

**Sede Julio Antonio Mella
Facultad de Construcciones
Departamento de Ingeniería Hidráulica**

INFORME REFERATIVO

Estudio de casos para la evaluación técnica de sectores hidrométricos

En opción al título de Ingeniero Hidráulico

Autora: Sandra Oduardo Bueno

Tutores: Dra.C. Ing. Mayelin González Trujillo

Ing. Alain Paneque Martínez

Santiago de Cuba, 2021

PENSAMIENTO



FIDEL CASTRO

EL FUTURO DE NUESTRA
PATRIA TIENE QUE SER
NECESARIAMENTE UN FUTURO
DE HOMBRES DE CIENCIA,
TIENE QUE SER UN FUTURO DE
HOMBRES DE PENSAMIENTO,
PORQUE PRECISAMENTE ES LO
QUE MÁS ESTAMOS
SEMBRANDO...

DISCURSO PRONUNCIADO POR EL COMANDANTE EN JEFE FIDEL
CASTRO RUZ EN EL ACTO CELEBRADO POR LA SOCIEDAD
ESPELEOLÓGICA DE CUBA, EN LA ACADEMIA DE CIENCIAS. EL 15 DE
ENERO DE 1960

DEDICATORIA

Dedico esta tesis en primer lugar a mi madre Virgen Beatriz Bueno Elías que aunque no se encuentra físicamente junto a mí ha sido testigo de todas las dificultades y sacrificios por los que he tenido que transitar para poder cumplir mi sueño, a mi padre Julio Vega Padilla que ha estado conmigo en todo momento, a mis hermanos Sandria Vega Bueno y Sander Vega Bueno que han sido un gran apoyo para mí en los momentos difíciles, por último a mi niña preciosa Alisha que a pesar de todo ha sido mi motor impulsor para poder vencer esta meta.

AGRADECIMIENTOS

Le doy gracias a Dios en primer lugar por darme la dicha de cumplir este sueño.

A mis padres Virgen Beatriz Bueno Elías y Julio Vega Padilla por ser la persona que soy, por contar con su apoyo incondicional en todo momento a pesar de mis malas decisiones, por ser testigos de este sueño.

A mis hermanos Sandria Vega Bueno y Sander Vega Bueno, por tener tanta paciencia y apoyarme en todo momento.

A mi princesa Alisha que es mi motor impulsor y que de ahora adelante va a acompañarme en todos mis proyectos profesional y personal.

A mis abuelos Lorenza Elías Rodríguez y Estanislao Bueno, por inculcarme siempre a ser una persona de bien, enseñándome sus experiencias y sabidurías.

A mi familia, en especial mis tías Bárbara Virgen Bueno Elías, Marelis López y mis primas Marislaidis Elías López y Milay Bueno Herrera.

A mis amigas Nadieska Martínez Lao, Yelanis Denise Torres Bonnane, Yiliannis Portales y Leydis Esther Liranza que desde la distancia siempre me han apoyado y me han dado las fuerzas para seguir adelante con este proyecto.

A Yunia Sierra Romero, por ser mi compañera incondicional durante esta etapa como estudiante.

A mis compañeros de aula que de alguna forma u otra contribuyeron en cumplimiento de este sueño.

Un agradecimiento muy especial a mi tutora por todos los momentos de sacrificio, por esa ayuda sincera e incondicional que me brindó para poder realizar este sueño.

Al claustro de profesores del departamento de Ingeniería Hidráulica que me han apoyado en mi formación como profesional durante esta etapa como estudiante.

A todos los que aportaron su granito de arena para la realización de este proyecto.

RESUMEN

Este trabajo aborda una temática importante como es la sectorización y las metodologías para su estudio técnico. El mismo tiene como objetivo analizar metodologías, a través de un estudio de casos, para la selección de un procedimiento de evaluación técnica de sectores hidrométricos de abastecimiento de agua. Se utilizaron los métodos histórico-lógicos, el método cualitativo de la investigación social (Villabella, 2015) y el de análisis-síntesis en el estudio y valoración del estudio de casos de las metodologías y en la identificación y selección de las condiciones de inicio, variables de análisis y criterios de la evaluación del procedimiento. Como resultado se propone un procedimiento para la evaluación técnica de los sectores hidrométricos el cual consta de condiciones de inicio, variables, criterios de análisis que permiten evaluar la eficiencia del sector en su comportamiento operacional.

