

1.1

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Optimización de la Eficiencia Física, Hidráulica, y Energética en el Sistema de Agua Potable del Proyecto Parque Logístico GD

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo la obtención del Título de:

Maestría en Ingeniería Civil

Con mención en Construcción y Saneamiento

Presentado por:

FRANCISCO MARLON FALCON ARIAS

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedico a:

Dios, quien me ha orientado y bendecido en toda mi vida y me da fortaleza para seguir con fe y optimismo hacia adelante.

A mis padres, Francisco y Georgina, que me han apoyado siempre y orientado a tener una buena formación, brindándome valores de ética, honestidad y responsabilidad.

A mi esposa Tania, mis hijos Adrián, Diego y Milena, quienes son mi fortaleza y me motivan a crecer día a día.

A mi hermana Gina, mi cuñado Marcio, y mi sobrina María de Los Ángeles, que me brindan su apoyo en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a:

Don Carlos Cueva González, quien con su apoyo y consejos, me ha permitido crecer como persona y profesionalmente. A los profesores y autoridades de la ESPOL, que gracias a su excelente calidad de educación pude adquirir nuevos conocimientos en el desarrollo de la maestría.

A la Ing. Esther Vázquez, Ing. Jeffrey Barberán, Ing. Nadia Quijano, quienes con su conocimiento y apoyo, me orientaron en el desarrollo del proyecto.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Francisco Marlon Falcón Arias* y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Francisco Marlon Falcón Arias

EVALUADORES

.....
Ing. Nadia Quijano

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
Ing. Esther Vásquez

PROFESOR TUTOR

.....
Ing. Jeffrey Barberán

PROFESOR CO-TUTOR

RESUMEN

En el año 2019, la empresa DIBIENS, construyó el proyecto Parque Logístico GD en su primera fase, el cual está compuesto por bodegas de almacenamiento de productos farmacéuticos y de consumo masivo, en un área de terreno de 22 Has, área de construcción de la primera fase 55.500m², y área de construcción final de proyecto 85.500 m², ubicado en el km 19 vía a Daule.

Para el desarrollo del proyecto, se realizó una campaña de medición que involucró la obtención de registros de presiones en la red, caudales suministrados, verificación de exactitud de medidores, muestreo de fugas, levantamiento de la infraestructura existente, levantamiento topográfico, identificación de guías y medición de parámetros eléctricos e hidráulicos de equipos de bombeo.

Como resultados principales se destaca la modelación hidráulica del sistema de agua potable que permite simular las condiciones antes y después de la implementación de las soluciones al sistema, y la reparación de fugas visibles y no visibles tuvo un impacto importante en disminuir los altos consumos registrados.

Finalmente, se concluyó que, con la Implementación de la Estación Reguladora de Presión, se eliminaron las variaciones internas de presión y se optimizó la eficiencia física, hidráulica y energética del sistema

Palabras claves: sistema de agua potable, eficiencia física, eficiencia hidráulica, eficiencia energética

ABSTRACT

In 2019, the DIBIENS company built the GD Logistics Park Project in its first Phase, which is composed of Warehouses for the Storage of Pharmaceutical and Mass Consumption products, in an area of land of 22 Has, construction area of the First Phase 55,500m², and final construction area of the project 85,500 m², located at km 19 via Daule. For the development of the project, a measurement campaign was carried out that involved obtaining records of pressures in the network, supplied flows, verification of meter accuracy, leak sampling, survey of existing infrastructure, topographic survey, identification of guides and measurement of electrical and hydraulic parameters of pumping equipment.

As main results, the hydraulic modeling of the drinking water system stands out, which allows simulating the conditions before and after the implementation of the solutions to the system, and the repair of visible and non-visible leaks had an important impact on reducing the high consumption recorded.

Finally, it was concluded that with the Implementation of the Pressure Regulating Station, internal pressure variations were eliminated and the physical, hydraulic and energy efficiency of the system was optimized.

Keywords: Drinking Water System, Physical Efficiency, Hydraulic Efficiency, Energy Efficiency

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	5
RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
ÍNDICE DE PLANOS.....	X
CAPÍTULO 1.....	10
1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 Antecedentes	10
1.2 Localización.....	14
1.3 Estudios Previos.....	15
1.4 Justificación.....	15
1.5 Objetivos	16
1.5.1 Objetivo General	16
1.5.2 Objetivos Específicos.....	16
CAPÍTULO 2.....	18
2. METODOLOGÍA.....	18
2.1 Trabajo de Campo.....	21
2.1.1 Recopilación y Análisis de Información.....	21
2.1.2 Identificación de pérdidas físicas en el sistema (fugas no visibles)	22
2.1.3 Identificación de pérdidas físicas en el sistema (fugas visibles)	25
2.1.4 Obtención de datos de presión	25
2.1.5 Obtención de datos de caudal	26
2.2 Tabulación de datos	26

2.3	Solución a diseñar	27
CAPÍTULO 3.....		28
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
3.1	Interpretación y análisis de resultados	28
3.2	Especificaciones técnicas.....	28
3.3	Diseño de la solución	30
3.3.1	Modelación hidráulica	30
3.3.2	Eficiencia física del sistema de agua potable	32
3.3.3	Eficiencia hidráulica del sistema de agua potable.....	34
3.3.4	Eficiencia energética del sistema de agua potable	36
CAPÍTULO 4.....		41
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	41
4.1	Conclusiones.....	41
4.2	Recomendaciones.....	41
BIBLIOGRAFÍA.....		42
ANEXOS.....		44

ABREVIATURAS

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

ASTM American Society for Testing and Materials

INEN Servicio Ecuatoriano de Normalización

SIMBOLOGÍA

m	Metro
psi	Unidad de presión en lbs/pulg ²
mca	Unidad de presión en metros de columna de agua
L/s	Unidad de caudal en Litros por segundo
QMD	Caudal medio diario
QMH	Caudal máximo horario

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Componentes calculados para el Umbral Medio de Fugas - UARL	12
Ilustración 2. Gráfico de facturación INTERAGUA octubre 2020-marzo 2021	13
Ilustración 3. Ubicación del Parque Logístico GD.....	14
Ilustración 4. Gráfico de construcción actual del proyecto.....	15
Ilustración 5. Esquema del procedimiento recomendado para la elaboración de un proyecto de eficiencia integral	20
Ilustración 6. Reservorios de agua existentes y cuarto de bombas.....	21
Ilustración 7. Tipos de fugas.....	22
Ilustración 8. Correlador localizador de fugas.....	23
Ilustración 9. Representación gráfica del funcionamiento de un geófono.....	23
Ilustración 10. Agua potable	24
Ilustración 11. Riego.....	24
Ilustración 12. Acometida 90mm	25
Ilustración 13. Esquema con componentes de estación reguladora de presión.....	29
Ilustración 14. Estación reguladora de presión.....	29
Ilustración 15. Presión aguas arriba y abajo de estación reguladora	30
Ilustración 16. Variación del caudal, la DQO y DBO afluentes a la PTAR a lo largo de 24h	31
Ilustración 17. Variación del caudal, la DQO y DBO afluentes a la PTAR a lo largo de 24h posterior a la implementación.....	31
Ilustración 18. Distribución genérica de las fugas en una red, clasificada por caudales	32
Ilustración 19. Tiempo versus consumo de agua	33

Ilustración 20. Estrategias de gestión de pérdidas	34
Ilustración 21. Esquematización de la válvula reguladora de presión	35
Ilustración 22. Tiempo versus consumo mensual (KWH)	38
Ilustración 23. Tarifa de consumo de agua de INTERAGUA.....	38
Ilustración 24. Tiempo versus costo mensual.....	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cálculo de consumo de agua potable del proyecto	19
Tabla 2. Consumo y facturación anual de agua potable.....	33
Tabla 3. Costos y consumo energético anual del equipo de bombeo	37

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1.....	45
--------------	----

CAPÍTULO 1

2. INTRODUCCIÓN

2.1 Antecedentes

Se define un sistema de abastecimiento de agua como la técnica responsable de almacenamiento, exportación y repartición de la toma de tratamiento de agua potable hasta las diversas conexiones de usuarios y otros puntos de consumo, cuyas características físicas, químicas microbiológicas han sido tratadas a fin de garantizar su aptitud para consumo humano (Comisión Nacional del Agua, 2010). De acuerdo con las normas INEN (2014), entre los objetivos fundamentales del control y operación de cualquier sistema hidrosanitario, especialmente de un sistema de abastecimiento de agua, deben acogerse al Reglamento de buenas prácticas de Manufactura del Ministerio de Salud Pública que involucra diversos aspectos como las características físicas, sustancias inorgánicas y radiactivas, sustancias orgánicas, plaguicidas, residuos de desinfectantes, subproductos de desinfección, cianotoxinas, y requisitos microbiológicos.

