

**DETERMINACIÓN ESTADÍSTICA DE LA POSIBILIDAD DE PONER A OPERAR LOS TRES
GRUPOS DEL BOMBEO PALENQUE – CUCARACHO DEL SISTEMA DE ACUEDUCTO DE
LA ZONA CENTRO-OCCIDENTAL DE LA CIUDAD DE MEDELLÍN, COLOMBIA EN
FORMA SIMULTÁNEA**

DANIEL MONTOYA PÉREZ

**UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
2017**

**DETERMINACIÓN ESTADÍSTICA DE LA POSIBILIDAD DE PONER A OPERAR LOS TRES
GRUPOS DEL BOMBEO PALENQUE – CUCARACHO DEL SISTEMA DE ACUEDUCTO DE
LA ZONA CENTRO-OCCIDENTAL DE LA CIUDAD DE MEDELLÍN, COLOMBIA EN
FORMA SIMULTÁNEA**

DANIEL MONTOYA PÉREZ

Proyecto de grado para optar al título de Magister en Ingeniería

ASESOR:

FRANCISCO J. BOTERO HERRERA, PhD

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
2017

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor el PhD Francisco Javier Botero Herrera, por su esfuerzo y dedicación.

Sus conocimientos, sus orientaciones, su manera de trabajar, su persistencia, paciencia y motivación han sido fundamentales para poder llevar a feliz término éste trabajo de grado. A pesar de todos los contratiempos y replanteamientos, siempre estuvo dispuesto a guiar mis esfuerzos para continuar adelante y no desfallecer.

A mis padres, Flor A. Pérez y Oscar de J. Montoya, por la confianza inagotable en mis capacidades y cualidades, su apoyo constante para darme fuerzas y persistir hasta el final.

A mi esposa, Gloria E. Duque, quien desde sus propios conocimientos aportó al desarrollo de este trabajo y me brindó una mirada diferente para tratar de aproximar el contenido del mismo a cualquier público y que fuera un lenguaje un poco menos matemático y científico afable a todos.

A mis compañeros de trabajo, Lina A. Acevedo, Lina M. Valderrama, Elizabeth Díaz, Julián A. Montoya, Carlos W. Sierra, José D. Vera, Ana I. Roldán, quienes aportaron para enmarcar el análisis dentro de la normatividad y visiones de sus respectivas ramas del saber. Muy especialmente a Ana I. Roldán por ayudarme a darle congruencia y forma al contenido, de modo que el mismo tuviera hilo conductor y entendible para cualquiera que tuviera interés en leerlo completo; y a José D. Vera por su mirada crítica y directiva para enfocar mucho mejor las necesidades del documento y las condiciones del análisis realizado para lograr conclusiones mucho más satisfactorias.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen.....	7
Palabras claves.....	7
Introducción.....	8
Objetivos.....	12
1 Símbolos, subíndices y nomenclatura.....	13
2 Generalidades del sistema de abastecimiento de agua en el Valle de Aburrá.....	14
3 Metodología.....	15
4 Recolección y procesamiento de datos.....	21
5 Resultados.....	23
6 Análisis de resultados.....	31
7 Conclusiones.....	32
8 Recomendaciones.....	33
9 Referencias.....	34
Anexo A.....	36
Anexo B.....	36
Anexo C.....	36
Anexo D.....	36
Anexo E.....	36
Anexo F.....	36
Anexo G.....	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cadena de bombeos sector occidental de la ciudad de Medellín.....	9
Figura 2. Configuración del sistema de bombeo Palenque-Cucaracho.....	10
Figura 3. Ubicación en Google Maps del sistema de bombeo Palenque-Cucaracho.....	10
Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología empleada.	11
Figura 5. Resumen gráfico de los resultados obtenidos	25
Figura 6. Resultados obtenidos de las ecuaciones de cálculo	26
Figura 7. Distribución de los valores de Caudal Vs Presión cuando las bombas están apagadas (Presión estática del sistema)	27
Figura 8. Distribución de los valores de Caudal Vs Presión cuando opera una sola bomba	28
Figura 9. Distribución de los valores de Caudal Vs Presión cuando operan dos bombas en paralelo	29
Figura 10. Curvas operativas de las bombas en su estado actual (medidas por Mantenimiento Equipos)	30

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Símbolos, subíndices y nomenclatura	13
Tabla 2. Resultado de las ecuaciones para calcular los caudales de descarga de cada bomba trabajando sola.....	19
Tabla 3. Resultado de las ecuaciones para calcular los caudales de descarga de dos grupos trabajando en paralelo	19
Tabla 4. Resultado de las ecuaciones para calcular los caudales de descarga de tres grupos trabajando en paralelo	20
Tabla 5. Dispersión de los datos extraídos para el análisis del sistema	22
Tabla 6. Resumen tabulado de los valores obtenidos con las ecuaciones para calcular la curva de comportamiento del sistema (Htot).....	24
Tabla 7. Valores de dispersión de la relación Caudal Vs Presión cuando las bombas están apagadas	27
Tabla 8. Valores de dispersión de la relación Caudal Vs Presión cuando hay un solo grupo operando	28
Tabla 9. Valores de dispersión de la relación Caudal Vs Presión cuando hay dos grupos operando	29

Resumen.

En este documento se presenta el análisis de un registro histórico de variables hidráulicas de un sistema de bombeo de agua potable, para establecer la viabilidad de operar sus tres grupos en paralelo, y así atender las necesidades de consumo de las comunidades servidas con el sistema Palenque - Cucaracho. Se empleó el modelo de cálculo de Hazen-Williams para obtener el comportamiento del sistema de tuberías frente a los cambios en el caudal, se analizaron datos de diseño recolectados de bases de datos de Empresas Públicas de Medellín, se obtuvieron estimaciones de las variables hidráulicas por minería de datos de mediciones, y se compararon finalmente con las condiciones de fábrica de los equipos cuando se pusieron en operación.

Se realiza una comparación entre las condiciones de flujo de una sola máquina, de dos y de las tres en paralelo para determinar la variación de la eficiencia en cada equipo, se verifica el incremento de pérdidas de presión y se enmarca todo el análisis en las normas por las cuáles se rigen los diseños de sistemas de transmisión y distribución de agua potable en Medellín y en las normas de aceptación de pruebas para equipos de bombeo en campo; así finalmente, poder concluir si es viable o no, poner en operación todos los grupos de la estación en paralelo.

Abstract.

This paper presents a hydraulic variable study of a hystorical register of a potable water pumping system, in order to stablish the operating viability of running all its tree groups in paralel, so therefore, meet the consumptions needs of the communities served with Palenque – Cucaracho’s system. A Hazen-Williams calculation model was set to obtain the behavior of the piping system against changes in flow rate. Design data were collected form *Empresas Públicas de Medellín* databases, data mining processes were carried out to get the hydraulic variables history, and finally, all this information was compared with the factory conditions of the equipment when they were originally put into operation.

A comparison between the flow conditions of a single machine running alone, two and the three of them in parallel were made to determine efficiency variation in each equipment, increases of pressure losses were checked and the whole work was framed into local laws and regulations for the industry and the acceptance standards for field tests of pumping systems. Finally, to fullfil the main purpose, concluding whether if it is feasible or not, to run all the groups of the station into parallel operation.

Palabras claves.

Análisis hidráulico estadístico, Bombeos en paralelo, Método de Hazen-Williams.

Key words.

Hydraulic statistical analysis, Paralel pumping systems, Hazen-Williams method.

Introducción.

Empresas Públicas de Medellín (EPM en adelante), es la empresa encargada de prestar los servicios públicos de agua potable, energía, gas y saneamiento a todos los habitantes del Valle de Aburrá.

La prestación del servicio acueducto está enmarcada en la sentencia T-740/11 de la Corte Constitucional de Colombia del 3 de octubre de 2011¹ [1] (ver el Anexo E para la normatividad), que consagra “*el derecho al acceso al agua suficiente, salubre, aceptable, accesible y asequible para el uso personal o doméstico de todos los colombianos*”. Entendido de esta manera, las empresas prestadoras de servicios de acueducto, entre ellas EPM, deben garantizar que todos los ciudadanos tengan acceso a este servicio en todo momento.

Para tal fin, EPM a partir de las proyecciones de los consumos según las estadísticas del crecimiento de la ciudad enmarcadas dentro del Plan de Ordenamiento Territorial del municipio (P.O.T.) realiza el diseño de las redes de distribución de agua potable, donde se tiene en cuenta:

- la estimación de la demanda de los usuarios (caudal), que está regida por el RAS [2] (ver el Anexo E para la normatividad),
- los alineamientos de las redes, que por lo general siguen el trazado de las vías, y
- la determinación del diámetro de las tuberías, que corresponde al punto donde las funciones de las pérdidas de presión y la del costo de la tubería se interceptan (diámetro económico [3]).

Sin embargo, la mayoría de las veces los P.O.T. se subestiman y hay zonas donde los crecimientos sobrepasan las estimaciones, por lo que, al momento de implementar soluciones de atención (darle un punto de conexión a cada usuario), se deben proyectar acciones a corto, mediano y largo plazo que subsanen el inconveniente. Las medidas a corto plazo son acciones que deben implementarse con la mayor brevedad posible para poder cumplir con la sentencia de la Corte antes señalada. Estas acciones implican buscar las formas técnicas de aumentar las capacidades de los circuitos con ajustes de operación de la infraestructura existente, algunas de ellas son:

- operar todos los grupos de bombeo de un sistema en paralelo,
- sobre-frecuenciar los motores de las bombas de un sistema para obtener más caudal, o
- realizar un aprovechamiento energético, inyectando la presión disponible a la entrada de un tanque para disminuir la cabeza dinámica total del sistema (debido a la configuración de flujos en las redes de distribución de la ciudad, en algunas de las entradas de los tanques el agua llega aún con presión remanente, superior a la atmosférica).

A mediano plazo se pueden implementar mejoras como, cambios en los sistemas de control, para operar las bombas con variadores de frecuencia, reemplazar tuberías de impulsión para aumentar su diámetro, aumentar la capacidad de los tanques de almacenamiento de algún circuito, aumentar los diámetros de las redes de distribución secundarias para disminuir pérdidas, entre otros.

¹ <http://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/2011/T-740-11.htm>

A largo plazo, se diseñan sistemas nuevos para reponer, modernizar o aumentar la capacidad de los sistemas existentes. Por lo general, éstas obras incluyen construcciones de tanques, alineamientos de tuberías nuevas, instalación de bombas y todos sus sistemas de potencia y control, redes de distribución, etc. También puede tratarse de proyectos de interconexión de plantas o redes de tuberías para flexibilizar el sistema.

Actualmente en la zona occidental del Valle de Aburrá los flujos no son suficientes para atender la demanda de los usuarios, por lo que se han proyectado acciones de todos los alcances que permitan superar las restricciones del sistema y proveer el servicio tal como lo consagra la Constitución y el Derecho Internacional. Para el corto plazo, se debe realizar un análisis estadístico de la posibilidad de operar sistemas utilizando la capacidad instalada completa de los bombeos, y es acá donde se enmarca el desarrollo de éste proyecto.