ABSTRACT

This work addresses an important topic such as sectorization and the methodologies for its technical study. It aims to analyze methodologies, through a case study, for the selection of a technical evaluation procedure for hydrometric sectors of water supply. The historical-logical methods, the qualitative method of social research and the analysis-synthesis method were used in the study and evaluation of the methodologies and in the identification and selection of the starting conditions, analysis variables and evaluation criteria. of the procedure. As a result, a procedure is proposed for the technical evaluation of the hydrometric sectors, which consists of starting conditions, variables, analysis and evaluation criteria, allowing to evaluate the efficiency of the sector in its operational behavior.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
DESARROLLO.....	4
1. Fundamentación teórica de la investigación.....	4
1.1 Concepto de sectorización hidrométrica.....	4
1.2 Etapas y tareas del proceso de sectorización.....	6
1.3 Aspectos a tener en cuenta para el diseño de sectores hidrométricos.....	7
1.4. Criterios básicos para la creación de los sectores hidrométricos.....	9
1.4.1. Ventajas de la sectorización hidrométrica del sistema de acueducto.....	10
1.5. Principios que sustentan la sectorización hidrométrica.....	12
1.6 Instrumentos de medición.....	14
1.7 Criterios de sectorización utilizados internacional y nacionalmente.....	16
2. Materiales y métodos.....	17
2.1. Metodología de trabajo.....	17
2.2. Metodologías y variables de estudio.....	18
2.3. Aspectos relevantes a tener en cuenta para el análisis del procedimiento.....	26
3. Fundamentos de la propuesta del procedimiento.....	28
3.1. Objetivos.....	28
3.2. Condiciones de inicio.....	28
3.3. Variables de análisis propuestas.....	29
3.4. Criterios de evaluación.....	30
3.5. Evaluación técnica de la sectorización.....	30
CONCLUSIONES.....	31
RECOMENDACIONES.....	32
BIBLIOGRAFÍA	

INTRODUCCIÓN

El agua potable es un recurso indispensable para todo proceso relacionado con la vida, es un producto primario tanto para la actividad doméstica, así como para las actividades urbanas y agrícolas. La disponibilidad de este recurso está totalmente ligada al bienestar y prosperidad de cualquier sociedad. De ahí, la importancia que cobra la buena gestión de las Redes de Abastecimiento de Agua Potable (RAP).

Según Campbell, (2013), estas son “las infraestructuras que permiten transportar el recurso en cuestión desde las fuentes hasta los consumidores; es decir, a través de ellas se da el proceso de abastecimiento de agua potable. En tal sentido, es importante hacer notar la relación directa que existe entre la calidad del servicio de abastecimiento de agua potable de la que dispone cualquier ciudad (o localidad) y su grado de desarrollo y modernidad”.

La falta de agua es uno de los problemas más necesario que afecta a la humanidad, por lo que ha sido prioridad encontrarla, de calidad y abundante, para tenerla a disposición. En Cuba la historia de la hidráulica se remonta desde el siglo XV, cuando surgen las originarias fuentes que abastecieron las primeras villas hasta que surge la Zanja Real reconocida como el primer acueducto de la Isla. La lluvia es la única fuente de agua que existe en el país y su magnitud es relativamente baja, siendo la causa para que los Recursos Hídricos Potenciales y Aprovechables (RHPA) sean limitados, sin embargo, los Recursos Hidráulicos Disponibles son favorables a partir de la infraestructura edificada (Moreno, 2018).

La construcción de abastecimientos colectivos asociados o ligados a regiones con escasos recursos hídricos ha sido una necesidad. La experiencia ha demostrado que no se puede depender por largo tiempo de fuentes de abastecimiento como los pozos y cisternas, porque la concentración en aumento de la población hace cada vez más dificultoso localizar fuentes no contaminadas, tanto de aguas superficiales como subterráneas, a la vez que las existentes son altamente vulnerables a la contaminación. Cuando una comunidad se desarrolla, la necesidad de un suministro público sustentable se hace imprescindible (Moreno, 2018).

