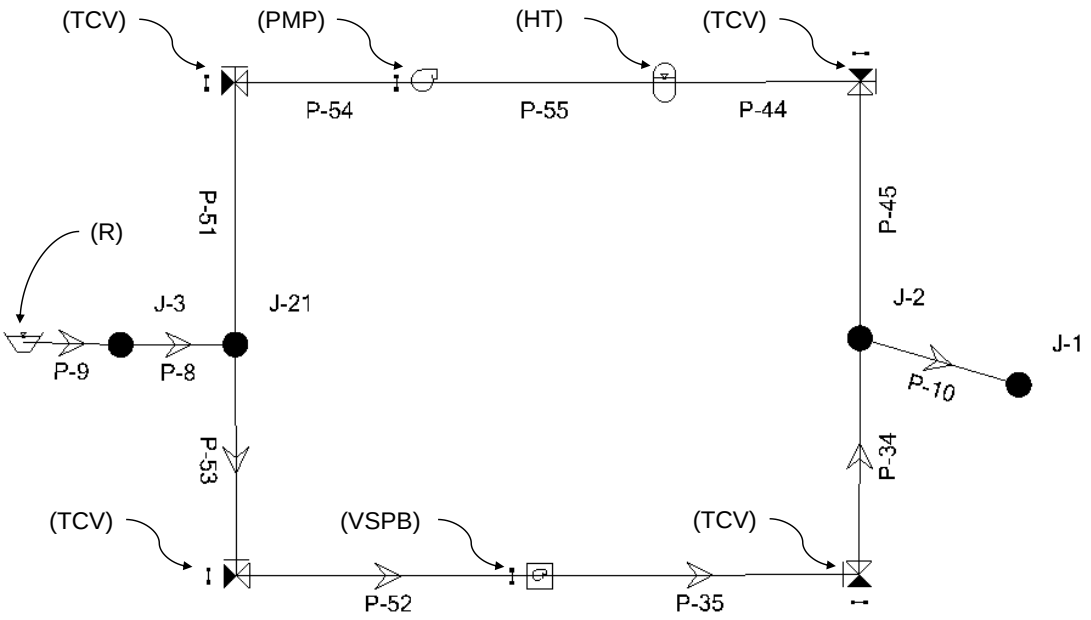
Como se desea evaluar el desempeño a lo largo del tiempo, los modelos han sido implementados como una simulación de tipo EPS (Extended Period Simulation), es decir, Simulación en Período Extendido o Cuasi-Estático.

### C.5.2. Elementos de los modelos

La composición de los modelos es la misma para todos (los 60 modelos en total) y los cambios se ven reflejados en las propiedades de los elementos que los componen.

En la siguiente imagen se indican los elementos que componen el modelo implementado.

Figura 9.19 – Identificación de los elementos de los modelos




Los elementos del modelo son explicados en la siguiente tabla:

*Tabla 9.15 - Descripción de los elementos de los modelos*

| Código en WC | Elemento | Descripción del elemento |
|---|---|---|
| R | Reservorio | Elemento con capacidad infinita de almacenaje. Este permite tanto la entrada como la salida de agua. Representa el agua proveída por la red. |
| P-XX | Tubería | Elemento que permite la conexión entre los distintos elementos del programa. |
| J-XX | Nodo | Elemento que permite la salida de agua del sistema cuando se le asigna una demanda (como en el caso del nodo J-1 al cual se le asigna la demanda de la población). Además cumplen la función de unir dos tuberías. |
| TCV | Válvula de Corte | Elemento que permite cortar el flujo de agua, esto se utiliza para separar sectores o dejar inhabilitados ciertos tramos de la red. |
| PMP | Bomba | Elemento que permite la adición de energía al sistema. Este elemento puede operar con una curva de bomba que debe ser ingresada. |
| VSPB | Batería de bombas de velocidad variable | Elemento que representa una batería de bombas con un variador de frecuencia, el cual funciona de la siguiente manera: Todas las bombas operan de forma paralela. Las bombas comparten el mismo nodo aguas abajo como aguas arriba. Las bombas son idénticas (misma curva de bomba). Las bombas operan a una única frecuencia de funcionamiento (las bombas no pueden operar a distintas frecuencias unas de otras). |
| HT | Estanque Hidroneumático | Elemento que representa el estanque hidroneumático. Para los modelos sin estanque hidroneumático permite modelar las sucesivas partidas/paradas del equipo de bombeo. Para los modelos con estanque hidroneumático permite modelar efectivamente este elemento. |

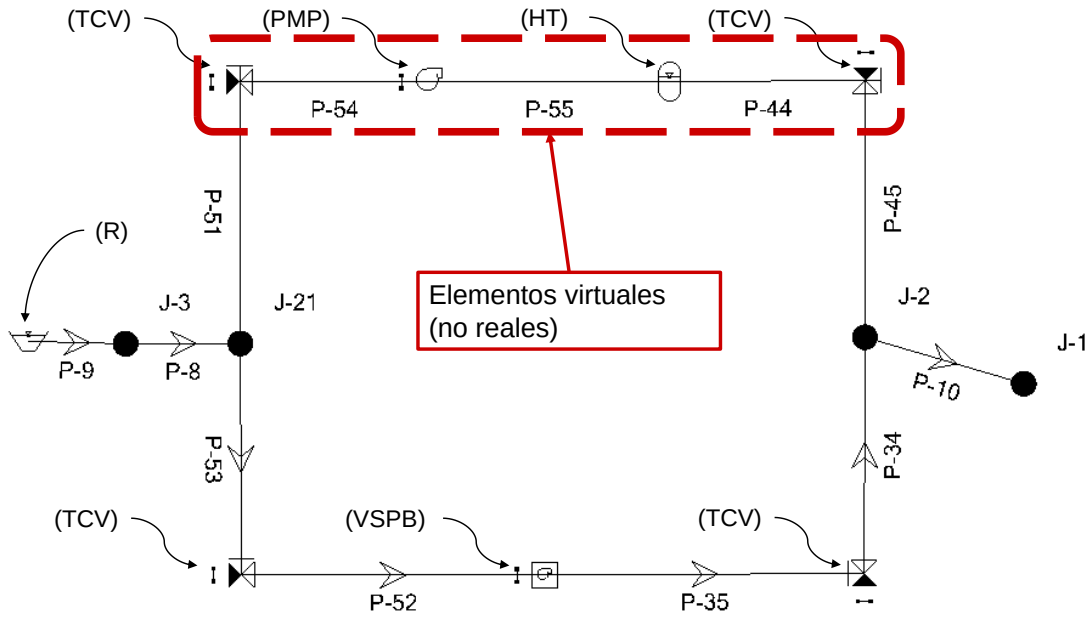
### C.5.3. Contraste del modelo teórico con la realidad

Dado que el modelo teórico se centra en simular de la manera más fidedigna posible el comportamiento en la realidad del sistema en estudio, existen ciertos elementos en el modelo teórico que no existen en la realidad de manera física. Estos elementos cumplen una función de modelación del fenómeno real.

En la presente figura se indican que elementos existen de manera física en la realidad y cuales no existen físicamente. Para esto se utiliza la misma imagen de la Figura 9.19, en dos casos, cuando se emplean exclusivamente bombas con variador de frecuencia (Figura 9.20) y cuando

se emplean bombas con variador de frecuencia en conjunto con un estanque hidroneumático (Figura 9.21).

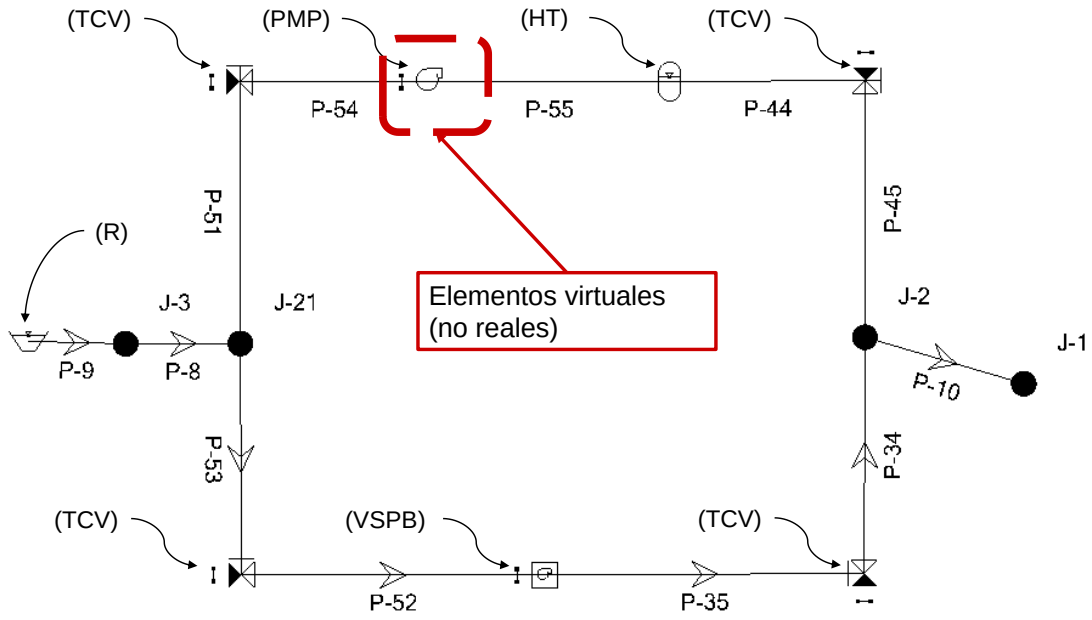
Figura 9.20 - Identificación de elementos existentes en la realidad para el caso en que se emplean bombas con variador de frecuencia sin estanque hidroneumático




Para el caso que en la realidad se empleen bombas con variador de frecuencia, la parte superior encerrada en roja corresponde a los elementos virtuales (no reales), que son empleados para poder realizar una correcta simulación del fenómeno físico.

La explicación de la modelación será hecha en el punto C.6 Consideraciones de modelación.

Figura 9.21 - Identificación de elementos existentes en la realidad para el caso en que se emplean bombas con variador de frecuencia junto a un estanque hidroneumático




Para el caso que en la realidad se empleen bombas con variador de frecuencia junto a un estanque hidroneumático, la parte superior encerrada en roja corresponde a los elementos virtuales (no reales), que son empleados para poder realizar una correcta simulación del fenómeno físico.

La explicación de la modelación será hecha en el punto C.6 Consideraciones de modelación.

## C.6. CONSIDERACIONES DE MODELACIÓN

En el presente punto se explicarán todas las consideraciones hechas para la creación de los diversos modelos hidráulicos computacionales.

### C.6.1. Modelación de partidas/Paradas de los equipos de bombeo

#### *C.6.1.1. Bombas con variador de frecuencia (Figura 9.20)*

La programación de las partidas y paradas de los equipos de bombeo se realiza con los controles lógicos que ofrece el programa, los que se definen al igual que la programación de un PLC real, por medio de límites de presión y caudal.

Cómo bien se nombró en el punto C.4, el principal problema de modelación es que el caudal proveído por los elementos nunca puede ser nulo (dado que es un modelo por demanda), sin

embargo, la realidad del fenómeno es lo descrito en el mismo punto C.4. Para resolver este problema se creó una solución que permite detener el equipo de bombeo por un par de segundos mientras se mantiene la oferta de caudal. Como solución se emplean los elementos virtuales indicados en la Figura 9.20, estos elementos son una bomba conectada a un estanque hidroneumático, los cuales cumplen la siguiente función:

- PMP: bomba virtual (sin variador de frecuencia) encargada de alimentar al estanque hidroneumático virtual, empleándose la curva de la bomba utilizada por el elemento VSPB (real) para una bomba reducida a la mínima de frecuencia de funcionamiento recomendada, ya que no se puede conectar un elemento HT a un VSPB o una bomba con frecuencia variable. Por esta razón se emplea una bomba virtual que representa al equipo de bombeo real cuando disminuye su frecuencia a la mínima de funcionamiento, reduciéndose el equipo de bombeo real a una única bomba en operación a su mínima frecuencia.
- HT: estanque hidroneumático virtual que tiene como objetivo simular la caída de presión en la red mientras provee de caudal a la población. Las variables del estanque hidroneumático virtual son explicadas a continuación:
    - Ventana de presiones: para evitar variaciones bruscas en la presión entregada se decidió emplear una ventana muy pequeña (51 a 51.5 [mca]), se descartó emplear el uso de una ventana más pequeña debido a problemas de convergencia en la solución del programa.
    - Caudal medio: se empleó el caudal mínimo entregado por la bomba, de manera de poder suplir la demanda máxima por un tiempo determinado.
    - Tiempo parada: se definió utilizar el tiempo de la resolución de las mediciones de caudal (5 [s]), para que fuese evaluado a cada instante de simulación la condición sobre la bomba.

  Esto generó estanques hidroneumáticos con un mínimo volumen de regulación y un gran volumen total. A modo de ejemplo en las siguientes tablas se muestran los volúmenes de los estanques hidroneumáticos virtuales empleados para los modelos de las bombas tipo 1, los cuales son análogos para los otros tipos de bombas.

*Tabla 9.16 - Hidroneumáticos virtuales para simulación de red de agua potable*

| Hidro *No Real* modelo B1-Q1-BP-VF | | |
|---|---|---|
| Pb | 51.5 | mca |
| Pa | 51 | mca |
| Ventana | 0.5 | mca |
| $Q_2$ | 0.77 | L/s |
| $Q_1$ | 0.77 | L/s |
| Qm | 0.77 | L/s |
| Tp | 0.08 | min |
| Tp | 5 | s |
| Vr | 3.85 | L |
| Factor Vr | 123.66 | - |
| Vt | 476.58 | L |
| Vt diseño | 477 | L |

| Hidro *No Real* modelo B1-Q2-BP-VF | | |
|---|---|---|
| Pb | 51.5 | mca |
| Pa | 51 | mca |
| Ventana | 0.5 | mca |
| $Q_2$ | 0.61 | L/s |
| $Q_1$ | 0.61 | L/s |
| Qm | 0.46 | L/s |
| Tp | 0.08 | min |
| Tp | 5 | s |
| Vr | 2.30 | L |
| Factor Vr | 123.66 | - |
| Vt | 284.03 | L |
| Vt diseño | 285 | L |

| Hidro *No Real* modelo B1-Q1-AP-VF | | |
|---|---|---|
| Pb | 51.5 | mca |
| Pa | 51 | mca |
| Ventana | 0.5 | mca |
| $Q_2$ | 0.57 | L/s |
| $Q_1$ | 0.57 | L/s |
| Qm | 0.57 | L/s |
| Tp | 0.08 | min |
| Tp | 5 | s |
| Vr | 2.87 | L |
| Factor Vr | 123.66 | - |
| Vt | 354.67 | L |
| Vt diseño | 355 | L |

| Hidro *No Real* modelo B1-Q2-AP-VF | | |
|---|---|---|
| Pb | 51.5 | mca |
| Pa | 51 | mca |
| Ventana | 0.5 | mca |
| $Q_2$ | 0.49 | L/s |
| $Q_1$ | 0.49 | L/s |
| Qm | 0.37 | L/s |
| Tp | 0.08 | min |
| Tp | 5 | s |
| Vr | 1.85 | L |
| Factor Vr | 123.66 | - |
| Vt | 228.34 | L |
| Vt diseño | 229 | L |

Las partidas/paradas se obtienen a partir de dos datos que entrega el programa como resultado una vez que los modelos han sido ejecutados:

- Relative Speed Factor (RSF): Factor Relativo de Velocidad en español. Entrega el valor de velocidad al que opera la bomba en un determinado instante. Este valor varía entre 0 y 1, donde 1 es la máxima velocidad con que puede operar la bomba y 0 significa que la bomba no opera. Estos valores se obtiene de los resultados del elemento PMP y del elemento VSPB de la Figura 9.20.

- Number of Running Lag Pumps (NRLP): Número de Bombas Adicionales en Operación en español, este parámetros nos dice cuántas bombas se encuentran en operación para el elemento VSPB adicionales a la bomba “base”, donde 0 significa que opera una bomba y valores superiores significa que operan uno más el número de NRLP. Estos valores se obtiene de los resultados del elemento VSPB de la Figura 9.20.

Para el conteo de las partidas/paradas de las bombas, se utilizan los resultados de:

(1) Valores de RSF para el elemento PMP: indica si el elemento PMP se encuentra operando. Dado que la bomba no tiene un variador de frecuencia, el valor de su resultado puede ser 0 (bomba no operando) o 1 (bomba operando).
(2) Valores de RSF para el elemento VSPB: indica si el elemento VSPB se encuentra operando. Dado que la bomba tiene variador de frecuencia, sus valores varían entre 0 y 1. Es importante recordar, que como la batería de bombas operan a la misma velocidad, la frecuencia reducida es la misma independiente del número de bombas en operación.
(3) Valores de NRLP para el elemento VSBP: indica cuantas bombas se encuentran en operación, dada que la configuración de los modelos es 3+1, el valor máximo de esta variable puede ser 2. De estos resultados se utilizan los cambios del número de bombas en operación para estimar cuando una bomba entra o sale de operación.

Se debe tener presente el hecho de que el elemento PMP y VSPB representan un único elemento en la realidad, ha sido dividido en dos elementos en el modelo para poder cumplir las restricciones propias del cálculo empleado por el programa (modelo por demanda).

Los dos resultados RSF se suman en un único valor para cada instante de simulación, ya que ambos elementos del modelo muestran el estado operacional de un único elemento real. A partir de esta lista de valores, se estiman las partidas por hora debidas a las paradas del equipo de bombeo, sin embargo, se debe agregar las partidas por hora debido a las entradas o salidas en operación de las otras bombas (valores NRLP) debido a fluctuaciones en el caudal demandado.

Los resultados NRLP se evalúan entre un valor escogido y el inmediatamente siguiente. Se verifica que el valor se mantenga constante, cualquier cambio ya sea un aumento o una disminución en este valor implica la entrada o la salida de una bomba, en consecuencia una partida/parada.

Finalmente sumando las partidas/paradas para ambos resultados RSF y los resultados NRLP se obtienen las partidas por hora para el equipo de bombeo.

*C.6.1.2. Bombas con variador de frecuencia junto a estanque hidroneumático (Figura 9.21)*

Análogo al caso anterior, con las siguientes diferencias:

- El estanque hidroneumático en este caso es real y no virtual, como se aprecia en la Figura 9.21.
- La ventana de presiones del estanque hidroneumático real varía entre 51 a 61 [mca] como se mencionó en el punto **C.3.1**.
- El tiempo mínimo entre partidas del sistema del estanque hidroneumático es calculado según la formulación clásica (ver punto 2.4.1) o la propuesta (ver punto 4.1.4) según sea el modelo en análisis.
- Debido a que el programa empleado no admite que sea conectado un elemento VSPB a uno HT, se debe crear una bomba "virtual" (elemento PMP) que haga el papel de la bomba real operando a su mínima frecuencia de funcionamiento.