Hace veinte años, la gestión de fugas se basaba más en un proceso de "estimación" que en una ciencia precisa. Esto ha cambiado drásticamente, impulsado por la presión regulatoria sobre las compañías de agua del Reino Unido para reducir las fugas. Se han logrado avances significativos en la comprensión y el modelado de los componentes de pérdida de agua y en la definición del nivel económico de fuga para sistemas individuales. No obstante, aunque existan muchas teorías exitosas sobre estos mecanismos y avances científicos hidráulicos, a nivel mundial, la mayoría de los sistemas de agua aún sufren pérdidas significativas. Parte del problema es la falta de métodos estándar significativos para comparar y reportar el desempeño de la gestión de fugas (Liemberger & Farley, 2004).

La gestión de fugas comprende cuatro componentes principales: cuantificación de la pérdida de agua; monitoreo de fugas; detección, ubicación y reparación de fugas; y presión de la red y gestión de activos. La cantidad de agua perdida en un sistema de distribución se puede cuantificar realizando un balance de agua mediante la metodología estandarizada de IWA/AWWA o la del Reino Unido. El balance hídrico del Reino Unido difiere de la metodología IWA/AWWA principalmente en la terminología utilizada,

además, considera el subregistro de medidores como parte de los ingresos por agua, por lo que no declara agua no contabilizada (Mutikanga et al., 2013).

Por otro lado, el monitoreo de fugas tiene como objetivo regular el flujo hacia áreas de medición del distrito (DMA) y analizar el consumo diario de cada usuario, así como determinar las fugas más allá del uso legítimo del cliente en el momento del flujo nocturno mínimo, que generalmente ocurre entre las 2:00 y las 4:00 a. m. Durante este período, las presiones de la red son altas y las fugas alcanzan su porcentaje máximo de entrada total en la DMA.

Adicionalmente, la distribución de agua es igual a la distribución de salida por dicho caudal de entrada. Una fuga consiste en la reducción de un caudal a sección de red de tubería mediante la igualación del caudal que se basa en la fórmula $Q = v * a$, en donde Q es el caudal, V la velocidad del agua (1.2 m/s aproximadamente) y a el área. Si se detecta fuga, la distribución de salida es menor a la distribución inicial. Por otro lado, la ubicación de fugas se refiere a señalar la posición exacta de la fuga mediante el uso de equipos acústicos como dispositivos de escucha, registradores de ruido y correladores de ruido de fugas.

Los avances recientes en la tecnología y las instalaciones de comunicación han dado lugar a equipos acústicos modernos que son más eficientes y menos dependientes de la experiencia del usuario, además, la medición multiparamétrica es una metodología prometedora que probablemente surja como una alternativa a las DMA para el monitoreo de fugas. Finalmente, la gestión de la presión y la gestión de activos (reemplazos de líneas principales y de servicio) son las únicas herramientas que pueden reducir las fugas de fondo (no reportadas e indetectables usando equipos acústicos) una vez que se han tendido las tuberías. Sin embargo, la gestión de activos es costosa y permanece fuera del alcance de muchas empresas de agua.

La gestión de la presión no solo reduce las fugas, sino que amplía la vida útil de las infraestructuras, reduce los costes de operación y mantenimiento mediante la reducción de la frecuencia de las interrupciones principales y el consumo de energía, mejora el servicio al cliente como resultado de la reducción de las interrupciones del suministro de agua y es una herramienta de gestión de la demanda (Mutikanga et al., 2013).

La Asociación Internacional de Abastecimiento de Agua (IWA) recomienda utilizar métricas de rendimiento del sistema de distribución que relacionen la pérdida por fugas con factores como la longitud y la presión de la red, el tiempo de servicio, la cantidad de conexiones y la cantidad de ubicaciones de servicio; todos los cuales son fáciles de determinar (Lambert et al., 1999).

El uso de estos indicadores de desempeño como guía de los niveles de pérdidas técnicas en las redes de distribución permite (Lambert et al., 1999)

- Determinar el caudal mínimo nocturno, expresado en litros por segundo o metros cúbicos por hora, a alcanzar tras la reparación inmediata de todas las fugas detectadas.
- A partir de un análisis del monitoreo de caudales mínimos nocturnos como método de detección de pérdidas físicas, decidir inmiscuirse en el sector hidráulico para detectar las pérdidas físicas existentes.

El Umbral Medio de Fugas Inevitables o UARL (Unavoidable Average Real Losses) es una métrica que muestra el estado óptimo de pérdida técnica que un sistema puede alcanzar bajo condiciones específicas de red y longitud de conexión, número de conexiones y estrés del servicio. Los valores que se muestran a continuación se derivan del análisis estadístico de datos de más de 27 proveedores en 20 países (Lambert et al., 1999)

Ilustración 1.

Componentes calculados para el Umbral Medio de Fugas - UARL

Tipo de infraestructura	Fugas de fondo	Roturas reportadas	Roturas no reportadas	UARL Total	Unidades
Red de distribución	9.6	5.8	2.6	18	litros/Km de tuberías/día/mca
Acometidas	0.6	0.04	0.16	0.8	litros/acometida/día/mca
Acometidas (medidas desde la red de distribución hasta el medidor)	16.0	1.9	7.1	25	litros/Km/día/mca

Nota: Obtenido de Lambert et al. (1999)

Los valores que se muestran en la ilustración anterior se pueden expresar en unidades internacionales o imperiales como ecuaciones, gráficos y hojas de cálculo. La fórmula básica para calcular UARL en litros/día es (Pedraza, 2012)

$$\text{UARL} = (18 \times L_d + 0.80 \times N_a \times 25 \times L_a) \times P$$

Donde

- L_d : Longitud total de las tuberías de distribución de la red, expresada en [Km]
- N_a : número total de acometidas existentes
- L_a : Suma de las longitudes de todas las acometidas, expresada en [Km]
- P : Presión promedio del sistema, expresada en [mca]

El Índice de Fugas Estructurales (IFE) o Infrastructure Leakage Index (ILI), es un indicador de los progresos potenciales y el estado actual del sistema. El IFE es adimensional y su cálculo se basa en la analogía entre el caudal medido y el Umbral de Fuga Promedio (UARL) calculado en base a la presión efectiva de cada sistema, por lo que puede ser utilizado positivamente como factor de comparación entre diferentes sistemas de abastecimiento (Pedraza, 2012). La fórmula es la siguiente:

$$\text{IFE} = Q / \text{UARL}$$

En el año 2019, la empresa DIBIENS, construyó el proyecto Parque Logístico GD en su primera fase, el cual está compuesto por bodegas de almacenamiento de productos farmacéuticos y de consumo masivo, en un área de terreno de 22has, área de construcción de la primera fase 55.500m², y área de construcción final de proyecto 85.500 m². (Información proporcionada por DIBIENS).

Debido a los altos consumos registrados en las planillas de INTERAGUA, en los años 2020-2021 (Ver ilustraciones 1 y 2), la inmobiliaria DIBIENS decide realizar un estudio mediante pruebas hidrostáticas para optimizar la eficiencia física, hidráulica y energética del sistema de agua potable en beneficio del proyecto.

Ilustración 2.

Gráfico de facturación INTERAGUA octubre 2020-marzo 2021



Nota: Obtenido de la base de datos de la inmobiliaria DIBIENS

2.2 Localización

El proyecto Parque Logístico GD está ubicado en el km 19 vía a Daule, que es una de las vías más importantes de ingreso y salida de Guayaquil, y los centros logísticos más importantes están ubicados en esa zona, tales como RANSA, Centro de Distribución El Rosado, Centro de Distribución TIA y AGUNSA.

Ilustración 3.

Ubicación del Parque Logístico GD



Nota: adaptado de Google Maps

Ilustración 4.

Gráfico de construcción actual del proyecto



Nota: obtenido de la base de datos de la inmobiliaria DIBIENS

2.3 Estudios Previos

La inmobiliaria DIBIENS proporcionó la siguiente información

- Planos topográficos
- Planos as built del sistema de agua potable (Ver anexos, Plano 1)
- Registro histórico de planillas de agua de INTERAGUA
- Planos arquitectónicos
- Características de equipos de bombeo
- Fugas reportadas en el Sistema de Agua Potable

2.4 Justificación

Los sistemas de distribución de agua urbana a menudo están “olvidados” hasta que manifiestan fugas y rupturas, lo que provoca pérdidas significativas de agua e ingresos. Según un estudio del Banco Mundial, alrededor de 48 000 millones de m³ de agua se pierden anualmente en los sistemas de distribución, lo que cuesta a las empresas aproximadamente \$14 000 millones al año en todo el mundo (Kingdom et al., 2006). La cantidad perdida o no facturada, es una medida de la eficiencia operativa de un sistema de distribución, y los altos niveles de NRW son indicativos de mala gobernabilidad y

malas condiciones físicas de dicha distribución. Cuando tales errores ocurren sistemáticamente en un número apreciable de clientes, la medida agregada del consumo de agua puede verse muy distorsionada y puede ocurrir una pérdida apreciable de ingresos.