El desarrollo de los sistemas de abastecimiento de agua potable requiere mantener continuamente niveles de eficiencia altos para que su operación, mantenimiento y

administración sean rentables y sostenibles, actualmente se ha desarrollado la ingeniería de sectorización de redes de distribución de agua potable y la conformación de sectores hidrométricos con el fin de incrementar la eficiencia hidráulica del sistema y facilitar la reducción y control de fugas de agua. El beneficio general de una red de agua potable sectorizada es disponer de una infraestructura que pueda ser observada y controlada confiablemente, con el fin de otorgar un servicio más eficiente y efectivo a la comunidad, independientemente de la magnitud de la ciudad (Hernández, 2018).

Para abordar este problema se realizó una búsqueda bibliográfica y documental profundizando en los elementos teórico-conceptuales y tendencias que conforman el estado de los principales conceptos que soportan la investigación. La principal conclusión obtenida radica en que sectorizar la red bajo criterios energéticos conlleva, además de todas las ventajas propias de la sectorización, mayores reducciones en el volumen incontrolado fugado.

En la evaluación de los sectores hidrométricos existen varias metodologías a nivel internacional entre estas se pueden mencionar la aplicada por Campbell (2013), Valencia España donde propone seguir la línea de Aprendizaje Automático Computacional (ML, Machine Learning, con este método se hace una primera exploración de las características de la red y mediante un algoritmo de formación de clústeres en jerarquía, además de aplicar una variante a este método de aprendizaje no supervisado con el cual se logra una partición en la que se minimice el número de válvulas necesarias.

En México en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, (2017), aplican una metodología para determinar la eficiencia de un sector donde se plantea un sistema de múltiple calificación basado en el riesgo de incumplir el nivel de servicio preestablecido por el gestor del abastecimiento. Sin embargo (Salguero *et al*, 2017) realizó un estudio metodológico donde se basa en la teoría de grafos para el desarrollo de los cálculos, en la misma se deben tener presentes tres conceptos para poder tener una mayor efectividad a la hora de aplicar la metodología.

En el caso de Cuba se utiliza una metodología aplicada por (NC 969:2014: GEAAL), la misma está agrupada en tres etapas de trabajo donde una de las variables que se utilizan es el caudal y la población.

Por lo antes expuesto, se declara como problema de investigación: Deficiencias en los procedimientos de evaluación técnica en los sectores hidrométricos de abastecimiento de agua en Cuba.

Objeto: la sectorización hidrométrica.

Objetivo general: Analizar metodologías, a través de un estudio de casos, para la selección de un procedimiento de evaluación técnica de sectores hidrométricos de abastecimiento de agua.

Campo de acción: La evaluación de sectores hidrométricos

Objetivos específicos:

1. Realizar una búsqueda bibliográfica y documental profundizando en los elementos teórico-conceptuales y tendencias que conforman el estado de los principales conceptos que soportan la investigación.
2. Identificar las variables y metodologías para la evaluación técnica de sectores hidrométricos en Cuba, a través de estudios de casos.
3. Propuesta de variables y pasos a seguir para la selección del procedimiento.

Hipótesis: Si se analizan metodologías para la evaluación técnica de sectores hidrométricos, a través de un estudio de casos, se pueden establecer elementos científicos que permitan seleccionar el procedimiento adecuado para su evaluación y contribuyan a mejorar la calidad del servicio del abastecimiento de agua en Cuba.

La estructura del documento es la siguiente: resumen, introducción, desarrollo, conclusiones, recomendaciones, bibliografías y anexos.

En el desarrollo se abordarán los temas relacionados con la fundamentación teórica de la investigación, el comportamiento de la evaluación de sectores hidrométricos en el mundo y en Cuba, las metodologías y variables de estudio, instrumentos de medición, así como la propuesta de condiciones de inicio, variables y criterios a seguir en el procedimiento.

DESARROLLO

1. Fundamentación teórica de la investigación

En este acápite se realiza una fundamentación teórica a través de un análisis teórico conceptual donde se analizan los temas relacionados con la sectorización hidrométrica con aspectos relacionados a conceptos, principios que sustentan la sectorización, metodología y variables de estudio, instrumentos de medición y técnica de estadísticas, evaluación de sectores hidrométricos.