## C.6.2. Modelación de pérdidas de carga

Para las pérdidas de carga se empleó el modelo de Hazen-Williams, empleándose un único valor para el coeficiente ($C_{HW}$ = 140).

La diferencia en la pérdida de energía se genera a través de la variación del diámetro de las tuberías:

- D = 160 [mm] para una red con bajas pérdidas.
- D = 110 [mm] para una red con altas pérdidas.

Esto se indica en la Tabla 4.5.

## C.6.3. Modelación de la fuente de agua

En la realidad el agua proviene desde la red y se puede encontrar conectado a las bombas que alimentan al sector en altura en alguna de las siguientes situaciones por ejemplo:

- Conexión directa desde la red a las bombas, por lo que las variaciones de presión en la red afectan la presión dinámica a impulsar por la bomba. Cuando se emplean bombas de pozo profundo, se emplean pozos presurizados para su instalación.
- Sentina de descarga para el agua proveniente de la red desde la cual aspira el equipo de bombeo. En este caso no son transmitidas las variaciones de presión en la red a las bombas, sin embargo, se debe tener cuidado con que la sentina no se seque cuando ocurre un evento de incendio, es decir, que el caudal que entrega la red a la

sentina sea menor a 16 [L/s] (es despreciable la capacidad de regulación de la sentina).

En el caso particular de los modelos de la presente memoria se ha asumido que se trabaja con una sentina, no son transferidas las variaciones de presión en la red y además no existen problemas con la sentina para el evento de incendio.

El agua en el modelo es suministrada según la Figura 9.19 por el elemento “R” que de acuerdo a la Tabla 9.15 corresponde a un “Reservorio”. Este elemento virtual (no real) del modelo tiene una capacidad infinita de suministro de agua y mantiene una cota de pelo de agua constante (no entrega una sobrepresión), por lo que tiene el mismo comportamiento que el elemento real descrito en el párrafo anterior.

De esta manera el “Reservorio” que es un elemento virtual, cumple la misma función del elemento real, permitiendo así una correcta modelación del fenómeno en estudio.

### C.6.4. Modelación de la demanda de población

En la realidad el agua es demandada por una red de moderada extensión en la cual se deben buscar los puntos de funcionamiento detallados en el numeral 4.1.1 - Puntos de funcionamiento del sistema.

La red se resume al peor punto de funcionamiento para el Qmáxh (caudal máximo horario) y el Qcoinc (caudal coincidente). Para efectos de modelación es coincidente con el comportamiento real de la red en relación a las pérdidas asociadas y la presión dinámica a impulsar por el equipo de bombeo. Además la curva de demanda de la red, especificada en la Figura 4.4 y Figura 4.7 ha sido cargado en el correspondiente modelo para el nodo “J-1” identificado en la Figura 9.19.

De esta manera se modela la demanda de la red junto a sus características físicas.

## C.7. INGRESO DE DATOS AL MODELO

### C.7.1. Demanda de la población

La demanda de la población, como se nombró en el punto C.6.4, es cargada en el nodo “J-1” identificado en la Figura 9.19. Para esto se le asigna una demanda unitaria al nodo y se le asocia la curva de datos de consumo de caudal empleada en los respectivos modelos.

### C.7.2. Curvas de las bombas

Para cada uno de los tres tipos de bombas empleadas, se utilizan cuatro bombas, sumando un total de 12 bombas empleadas en total. Los modelos de las bombas empleadas se resumen en la siguiente tabla:

*Tabla 9.17 - Resumen de bombas empleados en los modelos*

| **Tipo bomba** | **Marca** | **Modelo** |
|---|---|---|
| B1 | KSB | UPA 150C-30/6 DN 100 5,5 |
| | KSB | UPA 150C-30/10 UMA 150E 9/21 |
| | KSB | UPA 150C-30/9 UMA 150E 9/21 |
| | KSB | UPA 150C-30/14 UMA 150E 13/21 |
| B2 | Grundfos | CRE 20-6 P-F-A-E-HQQE |
| | Grundfos | CR_20-10_A-F-A-E-HQQE |
| | Grundfos | CR_32-6_A-F-A-E-HQQE |
| | Grundfos | CR_32-8_A-F-A-E-HQQE |
| B3 | Grundfos | SP_30-6 |
| | Grundfos | SP_30-9 |
| | Grundfos | SP_30-9 |
| | Grundfos | SP_46-10 |

La curva de cada bomba se obtiene a partir de la información provista por el fabricante en su catálogo técnico. Según la Figura 9.19 y dependiendo del modelo en estudio, se carga la curva de la bomba en el elemento VPSB (configuración 3+1) y es cargada la curva de la bomba reducida a la mínima frecuencia de funcionamiento determinado en el elemento PMP.

En los modelos cuya única diferencia sea si es del tipo VF o VF+HT, si bien se emplea la misma curva de bomba para el elemento VSPB, la curva a ingresar al elemento PMP es distinta debido a que por lo general siempre para el caso VF+HT se emplea una frecuencia mínima de funcionamiento más alta debido a la mayor presión requerida por el ventana del hidroneumático.

### C.7.3. Volumen de estanque hidroneumático

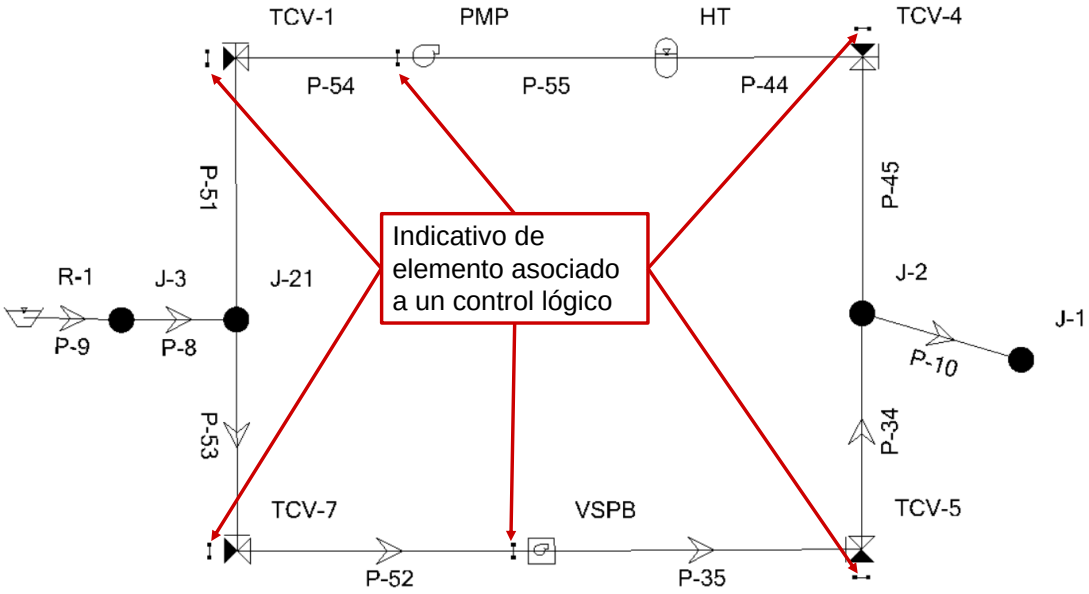
Los volúmenes para los distintos estanques hidroneumáticos especificados en la Tabla 9.12, Tabla 9.13 y Tabla 9.14, son ingresados en las propiedades del elemento HT existente en la Figura 9.19.

## C.8. CONTROLES LÓGICOS IMPLEMENTADOS EN EL MODELO

Los controles lógicos es una herramienta de la que se dispone en el programa empleado, ampliando los horizontes en las opciones de diseño al permitir la incorporación de controles lógicos en las instrucciones a seguir por el modelo.

Actualmente el control lógico permite emplear las sentencias lógicas: IF, AND y OR, las cuales en conjunto con las “Condiciones” y “Acciones” permite una amplia variedad de nuevas opciones. Se distingue un elemento que este asociado a un control lógico porque el programa dibuja una pequeña barra con dos círculos cercana al dibujo del elemento.

Figura 9.22 - Indicar de control lógico en los elementos de los modelos




Los controles lógicos implementados para cada uno de los dos escenarios se diferencia si es un modelo de tipo “VF” (con hidroneumático virtual) o “VF+HT” (con hidroneumático real) según lo explicado en la Tabla 4.2. La diferencia radica en la ventana de presiones para cada elemento HT existente en ambos modelos.

En los siguientes puntos se presentará la programación lógica para los modelos tipo VF o VF+HT.

### C.8.1. Controles lógicos para un modelo tipo VF

```
IF (P-10 Flow) <= (Qmínb) THEN
      Open TCV-1
      Open TCV -4
```

```
      Close TCV-5
      Close TCV-7
      Off VSPB
END IF
IF [(P-10 Flow) <= (Qmínb)] AND [(HT Pressure) > 51.50] THEN
      Off PMP
END IF
IF [(P-10 Flow) <= (Qmínb)] AND [(HT Pressure) < 51] THEN
      On PMP
END IF
IF (P-10 Flow) > (Qmínb) THEN
      Close TCV-1
      Close TCV -4
      Open TCV-5
      Open TCV-7
      On VSPB
      Off PMP
END IF
```

### C.8.2. Controles lógicos para un modelo tipo VF+HT

```
IF (P-10 Flow) <= (Qmínb) THEN
      Open TCV-1
      Open TCV -4
      Close TCV-5
      Close TCV-7
      Off VSPB
END IF
```

```
IF [(P-10 Flow) <= (Qmínb)] AND [(HT Pressure) > 61] THEN
      Off PMP
END IF
IF [(P-10 Flow) <= (Qmínb)] AND [(HT Pressure) < 51] THEN
      On PMP
END IF
IF (P-10 Flow) > (Qmínb) THEN
      Close TCV-1
      Close TCV -4
      Open TCV-5
      Open TCV-7
      On VSPB
      Off PMP
END IF
```

# D. ANEXO 4: RESULTADOS EN EXTENSO DE MODELOS HIDRÁULICOS COMPUTACIONALES

## D.1. NOMENCLATURA PARA LAS TABLAS DE RESULTADOS

En la siguiente tabla se explica la nomenclatura utilizada por las tablas empleadas en los resultados de los modelos:

*Tabla 9.18 - Nomenclatura para las tablas de los resultados de los modelos para los distintos tipos de bombas*

| Parámetro | Observación |
|---|---|
| N° A/H Totales | Hace referencia al número de arranques por hora (A/H) totales, es decir, para el conjunto de equipos empleados. Este valor no se encuentra divido por el número de equipos de bombeo empleados. |
| %N° A/H Totales | Evalúa la diferencia porcentual entre los distintos modelos para el número de arranques totales, donde el modelo base para calcular el porcentaje se encuentra marcado con negrita. |
| Qm hidro [L/s] | Caudal medio del estanque hidroneumático. Para el caso en que su volumen se estima por medio de las ecuaciones propuestas este valor es igual al caudal mínimo de la bomba para la más baja de frecuencia de funcionamiento calculada; para el caso en su volumen se estime con las ecuaciones actuales, su valor representa el promedio de los dos caudales limites estimados con la curva de la bomba a su mínima frecuencia de funcionamiento calculada. |
| % Qm hidro [L/s] | Evalúa la diferencia porcentual entre los distintos modelos para el caudal medio del hidroneumático, donde el modelo base para calcular el porcentaje es marcado con negrita. |
| Vol total hidro [L] | Valor del volumen total del estanque hidroneumático estimado con las fórmulas de cálculo. |
| % Vol total hidro [L] | Evalúa la diferencia porcentual entre los distintos modelos para el volumen total del estanque hidroneumático, donde el modelo base para calcular el porcentaje se encuentra marcado con negrita. |
| Vol total diseño hidro [L] | Volumen de diseño del hidroneumático, este valor se obtiene de aproximar el "Vol total hidro [L]" al inmediatamente superior modelo comercial existente. Este volumen es el que finalmente es empleado en la realidad y con el que se realizan las modelaciones. |
| % Vol total diseño hidro [L] | Evalúa la diferencia porcentual entre los distintos modelos para el volumen total de diseño del estanque hidroneumático, donde el modelo base para calcular el porcentaje se encuentra marcado con negrita. |

## D.2. RESULTADOS PARA LOS MODELOS DE LA BOMBA TIPO 1 (B1)

En el siguiente punto se revisarán los resultados de los 20 modelos que corresponden a la bomba tipo 1.

Los resultados aquí presentados corresponden al conjunto de bombas instaladas, por lo tanto los valores deben ser comparados contra el límite máximo de arranques por hora de cada bomba amplificado por el número de bombas instaladas, en este caso como la configuración es del tipo 3+1, se tiene un total de 4 bombas que se alternan los arranques. Dichos límites para cada bomba son detallados en la Tabla 5.2, Tabla 5.3 y Tabla 5.4.

### D.2.1. Arranques por hora y volumen de hidroneumático para modelos B1-Q1-BP-VF y B1-Q1-BP-VF+HT

Figura 9.23 - Arranques totales por cada hora para los modelos B1-Q1-BP-VF y B1-Q1-BP-VF+HT

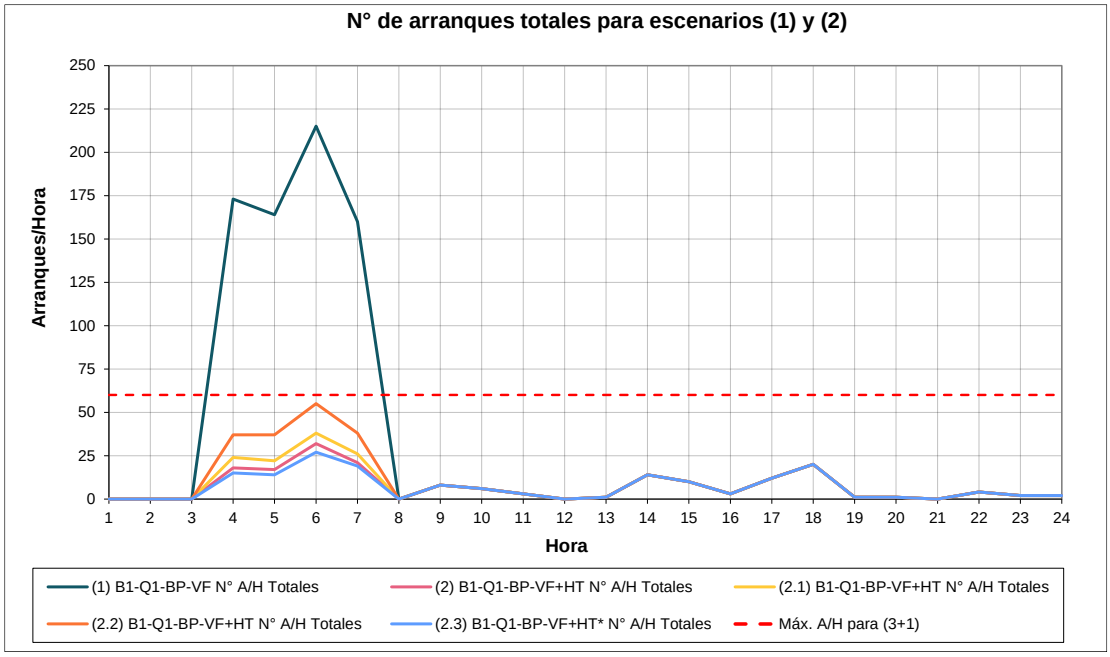



*Tabla 9.19 - Resumen de arranques totales por cada hora para los modelos B1-Q1-BP-VF y B1-Q1-BP-VF+HT*

| | Modelos para bomba tipo B1 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | (1) B1-Q1-BP-VF | (2) B1-Q1-BP-VF+HT | (2.1) B1-Q1-BP-VF+HT | (2.2) B1-Q1-BP-VF+HT | (2.3) B1-Q1-BP-VF+HT* |
| | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales |
| Total | 799 | 175 | 197 | 254 | 162 |
| Promedio | 33 | 7 | 8 | 11 | 7 |
| Máximo | 215 | 32 | 38 | 55 | 27 |
| Mínimo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Son informados en el gráfico los valores de arranques por hora, contabilizados para cada una de las horas simuladas en el programa. En la tabla adjunta, se informan el total de partidas, el promedio del día, el valor máximo y el valor mínimo.

Se observa en la Figura 9.23:

Las partidas por hora se encuentran concentradas entre las 3 am y las 8 am, resultado esperable debido a que la demanda de la población (ver Figura 4.6) es bajísima durante la noche.

- Después de las 8 am y hasta las 3 am, las partidas por hora son atribuibles casi en su totalidad a las partidas y paradas de bombas adicionales necesarias para cubrir la demanda.
- El límite máximo de arranques por hora indicada en el gráfico no es superado por el escenario sin estanque hidroneumático, menos por el escenario con hidroneumático. Esto demuestra que el aporte de agregar un estanque hidroneumático a sistema de bombeo con poblaciones medianas a grandes es nulo, dicha conclusión es lógica y responde al raciocinio de que a medida que las poblaciones aumentan de tamaño su demanda prácticamente jamás se hace cero o es tan baja que obligue a una detención de las bombas que la alimentan.

*Tabla 9.20 - Diferencias en los arranques por hora para los modelos B1-Q1-BP-VF y B1-Q1-BP-VF+HT*

| **N° MH** | **Código de Modelo Hidráulico** | **N° A/H Totales** | **%N° A/H Totales** | **N° A/H Totales** | **%N° A/H Totales** |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | B1-Q1-BP-VF | **799** | **0%** | - | - |
| 2 | B1-Q1-BP-VF+HT-Qmínb | 175 | -78% | **175** | **0%** |
| 2.1 | B1-Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | 197 | -75% | 197 | 13% |
| 2.2 | B1-Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | 254 | -68% | 254 | 45% |
| 2.3 | B1-Q1-BP-VF+HT-Qm | 162 | -80% | 162 | -7% |

*Tabla 9.21 - Diferencias en el volumen del estanque hidroneumático para los modelos B1-Q1-BP-VF y B1-Q1-BP-VF+HT*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Qm hidro [L/s] | % Qm hidro [L/s] | Vol total hidro [L] | % Vol total hidro [L] | Vol total diseño hidro [L] | % Vol total diseño hidro [L] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | B1-Q1-BP-VF | - | - | - | - | - | - |
| 2 | B1-Q1-BP-VF+HT-Qmínb | **0.83** | **0%** | **356.65** | **0%** | **400** | **0%** |
| 2.1 | B1-Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | 0.63 | -25% | 267.49 | -25% | 300 | -25% |
| 2.2 | B1-Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | 0.42 | -50% | 178.33 | -50% | 180 | -55% |
| 2.3 | B1-Q1-BP-VF+HT-Qm | 4.38 | 425% | 468.10 | 31% | 500 | 25% |

De ambas tablas se puede observar:

- Existe una significativa disminución de los arranques por hora (78%) respecto al modelo en que no existe un estanque hidroneumático (modelo 1) justificando su empleo.
- Se observa en la Tabla 9.20 que disminuciones de un 25% para el Qm (modelo 2.1) generan un aumento de sólo 3% de los arranques por hora respecto al modelo 2, mientras disminuyen en un 25% el tamaño total de diseño del estanque hidroneumático.
- Se observa en la Tabla 9.20 que disminuciones de un 50% para el Qm (modelo 2.2) generan un aumento de sólo 10% de los arranques por hora respecto al modelo 2, mientras disminuyen en un 55% el tamaño total de diseño del estanque hidroneumático.
- Se observa en la Tabla 9.20 que para el Qm calculado con las ecuaciones actuales (modelo 2.3) generan un disminución de sólo 2% de los arranques por hora respecto al modelo 2, mientras aumenta en un 25% el tamaño total de diseño del estanque hidroneumático.
- En la Tabla 9.21 se observa que disminuciones en el Qm tienen una relación lineal con el volumen total del hidroneumático, no así, con el volumen de diseño que depende de los modelos comerciales disponibles. Esta relación lineal no aplica para el modelo 2.3 (formulación clásica, ver 2.4.2) debido a que las ecuaciones son distintas que para los modelos 2, 2.1 y 2.2 (formulación propuesta ver 4.1.4).