Para disminuir los altos consumos registrados en las planillas de agua potable, es necesario identificar las pérdidas físicas, y proporcionar soluciones que permitan optimizar la eficiencia física, hidráulica y energética del sistema de agua potable. Consciente del problema de los diferentes formatos de balance de agua, métodos e indicadores de desempeño de fugas, la International Water Association (IWA) ha desarrollado una estructura y terminología de balance de agua internacional estándar. Mientras tanto, este formato estándar ha sido adoptado (con o sin modificaciones) por asociaciones nacionales en varios países y, más recientemente, por la Asociación Estadounidense de Obras Hidráulicas (AWWA) (Mutikanga et al., 2013).

Los componentes del balance hídrico pueden estimarse a través de diversas técnicas. Mientras que en casos ideales se miden muchos de los componentes importantes, la realidad, lamentablemente, suele ser muy diferente. A menudo, los administradores de servicios públicos ni siquiera comienzan a establecer un balance, ya que los datos clave, como la entrada total del sistema, no se conocen realmente. En este trabajo se plantea la idea de que siempre es importante mantener un balance hídrico adecuado, aún si las estimaciones sean la base de los componentes esenciales, ya que, realizando este procedimiento, se podrá elaborar una secuencia de pasos con el objetivo de precisar mejor los resultados.

2.5 Objetivos

2.5.1 Objetivo General

Optimizar la eficiencia física, hidráulica y energética del sistema de agua potable para obtener un balance hidráulico y disminución de costos por consumos de agua potable.

2.5.2 Objetivos Específicos

- Analizar el Impacto en la eficiencia física por disminución de fugas de agua, ya sean visibles y no visibles del sistema.

- Analizar el impacto en la eficiencia hidráulica por la implementación de soluciones técnicas efectivas, mediante la construcción de una estación reguladora de presión
- Analizar el impacto en la eficiencia energética con la optimización de la eficiencia física e hidráulica para disminuir los costos por consumo de energía eléctrica

CAPÍTULO 2

3. METODOLOGÍA

Para obtener los datos básicos del proyecto, se realiza una campaña de medición que involucre obtener registros de presiones en la red, caudales suministrados, variación de la demanda de agua, verificación de exactitud de medidores, muestreo de fugas, levantamiento de la infraestructura existente, levantamiento topográfico, identificación de guías y medición de parámetros eléctricos e hidráulicos de equipos de bombeo.

Para determinar la eficiencia física del proyecto, se realiza lo siguiente

- 1) Se determina un diagnóstico de la situación actual, en donde se determina el periodo de análisis, cuantificación del suministro de agua, estimación de consumos, cálculo de pérdidas, costo y tiempo de la reducción de fugas, con base en el balance de agua, desarrollado en tres etapas sintetizados de la siguiente forma
 - a. Etapa I
 - i. Elaborar una hoja de cálculo con los datos del último año de registro.
 - ii. Precisar un tiempo de análisis de la información.
 - iii. Escoger una unidad de medida.
 - b. Etapa II
 - i. Medir el abastecimiento de agua mediante la tipificación de las fuentes obras de captación del agua.
 - ii. Tasar los consumos medidos (registrados en el padrón de usuarios con sus estadísticas de volumen consumido) y no medidos (sin registro) que hayan sido aprobados.
 - iii. Estimar los egresos reconocidos y descartados (nivel de fugas y usos ilegales que persisten ocultos en la red de suministro de agua)
 - iv. Calcular los egresos probables absolutos (agua distribuida a la red de suministros que, por un lado, se desperdicia en fugas permanentes sin localizar y, por otro, es aprovechada por los consumidores, pero sin ser controlada por el organismo operados).

c. Etapa III

- i. Definir el consumo reducible y operaciones.
 - ii. Establecer la utilidad de la reducción de pérdidas (ahorro de energía eléctrica y potabilización).
 - iii. Calcular los costos y tiempo de reducción de pérdidas.
- 2) Se realiza una evaluación de la situación actual de fugas, se identifican las causas de las fugas, diseño de medidas preventivas para la reducción y control de fugas, definición de acciones para la eliminación de fugas, diseño de un programa de control y monitoreo de fugas.

Para determinar la eficiencia hidráulica del proyecto, se realiza lo siguiente

Un diagnóstico de la situación actual, en donde se determina el consumo de agua de los usuarios (clasificado como doméstico o no doméstico), dotaciones (distribución individual del agua a cada persona), continuidad de servicio (media de horas de permanencia del servicio de agua potable), caudal de agua suministrado por la red vs caudal de agua requerido por los usuarios, presión media en la red de distribución, y la elaboración del diagnóstico de la eficiencia hidráulica mediante la determinación de las características demográficas, la caracterización del manejo de sistema de agua potable vigente, los planos de la red en el presente, el cálculo de consumos, gastos de dotación y operación, y el cálculo de balances volumétricos, como se observa en la tabla 1.

Tabla 1.

Cálculo de consumo de agua potable del proyecto

Descripción	Cantidad	Unidad	Dotación	Consumo Diario (lts/día)	Consumo Diario (m3/día)	Consumo Diario (m3/mes)
Personas (CDE, ASEGNSA, 4PL, ADMINISTRACION)	800	personas	20 lts/per/día	16000 lts/día	16 m3/día	480 m3/mes
Limpieza Bodegas	5000	m2	1 lts/m2/día	5000 lts/día	5 m3/día	150 m3/mes
Comedor	220	m2	40 lts/m2/día	8800 lts/día	9 m3/día	264 m3/mes
Riego Areas Interiores PL	2339	m2	6 lts/m2/día	14034 lts/día	14 m3/día	421 m3/mes
TOTAL CONSUMO						1315.02 m3/mes

Nota: elaboración propia

Se elabora un proyecto de eficiencia hidráulica, en donde se realiza un modelo de simulación hidráulica de la red, análisis hidráulico con las alternativas para la

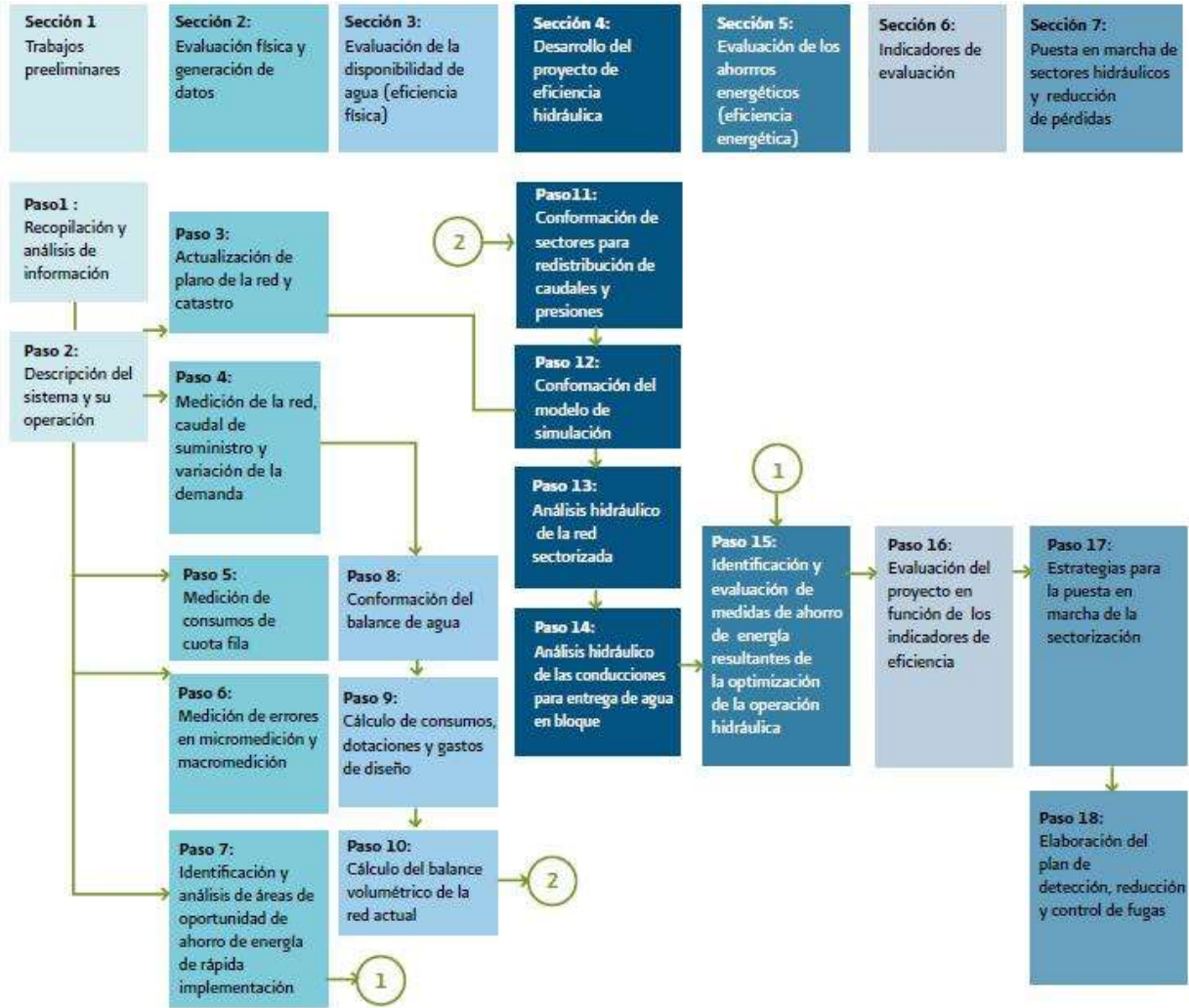
optimización del sistema que incluye la implementación de una estación reguladora de presión.