En éste sector, se ha escogido el circuito atendido por el bombeo Palenque-Cucaracho, donde las demandas actuales de flujo exigen 20 l/s adicionales a los entregados por dos grupos; incremento que se pretende generar con la puesta en operación de los tres grupos del bombeo.

En las siguientes gráficas se puede ver la porción de interés del sistema (donde se evidencian las situaciones enunciadas con anterioridad), los datos de diseño (cotas) y su ubicación geográfica:

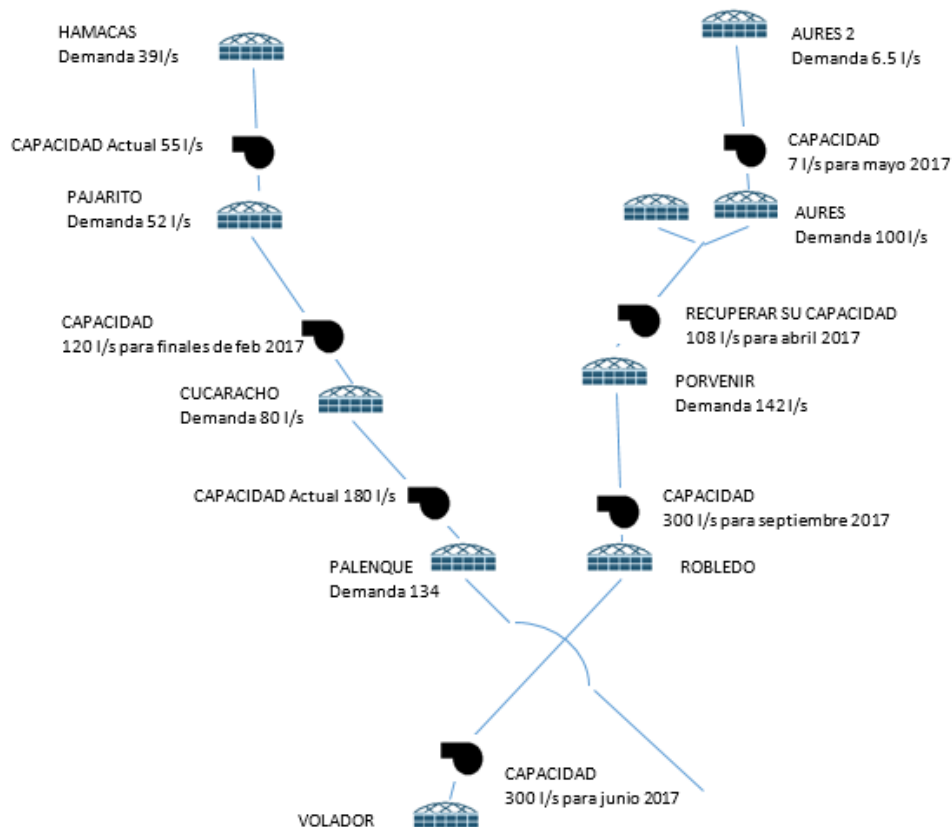


Figura 1. Cadena de bombeos sector occidental de la ciudad de Medellín

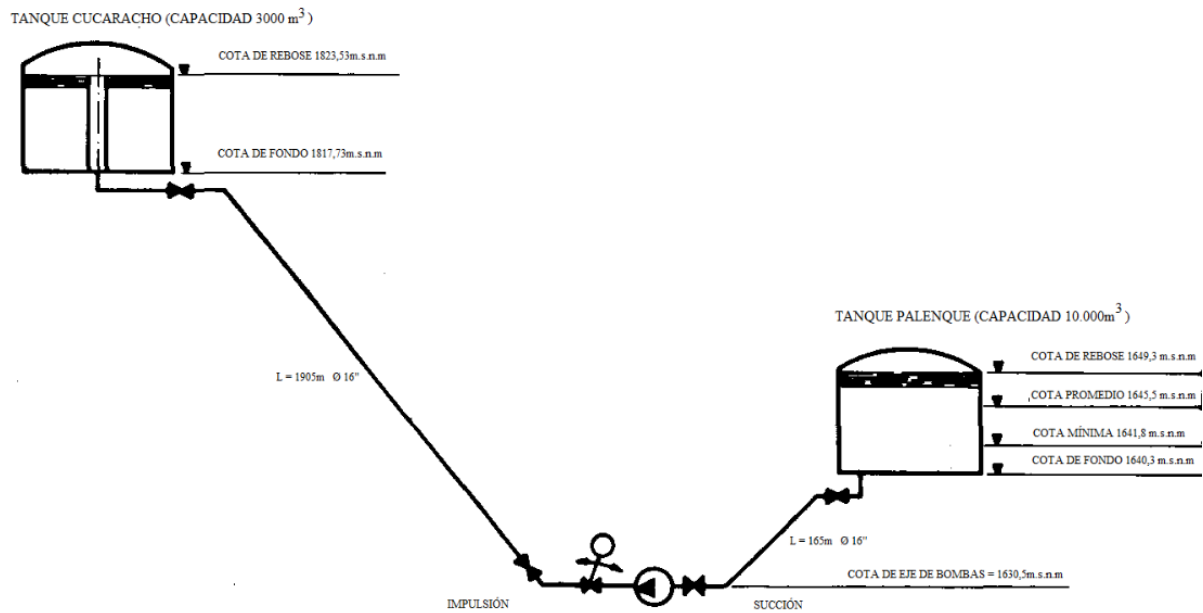


Figura 2. Configuración del sistema de bombeo Palenque-Cucaracho



Figura 3. Ubicación en Google Maps del sistema de bombeo Palenque-Cucaracho

El alcance de este trabajo se enfocará en los análisis hidráulicos necesarios para determinar si es viable técnicamente operar en paralelo los tres grupos del bombeo, obteniendo:

- el aumento de caudal esperado,
- la presión de descarga total del sistema, y
- las pérdidas de energía totales.

No se verificarán los temas eléctricos (capacidad de subestación y controles), ni los civiles (correspondientes al análisis de transmisión de cargas a los anclajes debido a los posibles golpes de ariete o fenómenos transitorios).

Para obtener estos resultados será necesario igualar las ecuaciones de comportamiento de las tuberías y de los equipos de bombeo, para así verificar que los flujos y presiones se encuentran dentro de los valores esperados, que satisfacen las necesidades planteadas y que no se generan valores que representen riesgos para las tuberías o bombas (según se indica en las normas del Instituto de Hidráulica [4] ver el Anexo E para la normatividad).

A continuación, se incluye un diagrama de flujo de la metodología empleada para realizar el análisis:

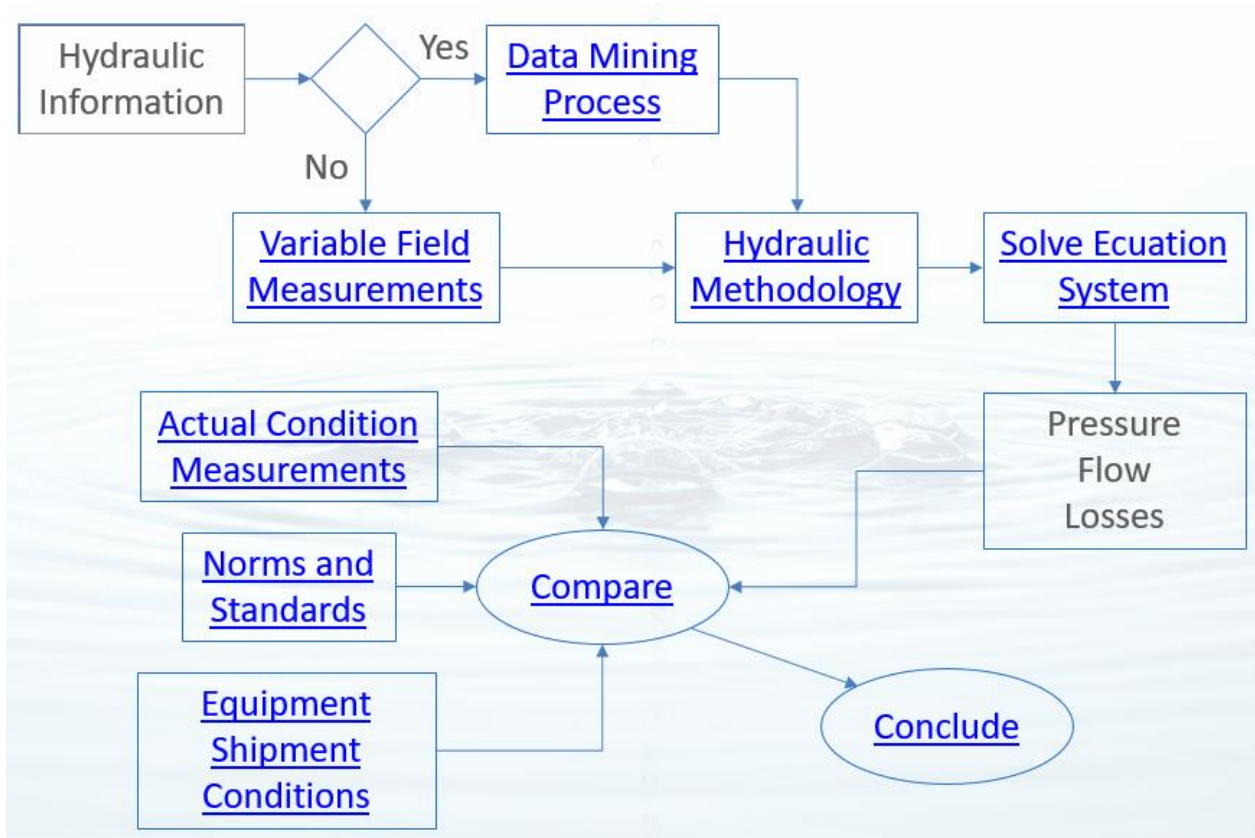


Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología empleada.

Objetivos.

1. Realizar una recolección de información de las variables hidráulicas del sistema de bombeo Palenque-Cucaracho en el Sistema de Información Histórico (SIH) de EPM, que permita realizar un análisis estadístico del comportamiento del mismo y proyectar las condiciones de operación con los tres grupos energizados al tiempo (ver el Anexo G con los datos empleados para realizar el análisis).
2. Obtener la ecuación de comportamiento de las tuberías frente a las variaciones de caudal y presión según el número de bombas operando en la estación, mediante el uso de la metodología de Hazen-Williams.
3. Extraer de la información operativa de las bombas (mediciones de campo realizadas por el equipo de Mantenimiento de EPM), las ecuaciones que relacionan el caudal y la presión entregada por las mismas (ver el Anexo A para las mediciones realizadas por el equipo de Mantenimiento, Anexo C para fotografías de la instalación y el Anexo F con los datos de diseño del sistema).
4. Igualar las ecuaciones encontradas, tanto para el comportamiento de las tuberías como para las bombas, y así determinar las posibles condiciones operativas para las diferentes configuraciones de equipos operando (una, dos o tres bombas en paralelo).
5. Verificar si las condiciones encontradas con la proyección de la operación de los tres grupos en simultáneo no representan un riesgo operativo para el sistema (bombas y tuberías), determinando el incremento en las pérdidas de presión, el caudal operativo y la eficiencia, de cada bomba si están las tres energizadas, comparándolo con las normas del Instituto de Hidráulica que indica la variación admisible respecto al punto de mejor eficiencia de los sistemas de bombeo.