## D.2.2. Arranques por hora y volumen de hidroneumático para modelos B1-Q1-AP-VF y B1-Q1-AP-VF+HT

Figura 9.24 - Arranques totales por cada hora para los modelos B1-Q1-AP-VF y B1-Q1-AP-VF+HT

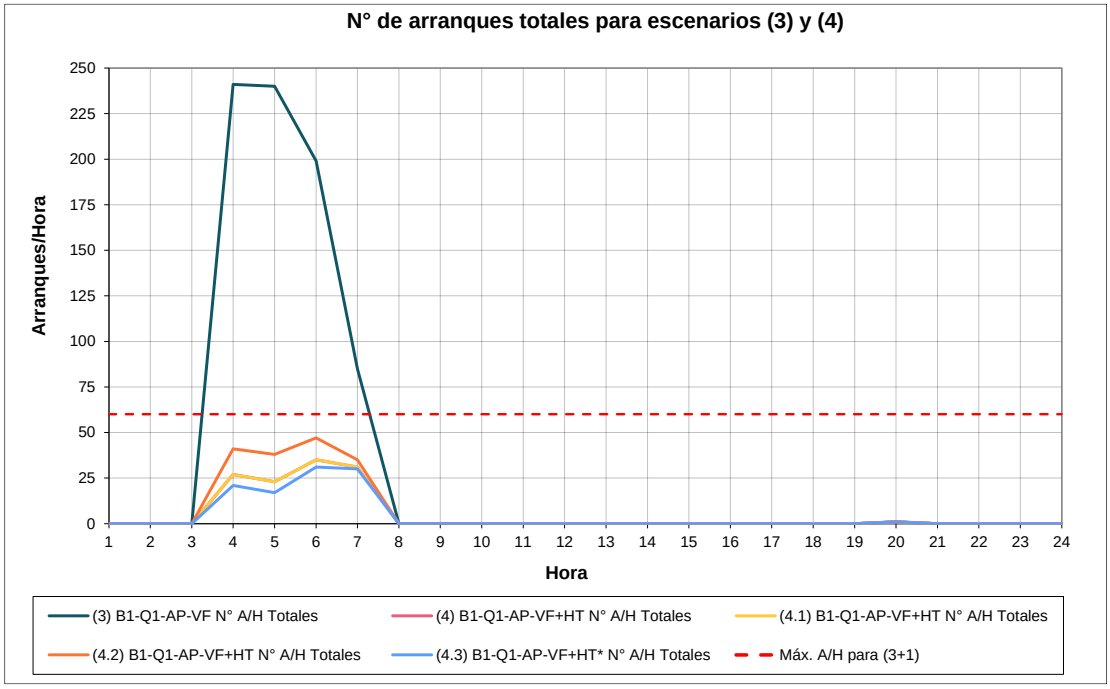



*Tabla 9.22 - Resumen de arranques totales por cada hora los modelos B1-Q1-AP-VF y B1-Q1-AP-VF+HT*

| | Modelos para bomba tipo B1 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | (3) B1-Q1-AP-VF | (4) B1-Q1-AP-VF+HT | (4.1) B1-Q1-AP-VF+HT | (4.2) B1-Q1-AP-VF+HT | (4.3) B1-Q1-AP-VF+HT* |
| | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales |
| Total | 766 | 117 | 117 | 162 | 100 |
| Promedio | 32 | 5 | 5 | 7 | 4 |
| Máximo | 241 | 35 | 35 | 47 | 31 |
| Mínimo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Son informados en el gráfico los valores de arranques por hora, contabilizados para cada una de las horas simuladas en el programa. En la tabla adjunta, se informan el total de partidas, el promedio del día, el valor máximo y el valor mínimo.

Se observa en el gráfico que:

Las partidas por hora se encuentran concentradas entre las 3 am y las 8 am, resultado esperable debido a que la demanda de la población (ver Figura 4.6) es bajísima durante la noche.

- Después de las 8 am y hasta las 3 am, las partidas por hora son atribuibles casi en su totalidad a las partidas y paradas de bombas adicionales necesarias para cubrir la demanda.
- El límite máximo de arranques por hora indicada en el gráfico no es superado por el escenario sin estanque hidroneumático, menos por el escenario con hidroneumático. Esto demuestra que el aporte de agregar un estanque hidroneumático a sistema de bombeo con poblaciones medianas a grandes es nulo, dicha conclusión es lógica y responde al raciocinio de que a medida que las poblaciones aumentan de tamaño su demanda prácticamente jamás se hace cero o es tan baja que obligue a una detención de las bombas que la alimentan.

*Tabla 9.23 - Diferencias en los arranques por hora para los modelos B1-Q1-AP-VF y B1-Q1-AP-VF+HT*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | N° A/H Totales | %N° A/H Totales | N° A/H Totales | %N° A/H Totales |
|---|---|---|---|---|---|
| 3 | B1-Q1-AP-VF | **766** | **0%** | - | - |
| 4 | B1-Q1-AP-VF+HT-Qmínb | 117 | -85% | **117** | **0%** |
| 4.1 | B1-Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | 117 | -85% | 117 | 0% |
| 4.2 | B1-Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | 162 | -79% | 162 | 38% |
| 4.3 | B1-Q1-AP-VF+HT-Qm | 100 | -87% | 100 | -15% |

*Tabla 9.24 - Diferencias en el volumen del estanque hidroneumático para los modelos B1-Q1-AP-VF y B1-Q1-AP-VF+HT*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Qm hidro [L/s] | % Qm hidro [L/s] | Vol total hidro [L] | % Vol total hidro [L] | Vol total diseño hidro [L] | % Vol total diseño hidro [L] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | B1-Q1-AP-VF | - | - | - | - | - | - |
| 4 | B1-Q1-AP-VF+HT-Qmínb | **0.64** | **0%** | **272.39** | **0%** | **300** | **0%** |
| 4.1 | B1-Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | 0.48 | -25% | 204.29 | -25% | 300 | 0% |
| 4.2 | B1-Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | 0.32 | -50% | 136.20 | -50% | 180 | -40% |
| 4.3 | B1-Q1-AP-VF+HT-Qm | 3.54 | 456% | 378.94 | 39% | 400 | 33% |

De ambas tablas se puede observar:

- Existe una significativa disminución de los arranques por hora (85%) respecto al modelo en que no existe un estanque hidroneumático (modelo 3) justificando su empleo.
- Se observa en la Tabla 9.23 que disminuciones de un 25% para el Qm (modelo 4.1) no generan un aumento de los arranques por hora respecto al modelo 4, debido a que si bien existe una diferencia en el volumen total del estanque hidroneumático dicha diferencia desaparece cuando se debe escoger el volumen de diseño (ver Tabla 4.6).
- Se observa en la Tabla 9.23 que disminuciones de un 50% para el Qm (modelo 4.2) generan un aumento de sólo 6% de los arranques por hora respecto al modelo 4, mientras disminuyen en un 40% el tamaño total de diseño del estanque hidroneumático.
- Se observa en la Tabla 9.23 que para el Qm calculado con las ecuaciones actuales (modelo 2.3) generan un disminución de sólo 2% de los arranques por hora respecto al modelo 2, mientras aumenta en un 33% el tamaño total de diseño del estanque hidroneumático.
- En la Tabla 9.24 se observa que disminuciones en el Qm tienen una relación lineal con el volumen total del hidroneumático, no así, con el volumen de diseño que depende de los modelos comerciales disponibles. Esta relación lineal no aplica para el modelo 2.3 (formulación clásica, ver 2.4.2) debido a que las ecuaciones son distintas que para los modelos 2, 2.1 y 2.2 (formulación propuesta ver 4.1.4).

D.2.3. Arranques por hora y volumen de hidroneumático para modelos B1-Q2-BP-VF y B1-Q2-BP-VF+HT

Figura 9.25 - Arranques totales por cada hora para los modelos B1-Q2-BP-VF y B1-Q2-BP-VF+HT

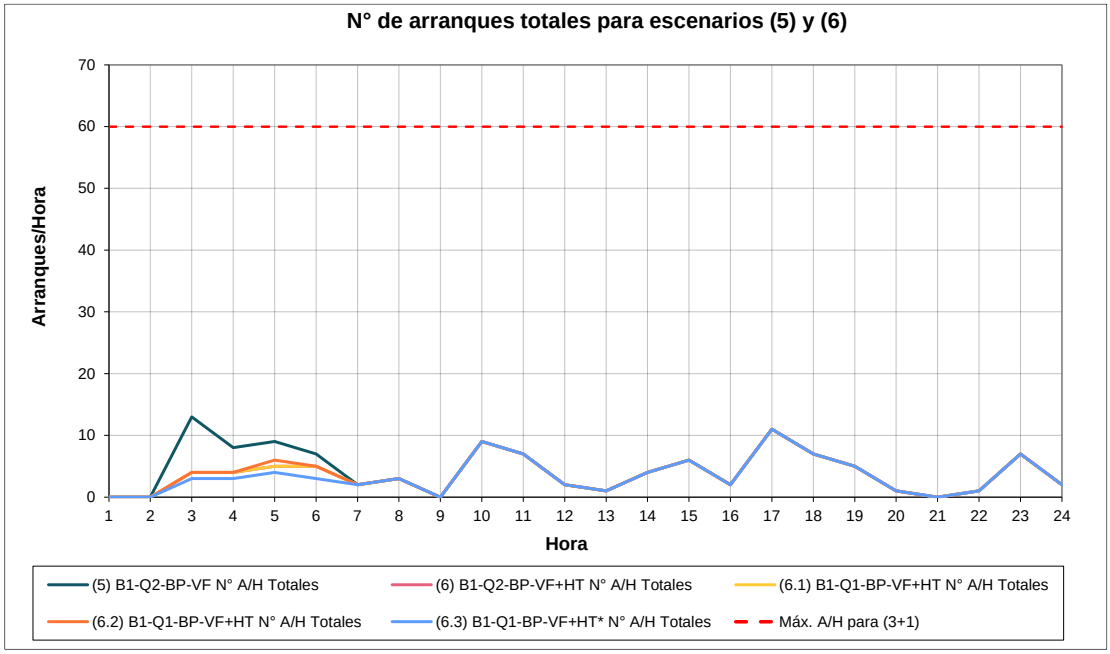


Figura 9.26 - Zoom arranques totales por cada hora para los modelos B1-Q2-BP-VF y B1-Q2-BP-VF+HT

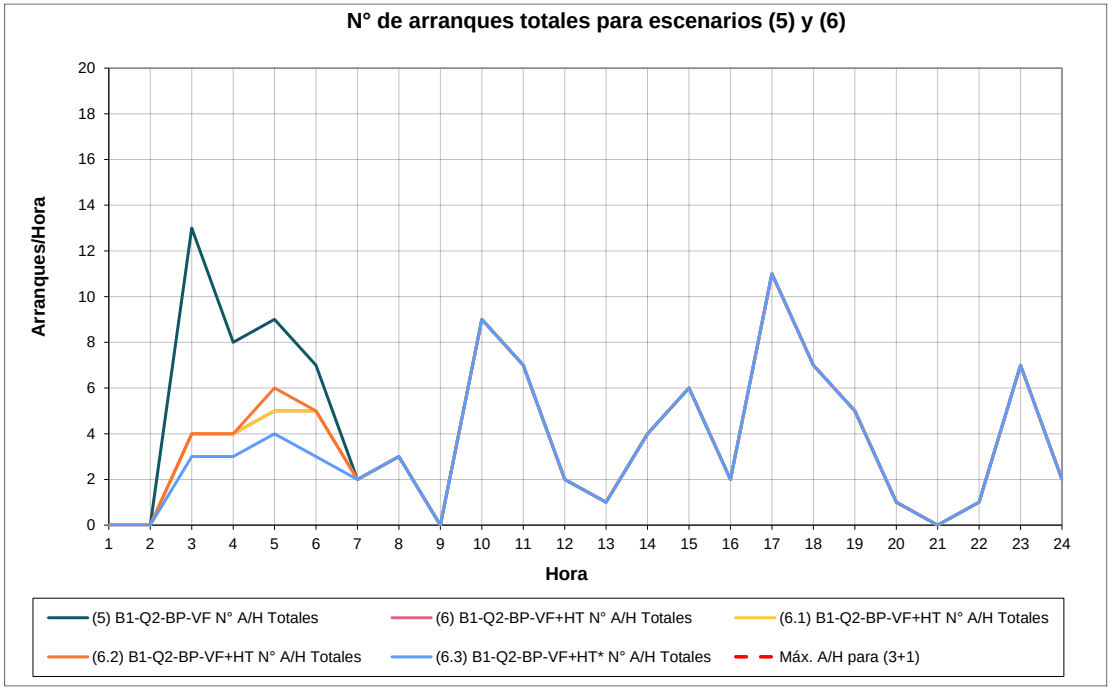



*Tabla 9.25 - Resumen de arranques totales por cada hora para los modelos B1-Q2-BP-VF y B1-Q2-BP-VF+HT*

| | Modelos para bomba tipo B1 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | (5) B1-Q2-BP-VF | (6) B1-Q2-BP-VF+HT | (6.1) B1-Q1-BP-VF+HT | (6.2) B1-Q1-BP-VF+HT | (6.3) B1-Q1-BP-VF+HT* |
| | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales |
| Total | 107 | 88 | 88 | 89 | 83 |
| Promedio | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| Máximo | 13 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| Mínimo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Son informados en el gráfico los valores de arranques por hora, contabilizados para cada una de las horas simuladas en el programa. En la tabla adjunta, se informan el total de partidas, el promedio del día, el valor máximo y el valor mínimo.

Se observa en el gráfico que:

- Las partidas por hora no se encuentran concentradas entre las 3 am y las 8 am como en los casos anteriores, resultado esperable debido a que si bien la demanda de la población (ver Figura 4.7) es baja durante la noche, no lo es el suficiente tiempo.
- No existe una preponderancia de las partidas por hora debido a un bajo caudal de demanda, sino que la mayor parte se debe a los arranques necesarios del sistema de bombeo para ajustarse a los cambios en el caudal de demanda.

- El límite máximo de arranques por hora indicada en el gráfico no es superado por el escenario sin estanque hidroneumático, menos por el escenario con hidroneumático. Esto demuestra que el aporte de agregar un estanque hidroneumático a sistema de bombeo con poblaciones medianas a grandes es nulo, dicha conclusión es lógica y responde al raciocinio de que a medida que las poblaciones aumentan de tamaño su demanda prácticamente jamás se hace cero o es tan baja que obligue a una detención de las bombas que la alimentan.

*Tabla 9.26 - Diferencias en los arranques por hora para los modelos B1-Q2-BP-VF y B1-Q2-BP-VF+HT*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | N° A/H Totales | %N° A/H Totales | N° A/H Totales | %N° A/H Totales |
|---|---|---|---|---|---|
| 5 | B1-Q2-BP-VF | **107** | **0%** | - | - |
| 6 | B1-Q2-BP-VF+HT-Qmínb | 88 | -18% | **88** | **0%** |
| 6.1 | B1-Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | 88 | -18% | 88 | 0% |
| 6.2 | B1-Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | 89 | -17% | 89 | 1% |
| 6.3 | B1-Q2-BP-VF+HT-Qm | 83 | -22% | 83 | -6% |

*Tabla 9.27 - Diferencias en el volumen del estanque hidroneumático para los modelos B1-Q2-BP-VF y B1-Q2-BP-VF+HT*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Qm hidro [L/s] | % Qm hidro [L/s] | Vol total hidro [L] | % Vol total hidro [L] | Vol total diseño hidro [L] | % Vol total diseño hidro [L] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | B1-Q2-BP-VF | - | - | - | - | - | - |
| 6 | B1-Q2-BP-VF+HT-Qmínb | **0.68** | **0%** | **289.21** | **0%** | **300** | **0%** |
| 6.1 | B1-Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | 0.51 | -25% | 216.91 | -25% | 300 | 0% |
| 6.2 | B1-Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | 0.34 | -50% | 144.60 | -50% | 180 | -40% |
| 6.3 | B1-Q2-BP-VF+HT-Qm | 4.03 | 496% | 430.95 | 49% | 500 | 67% |

Dado que la implementación de un estanque hidroneumático para el caso con el caudal de demanda de la población 2 (Q2, ver Figura 4.7) no reporta mayores beneficios, lo cual queda en evidencia al revisar la Tabla 9.26 y Tabla 9.27, no tiene sentido realizar un análisis de los resultados.