Los objetivos del proyecto de eficiencia hidráulica son reordenar las presiones y caudales en la red de suministro de agua potable, optimizar su funcionamiento, economizar, agilizar las tareas de mantenimiento y control de fugas, servirse de los beneficios del ahorro energético y ampliar la cobertura del servicio. Para la optimización de eficiencia energética, se determina un diagnóstico de la situación inicial de los equipos de bombeo y se determina el ahorro de energía resultante de la optimización de las eficiencias físicas e hidráulicas del Sistema.

A continuación, se muestra un esquema del procedimiento recomendado para la elaboración de un proyecto de eficiencia integral

Ilustración 5.

Esquema del procedimiento recomendado para la elaboración de un proyecto de eficiencia integral



Nota: Obtenido de Pedraza (2012)

3.1 Trabajo de Campo

3.1.1 Recopilación y Análisis de Información

De acuerdo con la información proporcionada por la empresa DIBIENS y la inspección del proyecto, se determinan preliminarmente las siguientes características del sistema de agua potable

- Se abastece de Agua Potable, desde el Acueducto existente de 1.800mm
- Tiene un macromedidor de 3" y una conexión de 160mm para llegar a un depósito de 270m³ de capacidad.
- Equipo de bombeo, compuesto por 3 bombas de 10 Hp para distribución a cada edificio del proyecto.

Ilustración 6.

Reservorios de agua existentes y cuarto de bombas



- Las tuberías de abastecimiento y distribución de agua potable están fabricadas en polietileno de alta densidad (PEAD) en diámetros de 160, 110, 90 y 63 mm.
- Las tuberías del sistema de riego son de PVC.
- La factibilidad de Servicio de INTERAGUA muestra que el proyecto tiene un caudal máximo horario de 4,21 litros/segundo y una presión de servicio de 2 Bares (29 psi=20mca) disponible en el acueducto.
- El sistema de agua potable opera a la presión del acueducto la mayor parte del tiempo en sus condiciones iniciales y el equipo de bombeo está configurado para

arrancar cuando la presión del suministro de agua al acueducto cae por debajo de 60 psi.

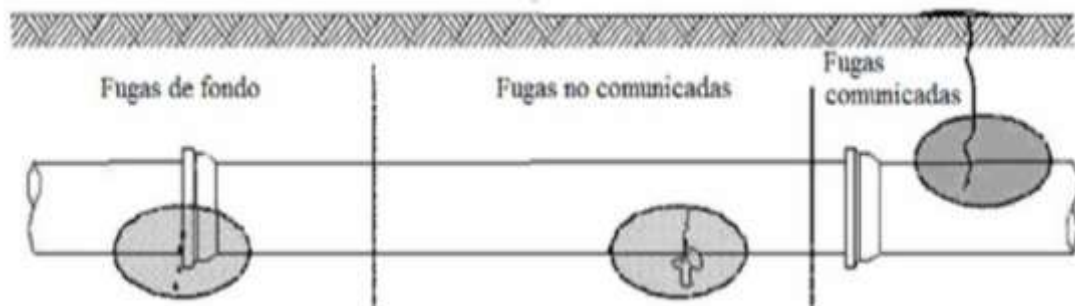
3.1.2 Identificación de pérdidas físicas en el sistema (fugas no visibles)

Para identificar las pérdidas físicas, se realizaron los siguientes procedimientos

- Revisión preliminar de la presión manométrica de la red.
- Inspección el diseño de la red de distribución por parte del equipo técnico.
- Registro de distancia recorrida, fugas detectadas y presión de servicio durante el recorrido.
- Uso de pintura de tráfico amarilla para marcar las fugas localizadas en el sitio.
- Aplicación de la geofonía, que es una actividad mediante la cual se pueden detectar posibles fugas en tuberías y collarines, accesorios y acometidas domiciliarias.

Ilustración 7.

Tipos de fugas



Nota: las fugas pueden ser profundas, comunicadas o no comunicadas. Obtenido de Fernández (2015).

Los avances tecnológicos recientes en los instrumentos de los geófonos los han hecho disponibles para una amplia gama de estudios sísmicos pasivos, a pesar de haber utilizado aquellos que son autónomos en la comunidad sísmica de fuente activa durante décadas. Los sistemas sísmicos compactos todo en uno, que incluyen geófonos, digitalizadores y baterías, comúnmente denominados nodos, son livianos y fáciles de implementar, lo que permite el uso de una gran cantidad de instrumentos en un solo proyecto, generalmente 100 o 1000 nodos (Karplus & Schmandt, 2018).

Las características del geófono utilizado para este trabajo fueron las siguientes

- Captura vibraciones de fugas en tuberías de presión.

- Convierte y amplifica pulsos electrónicos.
- Filtra las señales de interferencia y hace que esta sea audible.
- Consta de un módulo de control, auricular y micrófono.

Ilustración 8.

Correlador localizador de fugas

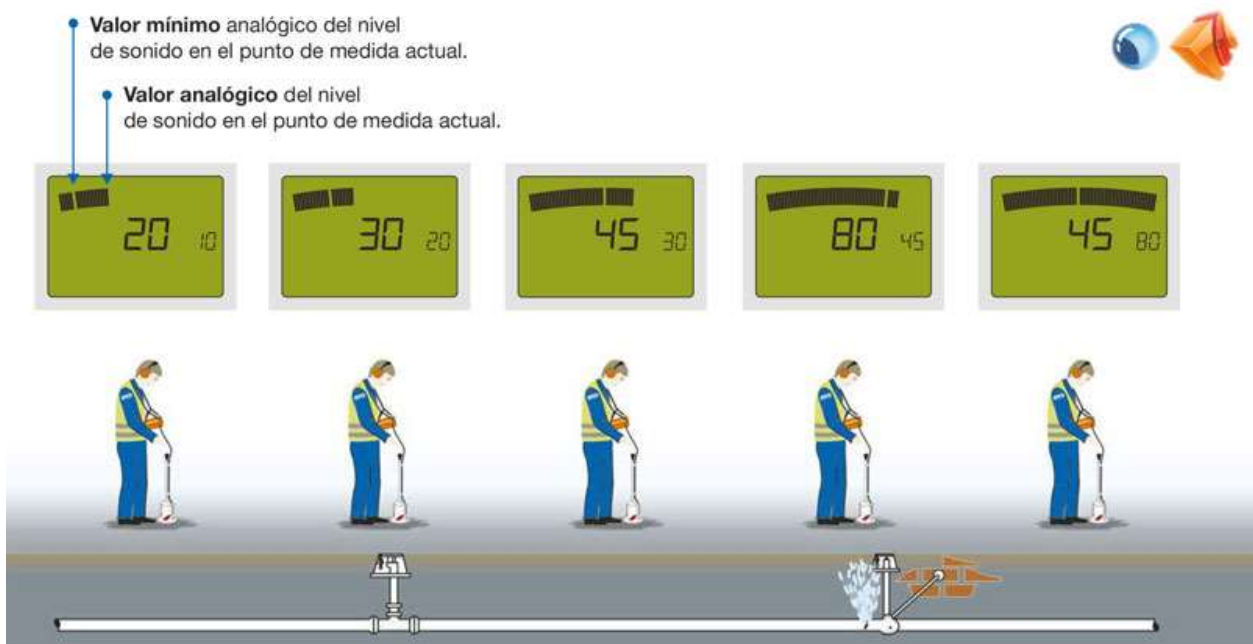


Nota: Obtenido de Pedraza (2012)

A través de este instrumento se pudo identificar fugas no visibles en la red de agua potable y sistema de riego

Ilustración 9.