1 Símbolos, subíndices y nomenclatura.

Tabla 1. Símbolos, subíndices y nomenclatura

ANSI	American National Standards Institute	ASTM	American Society for Testing and Materials
AWWA	American Water Works Association	BEF	Best Efficiency Point
D_i	Diámetro interno de la impulsión	D_s	Diámetro interno de la succión
H_{est}	Cabeza estática de succión	h_{fdesc}	Pérdidas en la descarga
h_{fsucc}	Pérdidas en la succión	H_{tot}	Cabeza dinámica total de las bombas
H_v	Cabeza de velocidad debida a cambio de diámetro entre succión y descarga	K_{desc}	Coefficiente de pérdidas en la descarga
K_{succ}	Coefficiente de pérdidas en la succión	NEGC	Normas y Especificaciones Generales de Construcción
NPSE	Net Positive Suction Energy	N_{ts}	Nivel del tanque de succión
NSR	Norma Sismo Resistencia Colombiana	P_{db}	Presión de descarga del bombeo
P.O.T.	Plan de Ordenamiento Territorial	P_{sb}	Presión de succión del bombeo
Q_b	Caudal del bombeo	RAS	Reglamento técnico del sector de Agua potable y Saneamiento básico
SIH	Sistema de Información Histórica de EPM	v_d	Velocidad en la descarga
v_s	Velocidad en la succión	Z	Diferencia de nivel entre el fondo del tanque de succión y el eje de las bombas
Z_{med}	Diferencia entre la presión de succión medida y el nivel del tanque cuando las bombas están apagadas, luego se promedia	η	Eficiencia de las bombas
%pérdidas	Relación entre la cabeza dinámica total y la cabeza estática del bombeo		

2 Generalidades del sistema de abastecimiento de agua en el Valle de Aburrá.

La ciudad de Medellín se desarrolló en medio de una topografía montañosa cercana a una fuente hídrica que tenía un clima propicio; y posteriormente, con el crecimiento de la ciudad, fue necesario implementar el sistema para el abastecimiento de agua potable del Valle de Aburrá el cual está compuesto por:

- Plantas de producción de agua: son la combinación de infraestructura civil y mecánica en la que se llevan a cabo procesos unitarios de transformación físico-química para cambiar las propiedades del agua de las fuentes superficiales, de modo que esta sea apta para el consumo humano. Las plantas y sus procesos están regidos por el DECRETO 1575 de mayo 9 de 2007, del Ministerio de la Protección Social [5] (que establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para el Consumo Humano) y el RAS [2] (ver el Anexo E para la normatividad).
- Redes de distribución: las hay primarias (tubería mayor a 6" y presiones superiores a 50 m.c.a.) y secundarias (redes que llegan a los usuarios finales de menor diámetro y presión regulada). Son el conjunto de las tuberías por las cuáles se transporta el agua desde la planta hasta los tanques de almacenamiento y distribución. Para su diseño se utilizan principalmente las normas internas de EPM [6] y las normas de especificaciones de materiales o uniones (ANSI, ASTM, AWWA, etc.).
- Tanques de almacenamiento: son contenedores de gran volumen donde se concentra el agua para posteriormente distribuirla a los consumidores. Principalmente se trata de estructuras de concreto o vidrio fusionado al acero, de fondos planos, de secciones rectangulares o circulares, que pueden ser superficiales o semienterrados. El ingreso de agua se realiza por la parte superior, y la distribución suele salir del fondo, o lateralmente en algunas ocasiones. Por temas de mantenimiento y facilidades de expansión, los más recientes se especifican en vidrio fusionado al acero. Las normas para su diseño y fabricación son la Norma de Sismo Resistencia Colombiana (NSR 10) y las normas AWWA D-103, ANSI/NSF 61.
- Sistemas de bombeo: para poder llevar el agua de un punto a otro a través de la topografía de la ciudad, que es accidentada, se hace necesario inyectarle energía al agua, por lo que se emplean los sistemas de bombeo. Estos sistemas son de suma importancia para que todos los habitantes del Valle de Aburrá tengan acceso al agua potable.

Los bombeos dentro de la infraestructura de EPM son muy diversos, tanto en capacidades (caudal y presión), como en tipo de bombas (*monoblock*, de carcasa partida, multietapas, de pozo profundo, tipo turbina), en potencias eléctricas (desde unos pocos caballos hasta 1000 caballos) y en configuraciones (dos, tres, cuatro o cinco grupos en paralelo, bombeos tipo *booster*, etc.).

Para el diseño de los mismos se emplean normas como el RAS [2], las guías del Instituto de Hidráulica [7] y reglamentación interna de EPM [6], lo que permite determinar los caudales a bombear, el tiempo de operación de los equipos, la potencia de las máquinas a emplear, la

cantidad de bombas que operarán en simultáneo, las bombas de reserva necesarias, el diámetro de la succión y de la impulsión, entre otros.

Normalmente, los sistemas de bombeo en EPM se diseñan para que tengan un respaldo operativo, de ésta forma, si se instalan dos equipos, uno será el que opere, mientras el otro queda como *stand-by*.

El bombeo Palenque-Cucaracho, está compuesto por tres bombas iguales, de las cuáles deberían operar máximo dos en simultáneo para garantizar la existencia de un equipo como contingencia si llegara a haber una avería. Sin embargo, en algunas ocasiones, es necesario transgredir estas condiciones de diseño y la operación presente configuraciones que no siguen dichos lineamientos de diseño, con el fin de solucionar de manera urgente, las necesidades de abastecimiento de los usuarios. Sin embargo, para remediar de manera permanente la situación posteriormente se deberán implementar las medidas a mediano y largo plazo proyectadas.

3 Metodología.

La metodología para estudiar el fenómeno hidráulico en tuberías existentes, parte de mediciones de campo, donde se hace seguimiento a las siguientes variables, para proyectar el comportamiento de las tuberías según la variación de caudal y obtener la ecuación que representa dicho fenómeno:

- presión de succión,
- presión de descarga,
- nivel del tanque de succión,
- caudal entregado por cada bomba,

Verificar otras como:

- velocidad de operación del equipo,
- frecuencia del motor (pues altera la velocidad de giro),
- diferencias topográficas de niveles entre la succión y la descarga, y

Obtener las condiciones constructivas del sistema, como:

- longitud de la tubería,
- diámetro de la misma,
- cantidad y tipos de accesorios,
- material.

Una vez se tienen estos registros, se puede realizar un análisis hidráulico mediante cualquiera de las metodologías de cálculo, como Darcy-Weisbach (que relaciona las pérdidas por rozamiento en la tubería con la longitud y diámetro de la misma y la velocidad de flujo del fluido mediante el coeficiente de rozamiento f) ([8], capítulo 5, numeral 5.10, página 278), la metodología de Hazen-Williams (metodología experimental desarrollada en el siglo 20 que utiliza parámetros geométricos para obtener las pérdidas en términos de longitudes de tubería) ([9], capítulo 9, numeral 9.8, página

252), Colebrook-White (es la más exacta, pero requiere de iteraciones para obtener el factor de fricción del fluido), y otras variaciones de éstas que difieren básicamente en la forma en la que se obtiene el factor de fricción del fluido con la tubería [10] y [11]².

Con éstas metodologías se obtiene el comportamiento de las tuberías (ecuación de pérdidas) según varía el caudal que se transporta por las mismas, la cual constituye la primera ecuación necesaria para resolver el sistema.

En este proyecto, se empleó la metodología de Hazen-Williams, puesto que, tal como lo indica Azevedo Netto ([3] Capítulo 14, numeral 14.9):

- se puede aplicar satisfactoriamente en diámetros desde 50[mm] hasta 3500 [mm], sin importar el material, siendo sus límites de aplicación los más amplios entre todas las metodologías de cálculo empleadas.
- es una ecuación producto de un trabajo estadístico riguroso, que retomaba investigaciones de otros autores y observaciones realizadas por ellos mismos.
- los coeficientes de la fórmula se establecieron de manera que el parámetro C es únicamente dependiente de la naturaleza de las paredes de la tubería.
- debido a la amplia aplicación de la fórmula, el coeficiente C se ha refinado de tal forma que, permite estimar el “envejecimiento” de la tubería.

Adicionalmente, permite la construcción de ecuaciones que dependen solamente de variables geométricas (L_{eq} , C y D), y del caudal que pasa por la tubería [3].

$$h_f = L_{eq} \left(\frac{Q}{1000 * 0.28 * C * D^{2.63}} \right)^{1.851} \quad \text{Ecuación 1}$$

donde:

h_f : Pérdidas de energía por fricción en la tubería en [m.c.a.]

L_{eq} : Longitud de tramo recto más la sumatoria de las longitudes equivalentes de los accesorios en la tubería en [m].

Q: Caudal que fluye por la tubería en [l/s].

C: Coeficiente de fricción del material de la tubería (adimensional).

D: Diámetro interno de la tubería en [mm].

También, si la tubería presentara cambios de diámetro, permite que los mismos, se puedan llevar a un diámetro único con la misma metodología de la longitud equivalente, variando la longitud de dicho tramo según las pérdidas proporcionales en el diámetro equivalente seleccionado para el cálculo final, con lo que se tendría una única ecuación.

² <http://www.hidrojing.com/el-calculo-de-las-perdidas/>

La Ecuación 1 se puede simplificar, teniendo en cuenta que los factores agrupados (ver ecuación 3) son todas condiciones geométricas del sistema y que dichos parámetros son constantes, pues son elementos existentes (longitud de tubería, material, diámetro), y se obtiene la ecuación básica para el análisis de sistemas hidráulicos existentes:

$$h_f = K * Q^{1.851} \quad \text{Ecuación 2}$$

donde:

$$K = L_{eq} \left(\frac{1}{1000 * 0.28 * C * D^{2.63}} \right)^{1.851} \quad \text{Ecuación 3}$$

Cuando no hay bombas operando, se obtiene la columna estática sobre la succión que es la diferencia piezométrica entre el fondo del tanque y la posición de la succión de las bombas (Z) (Ver tablas 6). Dicho dato es promediado posteriormente para poder calcular la cabeza estática en la succión de las bombas. Este procedimiento se puede realizar porque las succiones son poco susceptibles a ser alteradas o intervenidas por los usuarios, son más cortas y presentan menos fugas, la cabeza del tanque sirve de amortiguador y pulmón sosteniendo la presión en valores más constantes y no se necesitan estaciones de regulación (cheques con venteo y descargue) que pueden romper la columna de presión medida. Además, por lo general, la succión tiene cabeza neta positiva (el tanque de succión está por encima del nivel donde se ubican las máquinas del bombeo) que es muy importante, pues garantiza que la succión de la bomba siempre tendrá agua y una presión superior o igual al NPSE requerido.