### D.2.4. Arranques por hora y volumen de hidroneumático para modelos B1-Q2-AP-VF y B1-Q2-AP-VF+HT

Figura 9.27 - Arranques totales por cada hora para los modelos B1-Q2-AP-VF y B1-Q2-AP-VF+HT

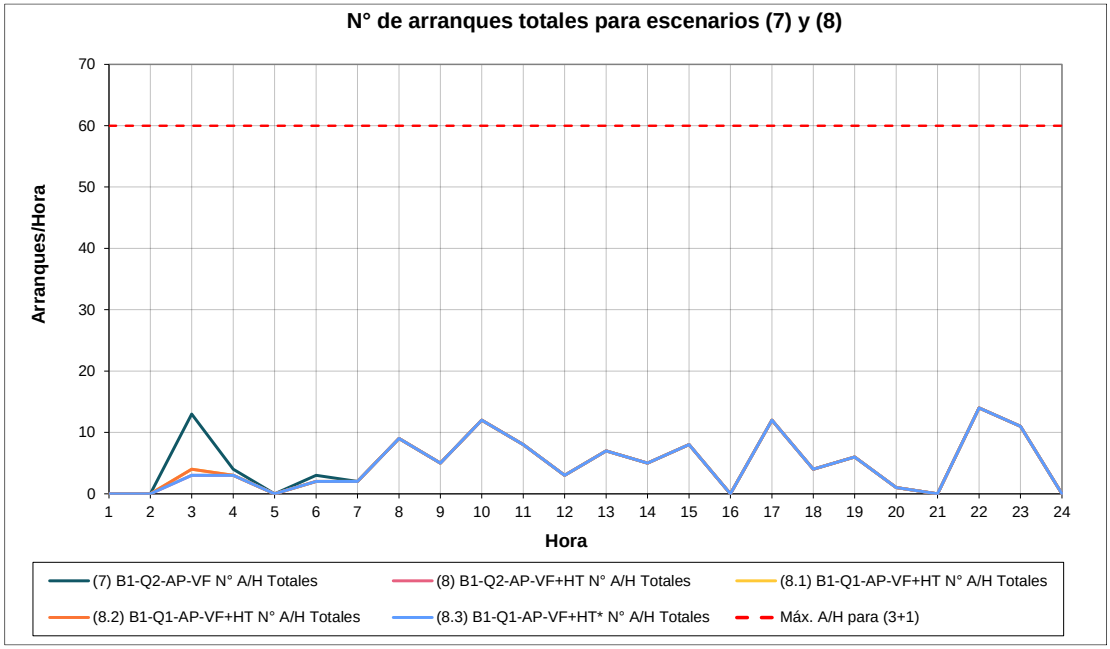



Figura 9.28 - Zoom arranques totales por cada hora para los modelos B1-Q2-AP-VF y B1-Q2-AP-VF+HT

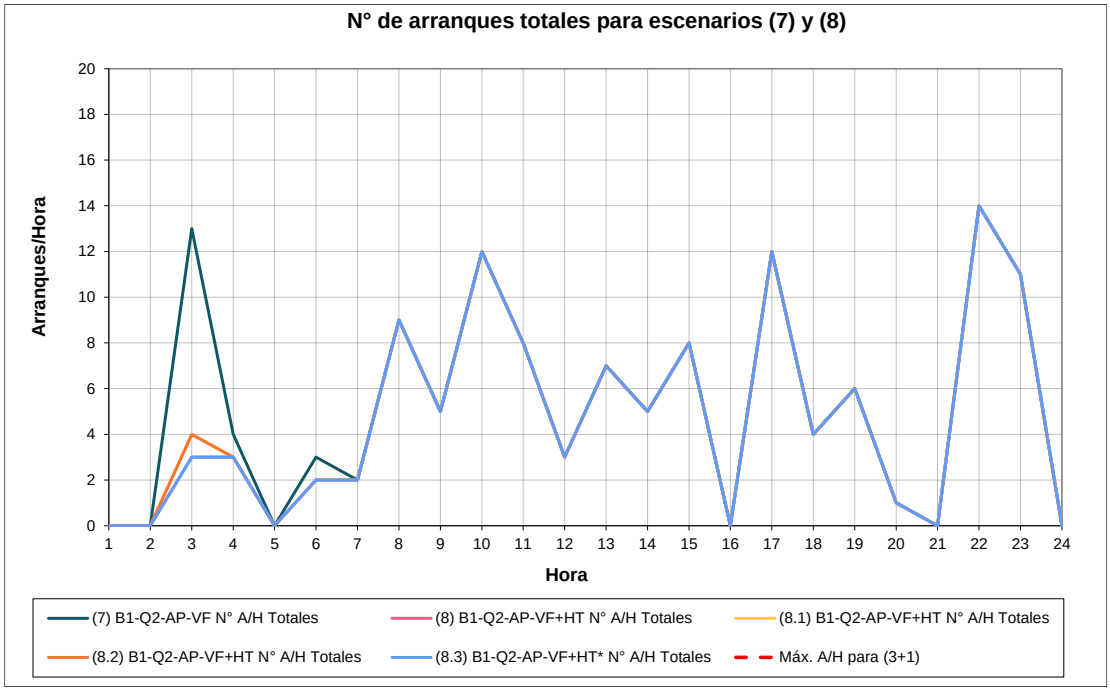


*Tabla 9.28 - Resumen de arranques totales por cada hora para los modelos B1-Q2-AP-VF y B1-Q2-AP-VF+HT*

| | Modelos para bomba tipo B1 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | (7) B1-Q2-AP-VF | (8) B1-Q2-AP-VF+HT | (8.1) B1-Q1-AP-VF+HT | (8.2) B1-Q1-AP-VF+HT | (8.3) B1-Q1-AP-VF+HT* |
| | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales |
| Total | 127 | 115 | 116 | 116 | 115 |
| Promedio | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Máximo | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| Mínimo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Se observa en el gráfico que:

- Las partidas por hora no se encuentran concentradas entre las 3 am y las 8 am como en los casos anteriores, resultado esperable debido a que si bien la demanda de la población (ver Figura 4.7) es baja durante la noche.
- No existe una preponderancia de las partidas por hora debido a un bajo caudal de demanda, sino que la mayor parte se debe a los arranques necesarios del sistema de bombeo para ajustarse a los cambios en el caudal de demanda.
- El límite máximo de arranques por hora indicada en el gráfico no es superado por el escenario sin estanque hidroneumático, menos por el escenario con hidroneumático. Esto demuestra que el aporte de agregar un estanque hidroneumático a sistema de bombeo con poblaciones medianas a grandes es nulo, dicha conclusión es lógica y responde al raciocinio de que a medida que las poblaciones aumentan de tamaño su demanda prácticamente jamás se hace cero o es tan baja que obligue a una detención de las bombas que la alimentan.

*Tabla 9.29 - Diferencias en los arranques por hora para los modelos B1-Q2-AP-VF y B1-Q2-AP-VF+HT*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | N° A/H Totales | %N° A/H Totales | N° A/H Totales | %N° A/H Totales |
|---|---|---|---|---|---|
| 7 | B1-Q2-AP-VF | **127** | **0%** | - | - |
| 8 | B1-Q2-AP-VF+HT-Qmínb | 115 | -9% | **115** | **0%** |
| 8.1 | B1-Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | 116 | -9% | 116 | 1% |
| 8.2 | B1-Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | 116 | -9% | 116 | 1% |
| 8.3 | B1-Q2-AP-VF+HT-Qm | 115 | -9% | 115 | 0% |

*Tabla 9.30 - Diferencias en el volumen del estanque hidroneumático para los modelos B1-Q2-AP-VF y B1-Q2-AP-VF+HT*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Qm hidro [L/s] | % Qm hidro [L/s] | Vol total hidro [L] | % Vol total hidro [L] | Vol total diseño hidro [L] | % Vol total diseño hidro [L] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | B1-Q2-AP-VF | - | - | - | - | - | - |
| 8 | B1-Q2-AP-VF+HT-Qmínb | **0.54** | **0%** | **230.45** | **0%** | **300** | **0%** |
| 8.1 | B1-Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | 0.40 | -25% | 172.84 | -25% | 180 | -40% |
| 8.2 | B1-Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | 0.27 | -50% | 115.23 | -50% | 180 | -40% |
| 8.3 | B1-Q2-AP-VF+HT-Qm | 6.67 | 1138% | 713.30 | 210% | 750 | 150% |

Dado que la implementación de un estanque hidroneumático para el caso con el caudal de demanda de la población 2 (Q2, ver Figura 4.7) no reporta mayores beneficios, lo cual queda en evidencia al revisar la Tabla 9.29 y Tabla 9.30, no tiene sentido realizar un análisis de los resultados.

### D.2.5. Resumen de resultados para los modelos de la bomba tipo 1

En la presente tabla se resume toda la información mostrada en los puntos anteriores para la bomba tipo 1.

*Tabla 9.31 - Resumen de resultados para los modelos de la bomba tipo 1*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | N° A/H Totales | %N° A/H Totales | N° A/H Totales | %N° A/H Totales | Qm hidro [L/s] | % Qm hidro [L/s] | Vol total hidro [L] | % Vol total hidro [L] | Vol total diseño hidro [L] | % Vol total diseño hidro [L] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | B1-Q1-BP-VF | **799** | **0%** | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2 | B1-Q1-BP-VF+HT-Qmínb | 175 | -78% | **175** | **0%** | **0.83** | **0%** | **356.65** | **0%** | **400** | **0%** |
| 2.1 | B1-Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | 197 | -75% | 197 | 13% | 0.63 | -25% | 267.49 | -25% | 300 | -25% |
| 2.2 | B1-Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | 254 | -68% | 254 | 45% | 0.42 | -50% | 178.33 | -50% | 180 | -55% |
| 2.3 | B1-Q1-BP-VF+HT-Qm | 162 | -80% | 162 | -7% | 4.38 | 425% | 468.10 | 31% | 500 | 25% |
| 3 | B1-Q1-AP-VF | **766** | **0%** | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 4 | B1-Q1-AP-VF+HT-Qmínb | 117 | -85% | **117** | **0%** | **0.64** | **0%** | **272.39** | **0%** | **300** | **0%** |
| 4.1 | B1-Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | 117 | -85% | 117 | 0% | 0.48 | -25% | 204.29 | -25% | 300 | 0% |
| 4.2 | B1-Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | 162 | -79% | 162 | 38% | 0.32 | -50% | 136.20 | -50% | 180 | -40% |
| 4.3 | B1-Q1-AP-VF+HT-Qm | 100 | -87% | 100 | -15% | 3.54 | 456% | 378.94 | 39% | 400 | 33% |
| 5 | B1-Q2-BP-VF | **107** | **0%** | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 6 | B1-Q2-BP-VF+HT-Qmínb | 88 | -18% | **88** | **0%** | **0.68** | **0%** | **289.21** | **0%** | **300** | **0%** |
| 6.1 | B1-Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | 88 | -18% | 88 | 0% | 0.51 | -25% | 216.91 | -25% | 300 | 0% |
| 6.2 | B1-Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | 89 | -17% | 89 | 1% | 0.34 | -50% | 144.60 | -50% | 180 | -40% |
| 6.3 | B1-Q2-BP-VF+HT-Qm | 83 | -22% | 83 | -6% | 4.03 | 496% | 430.95 | 49% | 500 | 67% |
| 7 | B1-Q2-AP-VF | **127** | **0%** | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 8 | B1-Q2-AP-VF+HT-Qmínb | 115 | -9% | **115** | **0%** | **0.54** | **0%** | **230.45** | **0%** | **300** | **0%** |
| 8.1 | B1-Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | 116 | -9% | 116 | 1% | 0.40 | -25% | 172.84 | -25% | 180 | -40% |
| 8.2 | B1-Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | 116 | -9% | 116 | 1% | 0.27 | -50% | 115.23 | -50% | 180 | -40% |
| 8.3 | B1-Q2-AP-VF+HT-Qm | 115 | -9% | 115 | 0% | 6.67 | 1138% | 713.30 | 210% | 750 | 150% |

*Tabla 9.32 - Detalle de los parámetros de las bombas empleadas en los modelos con bomba tipo 1 (B1)*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Características Bombas | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Marca | Modelo | Modelo Motor | Máx. partidas/ hora | Frecuencia mín [Hz] | Qmín b [L/s] | Tp [s] | Config. Bombas |
| 1 | B1-Q1-BP-VF | KSB | UPA 150C-30/6 DN 100 5,5 | UMA 150E | 15 | 46.2 | 0.77 | - | 3+1 |
| 2 | B1-Q1-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | 50.0 | 0.83 | 60 | 3+1 |
| 2.1 | B1-Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | |
| 2.2 | B1-Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | |
| 2.3 | B1-Q1-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | |
| 3 | B1-Q1-AP-VF | KSB | UPA 150C-30/10 UMA 150E 9/21 | UMA 150E | 15 | 34.4 | 0.57 | - | 3+1 |
| 4 | B1-Q1-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | 38.2 | 0.64 | 60 | 3+1 |
| 4.1 | B1-Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | |
| 4.2 | B1-Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | |
| 4.3 | B1-Q1-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | |
| 5 | B1-Q2-BP-VF | KSB | UPA 150C-30/9 UMA 150E 9/21 | UMA 150E | 15 | 36.7 | 0.61 | - | 3+1 |
| 6 | B1-Q2-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | 40.4 | 0.67 | 60 | 3+1 |
| 6.1 | B1-Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | |
| 6.2 | B1-Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | |
| 6.3 | B1-Q2-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | |
| 7 | B1-Q2-AP-VF | KSB | UPA 150C-30/14 UMA 150E 13/21 | UMA 150E | 15 | 29.5 | 0.49 | - | 3+1 |
| 8 | B1-Q2-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | 32.3 | 0.54 | 60 | 3+1 |
| 8.1 | B1-Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | |
| 8.2 | B1-Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | |
| 8.3 | B1-Q2-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | |

En la Tabla 9.31 se resumen los arranques por hora para los equipos de bombeo junto al volumen de los estanques hidroneumáticos, de manera de poder constatar rápidamente:

- Beneficios de la adición de un estanque hidroneumático en los arranques por hora.
- Aumento de los arranques por hora versus a la disminución del volumen de los estanques hidroneumáticos, al hacer variar el caudal medio (Qm).
- Resultados generados por la formulación clásica versus la formulación propuesta.

Además se vuelve a insertar la Tabla 9.32, en la que se indican las características de la bomba junto a las frecuencias de funcionamiento para el caudal mínimo alcanzado. Esto explica en parte las diferencias los arranques por hora para los modelos sin estanque hidroneumático.

### D.2.6. Comparación de resultados para los modelos con altas y bajas pérdidas de la bomba tipo 1

En la siguiente tabla se comparan los resultados de los modelos con altas y bajas pérdidas de la bomba tipo 1.

*Tabla 9.33 – Comparación resultados de arranques por hora entre modelos con altas y bajas pérdidas sin estanque hidroneumático*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | N° A/H Totales | %N° A/H Totales |
|---|---|---|---|
| 1 | B1-Q1-BP-VF | **799** | **0%** |
| 3 | B1-Q1-AP-VF | 766 | -4% |
| 5 | B1-Q2-BP-VF | **107** | **0%** |
| 7 | B1-Q2-AP-VF | 127 | 19% |

No existe una notable diferencia en la cantidad de arranques entre el modelo 1 y el modelo 3, así como en el modelo 5 y modelo 7. En ambos casos la diferencia es atribuible a que el Qmínb para los modelos con altas pérdidas tiende a ser menor que para los modelos con bajas perdidas. Dicha diferencia se genera debido a que las bombas para las redes con altas pérdidas deben elevar a una mayor altura, en consecuencia el recorrido que debe realizar su curva para llegar al Qmínb es mayor, por ende, su frecuencia mínima de operación tiende a ser más baja, análogamente ocurre lo contrario en las redes de bajas pérdidas.

## D.3. RESULTADOS PARA LOS MODELOS DE LA BOMBA TIPO 2 (B2)

En el siguiente punto se revisarán los resultados de los 20 modelos que corresponden a la bomba tipo 2.

Los resultados aquí presentados corresponden al conjunto de bombas instaladas, por lo tanto los valores deben ser comparados contra el límite máximo de arranques por hora de cada bomba amplificado por el número de bombas instaladas, en este caso como la configuración es del tipo 3+1, se tiene un total de 4 bombas que se alternan los arranques. Dichos límites para cada bomba son detallados en la Tabla 5.2, Tabla 5.3 y Tabla 5.4.

### D.3.1. Arranques por hora y volumen de hidroneumático para modelos B2-Q1-BP-VF y B2-Q1-BP-VF+HT

Figura 9.29 - Arranques totales por cada hora para los modelos B2-Q1-BP-VF y B2-Q1-BP-VF+HT

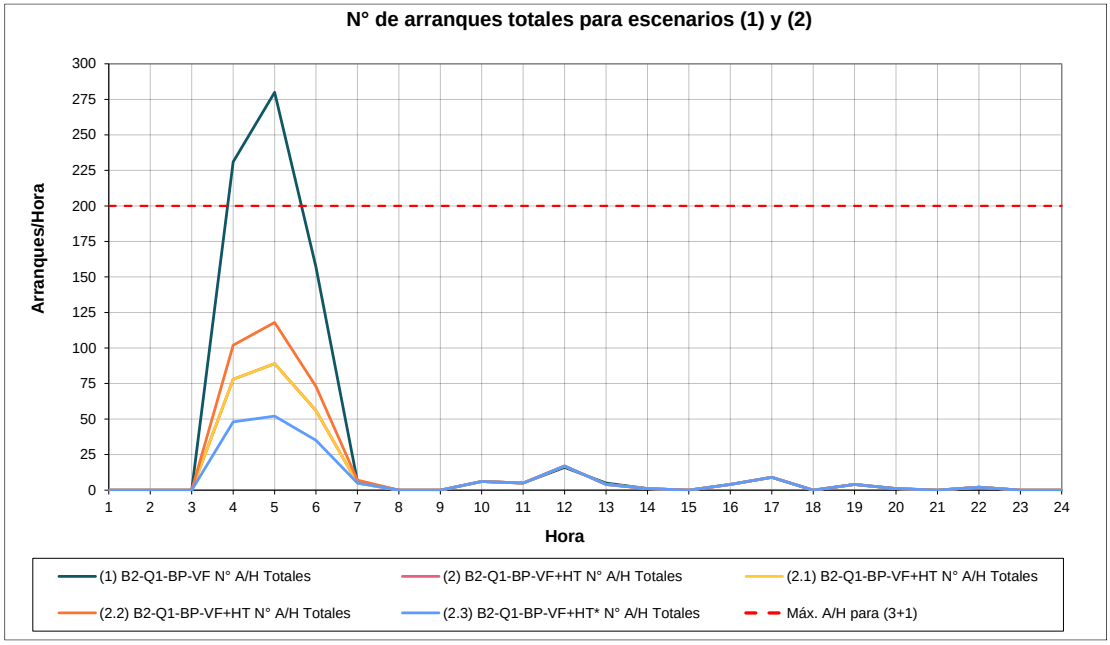



*Tabla 9.34 - Resumen de arranques totales por cada hora para los modelos B2-Q1-BP-VF y B2-Q1-BP-VF+HT*

| | Modelos para bomba tipo B2 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | (1) B2-Q1-BP-VF | (2) B2-Q1-BP-VF+HT | (2.1) B2-Q1-BP-VF+HT | (2.2) B2-Q1-BP-VF+HT | (2.3) B2-Q1-BP-VF+HT* |
| | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales |
| Total | 727 | 281 | 281 | 353 | 193 |
| Promedio | 30 | 12 | 12 | 15 | 8 |
| Máximo | 280 | 89 | 89 | 118 | 52 |
| Mínimo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Son informados en el gráfico los valores de arranques por hora, contabilizados para cada una de las horas simuladas en el programa. En la tabla adjunta, se informan el total de partidas, el promedio del día, el valor máximo y el valor mínimo.

Se observa en el gráfico que:

- Las partidas por hora se encuentran concentradas entre las 3 am y las 8 am, resultado esperable debido a que la demanda de la población (ver Figura 4.6) es bajísima durante la noche.
- Después de las 8 am y hasta las 3 am, las partidas por hora son atribuibles casi en su totalidad a las partidas y paradas de bombas adicionales necesarias para cubrir la demanda.
- El límite máximo de arranques por hora indicada en el gráfico es superado por el escenario sin estanque hidroneumático, no así por el escenario con hidroneumático.