Representación gráfica del funcionamiento de un geófono



Nota: Obtenido de Grupo SerLo (2017)

Ilustración 10.

Agua potable



Nota: elaboración propia

Ilustración 11.

Riego



Nota: elaboración propia

3.1.3 Identificación de pérdidas físicas en el sistema (fugas visibles)

Debido que la presión en el acueducto de 1.800mm, de donde se abastece directamente de agua potable al proyecto, la presión sube considerablemente en horas de la noche y feriados, se produjeron fugas como se observa en la siguiente imagen

Ilustración 12.

Acometida 90mm



Nota: obtenido de la base de datos de la inmobiliaria DIBIENS

3.1.4 Obtención de datos de presión

Se realizó con el objetivo de limitar las áreas de riesgo de alta y baja presión, así como para adaptar la referencia de simulación hidráulica de la red. Determinar el número de puntos de medición de presión en una red tiene una base teórica específica, ya que depende de la expansión de la ciudad. Sin embargo, se recomienda un punto de medición de presión por cada 270 viviendas registradas para tener una cobertura suficiente para un buen diagnóstico y ajuste del modelo de simulación hidráulica del sistema de abastecimiento de agua.

Por lo tanto, se tomaron registro de presiones en la red de agua potable utilizando un manómetro portátil, con conexión para toma domiciliaria, en donde las presiones en el día promediaban los 75 psi y en horas de la noche y feriados variaban de 90 a 110 psi en el punto de conexión con el acueducto.

3.1.5 Obtención de datos de caudal

Se realizan mediciones de caudal en cada bocatoma que produce agua para la red, como pozos, manantiales, presas, galerías filtrantes, etc. Debe hacerse precisamente en las tuberías por donde entra el agua a la red de distribución. Para plantas de tratamiento de agua, tanques o elevadores de presión, el flujo solo debe medirse en la salida de estas estructuras. Esto se hizo con la finalidad de calcular el balance de agua y volumen ajustado de acuerdo a la referencia de simulación hidráulica.

Las mediciones del caudal proporcionado se realizan a intervalos cortos, aproximadamente de 15 a 30 minutos. Si no se detecta un cambio en el caudal de cerca del 5% en el transcurso del día, el valor registrado se considerará el valor de costo promedio proporcionado por esa entrada a la red. Si el caudal fluctúa más de este porcentaje, se debe realizar una prueba continua de al menos 24 horas para obtener un promedio del suministro de agua en ese punto.

El proyecto cuenta con un macromedidor de 3", que se encuentra en la parte exterior del cerramiento perimetral.

Internamente cuenta con los siguientes medidores:

- Medidor de 3": Para control del consumo de la bodega principal ocupada por el Centro de Distribución de DIFARE
- Medidor de 3": Para control del consumo del resto de bodegas que componen el Parque Logístico.
- Medidor de 2": Para control de bodegas #1, #2 ocupadas por la empresa ASEGENSA
- Medidor de 2": Para control de las bodegas #5, #6 ocupadas por la empresa 4 PL INTELIGENCIA LOGISTICA

Con los medidores existentes, se pudieron obtener registro de los consumos reales en las diferentes edificaciones que componen el proyecto.

3.2 Tabulación de datos

Con los datos de campo obtenidos se procedió a realizar una modelación hidráulica, mediante el uso de un programa para simulación de sistemas de agua potable, considerando cada uno de los componentes del sistema: tuberías, reservorio, equipo de bombeo.

Con este trabajo se tiene un modelo hidráulico de las condiciones actuales, que permitirán tomar la mejor decisión para la optimización del Sistema y establecer las condiciones hidráulicas a futuro cuando se implementen nuevas edificaciones en el proyecto.

3.3 Solución a diseñar

Con la modelación hidráulica se procede a determinar

- Implementación de la estación reguladora de presión
- Configuración de equipo de bombeo y reservorio
- Presiones y caudales en diferentes puntos de la red de agua potable

Con la reparación de fugas visibles y no visibles, se obtiene la optimización de la eficiencia física del sistema.

Con la implementación de la estación reguladora de presión, se obtiene la optimización de la eficiencia hidráulica del sistema.

Con la configuración del equipo de bombeo y una vez optimizada la eficiencia física e hidráulica, se obtiene la optimización de la eficiencia energética del proyecto.

CAPÍTULO 3

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Interpretación y análisis de resultados

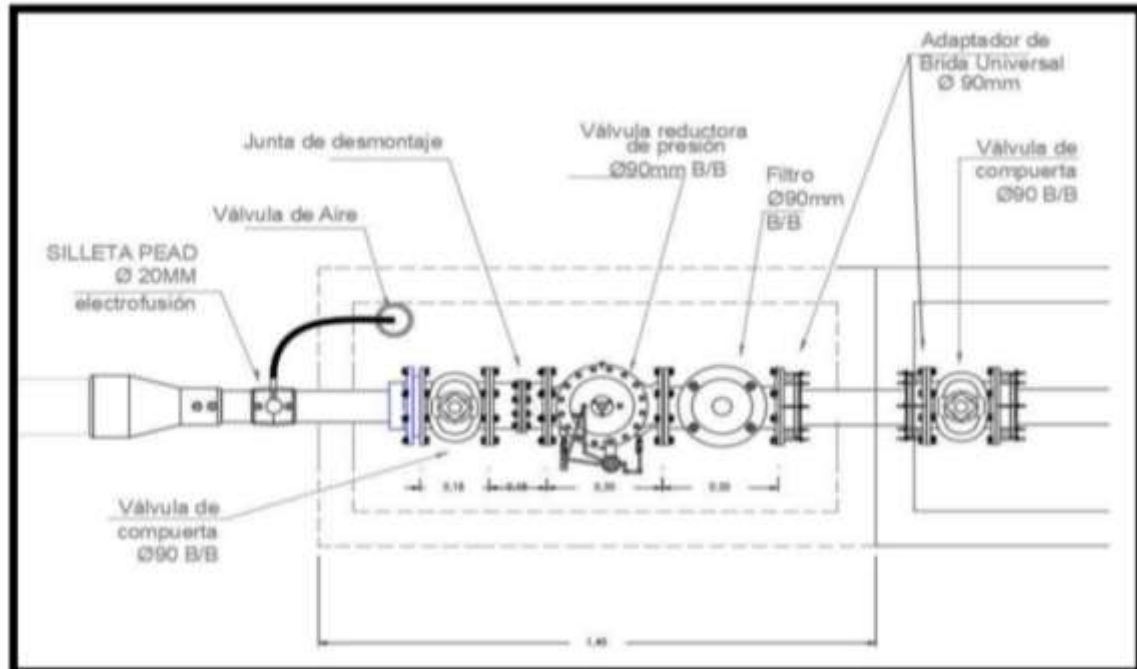
- Con la modelación hidráulica se determina lo siguiente:
Modelar hidráulicamente las condiciones actuales del sistema y las condiciones futuras luego de la implementación de las mejoras
- Con la reparación de fugas visibles y no visibles se determina lo siguiente:
Optimización de las pérdidas físicas del sistema disminuyendo los altos consumos registrados en las planillas de INTERAGUA
- Con la Implementación de una estación reguladora de presión se obtiene:
Eliminar las variaciones de presión que existen en el abastecimiento de agua potable desde el acueducto, consiguiendo que la presión de entrada se mantenga en 40 psi.
- Con la configuración del equipo de bombeo y reservorio se obtiene:
Asegurar una distribución continua de agua potable, manteniendo la presión de diseño del proyecto en 60 psi.

4.2 Especificaciones técnicas

Para la solución hidráulica se determina la construcción de una estación reguladora de presión siguiendo el siguiente esquema

Ilustración 13.

Esquema con componentes de estación reguladora de presión



Nota: obtenido de la base de datos de la inmobiliaria DIBIENS

A continuación, se observa la construcción de la estación reguladora de presión, ubicada a continuación del macromedidor existente:

Ilustración 14.

Estación reguladora de presión



Nota: elaboración propia

A continuación se observa la presión aguas arriba (75 psi) y aguas abajo regulada a 40 psi

Ilustración 15.