Cuando las bombas están apagadas, el conjunto del tanque y tuberías se comportan como un sistema hidrostático, por lo que se puede determinar la presión como las diferencias de niveles entre los dos puntos, y se puede usar la siguiente expresión ([9], capítulo 3, numeral 3.3, página 46):

$$h_{succ} = N_{ts} + Z_{med} \quad \text{Ecuación 4}$$

Las pérdidas de energía en la succión del bombeo son iguales a la diferencia entre la cabeza estática en la succión del bombeo y la presión de succión medida cuando las bombas están operando [3]:

$$h_{fsucc} = h_{succ} - P_{succ} \quad \text{Ecuación 5}$$

Despejando de la Ecuación 2, y sustituyendo el valor de las pérdidas, se obtiene el factor de pérdidas en la succión [3]:

$$K_{succ} = h_{fsucc} / Q^{1.851} \quad \text{Ecuación 6}$$

Por definición, se tiene que las pérdidas en un bombeo son iguales a la presión de descarga de las bombas menos la cabeza estática del bombeo ([3] capítulo 18, página 258), entonces se tiene que:

$$h_{fdesc} = P_{desc} - H_{est} \quad \text{Ecuación 7}$$

La cabeza estática en la descarga, a diferencia de la de succión, no debe ser medida con instrumentación de campo, pues las impulsiones pueden presentar cualquiera de las siguientes condiciones:

- por seguridad se diseñan con estaciones de retención (un cheque acompañado de ventosa y descargue) que evitan flujos muy destructivos en caso de una posible rotura de la tubería,
- o porque se pueden encontrar intervenidas (con derivaciones a consumos no facturados),
- o porque presentan fugas, que al tratarse de tramos tan grandes pueden ser considerables y despresurizar la red en cualquier momento.

Por éstas razones, la cabeza estática se debe obtener de los planos y diseños del sistema original; o por topografía, midiendo las cotas sobre el nivel del mar de los ejes de las bombas y del tanque de llegada (ver el Anexo F).

Despejando de la Ecuación 2, y sustituyendo el valor de las pérdidas, se obtiene el factor de pérdidas en la impulsión:

$$K_{desc} = h_{f_{desc}}/Q^{1.851} \quad \text{Ecuación 8}$$

Con los diámetros de la tubería en la succión y la descarga, se calcula la diferencia de presión debida a la cabeza de velocidad ([3] capítulo 16, página 209):

$$H_v = \frac{v_d^2 - v_s^2}{2g} \quad \text{Ecuación 9}$$

Por último, se calcula la cabeza dinámica total de las bombas, que es la cantidad de energía que se le debe transmitir al agua por medio de la bomba para vencer la presión estática del sistema más sus pérdidas por fricción debidas al flujo del líquido por las tuberías, que se obtiene con la siguiente ecuación ([9], capítulo 7, ejemplo 7.8, página 199):

$$H_{tot} = P_{desc} - P_{succ} + H_v \quad \text{Ecuación 10}$$

Esta presión es la que garantiza que en el punto de llegada se tengan las condiciones de caudal esperadas.

Adicionalmente es necesario construir las curvas operativas de cada una de las bombas de la estación, mediante mediciones de presión y caudal con aperturas variables de la válvula de la descarga general del sistema. De ésta manera se pueden obtener las ecuaciones de comportamiento de los equipos, que constituyen el segundo grupo de ecuaciones necesario para resolver el sistema y encontrar los puntos operativos del mismo según las variaciones de flujo y presión.

Las mediciones necesarias para obtener dichos comportamientos son realizadas periódicamente por el equipo de Mantenimiento Preventivo de EPM y son registradas en los servidores de la empresa, de donde pueden ser consultadas por el personal para realizar informes y obtener los estados operativos de los equipos (ver el Anexo A con el registro de las mediciones realizadas).

Partiendo de los comportamientos individuales de cada bomba, es posible construir una tabla de comportamiento de los equipos funcionando en paralelo, mediante el cálculo del caudal entregado por cada bomba a la presión de descarga que se midió durante las pruebas. Estos caudales se suman (como lo indica la metodología de bombas operando en paralelo [12]) y se puede obtener las curvas del sistema cuando hay 2 o 3 bombas operando en paralelo.

Los valores de esta tabla se grafican y se obtienen las ecuaciones de orden cuadrático mediante el uso de las líneas de tendencia, para posteriormente igualarlas con la ecuación de comportamiento de la tubería (metodología de Hazen-Williams) y resolver el sistema, encontrando los valores medios de Caudal Vs Presión para las diferentes combinaciones operativas (uno, dos o los tres grupos operando).

Para cada presión de descarga en las bombas se calculan los caudales entregados por cada una de ellas y se suman, para obtener así el caudal de las bombas cuando operan dos o tres en paralelo. A continuación, se muestran las tablas con las diferentes combinaciones posibles.

Tabla 2. Resultado de las ecuaciones para calcular los caudales de descarga de cada bomba trabajando sola

Caudal [l/s]	Grupo 1 H [m.c.a.]	Grupo 2 H [m.c.a.]	Grupo 3 H [m.c.a.]
0	283,89	281,36	283,23
20	269,31	267,09	268,95
40	251,44	249,44	251,45
60	230,28	228,43	230,74
80	205,82	204,05	206,81
100	178,07	176,30	179,67

Tabla 3. Resultado de las ecuaciones para calcular los caudales de descarga de dos grupos trabajando en paralelo

Caudal [l/s]	Grupos 1 y 2 H [m.c.a.]	Caudal [l/s]	Grupos 1 y 3 H [m.c.a.]	Caudal [l/s]	Grupos 2 y 3 H [m.c.a.]
0	283,89	0	283,89	0	283,89
1,01	283,23	1,01	283,23	0	283,23
3,82	281,36	6,72	281,36	2,90	281,36
37,17	269,31	39,54	269,31	36,71	269,31
38,09	268,95	40,45	268,95	37,64	268,95
42,71	267,09	45,02	267,09	42,31	267,09
77,90	251,45	80,00	251,45	77,91	251,45
77,91	251,44	80,01	251,44	77,92	251,44
82,03	249,44	84,11	249,44	82,08	249,44
117,55	230,74	119,60	230,74	117,95	230,74
118,36	230,28	120,41	230,28	118,77	230,28
121,61	228,43	123,66	228,43	122,05	228,43
157,11	206,81	159,24	206,81	157,87	206,81
158,64	205,82	160,77	205,82	159,41	205,82

Caudal [l/s]	Grupos 1 y 2 H [m.c.a.]	Caudal [l/s]	Grupos 1 y 3 H [m.c.a.]	Caudal [l/s]	Grupos 2 y 3 H [m.c.a.]
161,35	204,05	163,50	204,05	162,15	204,05
196,60	179,67	198,91	179,67	197,70	179,67
198,79	178,07	201,11	178,07	199,90	178,07
201,20	176,30	203,53	176,30	202,33	176,30

Tabla 4. Resultado de las ecuaciones para calcular los caudales de descarga de tres grupos trabajando en paralelo

Caudal [l/s]	Grupos 1, 2 y 3 H [m.c.a.]
0	283,89
1,01	283,23
6,72	281,36
56,71	269,32
58,09	268,95
65,02	267,086
117,90	251,45
117,92	251,44
124,12	249,44
177,55	230,74
178,77	230,28
183,66	228,43
237,11	206,81
239,41	205,82
243,50	204,05
296,61	179,67
299,90	178,07
303,53	176,30

Las ecuaciones obtenidas de esta manera fueron:

- Para cada una de las bombas operando por separado:

$$H_{b1} = -4,12E - 3 * Q^2 - 0,65 * Q + 283,89 \quad \text{Ecuación 11}$$

$$H_{b2} = -4,21E - 3 * Q^2 - 0,63 * Q + 281,36 \quad \text{Ecuación 12}$$

$$H_{b3} = -4,02E - 3 * Q^2 - 0,63 * Q + 283,23 \quad \text{Ecuación 13}$$

- Para dos grupos operando en paralelo:

$$H_{b1+b2} = -9,97E - 4 * Q^2 - 0,33 * Q + 283,89 \quad \text{Ecuación 14}$$

$$H_{b1+b3} = -1,01E - 3 * Q^2 - 0,32 * Q + 283,89 \quad \text{Ecuación 15}$$

$$H_{b2+b3} = -9,79E - 4 * Q^2 - 0,33 * Q + 283,89 \quad \text{Ecuación 16}$$

- Para los tres grupos operando en paralelo:

$$H_{b1+b2+b3} = -4,42E - 4 * Q^2 - 0,22 * Q + 283,89 \quad \text{Ecuación 17}$$

Mediante el procedimiento anterior es posible determinar el estado operativo actual de los equipos, sin embargo, es necesario compararlo con las curvas de rendimiento originales para poder contrastarlos y saber, si se encuentran en condiciones aceptables, si es necesario realizarles mantenimiento, o si, por el contrario, tienen un deterioro avanzado y los mismos ameritan ser reemplazados por unos nuevos [4] (ver el Anexo D para las curvas y datos operativos de las bombas cuando recién se recibieron en la instalación).