Esto constituye el primer aporte significativo de este elemento a un mejor funcionamiento de las bombas, al reducir las partidas por hora al límite permitido por los equipos de bombeo.

*Tabla 9.35 - Diferencias en los arranques por hora para los modelos B2-Q1-BP-VF y B2-Q1-BP-VF+HT*

| N° | Escenarios de Análisis Principal | N° A/H Totales | %N° A/H Totales | N° A/H Totales | %N° A/H Totales |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | B2-Q1-BP-VF | **727** | **0%** | - | - |
| 2 | B2-Q1-BP-VF+HT-Qmínb | 281 | -61% | **281** | **0%** |
| 2.1 | B2-Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | 281 | -61% | 281 | 0% |
| 2.2 | B2-Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | 353 | -51% | 353 | 26% |
| 2.3 | B2-Q1-BP-VF+HT-Qm | 193 | -73% | 193 | -31% |

*Tabla 9.36 - Diferencias en el volumen del estanque hidroneumático para los modelos B2-Q1-BP-VF y B2-Q1-BP-VF+HT*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Qm hidro [L/s] | % Qm hidro [L/s] | Vol total hidro [L] | % Vol total hidro [L] | Vol total diseño hidro [L] | % Vol total diseño hidro [L] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | B2-Q1-BP-VF | - | - | - | - | - | - |
| 2 | B2-Q1-BP-VF+HT- | **0.40** | **0%** | **51.54** | **0%** | **60** | **0%** |
| 2.1 | B2-Q1-BP-VF+HT- | 0.30 | -25% | 38.66 | -25% | 60 | 0% |
| 2.2 | B2-Q1-BP-VF+HT- | 0.20 | -50% | 25.77 | -50% | 35 | -42% |
| 2.3 | B2-Q1-BP-VF+HT- | 3.75 | 834% | 120.37 | 134% | 180 | 200% |

De ambas tablas se puede observar:

- Existe una significativa disminución de los arranques por hora (61% para el modelo 2) respecto al modelo en que no existe un estanque hidroneumático (modelo 1) justificando su empleo.
- Se observa en la Tabla 9.35 que disminuciones de un 25% para el Qm (modelo 2.1) no generan variaciones en los arranques por hora respecto al modelo 2, si bien, disminuyen en un 25% el volumen total del estanque hidroneumático, no lo hace con el volumen de diseño que debido a los modelos comerciales empleados no se ve reflejada dicha disminución en el volumen empleado en la realidad.
- Se observa en la Tabla 9.35 que disminuciones de un 50% para el Qm (modelo 2.2) generan un aumento de sólo 10% de los arranques por hora respecto al modelo 2,

mientras disminuyen en un 42% el tamaño total de diseño del estanque hidroneumático.

- Se observa en la Tabla 9.35 que para el Qm calculado con las ecuaciones actuales (modelo 2.3) generan un disminución de sólo 12% de los arranques por hora respecto al modelo 2, mientras aumenta en un 200% el tamaño total de diseño del estanque hidroneumático.
- En la Tabla 9.35 se observa que disminuciones en el Qm tienen una relación lineal con el volumen total del hidroneumático, no así, con el volumen de diseño que depende de los modelos comerciales disponibles. Esta relación lineal no aplica para el modelo 2.3 (formulación clásica, ver 2.4.2) debido a que las ecuaciones son distintas que para los modelos 2, 2.1 y 2.2 (formulación propuesta ver 4.1.4).

### D.3.2. Arranques por hora y volumen de hidroneumático para modelos B2-Q1-AP-VF y B2-Q1-AP-VF+HT

Figura 9.30 - Arranques totales por cada hora para los modelos B2-Q1-AP-VF y B2-Q1-AP-VF+HT

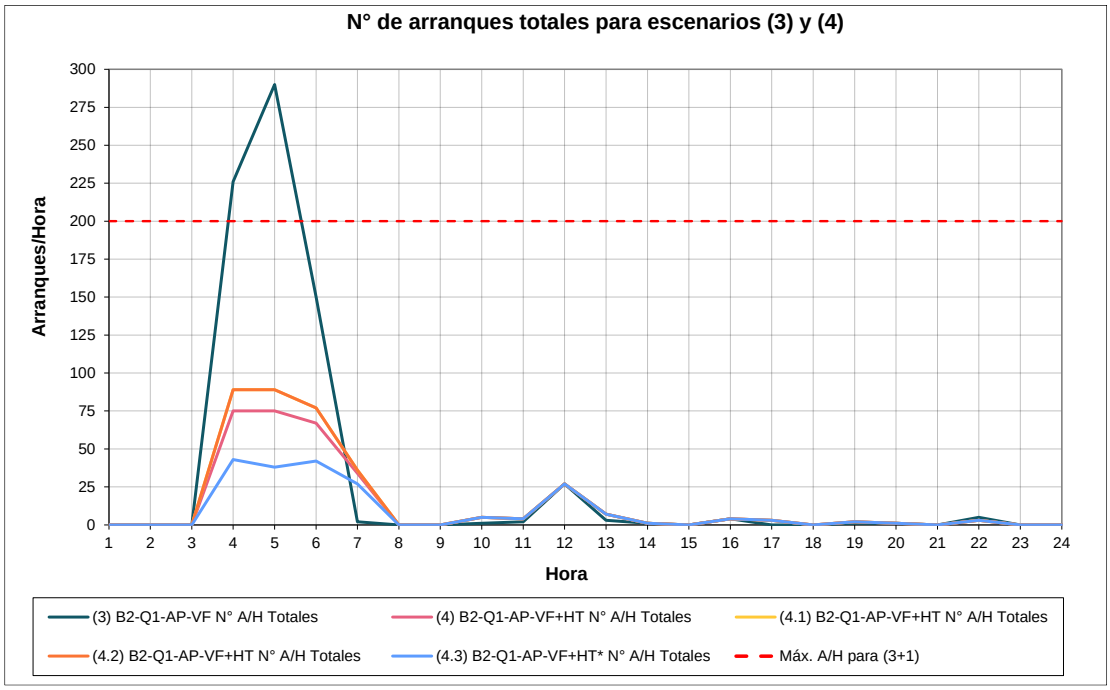


*Tabla 9.37 - Resumen de arranques totales por cada hora los modelos B2-Q1-AP-VF y B2-Q1-AP-VF+HT*

| | Modelos para bomba tipo B2 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | (3) B2-Q1-AP-VF | (4) B2-Q1-AP-VF+HT | (4.1) B2-Q1-AP-VF+HT | (4.2) B2-Q1-AP-VF+HT | (4.3) B2-Q1-AP-VF+HT* |
| | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales |
| Total | 713 | 308 | 348 | 348 | 207 |
| Promedio | 30 | 13 | 15 | 15 | 9 |
| Máximo | 290 | 75 | 89 | 89 | 43 |
| Mínimo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Son informados en el gráfico los valores de arranques por hora, contabilizados para cada una de las horas simuladas en el programa. En la tabla adjunta, se informan el total de partidas, el promedio del día, el valor máximo y el valor mínimo.

Se observa en el gráfico que:

- Las partidas por hora se encuentran concentradas entre las 3 am y las 8 am, resultado esperable debido a que la demanda de la población (ver Figura 4.6) es bajísima durante la noche.
- Después de las 8 am y hasta las 3 am, las partidas por hora son atribuibles casi en su totalidad a las partidas y paradas de bombas adicionales necesarias para cubrir la demanda.
- El límite máximo de arranques por hora indicada en el gráfico es superado por el escenario sin estanque hidroneumático, no así por el escenario con hidroneumático. Esto constituye el primer aporte significativo de este elemento a un mejor funcionamiento de las bombas, al reducir las partidas por hora al límite permitido por los equipos de bombeo.

*Tabla 9.38 - Diferencias en los arranques por hora para los modelos B2-Q1-AP-VF y B2-Q1-AP-VF+HT*

| N° | Escenarios de Análisis Principal | N° A/H Totales | %N° A/H Totales | N° A/H Totales | %N° A/H Totales |
|---|---|---|---|---|---|
| 3 | B2-Q1-AP-VF | **713** | **0%** | - | - |
| 4 | B2-Q1-AP-VF+HT-Qmínb | 308 | -57% | **308** | **0%** |
| 4.1 | B2-Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | 348 | -51% | 348 | 13% |
| 4.2 | B2-Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | 348 | -51% | 348 | 13% |
| 4.3 | B2-Q1-AP-VF+HT-Qm | 207 | -71% | 207 | -33% |

*Tabla 9.39 - Diferencias en el volumen del estanque hidroneumático para los modelos B2-Q1-AP-VF y B2-Q1-AP-VF+HT*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Qm hidro [L/s] | % Qm hidro [L/s] | Vol total hidro [L] | % Vol total hidro [L] | Vol total diseño hidro [L] | % Vol total diseño hidro [L] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | B2-Q1-AP-VF | - | - | - | - | - | - |
| 4 | B2-Q1-AP-VF+HT- | **0.56** | **0%** | **71.35** | **0%** | **80** | **0%** |
| 4.1 | B2-Q1-AP-VF+HT- | 0.42 | -25% | 53.52 | -25% | 60 | -25% |
| 4.2 | B2-Q1-AP-VF+HT- | 0.28 | -50% | 35.68 | -50% | 60 | -25% |
| 4.3 | B2-Q1-AP-VF+HT- | 3.47 | 525% | 111.45 | 56% | 180 | 125% |

De ambas tablas se puede observar:

- Existe una significativa disminución de los arranques por hora (57% para el modelo 4) respecto al modelo en que no existe un estanque hidroneumático (modelo 3) justificando su empleo.
- Se observa en la Tabla 9.38 que disminuciones de un 25% para el Qm (modelo 4.1) generan un aumento de sólo 6% de los arranques por hora respecto al modelo 4, mientras disminuyen en un 25% el tamaño total de diseño del estanque hidroneumático.
- Se observa en la Tabla 9.38 que disminuciones de un 50% para el Qm (modelo 4.2) generan un aumento de sólo 6% de los arranques por hora respecto al modelo 4, mientras disminuyen en un 25% el tamaño total de diseño del estanque hidroneumático. Esto se debe a que existe diferencia en el volumen total del estanque hidroneumático respecto del modelo 4.1 respecto al 4.2, sin embargo, dicha diferencia queda anulada en el volumen de diseño, por lo tanto ambos modelos obtienen los mismos resultados finales.
- Se observa en la Tabla 9.38 que para el Qm calculado con las ecuaciones actuales (modelo 2.3) generan un disminución de 20% de los arranques por hora respecto al modelo 2, mientras aumenta en un 125% el tamaño total de diseño del estanque hidroneumático. Dicho aumento no se justifica debido a que el modelo 4 se encuentra bastante lejano al límite de arranques por hora máximos permitidos por el equipo de bombeo.
- En la Tabla 9.38 se observa que disminuciones en el Qm tienen una relación lineal con el volumen total del hidroneumático, no así, con el volumen de diseño que depende de los modelos comerciales disponibles. Esta relación lineal no aplica para

el modelo 2.3 (formulación clásica, ver 2.4.2) debido a que las ecuaciones son distintas que para los modelos 2, 2.1 y 2.2 (formulación propuesta ver 4.1.4).

### D.3.3. Arranques por hora y volumen de hidroneumático para modelos B2-Q2-BP-VF y B2-Q2-BP-VF+HT

Figura 9.31 - Arranques totales por cada hora para los modelos B2-Q2-BP-VF y B2-Q2-BP-VF+HT

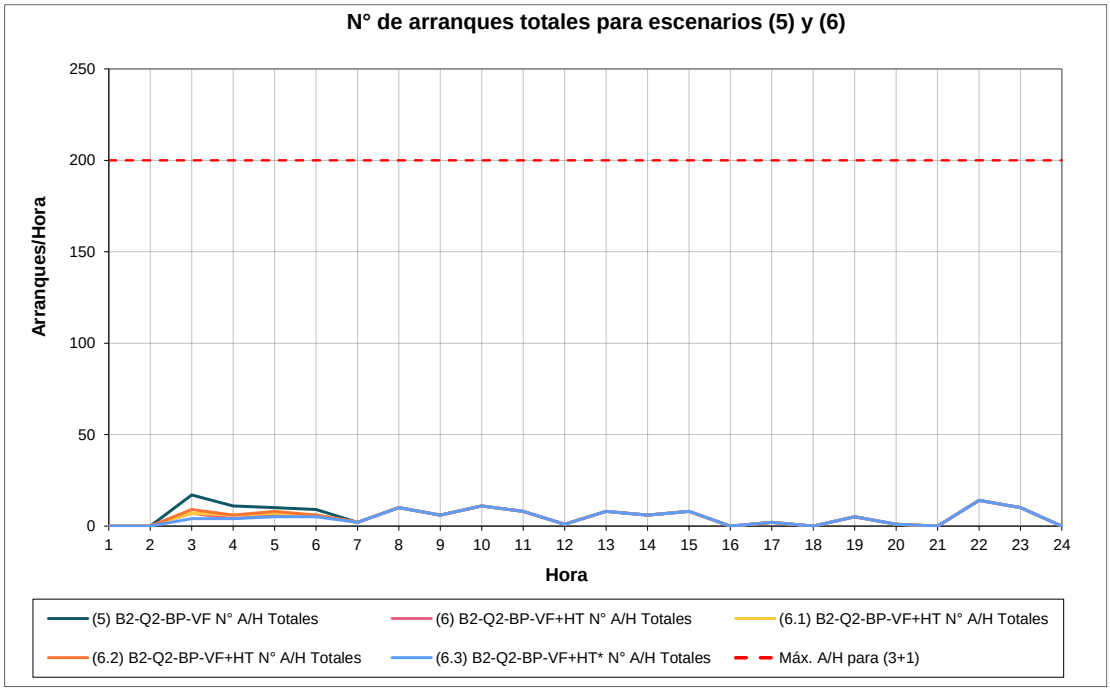


Figura 9.32 - Zoom arranques totales por cada hora para los modelos B2-Q2-BP-VF y B2-Q2-BP-VF+HT

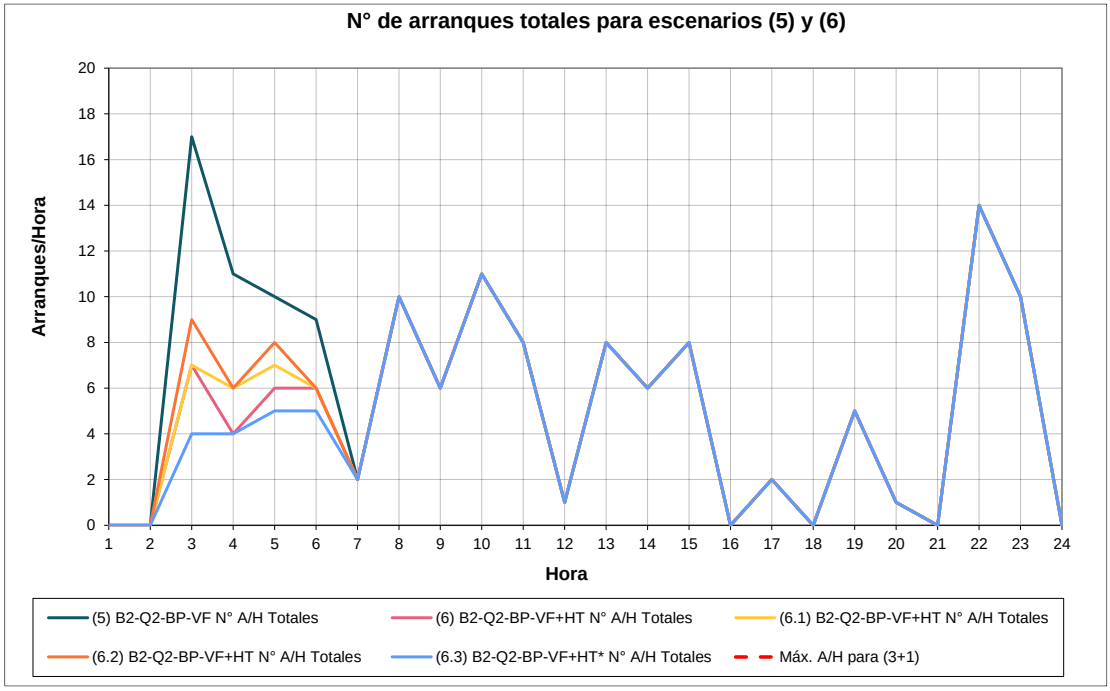



*Tabla 9.40 - Resumen de arranques totales por cada hora para los modelos B2-Q2-BP-VF y B2-Q2-BP-VF+HT*

| | Modelos para bomba tipo B2 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | (5) B2-Q2-BP-VF | (6) B2-Q2-BP-VF+HT | (6.1) B2-Q2-BP-VF+HT | (6.2) B2-Q2-BP-VF+HT | (6.3) B2-Q2-BP-VF+HT* |
| | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales |
| Total | 139 | 115 | 118 | 121 | 110 |
| Promedio | 6 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Máximo | 17 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| Mínimo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Son informados en el gráfico los valores de arranques por hora, contabilizados para cada una de las horas simuladas en el programa. En la tabla adjunta, se informan el total de partidas, el promedio del día, el valor máximo y el valor mínimo.

Se observa en el gráfico que:

- Las partidas por hora no se encuentran concentradas entre las 3 am y las 8 am como en los casos anteriores, resultado esperable debido a que si bien la demanda de la población (ver Figura 4.7) es baja durante la noche.
- No existe una preponderancia de las partidas por hora debido a un bajo caudal de demanda, sino que la mayor parte se debe a los arranques necesarios del sistema de bombeo para ajustarse a los cambios en el caudal de demanda.

- El límite máximo de arranques por hora indicada en el gráfico no es superado por el escenario sin estanque hidroneumático, menos por el escenario con hidroneumático. Esto demuestra que el aporte de agregar un estanque hidroneumático a sistema de bombeo con poblaciones medianas a grandes es nulo, dicha conclusión es lógica y responde al raciocinio de que a medida que las poblaciones aumentan de tamaño su demanda prácticamente jamás se hace cero o es tan baja que obligue a una detención de las bombas que la alimentan.