Presión aguas arriba y abajo de estación reguladora



Nota: elaboración propia

Las especificaciones técnicas de los componentes de la estación reguladora de presión son los siguientes

- Válvula reguladora de presión DN 80, tipo globo PN10/16
- Válvula de compuerta sello elastomérico, extremos bridados PN10/16
- Brida y portabrida DN80 PN10/16
- Filtro tipo MP DN80 PN10/16
- Reductor PE100 DN150 a DN80 electrofusión
- Válvula de aire 1" Tipo acción simple
- Empaques y pernos
- Manómetro de glicerina

4.3 Diseño de la solución

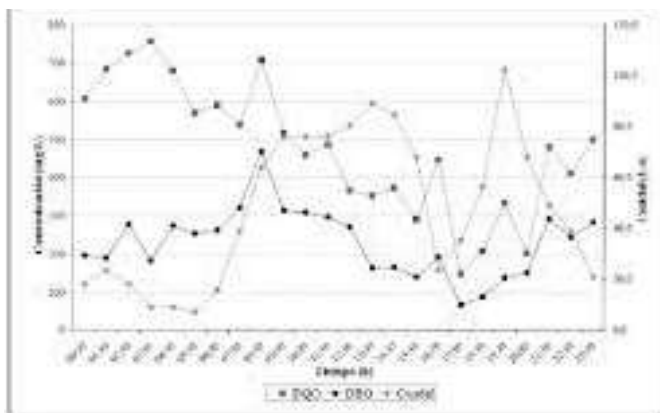
A continuación se muestra el diseño de las Soluciones propuestas en el Sistema:

4.3.1 Modelación hidráulica

Escenario #1: Modelación hidráulica con las condiciones iniciales del sistema

Ilustración 16.

Variación del caudal, la DQO y DBO afluentes a la PTAR a lo largo de 24h

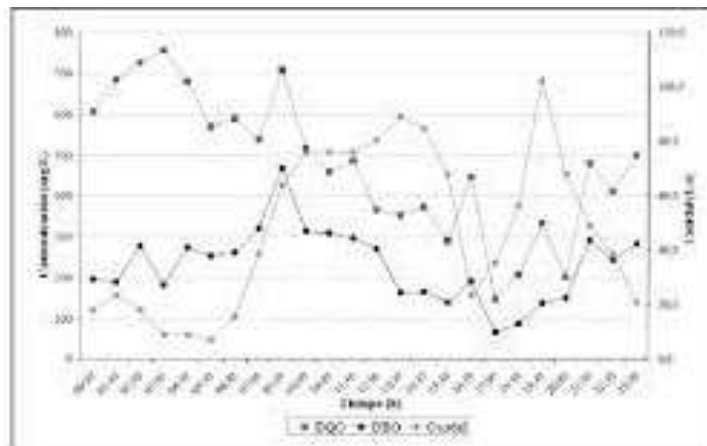


Escenario #2. Modelación hidráulica luego de implementar la construcción de la estación reguladora de presión

Nota: elaboración propia

Ilustración 17.

Variación del caudal, la DQO y DBO afluentes a la PTAR a lo largo de 24h posterior a la implementación



Nota: elaboración propia

4.3.2 Eficiencia física del sistema de agua potable

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (2010), “la eficiencia física se refiere a la conservación del agua en el sistema de abastecimiento y se calcula en porcentaje” mediante la siguiente fórmula

$$\eta_{física} = \frac{Vol_{consumido}}{Vol_{suministro}} \times 100$$

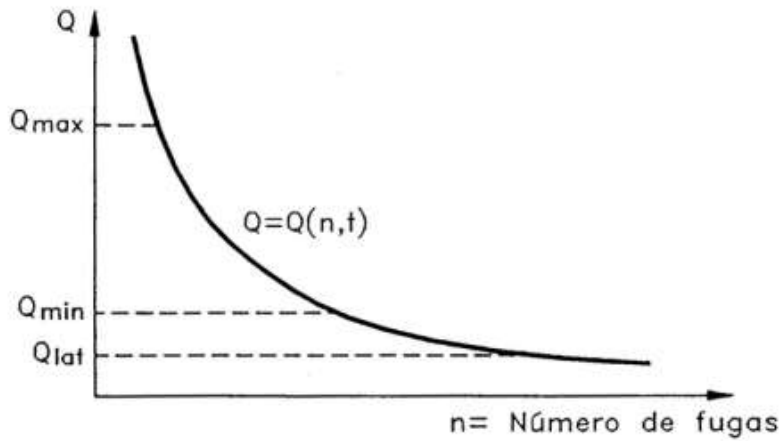
En donde $\eta_{física}$ es la eficiencia física, $Vol_{consumido}$ consiste en la cantidad de agua que puede estar medida o no, que es receptada por los consumidores en sus tomas, estén o no registradas por el organismo operador, y $Vol_{suministrado}$, que se refiere a la cantidad de agua producida o extraída de las fuentes de abastecimiento. Esto muestra la capacidad del sistema de suministro para entregar agua inyectada desde la red a los usuarios y el tamaño de la fuga existente. Sin embargo, los valores de eficiencia física no muestran con precisión el grado de deterioro de las cañerías, tomas de agua domiciliarias y otros elementos del sistema.

El diagnóstico de la eficiencia física de los sistemas de agua potable se enfoca en un procedimiento que controla cómo se gestiona el suministro y consumo de agua en sistemas de agua potable de manera específica, distinguiendo entre pérdidas reales y aparentes. Esto es conocido como balance hídrico. El propósito del diagnóstico de eficiencia física es establecer con precisión los valores del índice de eficiencia de la ecuación y el Índice de Fugas Estructurales (IFE), reconocer y calcular las pérdidas o fugas reales, y facilitar una descripción detallada del proyecto para mejorar la eficiencia física del sistema (Comisión Nacional del Agua, 2010).

Optimización de la eficiencia física con las condiciones iniciales del sistema

Ilustración 18.

Distribución genérica de las fugas en una red, clasificada por caudales



Nota: obtenido de Vela et al. (1994)

Tabla 2.

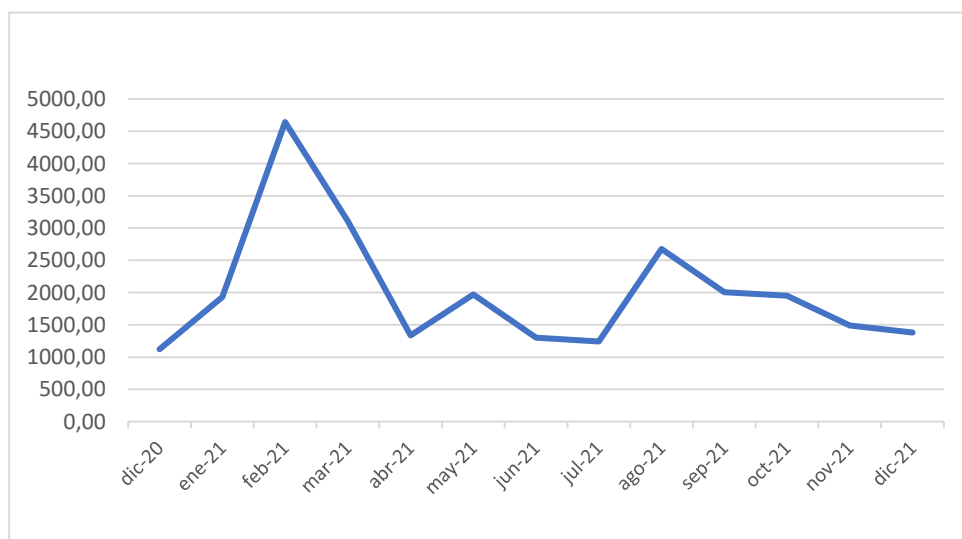
Consumo y facturación anual de agua potable

	ALTOS CONSUMOS REGISTRADOS				DETECCION Y REPARACION DE FUGAS (EFICIENCIA FISICA)							ESTACION REGULADORA DE PRESION (EFICIENCIA HIDRAULICA)	
	dic-20	ene-21	feb-21	mar-21	abr-21	may-21	jun-21	jul-21	ago-21	sep-21	oct-21	nov-21	dic-21
Consumo (m3/mes)	1121,03	1930,09	4642,49	3105,11	1337,57	1971,26	1302,48	1243,64	2674,79	2006,00	1953,00	1489,00	1380,00
Facturacion Interagua	\$ 1.840,59	\$ 3.168,95	\$ 7.622,36	\$ 5.098,19	\$ 2.196,12	\$ 3.236,55	\$ 2.138,50	\$ 2.041,90	\$ 4.391,66	\$ 3.293,59	\$ 3.224,47	\$ 2.422,68	\$ 2.234,33
Promedio Facturado	\$4.433				\$2.932							\$2.329	
Disminución de Costos por Consumo de Agua Potable por Optimización de Eficiencia Física					34%								
Disminución de Costos por Consumo de Agua Potable por Optimización de Eficiencia Hidráulica					21%								

Nota: elaboración propia

Ilustración 19.

Tiempo versus consumo de agua



Nota: elaboración propia

Como se puede observar en esta ilustración, en el mes de febrero de 2021 se reportó el mayor índice de consumo de agua, con un valor de 4642,49 m³/mes, cuya representación monetaria en la facturación de interagua fue de \$7622,36.

Optimización de la eficiencia física luego de haber reparado las fugas visibles y no visibles en el Sistema

Ilustración 20.