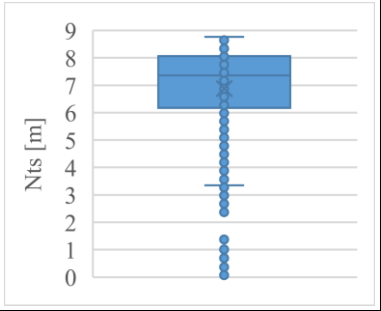
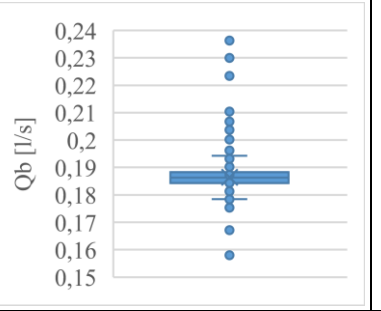
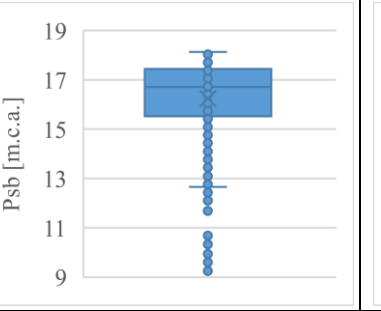
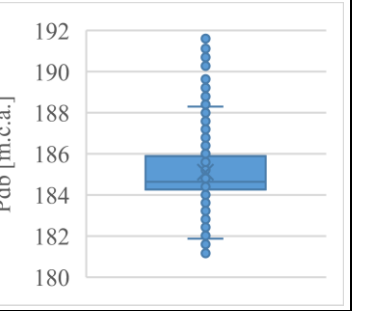
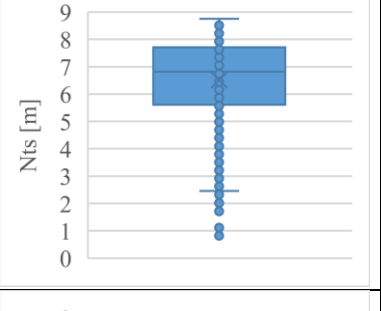
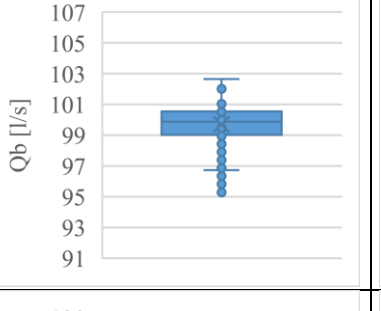
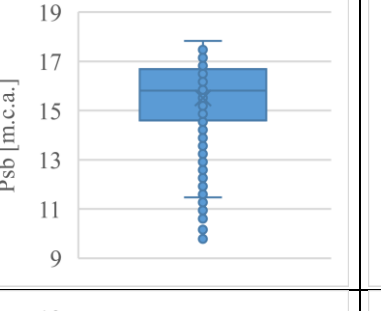
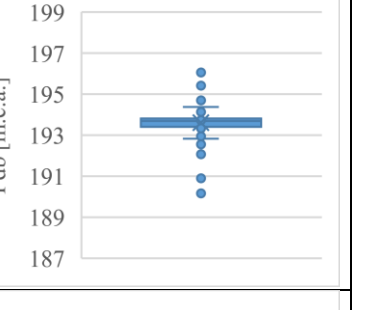
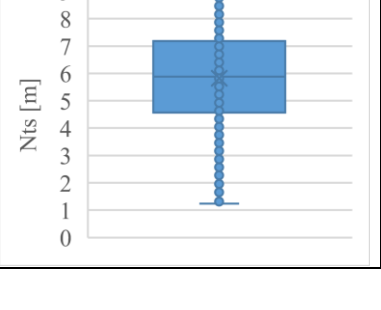
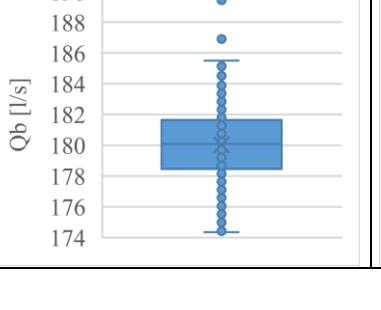
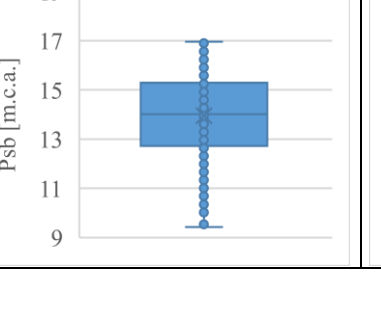
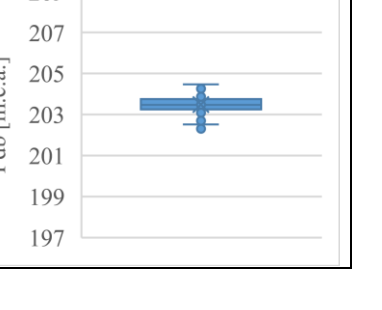
4 Recolección y procesamiento de datos.

Como herramienta para el proceso de minería de datos, en EPM, se cuenta con un sistema SCADA y un repositorio de información SIH para su almacenamiento, de dónde se extrajo información histórica de las variables enunciadas en el numeral 3 de un período de tres meses, con datos cada 5 minutos, para un total de 24632 registros por cada variable, para que los mismos constituyeran una muestra representativa del comportamiento del sistema (ver el Anexo G con los datos empleados para realizar el análisis).

Esta instalación tiene la siguiente instrumentación, por medio de la cual se obtuvieron los registros analizados finalmente en ése proyecto. Medidores de presión, celdas piezoresistivas con señal de salida de 4 a 20 mA (marca WIKA, modelo S-20), medidores de nivel, celdas hidrostáticas de tipo cerámicas con señal de salida de 4 a 20 mA igualmente (marca Pondus, modelo LT60FA), y el medidor de flujo, sensor electromagnético con señal de salida ModBus RS485 (marca Endress + Hauser, modelo Promag53W). Los manuales de la instrumentación pueden consultarse en el Anexo B, para verificar rangos operativos, condiciones de conexión, porcentajes de error, tipos de señal, etc.

En la tabla 3 se presentan los gráficos de “caja y bigotes” con los cuales se analiza el comportamiento estadístico de los datos registrados para cada variable

Tabla 5. Dispersión de los datos extraídos para el análisis del sistema

	Nivel tanque succión [m]	Caudal bombeado [l/s]	Presión de succión del bombeo [m.c.a.]	Presión de descarga del bombeo [m.c.a.]
0 Grupos operando				
1 Grupo operando				
2 Grupos operando				

Como se puede observar, en los gráficos anteriores al aumentar el caudal bombeado, cuando se incrementa el número de máquinas operando en la estación, se tiene:

- Los valores medios del nivel del tanque de succión van disminuyendo.
- La mayoría del tiempo los valores del nivel del tanque están por debajo del valor medio, pues como se puede ver en las gráficas de nivel, el bigote inferior es más largo. En caso de energizar los tres grupos, será necesario revisar los valores del nivel del tanque de succión y la presión mínima de disparo de los equipos pues ya con dos equipos está en valores bajos, llegando 1,25 metros y menos.
- La presión de succión del bombeo entonces, también presenta más acumulación de valores en los niveles inferiores al valor medio, y se debe al comportamiento del nivel del tanque de succión pues son variables directamente relacionadas.
- Los valores medios de la presión de succión disminuyen, pues este valor depende directamente del nivel del tanque y de las pérdidas de energía en la succión que aumentan.
- Los valores medios de la presión de descarga de las bombas tienen poca dispersión, y se ve como disminuye la cantidad de datos por fuera del rango entre máximo y mínimo, lo que indica que a medida que más grupos operan, el comportamiento del sistema se ve menos perturbado por factores como posibles recirculaciones en las válvulas de descarga de los grupos, o, entre otros.
- Las gráficas de caudal bombeados y presión de descarga, presentan una distribución más homogénea, donde los bigotes tienen longitudes similares y los tamaños de los cuartiles también son proporcionales, lo que indica que el sistema presenta menos perturbaciones y su variación sólo depende de los factores de incremento de pérdidas por flujo y fluctuaciones en el nivel del tanque de succión.

5 Resultados.

A continuación, se presenta en forma de tabla, un conjunto de muestra de los resultados de las ecuaciones descritas en el numeral 3, y aplicadas a cada uno de los puntos extraídos del histórico de información de EPM (los datos completos con los que se realizó el estudio pueden verificarse en el Anexo G), donde se tiene lo siguiente:

- Z Sólo se calcula para los instantes en los que todas las bombas se encuentran apagadas.
- Z_{med} Es el promedio de las Z encontradas de la manera antes descrita.
- K_{succ} Para los instantes donde las bombas están apagadas, no se estima el coeficiente de pérdidas porque al ser $Q = 0$, se tendría una indeterminación.
- H_v Para el caso planteado, los diámetros de succión y descarga son iguales, por lo que siempre es 0.
- K_{desc} Para los instantes donde las bombas están apagadas, no se estima el coeficiente de pérdidas porque al ser $Q = 0$, se tendría una indeterminación.

Tabla 6. Resumen tabulado de los valores obtenidos con las ecuaciones para calcular la curva de comportamiento del sistema (Htot)

Qdes [l/s]	Z [m]	H estática succión m=N+Zmed [m]	Pérdidas en succión Hfs=Hesucc- Ps [m]	$K_s=H_{fs}/Q^{1,851}$	V^2_d [m ² /s ²]	V^2_s [m ² /s ²]	Pérdidas en la descarga Hfd=Pdesc- He des [m]	$K_d=H_{fd}/Q^{1,851}$	H TOTAL Hd=Pd- Ps+Hv [m]
100,88		17,55	0,17	3,42E-5	0,60	0,60	17,30	3,38E-3	175,68
100,76		17,55	0,23	4,60E-5	0,60	0,60	17,40	3,41E-3	175,83
100,87		17,56	0,38	7,36E-5	0,60	0,60	17,35	3,40E-3	175,93
100,94		17,56	0,33	6,39E-5	0,61	0,61	17,40	3,40E-3	175,92
100,83		17,56	0,50	9,70E-5	0,60	0,60	17,41	3,40E-3	176,10
100,93		17,57	0,51	9,89E-5	0,60	0,60	17,32	3,38E-3	176,01
0	9,36	17,99	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0	165,92
0	9,37	17,99	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0	165,88
0	9,36	18,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0	165,92
0	9,36	18,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0	165,90
0	9,36	18,01	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0	165,88
0	9,36	18,02	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0	165,87
183,01		17,05	1,35	8,81E-5	1,97	1,97	27,64	1,81E-3	187,70
183,05		16,97	1,33	8,76E-5	1,96	1,96	27,47	1,80E-3	187,60
182,69		16,89	0,99	6,49E-5	1,96	1,96	27,51	1,81E-3	187,37
182,73		16,81	1,20	7,89E-5	1,96	1,96	27,50	1,81E-3	187,64
182,50		16,73	1,32	8,71E-5	1,96	1,96	27,49	1,81E-3	187,84
182,60		16,65	1,23	8,14E-5	1,96	1,96	27,38	1,80E-3	187,72

A partir de la solución de las ecuaciones para cada registro de los datos extraído se efectuó un análisis gráfico, el mismo puede observarse a continuación:

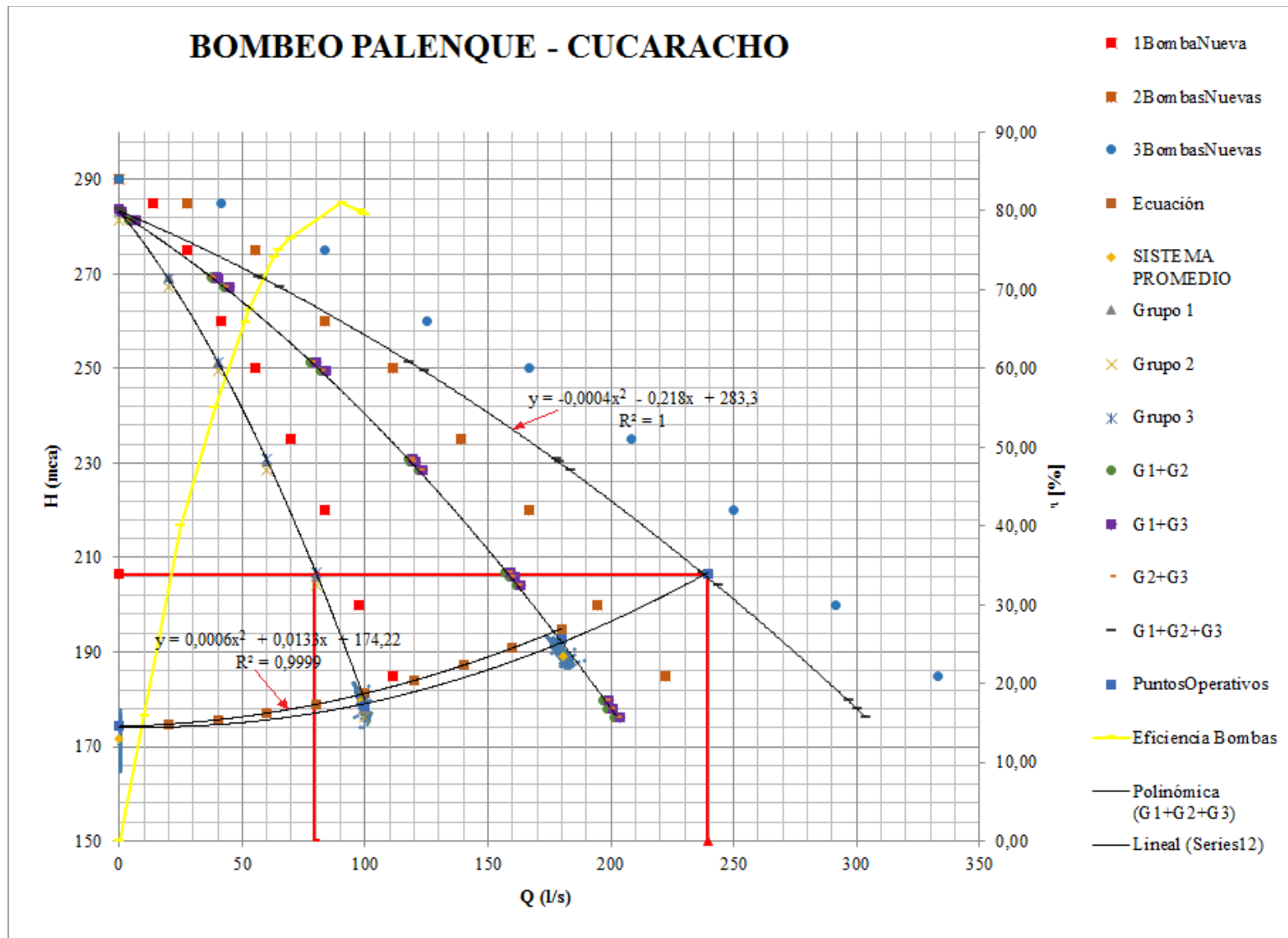


Figura 5. Resumen gráfico de los resultados obtenidos

Se puede ver que la diferencia entre la curva original (■) y las curvas medidas de las bombas (línea de tendencia más baja), es un desplazamiento paralelo de cada punto, por lo que esta variación se podría atribuir a un desgaste normal de los anillos de retención de la bomba y del impulsor. Sin embargo, como la variación del caudal está por debajo del $\pm 10\%$ y la de la cabeza por debajo del $\pm 6\%$, según la norma EN ISO 9906 [13] (En dicha norma, ver Tabla 8, para los Grados 1, 2 y 3), se concluye que las bombas se encuentran en condiciones de operación aceptables.

Utilizando la ecuación del sistema, Ecuación 7 ($P_{desc} = H_{est} + h_{f_{desc}}$) e igualándola con la ecuación ($Hd = 5,56E - 4 * Q^2 + 1,31E - 2 * Q + 174,22$) obtenida como la línea de tendencia e igualándola con la ecuación de tres bombas operando en paralelo ($H = -4,42E - 4 * Q^2 - 0,22 * Q + 283,89$), se puede determinar la presión y el caudal de los tres grupos operando en paralelo.

Con la presión de descarga y el caudal se pueden graficar el comportamiento de las bombas como se muestra a continuación. Las nubes de datos se representaron en la dispersión azul, y se realizó un análisis “caja y bigotes” para verificar su distribución, que se indica con los cuadros negros y bigotes rojos.

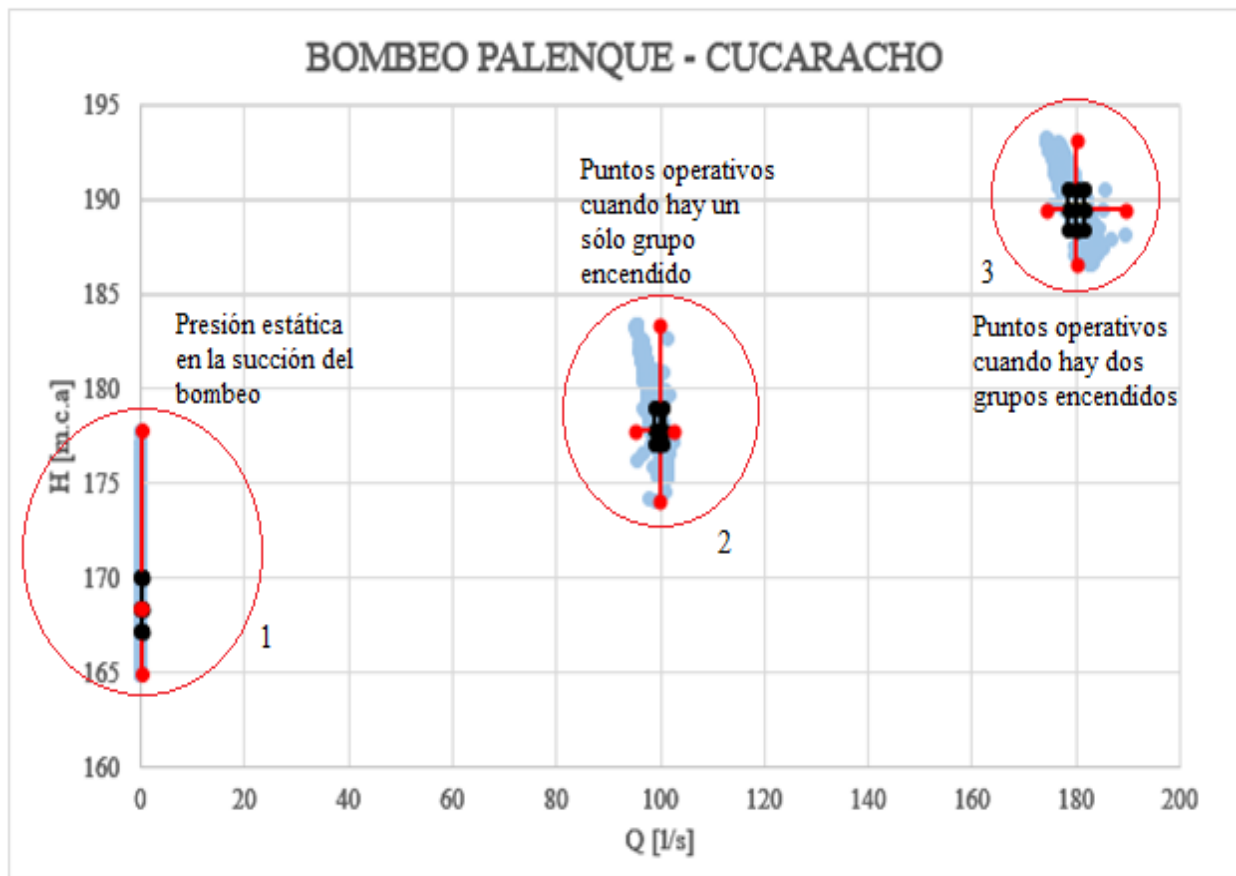


Figura 6. Resultados obtenidos de las ecuaciones de cálculo

El primer conjunto de valores de la figura 3, representa los cálculos para la presión estática del bombeo, cuando las bombas están apagadas. En la figura 4, se presenta una ampliación de la zona 1 para apreciar más detalles.

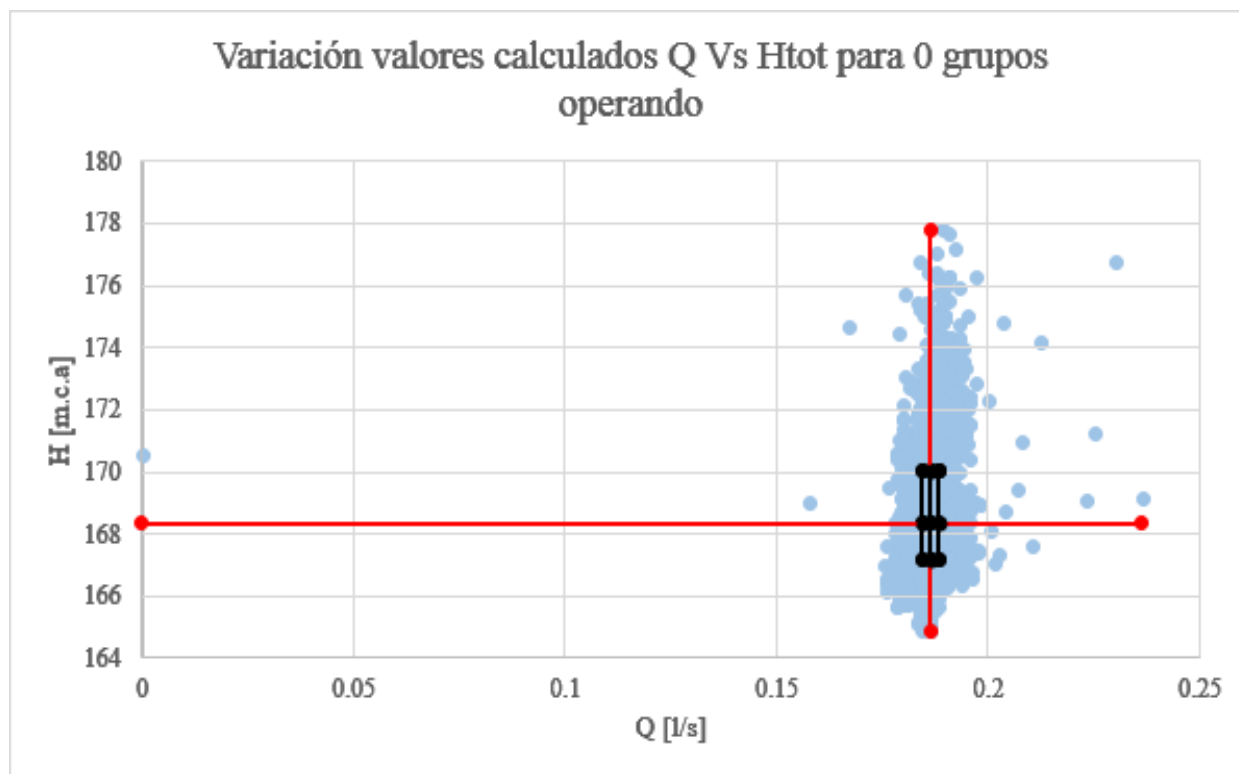


Figura 7. Distribución de los valores de Caudal Vs Presión cuando las bombas están apagadas (Presión estática del sistema)

Se observan los siguientes puntos de interés en la figura 4:

Tabla 7. Valores de dispersión de la relación Caudal Vs Presión cuando las bombas están apagadas

	Caudal [l/s]	Presión [m.c.a.]
Mínimo	0	164,85
Primer cuartil	0,1843	167,16
Mediana	0,1863	168,34
Tercer cuartil	0,1883	170,06
Máximo	0,2364	177,68

El segundo conjunto de valores de la figura 3, representa los cálculos de la relación entre el caudal y la presión de bombeo para un grupo operando. En la figura 5, se presenta una ampliación de la zona 2 para apreciar más detalles.