*Tabla 9.41 - Diferencias en los arranques por hora para los modelos B2-Q2-BP-VF y B2-Q2-BP-VF+HT*

| N° | Escenarios de Análisis Principal | N° A/H Totales | %N° A/H Totales | N° A/H Totales | %N° A/H Totales |
|---|---|---|---|---|---|
| 5 | B2-Q2-BP-VF | **139** | **0%** | - | - |
| 6 | B2-Q2-BP-VF+HT-Qmínb | 115 | -17% | **115** | **0%** |
| 6.1 | B2-Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | 118 | -15% | 118 | 3% |
| 6.2 | B2-Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | 121 | -13% | 121 | 5% |
| 6.3 | B2-Q2-BP-VF+HT-Qm | 110 | -21% | 110 | -4% |

*Tabla 9.42 - Diferencias en el volumen del estanque hidroneumático para los modelos B2-Q2-BP-VF y B2-Q2-BP-VF+HT*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Qm hidro [L/s] | % Qm hidro [L/s] | Vol total hidro [L] | % Vol total hidro [L] | Vol total diseño hidro [L] | % Vol total diseño hidro [L] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | B2-Q2-BP-VF | - | - | - | - | - | - |
| 6 | B2-Q2-BP-VF+HT- | **0.66** | **0%** | **84.70** | **0%** | **100** | **0%** |
| 6.1 | B2-Q2-BP-VF+HT- | 0.49 | -25% | 63.52 | -25% | 80 | -20% |
| 6.2 | B2-Q2-BP-VF+HT- | 0.33 | -50% | 42.35 | -50% | 60 | -40% |
| 6.3 | B2-Q2-BP-VF+HT- | 5.07 | 668% | 162.72 | 92% | 180 | 80% |

- Dado que la implementación de un estanque hidroneumático para el caso con el caudal de demanda de la población 2 (Q2, ver Figura 4.7) no reporta mayores beneficios, lo cual queda en evidencia al revisar la Tabla 9.56 y Tabla 9.57, no tiene sentido realizar un análisis de los resultados.

### D.3.4. Arranques por hora y volumen de hidroneumático para modelos B2-Q2-AP-VF y B2-Q2-AP-VF+HT

Figura 9.33 - Arranques totales por cada hora para los modelos B2-Q2-AP-VF y B2-Q2-AP-VF+HT

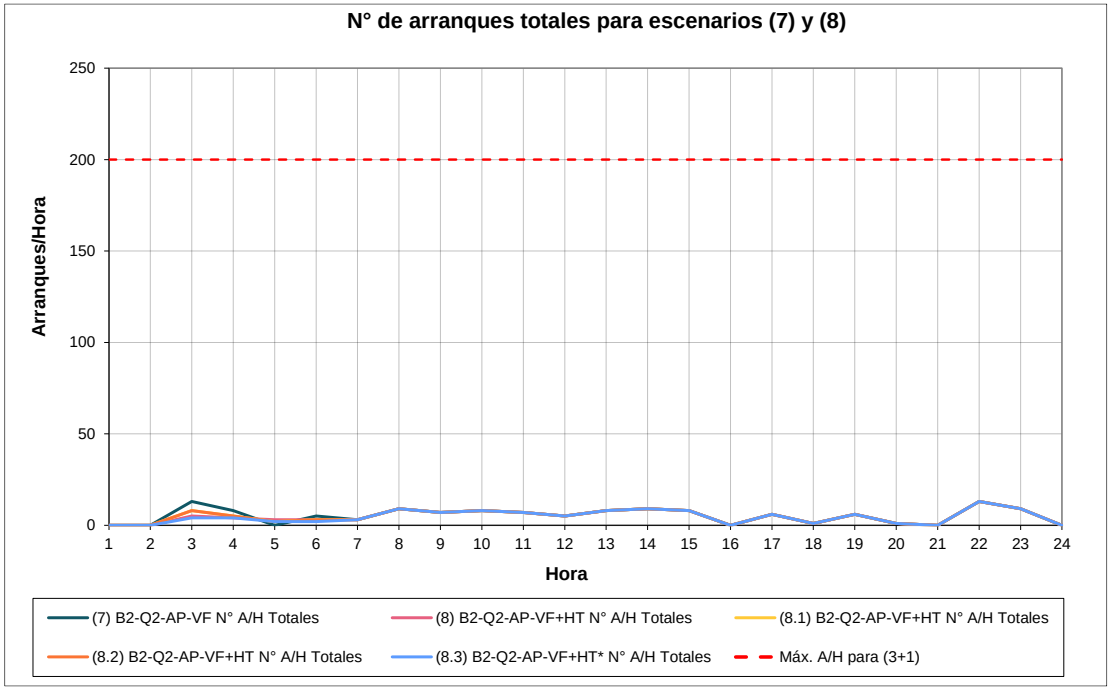



Figura 9.34 - Zoom arranques totales por cada hora para los modelos B2-Q2-AP-VF y B2-Q2-AP-VF+HT

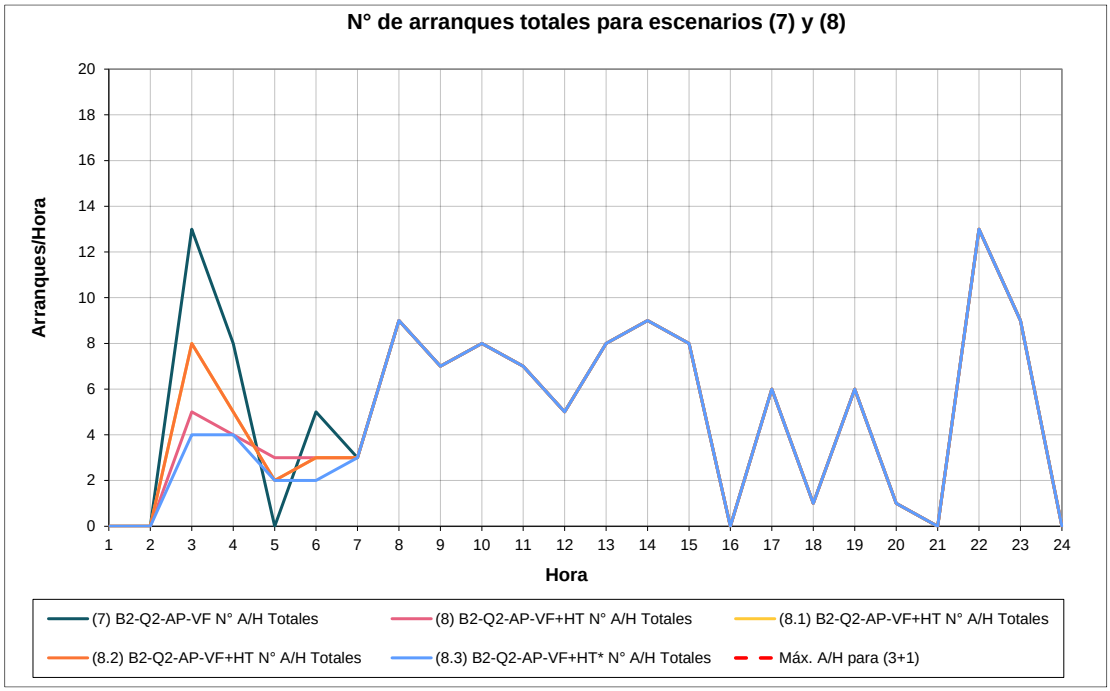


*Tabla 9.43 - Resumen de arranques totales por cada hora para los modelos B2-Q2-AP-VF y B2-Q2-AP-VF+HT*

| | Modelos para bomba tipo B2 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | (7) B2-Q2-AP-VF | (8) B2-Q2-AP-VF+HT | (8.1) B2-Q2-AP-VF+HT | (8.2) B2-Q2-AP-VF+HT | (8.3) B2-Q2-AP-VF+HT* |
| | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales |
| Total | 126 | 115 | 118 | 118 | 112 |
| Promedio | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Máximo | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 |
| Mínimo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Se observa en el gráfico que:

- Las partidas por hora no se encuentran concentradas entre las 3 am y las 8 am como en los casos anteriores, resultado esperable debido a que si bien la demanda de la población (ver Figura 4.7) es baja durante la noche.
- No existe una preponderancia de las partidas por hora debido a un bajo caudal de demanda, sino que la mayor parte se debe a los arranques necesarios del sistema de bombeo para ajustarse a los cambios en el caudal de demanda.
- El límite máximo de arranques por hora indicada en el gráfico no es superado por el escenario sin estanque hidroneumático, menos por el escenario con hidroneumático. Esto demuestra que el aporte de agregar un estanque hidroneumático a sistema de bombeo con poblaciones medianas a grandes es nulo, dicha conclusión es lógica y responde al raciocinio de que a medida que las poblaciones aumentan de tamaño su demanda prácticamente jamás se hace cero o es tan baja que obligue a una detención de las bombas que la alimentan.

*Tabla 9.44 - Diferencias en los arranques por hora para los modelos B2-Q2-AP-VF y B2-Q2-AP-VF+HT*

| N° | Escenarios de Análisis Principal | N° A/H Totales | %N° A/H Totales | N° A/H Totales | %N° A/H Totales |
|---|---|---|---|---|---|
| 7 | B2-Q2-AP-VF | **126** | **0%** | - | - |
| 8 | B2-Q2-AP-VF+HT-Qmínb | 115 | -9% | **115** | **0%** |
| 8.1 | B2-Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | 118 | -6% | 118 | 3% |
| 8.2 | B2-Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | 118 | -6% | 118 | 3% |
| 8.3 | B2-Q2-AP-VF+HT-Qm | 112 | -11% | 112 | -3% |

*Tabla 9.45 - Diferencias en el volumen del estanque hidroneumático para los modelos B2-Q2-AP-VF y B2-Q2-AP-VF+HT*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Qm hidro [L/s] | % Qm hidro [L/s] | Vol total hidro [L] | % Vol total hidro [L] | Vol total diseño hidro [L] | % Vol total diseño hidro [L] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | B2-Q2-AP-VF | - | - | - | - | - | - |
| 8 | B2-Q2-AP-VF+HT- | **0.57** | **0%** | **73.40** | **0%** | **80** | **0%** |
| 8.1 | B2-Q2-AP-VF+HT- | 0.43 | -25% | 55.05 | -25% | 60 | -25% |
| 8.2 | B2-Q2-AP-VF+HT- | 0.29 | -50% | 36.70 | -50% | 60 | -25% |
| 8.3 | B2-Q2-AP-VF+HT- | 4.44 | 677% | 142.66 | 94% | 180 | 125% |

Dado que la implementación de un estanque hidroneumático para el caso con el caudal de demanda de la población 2 (Q2, ver Figura 4.7) no reporta mayores beneficios, lo cual queda en evidencia al revisar la Tabla 9.59 y Tabla 9.60, no tiene sentido realizar un análisis de los resultados.

### D.3.5. Resumen de resultados para los modelos de la bomba tipo 2

En la presente tabla se resume toda la información mostrada en los puntos anteriores para la bomba tipo 2.

*Tabla 9.46 - Resumen de resultados para los modelos de la bomba tipo 2*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | N° A/H Totales | %N° A/H Totales | N° A/H Totales | %N° A/H Totales | Qm hidro [L/s] | % Qm hidro [L/s] | Vol total hidro [L] | % Vol total hidro [L] | Vol total diseño hidro [L] | % Vol total diseño hidro [L] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | B2-Q1-BP-VF | **727** | **0%** | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2 | B2-Q1-BP-VF+HT-Qmínb | 281 | -61% | **281** | **0%** | **0.40** | **0%** | **52** | **0%** | **60** | **0%** |
| 2.1 | B2-Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | 281 | -61% | 281 | 0% | 0.30 | -25% | 39 | -25% | 60 | 0% |
| 2.2 | B2-Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | 353 | -51% | 353 | 26% | 0.20 | -50% | 26 | -50% | 35 | -42% |
| 2.3 | B2-Q1-BP-VF+HT-Qm | 193 | -73% | 193 | -31% | 3.75 | 834% | 120 | 134% | 180 | 200% |
| 3 | B2-Q1-AP-VF | **713** | **0%** | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 4 | B2-Q1-AP-VF+HT-Qmínb | 308 | -57% | **308** | **0%** | **0.56** | **0%** | **71** | **0%** | **80** | **0%** |
| 4.1 | B2-Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | 348 | -51% | 348 | 13% | 0.42 | -25% | 54 | -25% | 60 | -25% |
| 4.2 | B2-Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | 348 | -51% | 348 | 13% | 0.28 | -50% | 36 | -50% | 60 | -25% |
| 4.3 | B2-Q1-AP-VF+HT-Qm | 207 | -71% | 207 | -33% | 3.47 | 525% | 111 | 56% | 180 | 125% |
| 5 | B2-Q2-BP-VF | **139** | **0%** | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 6 | B2-Q2-BP-VF+HT-Qmínb | 115 | -17% | **115** | **0%** | **0.66** | **0%** | **85** | **0%** | **100** | **0%** |
| 6.1 | B2-Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | 118 | -15% | 118 | 3% | 0.49 | -25% | 64 | -25% | 80 | -20% |
| 6.2 | B2-Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | 121 | -13% | 121 | 5% | 0.33 | -50% | 42 | -50% | 60 | -40% |
| 6.3 | B2-Q2-BP-VF+HT-Qm | 110 | -21% | 110 | -4% | 5.07 | 668% | 163 | 92% | 180 | 80% |
| 7 | B2-Q2-AP-VF | **126** | **0%** | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 8 | B2-Q2-AP-VF+HT-Qmínb | 115 | -9% | **115** | **0%** | **0.57** | **0%** | **73** | **0%** | **80** | **0%** |
| 8.1 | B2-Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | 118 | -6% | 118 | 3% | 0.43 | -25% | 55 | -25% | 60 | -25% |
| 8.2 | B2-Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | 118 | -6% | 118 | 3% | 0.29 | -50% | 37 | -50% | 60 | -25% |
| 8.3 | B2-Q2-AP-VF+HT-Qm | 112 | -11% | 112 | -3% | 4.44 | 677% | 143 | 94% | 180 | 125% |

*Tabla 9.47 - Detalle de los parámetros de las bombas empleadas en los modelos con bomba tipo 2 (B2)*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Características Bombas | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Marca | Modelo | Modelo Motor | Máx. partidas/ hora | Frecuencia mín [Hz] | Qmín b [L/s] | Tp [s] | Config. Bombas |
| 1 | B2-Q1-BP-VF | Grundfos | CRE 20-6 P-F-A-E-HQQE | 7.5kW | 50 | 33.3 | 0.37 | - | 3+1 |
| 2 | B2-Q1-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | 36.1 | 0.40 | 18 | 3+1 |
| 2.1 | B2-Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | |
| 2.2 | B2-Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | |
| 2.3 | B2-Q1-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | |
| 3 | B2-Q1-AP-VF | Grundfos | CR_20-10_A-F-A-E-HQQE | 11kW | 50 | 30.3 | 0.34 | - | 3+1 |
| 4 | B2-Q1-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | 33.3 | 0.56 | 18 | 3+1 |
| 4.1 | B2-Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | |
| 4.2 | B2-Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | |
| 4.3 | B2-Q1-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | |
| 5 | B2-Q2-BP-VF | Grundfos | CR_32-6_A-F-A-E-HQQE | 11kW | 50 | 34.2 | 0.61 | - | 3+1 |
| 6 | B2-Q2-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | 37.1 | 0.66 | 18 | 3+1 |
| 6.1 | B2-Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | |
| 6.2 | B2-Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | |
| 6.3 | B2-Q2-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | |
| 7 | B2-Q2-AP-VF | Grundfos | CR_32-8_A-F-A-E-HQQE | 15kW | 50 | 30.0 | 0.53 | - | 3+1 |
| 8 | B2-Q2-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | 32.2 | 0.57 | 18 | 3+1 |
| 8.1 | B2-Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | |
| 8.2 | B2-Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | |
| 8.3 | B2-Q2-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | |

En la Tabla 9.46 se resumen los arranques por hora para los equipos de bombeo junto al volumen de los estanques hidroneumáticos, de manera de poder constatar rápidamente:

- Beneficios de la adición de un estanque hidroneumático en los arranques por hora.
- Aumento de los arranques por hora versus a la disminución del volumen de los estanques hidroneumáticos, al hacer variar el caudal medio (Qm).
- Resultados generados por la formulación clásica versus la formulación propuesta.

Además se vuelve a insertar la Tabla 9.47, en la que se indican las características de la bomba junto a las frecuencias de funcionamiento para el caudal mínimo alcanzado. Esto explica en parte las diferencias los arranques por hora para los modelos sin estanque hidroneumático.

### D.3.6. Comparación de resultados para los modelos con altas y bajas pérdidas de la bomba tipo 2

En la siguiente tabla se comparan los resultados de los modelos con altas y bajas pérdidas de la bomba tipo 2.

*Tabla 9.48 – Comparación resultados de arranques por hora entre modelos con altas y bajas pérdidas*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | N° A/H Totales | %N° A/H Totales |
|---|---|---|---|
| 1 | B2-Q1-BP-VF | **727** | **0%** |
| 3 | B2-Q1-AP-VF | 713 | -2% |
| 5 | B2-Q2-BP-VF | **139** | **0%** |
| 7 | B2-Q2-AP-VF | 126 | -9% |

No existe una notable diferencia en la cantidad de arranques entre el modelo 1 y el modelo 3, así como en el modelo 5 y modelo 7. En ambos casos la diferencia es atribuible a que el Qmínb para los modelos con altas pérdidas tiende a ser menor que para los modelos con bajas perdidas. Dicha diferencia se genera debido a que las bombas para las redes con altas pérdidas deben elevar a una mayor altura, en consecuencia el recorrido que debe realizar su curva para llegar al Qmínb es mayor, por ende, su frecuencia mínima de operación tiende a ser más baja, análogamente ocurre lo contrario en las redes de bajas pérdidas.

## D.4. RESULTADOS PARA LOS MODELOS DE LA BOMBA TIPO 3 (B3)

En el siguiente punto se revisarán los resultados de los 20 modelos que corresponden a la bomba tipo 3.

Los resultados aquí presentados corresponden al conjunto de bombas instaladas, por lo tanto los valores deben ser comparados contra el límite máximo de arranques por hora de cada bomba amplificado por el número de bombas instaladas, en este caso como la configuración es del tipo 3+1, se tiene un total de 4 bombas que se alternan los arranques. Dichos límites para cada bomba son detallados en la Tabla 5.2, Tabla 5.3 y Tabla 5.4.