Estrategias de gestión de pérdidas



Nota: obtenido de Durando (2018)

Luego de la optimización de la eficiencia física, hubo una disminución de costos por consumo de agua potable del 34%. En el periodo de altos consumos registrados se evidenció un promedio facturado de \$4433, mientras que en el periodo de detección y reparación de fugas, este valor disminuyó a \$2932.

4.3.3 Eficiencia hidráulica del sistema de agua potable

La eficiencia hidráulica consiste en la relación entre la capacidad de un sistema de agua urbano para capturar, dirigir y distribuir agua, y la capacidad real de ese sistema para funcionar. No existe un indicador específico para determinar el valor numérico de la eficiencia hidráulica, sin embargo, por medio de algunos parámetros relativos a las medidas espaciales y temporales del agua disponible para el usuario, es posible evaluarla de manera más práctica. Estas medidas incluyen el consumo unitario de los usuarios, la continuidad del servicio de agua, dotación, diferencia entre el caudal de agua

útil en la red y el requerido por los usuarios, y la presión media del agua en la red de distribución (Comisión Nacional del Agua, 2010).

Por otro lado, una descripción detallada del diagnóstico de eficiencia hidráulica de los sistemas de distribución de agua potable incluye cinco actividades que son: determinación del número de habitantes con acceso a un suministro de agua potable y cobertura de la red de distribución, explicación de la operación actual del sistema de agua potable, modernización del plan de red, procesamiento de datos de consumo, dotación y gastos de operación; y cálculo del balance de volumen de la red actual (Comisión Nacional del Agua, 2010).

Optimización de la eficiencia hidráulica con las condiciones actuales del sistema

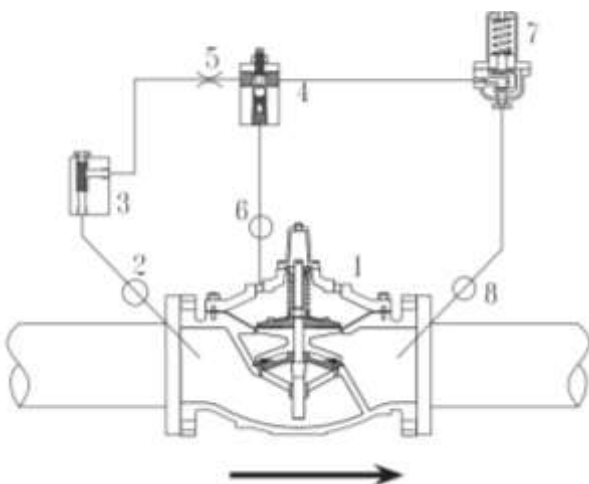
La eficiencia hidráulica se determina

$$\text{Eficiencia Hidráulica (EH)} = (\text{Caudal Suministrado} - \text{Caudal Requerido}) / \text{Caudal Suministrado} * 100$$

Optimización de la eficiencia hidráulica luego de haber construido la estación reguladora de presión

Ilustración 21.

Esquemmatización de la válvula reguladora de presión



Nota: obtenido de Singer Valve Inc (2005)

4.3.4 Eficiencia energética del sistema de agua potable

La estimación de pérdida de agua en el mundo es de alrededor del 30%, lo que significa que también se pierde una porción similar de energía. Múltiples factores contribuyen a estas pérdidas de energía en el sector del agua: estaciones de bombeo ineficientes, diseño deficiente de las redes, instalaciones y mantenimiento, tuberías viejas con pérdida de carga, cuellos de botella en las redes, presiones excesivas y estrategias de operación ineficientes (Coelho & Andrade, 2014).

La eficiencia se puede obtener con: mejora del diseño de las estaciones de bombeo, mejora del diseño de los sistemas, instalación de variadores de velocidad (VSD), operación eficiente de las bombas, reducción de fugas a través de la modulación de la presión, el reemplazo de equipos ineficientes, la gestión de fugas mediante monitoreo y mantenimiento regulares, evitando el desperdicio de agua y energía, la simple selección de un sistema tarifario de energía adecuado, o incluso la incorporación de fuentes de energía renovables en los sistemas, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles (Coelho & Andrade, 2014; Pedraza, 2012).

De todas las medidas presentadas, algunas de ellas pueden implicar altos costes de inversión. Sin embargo, algunas de las medidas no presentan costos de inversión significativos en comparación con los beneficios obtenidos. Además, algunas medidas relacionadas con la gestión no necesitan ninguna inversión, lo que significa que, en algunos casos, la mejora de la eficiencia de los sistemas de suministro de agua se puede obtener sin demasiado esfuerzo. El reemplazo de algunos equipos ineficientes por sistemas de bomba/motor de alta eficiencia puede proporcionar alrededor del 10 al 30 % del ahorro de energía de bombeo (Coelho & Andrade, 2014).

Optimización de la eficiencia energética con las condiciones actuales del sistema

El indicador Energético se determina

$$\text{Indicador Energético (IE)} = \text{Energía Consumida (kwh)} / \text{Volumen de Agua Suministrada (m3)}$$

Las ecuaciones para determinar la potencia que demandará un equipo de bombeo y el costo anual que se paga por la operación del mismo se presentan a continuación

$$P_{bomba} = \frac{9.8 \gamma Q_{bomba} H_t}{\eta_b}$$

ECUACIÓN 1

Costo de Bombeo Anual = costo_{kWh} x Potencia x # horas anuales

Donde

- γ = Peso específico del agua (kg/m³)
- Q_{bomba} = Gasto (m³ /s).
- H_t = Carga dinámica total (m)
- η_b = Eficiencia entre la potencia entregada al fluido y la potencia del motor
- Costo_{kWh} = Costo del kilowatt-hora; expresado en \$/kWh. De acuerdo a la tarifa del sistema evaluado.

Partiendo de estas expresiones y de las condiciones de las instalaciones electromecánicas en los sistemas de agua, tenemos que cuando los equipos se desgastan por el uso y por condiciones operativas que no son tomadas en cuenta en su selección, disminuyen su eficiencia η_b y, por tanto, para considerar las mismas cantidades de gasto y carga, aumentan la potencia y por ende el consumo de energía.

Costo de Bombeo Anual

Tabla 3.

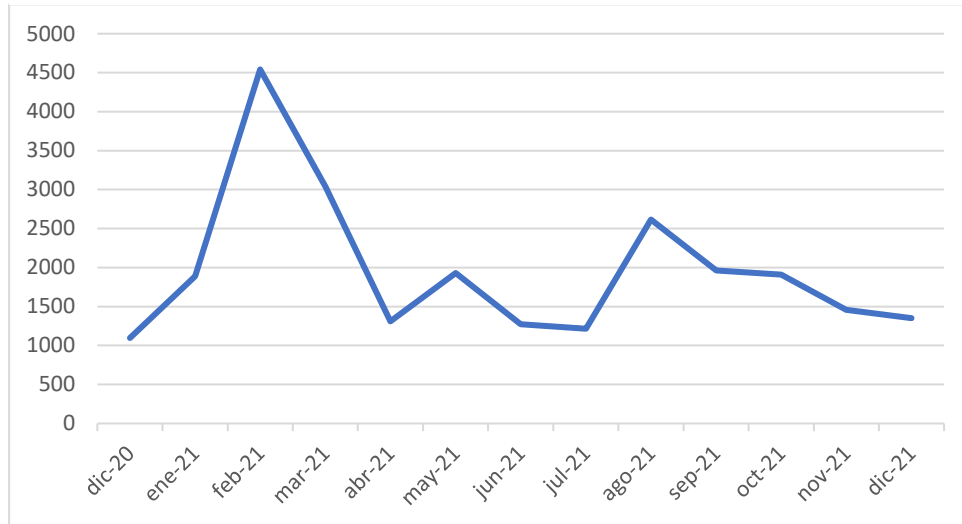
Costos y consumo energético anual del equipo de bombeo

	ALTOS CONSUMOS REGISTRADOS				PERIODO DE MEJORA DE EFICIENCIA FISICA							PERIODO MEJORA EFICIENCIA HIDRAULICA	
	dic-20	ene-21	feb-21	mar-21	abr-21	may-21	jun-21	jul-21	ago-21	sep-21	oct-21	nov-21	dic-21
Potencia de la Bomba (KW)	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Tiempo de Bombeo Diario (H)	4,87	8,39	20,18	13,50	5,82	8,57	5,66	5,41	11,63	8,72	8,49	6,47	6,00
Consumo Diario (KWH)	36,56	62,94	151,39	101,25	43,62	64,28	42,47	40,55	87,22	65,41	63,68	48,55	45,00
Consumo Mensual (KWH)	1096,6629	1888,1281	4541,565	3037,6105	1308,4952	1928,4057	1274,164	1216,6077	2616,6449	1962,3913	1910,5435	1456,6304	1350
Costo Energía (KWH)	\$ 0,09	\$ 0,09	\$ 0,09	\$ 0,09	\$ 0,09	\$ 0,09	\$ 0,09	\$ 0,09	\$ 0,09	\$ 0,09	\$ 0,09	\$ 0,09	\$ 0,09
Costo Mensual	\$ 98,70	\$ 169,93	\$ 408,74	\$ 273,38	\$ 117,76	\$ 173,56	\$ 114,67	\$ 109,49	\$ 235,50	\$ 176,62	\$ 171,95	\$ 131,10	\$ 121,50
Promedio Costo Mensual en Cada Etapa	\$238				\$157							\$126	
Disminucion de Costos de Energía por Optimización de Eficiencia Física e Hidráulica					47%								

Nota: elaboración propia

Ilustración 22.