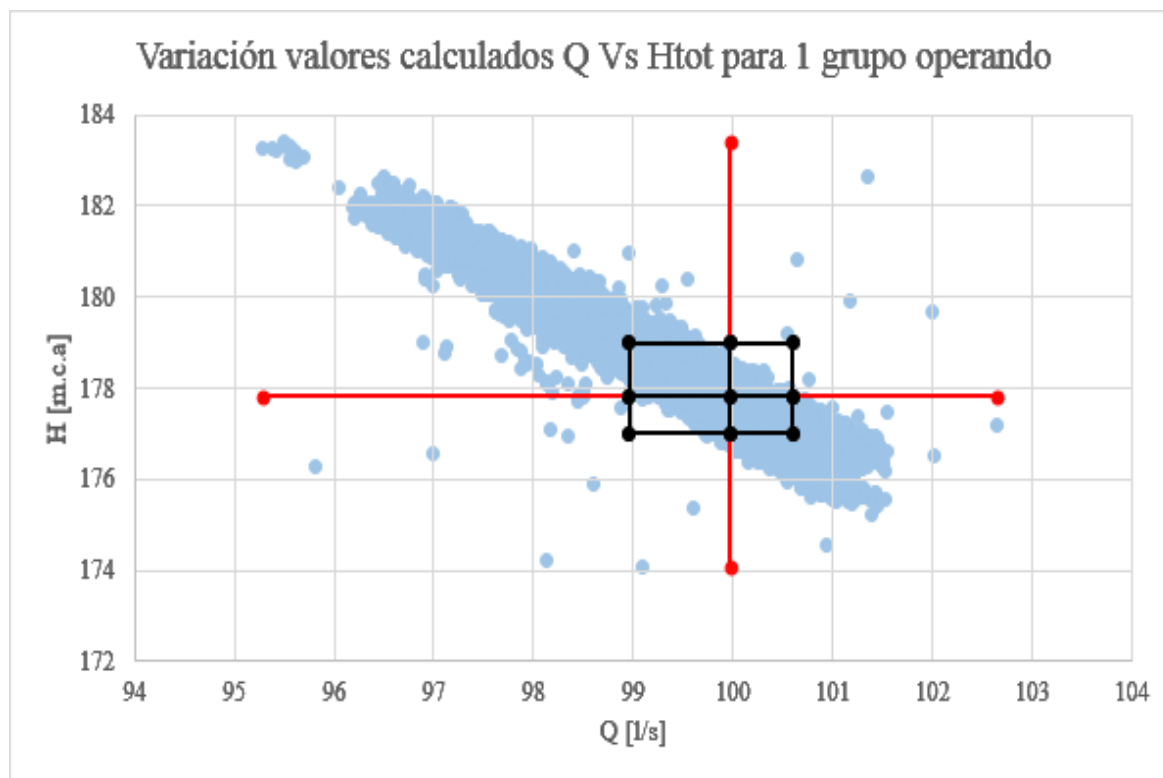


Figura 8. Distribución de los valores de Caudal Vs Presión cuando opera una sola bomba

Se observan los siguientes puntos de interés en la figura 5:

Tabla 8. Valores de dispersión de la relación Caudal Vs Presión cuando hay un solo grupo operando

	Caudal [l/s]	Presión [m.c.a.]
Mínimo	95,28	174,09
Primer cuartil	99,01	177,01
Mediana	99,88	177,83
Tercer cuartil	100,53	178,98
Máximo	102,65	183,39

El tercer conjunto de valores de la figura 3, representa los cálculos de la relación entre el caudal y la presión de bombeo para dos grupos operando. En la figura 6, se presenta una ampliación de la zona 3 para apreciar más detalles.

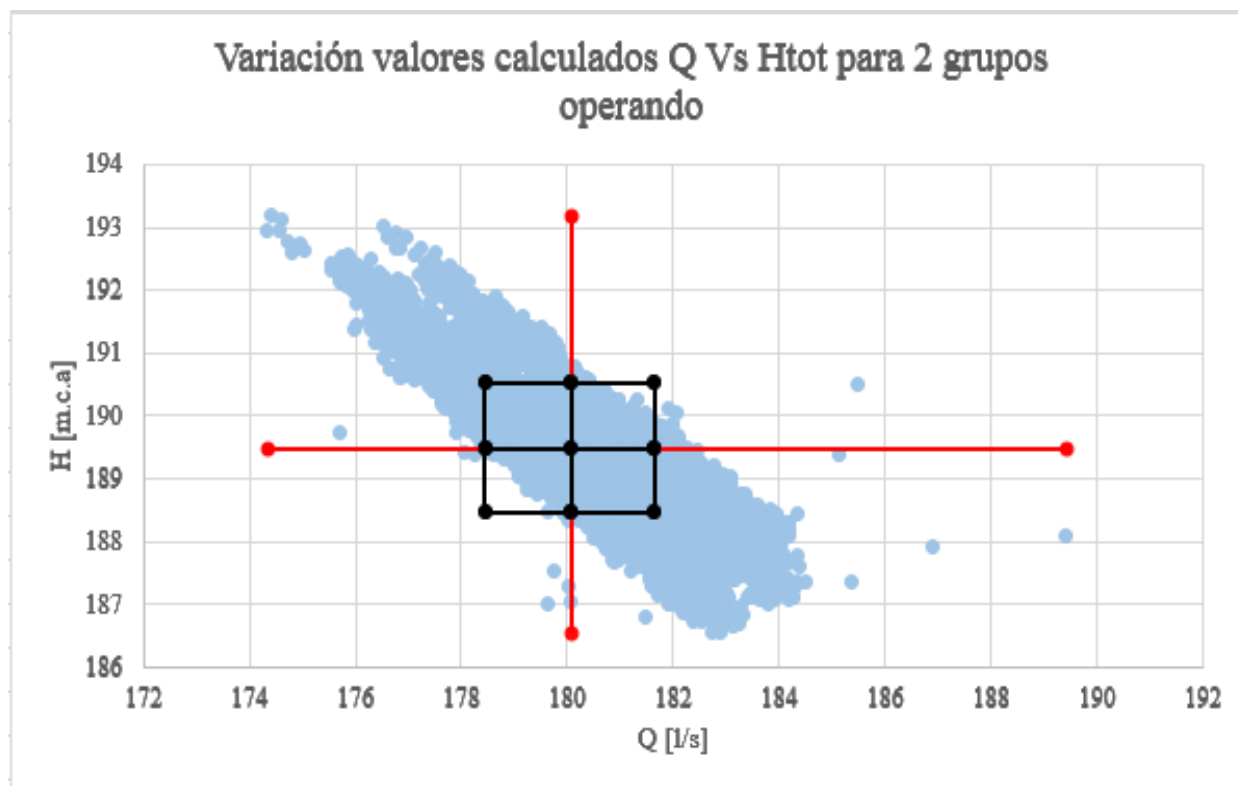


Figura 9. Distribución de los valores de Caudal Vs Presión cuando operan dos bombas en paralelo

Se observan los siguientes puntos de interés en la figura 6:

Tabla 9. Valores de dispersión de la relación Caudal Vs Presión cuando hay dos grupos operando

	Caudal [l/s]	Presión [m.c.a.]
Mínimo	174,34	186,56
Primer cuartil	178,44	188,46
Mediana	180,08	189,48
Tercer cuartil	181,65	190,53
Máximo	189,43	193,18

La dispersión que presentan los valores de los puntos (combinaciones de caudales y presiones), indican el rango operativo del sistema debido a las fluctuaciones de altura de lámina de agua del tanque de succión entre su nivel mínimo y máximo, variaciones que se presentan debido a que, éste, como la mayoría de los tanques de donde se conectan los bombes en el sistema de distribución de agua potable en la ciudad de Medellín, es un tanque de distribución para consumo de los usuarios, por lo que la cantidad de agua disponible no sólo depende del caudal bombeado, sino del consumido por los usuarios del circuito aguas abajo del tanque también.

Posteriormente, tomando los valores de caudal operativo de las bombas cuando opera cada una de manera independiente, y cuando operan todas en paralelo; se puede determinar si la variación en la eficiencia es razonable o si, por el contrario, el punto operativo de las máquinas se aleja substancialmente del *Best Efficiency Point* (BEF) [4] y, por tanto, no es recomendable que la estación opere de dicha forma.

En la siguiente gráfica se puede observar qué, la eficiencia de operación de las bombas, tanto cuando opera cada una por separado, como cuando operan en paralelo los tres grupos, conservarán valores similares, cercanos ambos al 80%; por lo que, no se presentarán cambios en los consumos eléctricos ni regímenes de temperatura elevados.

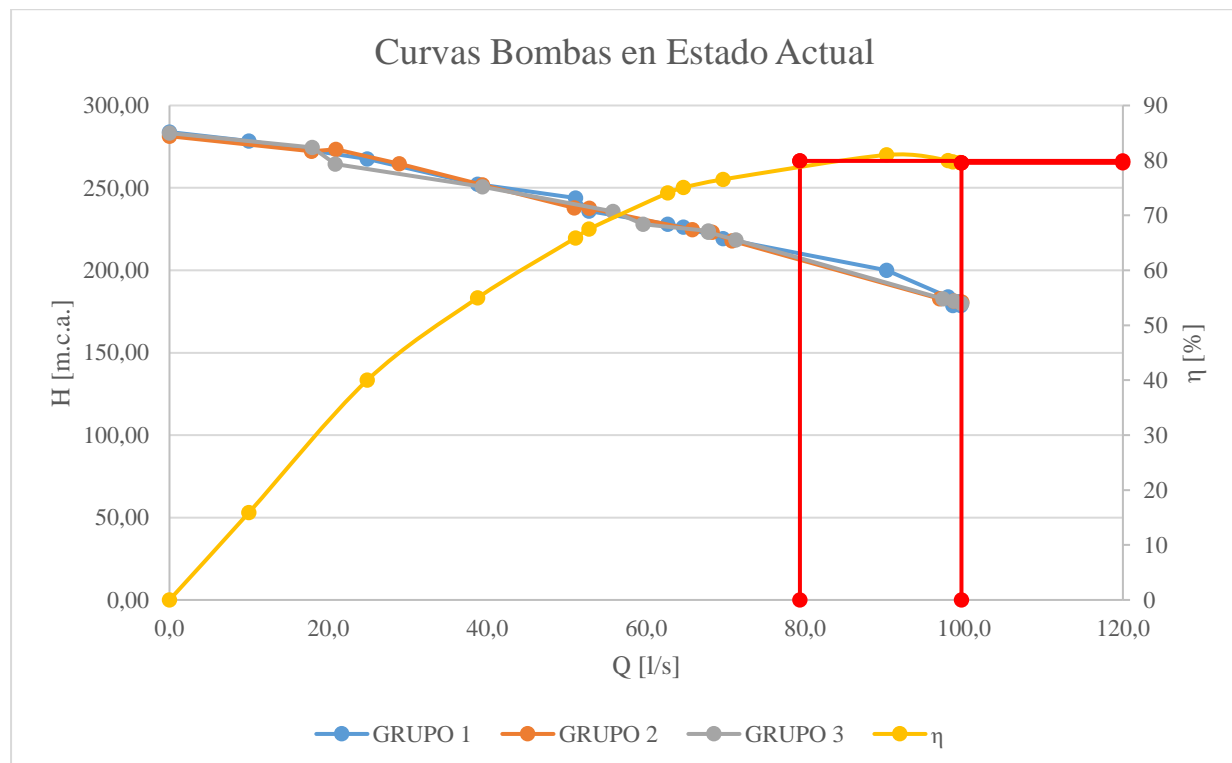


Figura 10. Curvas operativas de las bombas en su estado actual (medidas por Mantenimiento Equipos)

6 Análisis de resultados

Las bombas se encuentran en un estado de conservación aceptable, pues según la norma EN ISO 9906 [13] (En dicha norma, ver Tabla 8 para los Grados 1,2 y 3), las presiones deben estar dentro del rango entre $\pm 6\%$ de la presión indicada por el fabricante (-2,14% aproximadamente), y caudales deben estar dentro del rango entre $\pm 10\%$ del caudal indicado por el fabricante (-9,68% aproximadamente). Para éstos puntos operativos, la eficiencia de cada bomba estaría cercana a valores del 80%, lo que indica que las mismas operarían en el rango de las mejores condiciones esperadas.