### D.4.1. Arranques por hora y volumen de hidroneumático para modelos B3-Q1-BP-VF y B3-Q1-BP-VF+HT

Figura 9.35 - Arranques totales por cada hora para los modelos B3-Q1-BP-VF y B3-Q1-BP-VF+HT

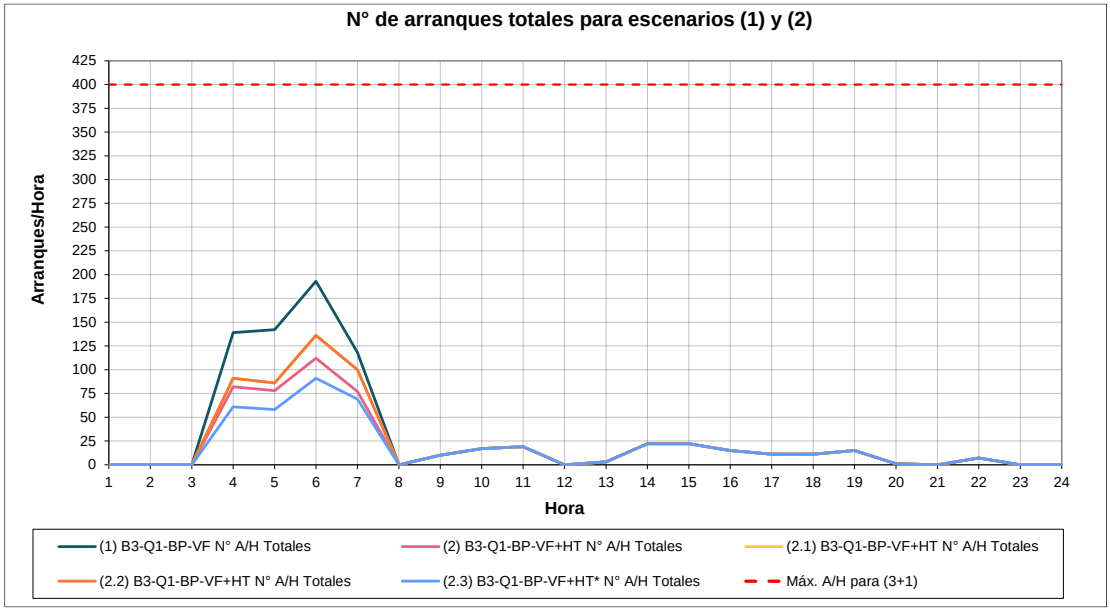



Figura 9.36- Zoom arranques totales por cada hora para los modelos B3-Q1-BP-VF y B3-Q1-BP-VF+HT

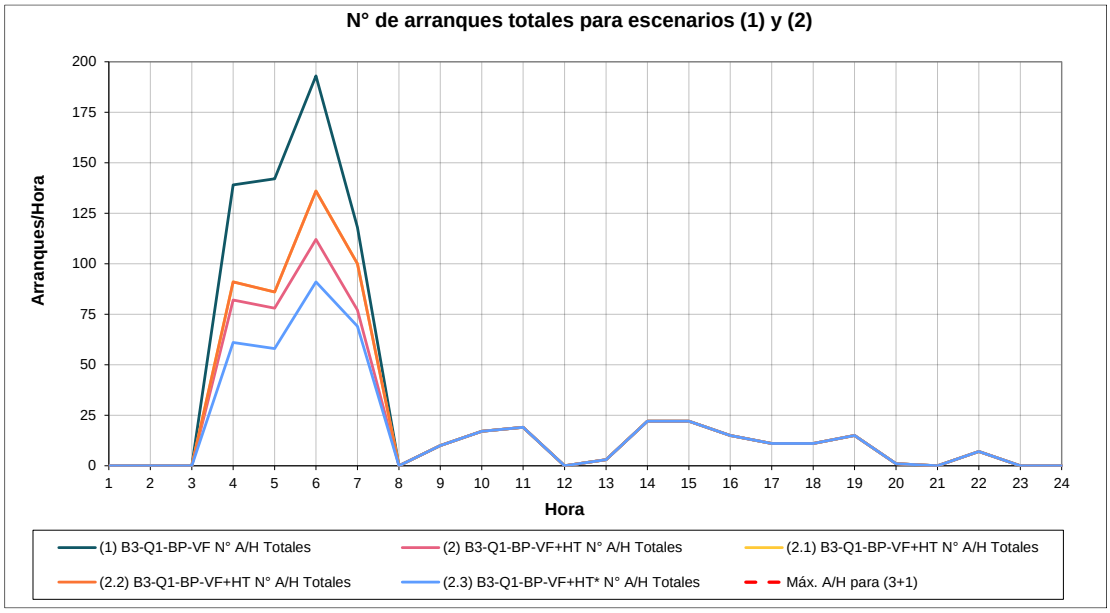


*Tabla 9.49 - Resumen de arranques totales por cada hora para los modelos B3-Q1-BP-VF y B3-Q1-BP-VF+HT*

| | Modelos para bomba tipo B3 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | (1) B3-Q1-BP-VF | (2) B3-Q1-BP-VF+HT | (2.1) B3-Q1-BP-VF+HT | (2.2) B3-Q1-BP-VF+HT | (2.3) B3-Q1-BP-VF+HT* |
| | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales |
| Total | 745 | 502 | 566 | 566 | 432 |
| Promedio | 31 | 21 | 24 | 24 | 18 |
| Máximo | 193 | 112 | 136 | 136 | 91 |
| Mínimo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Son informados en el gráfico los valores de arranques por hora, contabilizados para cada una de las horas simuladas en el programa. En la tabla adjunta, se informan el total de partidas, el promedio del día, el valor máximo y el valor mínimo.

Se observa en el gráfico que:

- Las partidas por hora se encuentran concentradas entre las 3 am y las 8 am, resultado esperable debido a que la demanda de la población (ver Figura 4.6) es bajísima durante la noche.
- Después de las 8 am y hasta las 3 am, las partidas por hora son atribuibles casi en su totalidad a las partidas y paradas de bombas adicionales necesarias para cubrir la demanda.
- El límite máximo de arranques por hora indicada en el gráfico no es superado por el escenario sin estanque hidroneumático ni por el escenario con hidroneumático, esto se debe al alto límite de arranques por hora que permite este modelo en particular de bomba, no obstante, dicha situación es poco usual y muy particular de este modelo de bomba empleado, pues como se puede ver en la Tabla 9.62 las otras bombas presentan límites de arranques por hora bastantes menores. De todas maneras si existe un aporte del estanque hidroneumático a un mejor funcionamiento de las bombas, al reducir las partidas por hora al límite permitido por los equipos de bombeo.

*Tabla 9.50 - Diferencias en los arranques por hora para los modelos B3-Q1-BP-VF y B3-Q1-BP-VF+HT*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | N° A/H Totales | %N° A/H Totales | N° A/H Totales | %N° A/H Totales |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | B3-Q1-BP-VF | **745** | **0%** | - | - |
| 2 | B3-Q1-BP-VF+HT-Qmínb | 502 | -33% | **502** | **0%** |
| 2.1 | B3-Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | 566 | -24% | 566 | 13% |
| 2.2 | B3-Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | 566 | -24% | 566 | 13% |
| 2.3 | B3-Q1-BP-VF+HT-Qm | 432 | -42% | 432 | -14% |

*Tabla 9.51 - Diferencias en el volumen del estanque hidroneumático para los modelos B3-Q1-BP-VF y B3-Q1-BP-VF+HT*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Qm hidro [L/s] | % Qm hidro [L/s] | Vol total hidro [L] | % Vol total hidro [L] | Vol total diseño hidro [L] | % Vol total diseño hidro [L] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | B3-Q1-BP-VF | - | - | - | - | - | - |
| 2 | B3-Q1-BP-VF+HT-Qmínb | **1.19** | **0%** | **76.36** | **0%** | **80.00** | **0%** |
| 2.1 | B3-Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | 0.89 | -25% | 57.27 | -25% | 60.00 | -25% |
| 2.2 | B3-Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | 0.59 | -50% | 38.18 | -50% | 60.00 | -25% |
| 2.3 | B3-Q1-BP-VF+HT-Qm | 5.00 | 320% | 80.25 | 5% | 100.00 | 25% |

De ambas tablas se puede observar:

- Existe una disminución de los arranques por hora (33%) respecto al modelo en que no existe un estanque hidroneumático (modelo 1).
- Se observa en la Tabla 9.50 que disminuciones de un 25% para el Qm (modelo 2.1) generan un aumento de sólo 9% de los arranques por hora respecto al modelo 2, mientras disminuyen en un 25% el tamaño total de diseño del estanque hidroneumático.
- Se observa en la Tabla 9.50 que disminuciones de un 50% para el Qm (modelo 2.2) generan un aumento de sólo 9% de los arranques por hora respecto al modelo 4, mientras disminuyen en un 25% el tamaño total de diseño del estanque hidroneumático. Resultado que es idéntico al del modelo 2.1, si bien existe diferencia en el volumen total del estanque hidroneumático respecto del modelo 2.1 respecto al 2.2, sin embargo, dicha diferencia queda anulada en el volumen de diseño, por lo tanto ambos modelos obtienen los mismos resultados finales.
- Se observa en la Tabla 9.50 que para el Qm calculado con las ecuaciones actuales (modelo 2.3) generan una disminución de sólo 9f% de los arranques por hora respecto al modelo 2, mientras aumenta en un 25% el tamaño total de diseño del estanque hidroneumático.
- En la Tabla 9.51 se observa que disminuciones en el Qm tienen una relación lineal con el volumen total del hidroneumático, no así, con el volumen de diseño que depende de los modelos comerciales disponibles Esta relación lineal no aplica para el modelo 2.3 (formulación clásica, ver 2.4.2) debido a que las ecuaciones son distintas que para los modelos 2, 2.1 y 2.2 (formulación propuesta ver 4.1.4).

### D.4.2. Arranques por hora y volumen de hidroneumático para modelos B3-Q1-AP-VF y B3-Q1-AP-VF+HT

Figura 9.37 - Arranques totales por cada hora para los modelos B3-Q1-AP-VF y B3-Q1-AP-VF+HT

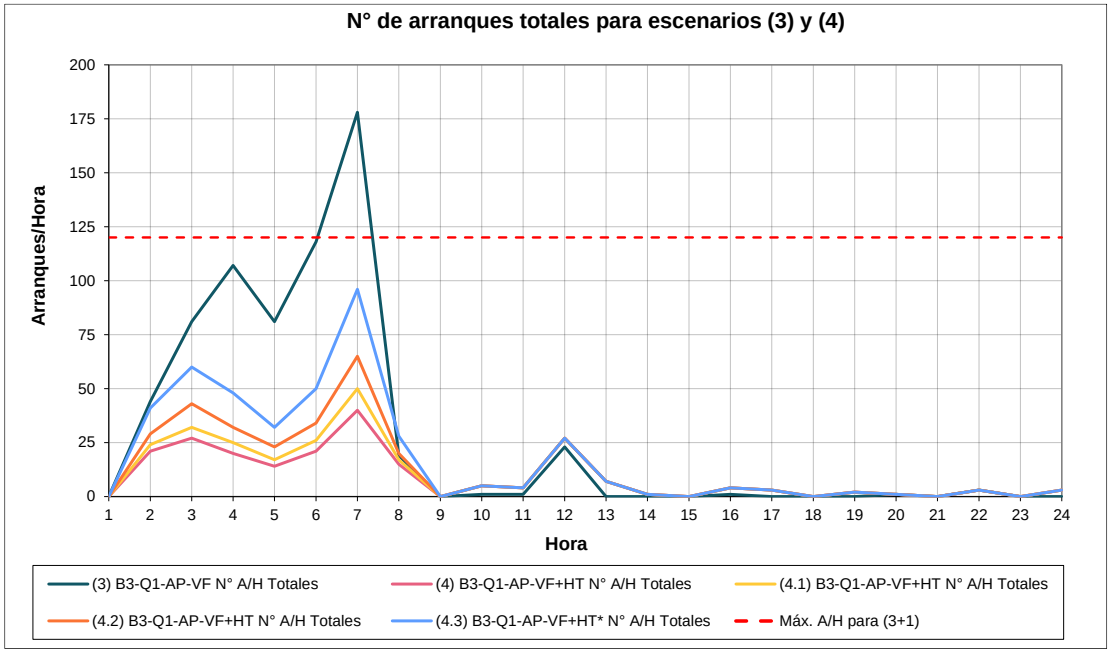



*Tabla 9.52 - Resumen de arranques totales por cada hora los modelos B3-Q1-AP-VF y B3-Q1-AP-VF+HT*

| | Modelos para bomba tipo B3 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | (3) B3-Q1-AP-VF | (4) B3-Q1-AP-VF+HT | (4.1) B3-Q1-AP-VF+HT | (4.2) B3-Q1-AP-VF+HT | (4.3) B3-Q1-AP-VF+HT* |
| | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales |
| Total | 658 | 218 | 251 | 306 | 415 |
| Promedio | 27 | 9 | 10 | 13 | 17 |
| Máximo | 178 | 40 | 50 | 65 | 96 |
| Mínimo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Son informados en el gráfico los valores de arranques por hora, contabilizados para cada una de las horas simuladas en el programa. En la tabla adjunta, se informan el total de partidas, el promedio del día, el valor máximo y el valor mínimo.

Se observa en el gráfico que:

- Las partidas por hora se encuentran concentradas entre las 12 am y las 9 am, resultado levemente distinto al modelo de los otros tipos de bombas (B1 y B2) y que es atribuible al alto valor del Qmínb para la bomba tipo 3 (ver Tabla 9.62), pero esperable debido a que la demanda de la población (ver Figura 4.6) es bajísima durante la noche.

- Después de las 9 am y hasta las 12 am, las partidas por hora son atribuibles casi en su totalidad a las partidas y paradas de bombas adicionales necesarias para cubrir la demanda.
- El límite máximo de arranques por hora indicada en el gráfico es superado por el escenario sin estanque hidroneumático, no así por el escenario con hidroneumático. Esto constituye el primer aporte significativo de este elemento a un mejor funcionamiento de las bombas, al reducir las partidas por hora al límite permitido por los equipos de bombeo.

*Tabla 9.53 - Diferencias en los arranques por hora para los modelos B3-Q1-AP-VF y B3-Q1-AP-VF+HT*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | N° A/H Totales | %N° A/H Totales | N° A/H Totales | %N° A/H Totales |
|---|---|---|---|---|---|
| 3 | B3-Q1-AP-VF | **658** | **0%** | - | - |
| 4 | B3-Q1-AP-VF+HT-Qmínb | 218 | -67% | **218** | **0%** |
| 4.1 | B3-Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | 251 | -62% | 251 | 15% |
| 4.2 | B3-Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | 306 | -53% | 306 | 40% |
| 4.3 | B3-Q1-AP-VF+HT-Qm | 306 | -53% | 306 | 40% |

*Tabla 9.54 - Diferencias en el volumen del estanque hidroneumático para los modelos B3-Q1-AP-VF y B3-Q1-AP-VF+HT*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Qm hidro [L/s] | % Qm hidro [L/s] | Vol total hidro [L] | % Vol total hidro [L] | Vol total diseño hidro [L] | % Vol total diseño hidro [L] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | B3-Q1-AP-VF | - | - | - | - | - | - |
| 4 | B3-Q1-AP-VF+HT-Qmínb | **2.18** | **0%** | **466.85** | **0%** | **500.00** | **0%** |
| 4.1 | B3-Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | 1.64 | -25% | 350.14 | -25% | 400.00 | -20% |
| 4.2 | B3-Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | 1.09 | -50% | 233.43 | -50% | 300.00 | -40% |
| 4.3 | B3-Q1-AP-VF+HT-Qm | 3.96 | 81% | 211.76 | -55% | 300.00 | -40% |

De ambas tablas se puede observar:

- Existe una significativa disminución de los arranques por hora (67%) del modelo 4 respecto al modelo en que no existe un estanque hidroneumático (modelo 3) justificando su empleo.

- Se observa en la Tabla 9.53 que disminuciones de un 25% para el Qm (modelo 4.1) generan un aumento de sólo 5% de los arranques por hora respecto al modelo 4, mientras disminuyen en un 20% el tamaño total de diseño del estanque hidroneumático.
- Se observa en la Tabla 9.53 que disminuciones de un 50% para el Qm (modelo 4.2) generan un aumento de sólo 14% de los arranques por hora respecto al modelo 4, mientras disminuyen en un 40% el tamaño total de diseño del estanque hidroneumático.
- Se observa en la Tabla 9.53 que para el Qm calculado con las ecuaciones actuales (modelo 2.3) generan un aumento de un 30% de los arranques por hora respecto al modelo 4, mientras disminuye en un 60% el tamaño total de diseño del estanque hidroneumático. Este resultado es bastante curioso, debido a que en los modelos similares para los tipos de bombas B1 y B2 ocurría el efecto inverso, es decir, mientras disminuían los arranques por hora aumentaban el tamaño del volumen de diseño del hidroneumático. Este comportamiento atribuible al bajo volumen del estanque hidroneumático que se determina con la formulación clásica.
- En la Tabla 9.53 se observa que disminuciones en el Qm tienen una relación lineal con el volumen total del hidroneumático, no así, con el volumen de diseño que depende de los modelos comerciales disponibles. Esta relación lineal no aplica para el modelo 4.3 (formulación clásica, ver 2.4.2) debido a que las ecuaciones son distintas que para los modelos 4, 4.1 y 4.2 (formulación propuesta ver 4.1.4).

### D.4.3. Arranques por hora y volumen de hidroneumático para modelos B3-Q2-BP-VF y B3-Q2-BP-VF+HT

Figura 9.38 - Arranques totales por cada hora para los modelos B3-Q2-BP-VF y B3-Q2-BP-VF+HT

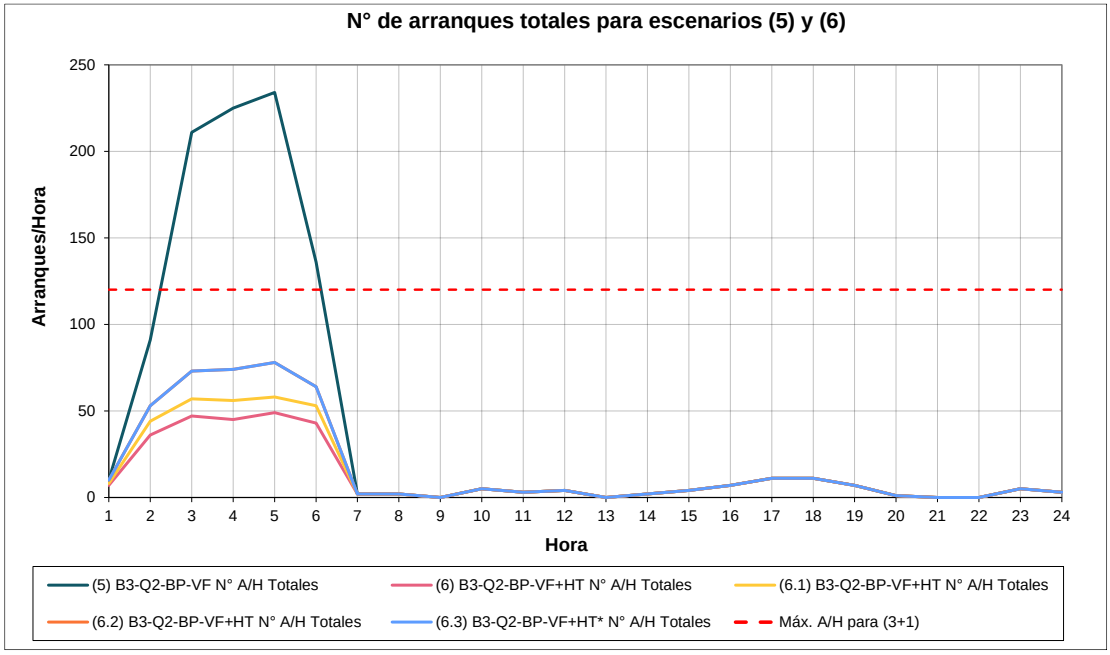



*Tabla 9.55 - Resumen de arranques totales por cada hora para los modelos B3-Q2-BP-VF y B3-Q2-BP-VF+HT*

| | Modelos para bomba tipo B3 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | (5) B3-Q2-BP-VF | (6) B3-Q2-BP-VF+HT | (6.1) B3-Q2-BP-VF+HT | (6.2) B3-Q2-BP-VF+HT | (6.3) B3-Q2-BP-VF+HT* |
| | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales |
| Total | 974 | 294 | 343 | 419 | 419 |
| Promedio | 41 | 12 | 14 | 17 | 17 |
| Máximo | 234 | 49 | 58 | 78 | 78 |
| Mínimo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Son informados en la Figura 9.38 los valores de arranques por hora, contabilizados para cada una de las horas simuladas en el programa. En la Tabla 9.55 adjunta, se informan el total de partidas, el promedio del día, el valor máximo y el valor mínimo.