Tiempo versus consumo mensual (KWH)



Nota: elaboración propia

Como se observa en esta ilustración, el consumo más alto se reportó en el mes de febrero de 2021, con un valor de 4541.56 KWH. Sin embargo, como es evidente, luego de realizar la eficiencia física, hidráulica y energética de forma adecuada, los consumos disminuyeron notablemente a partir del mes de abril a diciembre de 2021, con un valor mínimo de 1216.60 KWH y máximo de 2616.64 KWH. En otras palabras, antes de la optimización, el promedio del costo mensual en la etapa de alto consumo era de \$238, mientras que en el periodo de mejora de eficiencia física disminuyó a \$157.

Ilustración 23.

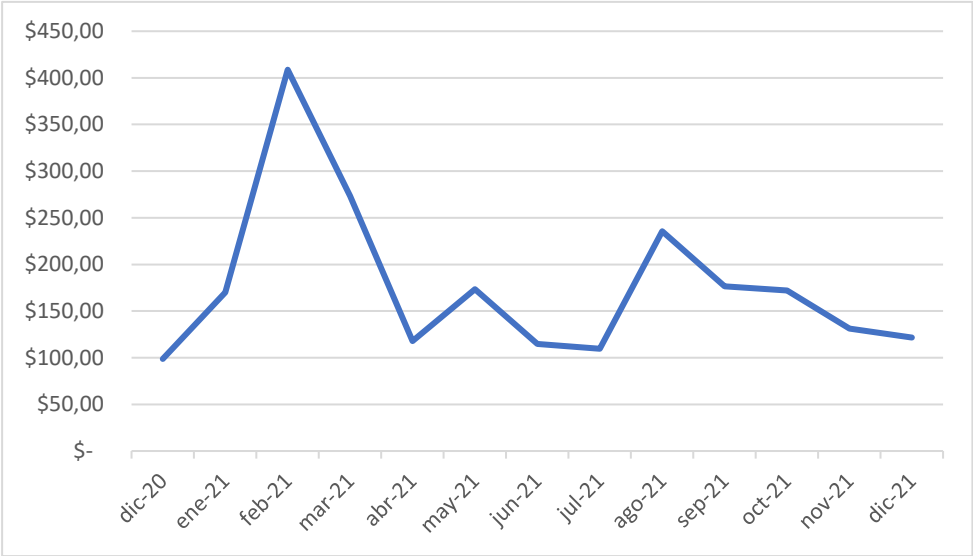
Tarifa de consumo de agua de INTERAGUA



Nota: Obtenido de la base de datos de la inmobiliaria DIBIENS

Ilustración 24.

Tiempo versus costo mensual



Nota: elaboración propia

Conjuntamente, el costo mensual más alto se reportó en el mes de febrero de 2021, con un valor total de \$408.71, y, así como en la gráfica anterior, esta cantidad disminuyó considerablemente en los siguientes meses luego de los trabajos de detección y reparación de fugas, disminuyendo los costos de energía por optimización de eficiencia física e hidráulica en un 47%, con un periodo de mejora de eficiencia hidráulica de \$126 en los meses de noviembre y diciembre.

Optimización de la eficiencia energética luego de haber optimizado la eficiencia física e hidráulica

El proyecto se dividió en tres etapas que se fueron cumpliendo durante un año. Durante la primera etapa se reportaron los problemas de fugas de agua y altos consumos de agua en el periodo diciembre 2020 hasta marzo 2021. La segunda fase va de abril a octubre de 2021, en donde se realizaron trabajos de detección y reparación de fugas para mejorar la eficiencia física, cuyos resultados se evidencian en la tabla 2 e ilustraciones 22 a la 24. Finalmente, la tercera etapa fue de noviembre a diciembre de 2021, donde se evidencia una disminución notable en los consumos y costos del equipo de bombeo. Esto se puede explicar por la optimización de la eficiencia hidráulica gracias a la construcción de la estación reguladora de presión en el mes de octubre, lo cual hizo

que se redujeran las planillas de Interagua en el mes de noviembre y el consumo por energía de las bombas.

CAPÍTULO 4

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Mediante el análisis de la eficiencia física, se pudo determinar que la optimización de dicho sistema permitió disminuir la cantidad de fugas de agua visibles y no visibles. Es decir, antes de la optimización, el costo promedio mensual en la fase de alto consumo fue de \$238, lo que bajó a \$157 en la fase de mejora de la eficiencia física.
- La eficiencia hidráulica demostró tener un gran impacto en la reducción de fugas a través de la construcción de una estación reguladora de presión, evidenciando una mejoría en \$126 en los meses de noviembre y diciembre de 2021.
- La eficiencia energética se vio reducida en un 47% con la optimización de la eficiencia física e hidráulica en relación a los costos por consumo de energía eléctrica.

5.2 Recomendaciones

- Aplicar la optimización de la eficiencia física en proyectos que reporten pérdidas de agua visibles y no visibles para reducir los costos.
- Construir una estación reguladora de presión para la optimización de la eficiencia hidráulica, de tal manera que no se produzcan altas presiones del abastecimiento de agua potable, y, por lo tanto, no ocurran las fugas.
- Optimizar la eficiencia física e hidráulica para finalmente obtener una reducción de la eficiencia energética.

BIBLIOGRAFÍA

- Uni-Bell PVC Pipe Association (2021). Handbook of PVC Pipe Design and Construction. Dallas, Texas 75234
- Coelho, B., & Andrade, A. (2014). Efficiency achievement in water supply systems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 59-84. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.010>
- Comisión Nacional del Agua. (2010). Mejora de Eficiencia Física. En *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento* (Vol. 39). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Durando, M. (2018, mayo 24). *Pérdidas de agua, otra forma de llamar la ineficiencia operativa*. Open International. <https://www.openintl.com/es/perdidas-de-agua-otra-forma-de-llamar-la-ineficiencia-operativa/>
- Fernández, V. (2015). *Diagnóstico, análisis y propuesta de un sistema óptimo de gestión del manejo del agua potable en la ciudad de Guayaquil* [Masterado, Universidad de las Fuerzas Armadas]. <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/10437>
- Grupo SerLo. (2017). *Geófono para Localizador Fugas de Agua*. Localizador de fugas. <http://www.localizadorfugasagua.es/geofono.php>
- INEN. (2014). *Agua potable. Requisitos* (Norma Técnica Ecuatoriana N.º 5; 1108). INEN.
- Karplus, M., & Schmandt, B. (2018). Preface to the Focus Section on Geophone Array Seismology. *Seismological Research Letters*, 89(5), 1597-1600. <https://doi.org/10.1785/0220180212>
- Kingdom, B., Liemberger, R., & Marin, P. (2006). *The Challenge of Reducing Non-Revenue Water in Developing Countries--How the Private Sector Can Help: A Look at Performance-Based Service Contracting*. World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17238>

- Lambert, A., Brown, T., Takizawa, M., & Weimer, D. (1999). A review of performance indicators for real losses from water supply systems. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 48(6), 227-237. <https://doi.org/10.2166/aqua.1999.0025>
- Liemberger, R., & Farley, M. (2004, enero 1). *Developing a Non-Revenue Water Reduction Strategy, Part 1: Investigating and Assessing Water Losses*. CiteSeer.
- Mutikanga, H. E., Sharma, S. K., & Vairavamoorthy, K. (2013). Methods and Tools for Managing Losses in Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(2), 166-174. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000245](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000245)
- Pedraza, J. (2012). *Manual para un proyecto de eficiencia energética e hidráulica integral en un sistema de agua y saneamiento* (Manual N.º 002; Tetra Tech ES Inc). Watergy México A.C.
- Singer Valve Inc. (2005). *Válvula reductora de presión*. Singer Valve. <http://www.aquaworkscr.com/pdf/Reductora.pdf>
- Vela, A., Martínez, F., García-Serra, J., & Pérez, R. (1994). Estrategias óptimas para la reducción de pérdidas de agua en sistemas de abastecimiento. *Ingeniería del agua*, 1(1), 35-54. <https://doi.org/10.4995/ia.1994.2630>

ANEXOS

PLANOS

Plano 1.

Implantación general de sistema de agua potable