Al implementar ésta solución se podrá dar respuesta a las necesidades de la comunidad y tener una capacidad adicional para emergencias, pues el caudal entregado se aumenta en 60 l/s, mucho más que los 20 l/s que se requieren en el momento. Éste remanente se podría disminuir reduciendo la velocidad de giro de los equipos, para que los mismos trabajen incluso con un menor consumo eléctrico y menor desgaste.

Los puntos de Caudal Vs Presión de descarga de las bombas tienen correspondencia exacta con la curva de las bombas, no están desplazados, lo que indica que las válvulas de descarga de cada grupo no presentan pasas y no hay recirculación de agua. Esto sería evidente al comparar los puntos cuando se pusieran en operación todos los grupos de la instalación, donde el agua no puede retornar por ninguna otra descarga.

Adicionalmente a las verificaciones hidráulicas se deben realizar análisis en las instalaciones eléctricas, que permitan asegurar que las conexiones y elementos de control necesarios para la operación de las bombas tengan la capacidad suficiente para energizar todos los equipos al mismo tiempo y no se presenten cortes por protecciones o sobretensiones. También se deben verificar condiciones de carga en los anclajes, debidas a los posibles eventos de golpes de ariete con una presión de servicio mayor a la del diseño original, y determinar si es posible asumirlas con las estructuras existentes o si se deben reforzar.

7 Conclusiones.

- La disponibilidad de información histórica, de registros de los diseños y la información de fábrica de los equipos instalados, es la base necesaria para poder realizar los análisis hidráulicos en los que se identifique las posibilidades operativas de cada sistema. Sin esta información, sería obligatorio realizar mediciones de campo extensas que permitieran obtener los mismos datos, lo que implicaría tiempo, desplazamientos, equipos, entre otros.
- Partiendo de la información recolectada y aplicando la metodología descrita anteriormente, se pudo obtener la ecuación de comportamiento de las tuberías, esta ecuación permite proyectar el comportamiento de las mismas a medida que el caudal varíe, con lo que se pueden obtener datos, que, aunque no se han medido, podrían verificarse posteriormente, o que indiquen que el sistema no debería forzarse a trabajar a esos niveles pues podrían significar riesgos. Como se explicó en el desarrollo del proyecto, esta metodología es recomendada por su amplia aplicación y verificación experimental en diferentes campos industriales y educativos, adicionalmente, en EPM se ha aplicado satisfactoriamente para el diseño de los sistemas de bombeo encontrando correspondencia con los valores medidos con ajustes cercanos al + 7% en caudal, lo que asegura que el abastecimiento de los usuarios está cubierto si las condiciones de diseño fueron consecuentemente verificadas.
- Poder contar con los datos de las curvas originales de las bombas es fundamental para poder comparar los registros de caudal y presión medidos en fábrica, con los que los equipos entregan en la instalación definitiva, y a medida que van avanzando los años. Comparando dichos valores se puede verificar si las bombas están en condiciones operativas satisfactorias, si presentan fallas menores, o si, por el contrario, es necesario reemplazarlas pues ya no cumplen con los estándares indicados en las normas técnicas [4], [7], [12]. Consecuentemente, es necesario que se realicen análisis constantes de éste tipo y se verifiquen las condiciones operativas del sistema para tomar los correctivos o medidas necesarias en los momentos oportunos y no cuando la situación sea insostenible y se requieran acciones inmediatas.
- De la solución del sistema de ecuaciones (pérdidas en las tuberías y comportamiento de las bombas), se puede observar qué, al implementar ésta solución se podrá dar respuesta a las necesidades de la comunidad y tener una capacidad adicional para emergencias, pues el caudal entregado se aumenta en 60 l/s, mucho más que los 20 l/s que se requieren en el momento. Éste remanente se podría disminuir reduciendo la velocidad de giro de los equipos, para que los mismos trabajen incluso con un menor consumo eléctrico y menor desgaste (verificando si la eficiencia de los mismos no se ve afectada).
- Según la norma ANSI/HI 9.6.3-1997, las bombas pueden operar en un rango de $70\% < BEP < 120\%$, y por razones energéticas y operativas, los bombeos en EPM se diseñan para que las pérdidas no superen el 15% de la presión dinámica total del sistema, sin embargo, como se trata de un caso de emergencia, donde se debe priorizar la prestación del servicio a la comunidad, es razonable encontrar porcentajes de pérdidas superiores a éste valor, pudiendo llegar hasta un 35%, para el caso del bombeo Palenque – Cucaracho las pérdidas al disponer de las tres bombas operando en paralelo representarían un 15,55%. Estos valores son admisibles por tratarse de

medidas extraordinarias, necesarias para la mitigación de una necesidad que no da espera a la implementación de medidas de mediano y largo plazo, pero que debe ser corregida posteriormente con ampliaciones y ajustes en los circuitos, de forma que la operatividad vuelva a estar enmarcada en los parámetros de seguridad y confiabilidad que exige la norma RAS [2] y aplica EPM, NEGC [6].

8 Recomendaciones.

- Realizar un análisis del mismo escenario operativo con una metodología de cálculo diferente y comparar los resultados obtenidos para determinar las variaciones entre ellos, analizando las posibles causas de los mismos, si son representativas o son ajustes que no requieren de mayor profundización y detenimiento.
- Realizar un análisis desde las ópticas eléctrica y civil de un sistema de bombeo como éstos, para complementar las conclusiones y efectivamente indicar si bajo cualquier situación es viable operar los tres grupos del sistema en paralelo. Verificando cargabilidad de los transformadores, presencia o no de variadores de velocidad, determinación de las potencias eléctricas consumidas, análisis de transitorios en tuberías y anclajes, verificación de incrementos de presión para evaluar factores de seguridad de las tuberías, entre otros.
- Realizar proyecciones del sector para verificar demandas futuras (caudales a proveer), y poder identificar de manera más proactiva las medidas a mediano y largo plazo que deban implementarse en los circuitos de distribución de agua, evitando en la medida de lo posible circunstancias como ésta para tener mayor control y disponibilidad del recurso hídrico.
- Validar de manera experimental los resultados proyectados con el análisis, para determinar su correspondencia con la realidad y correlacionar el método con los valores medidos en pruebas, ya que técnicamente no es un riesgo para las bombas (obviamente, verificando que se cumplan los mismos criterios de seguridad en el aspecto eléctrico y civil).

9 Referencias

- [1] C. C. d. Colombia, *Sentencia T-740/11*, Bogotá, 2011.
- [2] M. d. V. Colombia, *Reglamento técnico del sector de Agua potable y Saneamiento básico (RAS)*, Bogotá, 2000.
- [3] G. Á. Acosta y J. N. Azevedo, *Manual de hidráulica*, México: Harla, 1976.
- [4] ANSI, «American National Standard for Centrifugal and Vertical Pumps for Allowable Operating Region,» 1997.
- [5] M. d. I. P. S. Colombia, *Decreto 1575*, Bogotá, 2007.
- [6] EPM, *Normas y Especificaciones Generales de Construcción Capítulo 7*.
- [7] ANSI, *American National Standard for Rotodynamic Pumps for Hydraulic Performance Acceptance Tests*, 2011.
- [8] B. Wylie, V. Streeter y K. Bedford, *Mecánica de fluidos*, Bogotá: McGrawHill, 2000.
- [9] R. Mott L., *Mecánica de fluidos aplicada*, Ciudad de México: Prentice Hall, 1996.
- [10] P. Hasen Rodríguez, F. Arreguín Cortés y O. Guerrero Angulo, «Ecuación universal para el cálculo de pérdidas en redes de agua potable,» de *Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales; AIDIS. Ciencia y conciencia compromiso nacional con el medio ambiente*, Ciudad de México, 2000.
- [11] Y. M. Camaraza, «Nuevo modelo para la determinación del factor de fricción en el régimen de flujo turbulento,» *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, vol. 5, n° 2, p. N/A, 2011.
- [12] ANSI, «American National Standard for Rotodynamic (Centrifugal) Pumps for Design and Application,» 2009.
- [13] «Bombas rotodinámicas. Ensayos de rendimiento hidráulico de aceptación. Niveles 1, 2 y 3 (ISO 9906:2012) (Ratificada por AENOR en junio de 2012),» Madrid, 2012.
- [14] C. F. Colebrook, «Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between smooth and rough pipe laws,» *Journal of the Institution of Civil Engineers*, p. N/A, Febrero 1939.

- [15] C. F. Colebrook y C. White, «Experiments with fluid friction in roughened pipes,» *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical-Sciences*, vol. 161, n° 906, pp. 367-381, 1937.
- [16] H. I. Standards, «Hydraulic Institute Standards for Centrifugal, Rotary and Reciprocating Pumps,» Detroit, 1983.
- [17] ANSI, «American National Standard for Rotodynamic (Centrifugal) Pumps for Design and Application,» 2009.

Anexo A

Informe del estado actual del sistema de bombeo Palenque – Cucaracho (Elaborado por el equipo de Mantenimiento Predictivo y Gestión de EPM).

Anexo B

Catálogos de instrumentación del bombeo (sensores de presión de succión y descarga, sensor de flujo y nivel de tanque de succión).

Anexo C

Fotografías de la instalación.

Anexo D

Curvas de fábrica de las bombas.

Anexo E

Normas (EN-ISO9906, NEGC Capítulo 7 y Normas de diseño de acueductos EPM).

Anexo F

Datos de diseño e información recolectada sobre el bombeo.

Anexo G

Hoja de cálculos realizados.