Se observa en la Figura 9.38 que las partidas por hora se encuentran concentradas entre las 12 am y las 7 am, resultado diferente para modelos similares en los otros dos tipos de bombas, similar a los resultados de los modelos 1, 2, 3 y 4. Esto se debe a que si se observan las curvas de caudal (ver Figura 4.6 y Figura 4.7) ambas tiene una forma relativamente similar, sin embargo, se diferencian en que el caudal mínimo de la curva para la población 2 es mayor y en el caso de las bombas tipo 1 y tipo 2 el Qmínb es más bajo que dicho caudal, por lo cual la bomba tiende a tener un funcionamiento más o menos constante con escasas detenciones por bajo caudal, situación que no ocurre para la bomba tipo 3 que al tener un Qmínb más alto

que el caudal mínimo de la población 2 genera un comportamiento muy similar al observado para los modelos 1, 2, 3 y 4 de los modelos de bombas tipo 1 y tipo 2.

- Después de las 7 am y hasta las 12 am, las partidas por hora son atribuibles casi en su totalidad a las partidas y paradas de bombas adicionales necesarias para cubrir la demanda.
- El límite máximo de arranques por hora indicada en el gráfico es superado por el escenario sin estanque hidroneumático, no así por el escenario con hidroneumático. Esto constituye un aporte significativo de este elemento a un mejor funcionamiento de las bombas, al reducir las partidas por hora al límite permitido por los equipos de bombeo.

*Tabla 9.56 - Diferencias en los arranques por hora para los modelos B3-Q2-BP-VF y B3-Q2-BP-VF+HT*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | N° A/H Totales | %N° A/H Totales | N° A/H Totales | %N° A/H Totales |
|---|---|---|---|---|---|
| 5 | B3-Q2-BP-VF | **974** | **0%** | - | - |
| 6 | B3-Q2-BP-VF+HT-Qmínb | 294 | -70% | **294** | **0%** |
| 6.1 | B3-Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | 343 | -65% | 343 | 17% |
| 6.2 | B3-Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | 419 | -57% | 419 | 43% |
| 6.3 | B3-Q2-BP-VF+HT-Qm | 419 | -57% | 419 | 43% |

*Tabla 9.57 - Diferencias en el volumen del estanque hidroneumático para los modelos B3-Q2-BP-VF y B3-Q2-BP-VF+HT*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Qm hidro [L/s] | % Qm hidro [L/s] | Vol total hidro [L] | % Vol total hidro [L] | Vol total diseño hidro [L] | % Vol total diseño hidro [L] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | B3-Q2-BP-VF | - | - | - | - | - | - |
| 6 | B3-Q2-BP-VF+HT-Qmínb | **2.18** | **0%** | **466.85** | **0%** | **500.00** | **0%** |
| 6.1 | B3-Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | 1.64 | -25% | 350.14 | -25% | 400.00 | -20% |
| 6.2 | B3-Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | 1.09 | -50% | 233.43 | -50% | 300.00 | -40% |
| 6.3 | B3-Q2-BP-VF+HT-Qm | 5.07 | 132% | 271.20 | -42% | 300.00 | -40% |

El análisis es análogo al realizado para los otros modelos, por lo cual no se replicará en este caso, debido a que la solución en este caso no pasa por implementar un estanque hidroneumático, sino que consiste en elegir una bomba que ofrezca un menor caudal mínimo

permitiendo de esta manera prácticamente eliminar la necesidad de un estanque hidroneumático, como fue revisado en los puntos anteriormente.

### D.4.4. Arranques por hora y volumen de hidroneumático para modelos B3-Q2-AP-VF y B3-Q2-AP-VF+HT

Figura 9.39 - Arranques totales por cada hora para los modelos B3-Q2-AP-VF y B3-Q2-AP-VF+HT

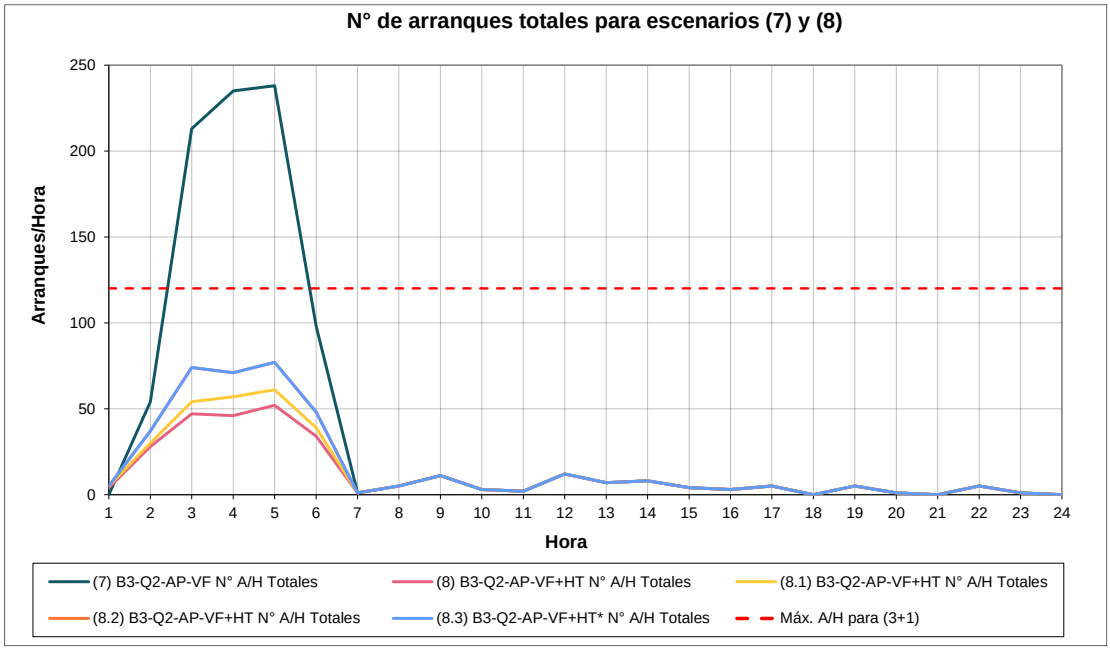



*Tabla 9.58 - Resumen de arranques totales por cada hora para los modelos B3-Q2-AP-VF y B3-Q2-AP-VF+HT*

| | Modelos para bomba tipo B3 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | (7) B3-Q2-AP-VF | (8) B3-Q2-AP-VF+HT | (8.1) B3-Q2-AP-VF+HT | (8.2) B3-Q2-AP-VF+HT | (8.3) B3-Q2-AP-VF+HT* |
| | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales | N° A/H Totales |
| Total | 911 | 284 | 319 | 385 | 385 |
| Promedio | 38 | 12 | 13 | 16 | 16 |
| Máximo | 238 | 52 | 61 | 77 | 77 |
| Mínimo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Son informados en el gráfico los valores de arranques por hora, contabilizados para cada una de las horas simuladas en el programa. En la tabla adjunta, se informan el total de partidas, el promedio del día, el valor máximo y el valor mínimo.

Se observa en el gráfico que las partidas por hora se encuentran concentradas entre las 12 am y las 7 am, resultado diferente para modelos similares en los otros dos tipos de bombas, pero similar a los resultados de los modelos 1, 2, 3 y 4. Esto se debe a que si se observan las curvas de caudal (ver Figura 4.6 y Figura 4.7) ambas tiene una forma relativamente similar,

sin embargo, se diferencian en que el caudal mínimo de la curva para la población 2 es mayor y en el caso de las bombas tipo 1 y tipo 2 el Qmínb es más bajo que dicho caudal, por lo cual la bomba tiende a tener un funcionamiento más o menos constante con escasas detenciones por bajo caudal, situación que no ocurre para la bomba tipo 3 que al tener un Qmínb más alto que el caudal mínimo de la población 2 genera un comportamiento muy similar al observado para los modelos 1, 2, 3 y 4 de los modelos de bombas tipo 1 y tipo 2.

- Después de las 7 am y hasta las 12 am, las partidas por hora son atribuibles casi en su totalidad a las partidas y paradas de bombas adicionales necesarias para cubrir la demanda.
- El límite máximo de arranques por hora indicada en el gráfico es superado por el escenario sin estanque hidroneumático, no así por el escenario con hidroneumático. Esto constituye un aporte significativo de este elemento a un mejor funcionamiento de las bombas, al reducir las partidas por hora al límite permitido por los equipos de bombeo.

*Tabla 9.59 - Diferencias en los arranques por hora para los modelos B3-Q2-AP-VF y B3-Q2-AP-VF+HT*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | N° A/H Totales | %N° A/H Totales | N° A/H Totales | %N° A/H Totales |
|---|---|---|---|---|---|
| 7 | B3-Q2-AP-VF | **911** | **0%** | - | - |
| 8 | B3-Q2-AP-VF+HT-Qmínb | 284 | -69% | **284** | **0%** |
| 8.1 | B3-Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | 319 | -65% | 319 | 12% |
| 8.2 | B3-Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | 385 | -58% | 385 | 36% |
| 8.3 | B3-Q2-AP-VF+HT-Qm | 385 | -58% | 385 | 36% |

*Tabla 9.60 - Diferencias en el volumen del estanque hidroneumático para los modelos B3-Q2-AP-VF y B3-Q2-AP-VF+HT*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Qm hidro [L/s] | % Qm hidro [L/s] | Vol total hidro [L] | % Vol total hidro [L] | Vol total diseño hidro [L] | % Vol total diseño hidro [L] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | B3-Q2-AP-VF | - | - | - | - | - | - |
| 8 | B3-Q2-AP-VF+HT-Qmínb | **1.91** | **0%** | **408.25** | **0%** | **500.00** | **0%** |
| 8.1 | B3-Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | 1.43 | -25% | 306.18 | -25% | 400.00 | -20% |
| 8.2 | B3-Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | 0.95 | -50% | 204.12 | -50% | 300.00 | -40% |
| 8.3 | B3-Q2-AP-VF+HT-Qm | 4.44 | 133% | 237.77 | -42% | 300.00 | -40% |

El análisis es análogo al realizado para los otros modelos, por lo cual no se replicará en este caso, debido a que la solución en este caso no pasa por implementar un estanque hidroneumático, sino que consiste en elegir una bomba que ofrezca un menor caudal mínimo permitiendo de esta manera prácticamente eliminar la necesidad de un estanque hidroneumático, como fue revisado en puntos anteriores.

### D.4.5. Resumen de resultados para los modelos de la bomba tipo 3

En la presente tabla se resume toda la información mostrada en los puntos anteriores para la bomba tipo 3.

*Tabla 9.61 - Resumen de resultados para los modelos de la bomba tipo 3*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | N° A/H Totales | %N° A/H Totales | N° A/H Totales | %N° A/H Totales | Qm hidro [L/s] | % Qm hidro [L/s] | Vol total hidro [L] | % Vol total hidro [L] | Vol total diseño hidro [L] | % Vol total diseño hidro [L] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | B3-Q1-BP-VF | **745** | **0%** | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2 | B3-Q1-BP-VF+HT- | 502 | -33% | **502** | **0%** | **1.19** | **0%** | **76** | **0%** | **80** | **0%** |
| 2.1 | B3-Q1-BP-VF+HT- | 566 | -24% | 566 | 13% | 0.89 | -25% | 57 | -25% | 60 | -25% |
| 2.2 | B3-Q1-BP-VF+HT- | 566 | -24% | 566 | 13% | 0.59 | -50% | 38 | -50% | 60 | -25% |
| 2.3 | B3-Q1-BP-VF+HT- | 432 | -42% | 432 | -14% | 5.00 | 320% | 80 | 5% | 100 | 25% |
| 3 | B3-Q1-AP-VF | **658** | **0%** | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 4 | B3-Q1-AP-VF+HT- | 218 | -67% | **218** | **0%** | **2.18** | **0%** | **467** | **0%** | **500** | **0%** |
| 4.1 | B3-Q1-AP-VF+HT- | 251 | -62% | 251 | 15% | 1.64 | -25% | 350 | -25% | 400 | -20% |
| 4.2 | B3-Q1-AP-VF+HT- | 306 | -53% | 306 | 40% | 1.09 | -50% | 233 | -50% | 300 | -40% |
| 4.3 | B3-Q1-AP-VF+HT- | 306 | -53% | 306 | 40% | 3.96 | 81% | 212 | -55% | 300 | -40% |
| 5 | B3-Q2-BP-VF | **974** | **0%** | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 6 | B3-Q2-BP-VF+HT- | 294 | -70% | **294** | **0%** | **2.18** | **0%** | **467** | **0%** | **500** | **0%** |
| 6.1 | B3-Q2-BP-VF+HT- | 343 | -65% | 343 | 17% | 1.64 | -25% | 350 | -25% | 400 | -20% |
| 6.2 | B3-Q2-BP-VF+HT- | 419 | -57% | 419 | 43% | 1.09 | -50% | 233 | -50% | 300 | -40% |
| 6.3 | B3-Q2-BP-VF+HT- | 419 | -57% | 419 | 43% | 5.07 | 132% | 271 | -42% | 300 | -40% |
| 7 | B3-Q2-AP-VF | **911** | **0%** | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 8 | B3-Q2-AP-VF+HT- | 284 | -69% | **284** | **0%** | **1.91** | **0%** | **408** | **0%** | **500** | **0%** |
| 8.1 | B3-Q2-AP-VF+HT- | 319 | -65% | 319 | 12% | 1.43 | -25% | 306 | -25% | 400 | -20% |
| 8.2 | B3-Q2-AP-VF+HT- | 385 | -58% | 385 | 36% | 0.95 | -50% | 204 | -50% | 300 | -40% |
| 8.3 | B3-Q2-AP-VF+HT- | 385 | -58% | 385 | 36% | 4.44 | 133% | 238 | -42% | 300 | -40% |

*Tabla 9.62 - Detalle de los parámetros de las bombas empleadas en los modelos con bomba tipo 3 (B3)*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | Características Bombas | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Marca | Modelo | Modelo Motor | Máx. partidas/ hora | Frecuencia mín [Hz] | Qmín b [L/s] | Tp [s] | Config. Bombas |
| 1 | B3-Q1-BP-VF | Grundfos | SP_30-6 | MS 4000 | 100 | 44.7 | 1.09 | - | 3+1 |
| 2 | B3-Q1-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | 48.9 | 1.19 | 9 | 3+1 |
| 2.1 | B3-Q1-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | |
| 2.2 | B3-Q1-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | |
| 2.3 | B3-Q1-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | |
| 3 | B3-Q1-AP-VF | Grundfos | SP_30-9 | MS 6000 | 30 | 36.6 | 2.00 | - | 3+1 |
| 4 | B3-Q1-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | 39.8 | 2.18 | 30 | 3+1 |
| 4.1 | B3-Q1-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | |
| 4.2 | B3-Q1-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | |
| 4.3 | B3-Q1-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | |
| 5 | B3-Q2-BP-VF | Grundfos | SP_30-9 | MS 6000 | 30 | 36.4 | 1.99 | - | 3+1 |
| 6 | B3-Q2-BP-VF+HT-Qmínb | | | | | 39.8 | 2.18 | 30 | 3+1 |
| 6.1 | B3-Q2-BP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | |
| 6.2 | B3-Q2-BP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | |
| 6.3 | B3-Q2-BP-VF+HT-Qm | | | | | | | | |
| 7 | B3-Q2-AP-VF | Grundfos | SP_46-10 | MS 6000 | 30 | 31.9 | 1.75 | - | 3+1 |
| 8 | B3-Q2-AP-VF+HT-Qmínb | | | | | 34.8 | 1.91 | 30 | 3+1 |
| 8.1 | B3-Q2-AP-VF+HT-75%Qmínb | | | | | | | | |
| 8.2 | B3-Q2-AP-VF+HT-50%Qmínb | | | | | | | | |
| 8.3 | B3-Q2-AP-VF+HT-Qm | | | | | | | | |

En la Tabla 9.61 se resumen los arranques por hora para los equipos de bombeo junto al volumen de los estanques hidroneumáticos, de manera de poder constatar rápidamente:

- Beneficios de la adición de un estanque hidroneumático en los arranques por hora.
- Aumento de los arranques por hora versus a la disminución del volumen de los estanques hidroneumáticos, al hacer variar el caudal medio (Qm).
- Resultados generados por la formulación clásica versus la formulación propuesta.

Además se vuelve a insertar la Tabla 9.62, en la que se indican las características de la bomba junto a las frecuencias de funcionamiento para el caudal mínimo alcanzado. Esto explica en parte las diferencias los arranques por hora para los modelos sin estanque hidroneumático.

### D.4.6. Comparación de resultados para los modelos con altas y bajas pérdidas de la bomba tipo 3

En la siguiente tabla se comparan los resultados de los modelos con altas y bajas pérdidas de la bomba tipo 3.

*Tabla 9.63 – Comparación resultados de arranques por hora entre modelos con altas y bajas pérdidas*

| N° MH | Código de Modelo Hidráulico | N° A/H Totales | %N° A/H Totales |
|---|---|---|---|
| 1 | B3-Q1-BP-VF | **745** | **0%** |
| 3 | B3-Q1-AP-VF | 658 | -12% |
| 5 | B3-Q2-BP-VF | **974** | **0%** |
| 7 | B3-Q2-AP-VF | 911 | -6% |

No existe una notable diferencia en la cantidad de arranques entre el modelo 1 y el modelo 3, así como en el modelo 5 y modelo 7. En ambos casos la diferencia es atribuible a que el Qmínb para los modelos con altas pérdidas tiende a ser menor que para los modelos con bajas perdidas. Dicha diferencia se genera debido a que las bombas para las redes con altas pérdidas deben elevar a una mayor altura, en consecuencia el recorrido que debe realizar su curva para llegar al Qmínb es mayor, por ende, su frecuencia mínima de operación tiende a ser más baja, análogamente ocurre lo contrario en las redes de bajas pérdidas.