1.1. Concepto de sectorización hidrométrica

Existen varios conceptos de sectorización hidrométrica, dentro de estos plantea (Toxky, 2012), que “Dentro del subsector de agua potable, el término de sectorización es conocido como la formación de zonas de suministro autónomas, mas no independiente dentro de una red de distribución; en otras palabras, es la división o partición de una red en muchas pequeñas redes, con el fin de facilitar su operación”.

De este modo será mucho más sencillo controlar los caudales de entrada en cada sector, las presiones internas de la tubería, la demanda y el consumo, así como las pérdidas de agua, tanto en fugas como en usos no autorizados. Aún más, puede conducirse el agua por la red primaria sin exceso de conexiones con la secundaria desde la fuente de alimentación hasta los puntos más lejanos.

Esto es una sección de la red de distribución de agua potable, perfectamente delimitada por medio de válvulas de seccionamiento adecuadamente instrumentada para aforar el caudal de entrada, para medir y controlar la presión de operación, a fin de brindar la misma calidad de servicio de suministro a la totalidad de usuarios contenidos en esta red (Toxky, 2012).

Según (Hernández, 2018) un sector hidrométrico es la unidad estructural del sistema de abasto, con delimitación física e hidráulica de sus redes de distribución e independencia operacional tecnológica y comercial. Este sector es cerrado, cuando tiene independencia operacional tecnológica y comercial, que cuenta con hidrómetros en los puntos de entrada de suministro a las redes de distribución, y medrado el consumo de todos los clientes localizados dentro de sus límites.

Esta sectorización está relacionada al control y nivelación de las presiones, los caudales, la continuidad y calidad del agua distribuida, la contabilización del agua no facturada, el establecimiento de estrategias de operación, así como la detección y eliminación de salideros ya que es el proceso de subdivisión de las redes de distribución de un sistema de acueducto en distritos y circuitos hidrométricos, definidos a partir de la red primaria que pueden aislarse hidráulicamente del resto de la red con el accionamiento de válvulas de seccionamiento (GEAAL, 2016).

El concepto de sectorización de redes de abastecimiento de agua potable (RDAP) que se maneja en la actualidad se da a conocer en la década de 1980 en Inglaterra por parte la Asociación de Autoridades de Agua (AAA). Desde entonces, hasta la actualidad, el avance que ha tenido el estudio de la misma ha sido relativamente limitado, que consiste en la subdivisión de la red de distribución de sectores con áreas más pequeñas, delimitadas física e hidráulicamente cuya entrada de agua esté controlada (Herrera, 2011)

Nacionalmente se han definido otros conceptos de sectorización como el expresado por Lantigua, (2015), el cual plantea que es una opción estratégica que reduce el área de inspección para la detección y localización de anomalías como roturas, fugas, deficiencia de presión y, además mediante la implantación de un sistema de control, mejore sustancialmente la gestión de la explotación global de la red optimizando las presiones en todo el sector.

Se precisa subrayar que este concepto de sectorización que se maneja actualmente se dio a conocer por vez primera en los años de 1980 en Inglaterra por la Asociación de Autoridades de Agua. Desde entonces, el avance que ha tenido el estudio de la misma a nivel internacional ha sido limitado (Herrera, 2011). Este hecho se confirma también a nivel nacional donde no solo a nivel de marco teórico los estudios han sido limitados, sino, sobre todo, respecto a su aplicación práctica por parte de las empresas de acueductos y de investigaciones y proyectos del sector hidráulico cubano.

En términos generales, la sectorización de las redes de abastecimiento de agua potable (RDAP) puede ser considerada como el procedimiento encaminado a establecer dentro de las mismas, subáreas con una alimentación controlada (que puede ser exclusiva del sector

o compartida por varios sectores al mismo tiempo). Tal procedimiento puede perseguir objetivos que van desde el Control Activo de Fugas (CAF) hasta el control de la calidad del agua (Farley *et al.*, 2008). En cualquier caso, el contar con una red sectorizada, permite detectar con mayor facilidad cualquier anomalía que ocurra en un punto de la red, debido a la reducción dimensional implícita en la sectorización misma.

1.2. Etapas y tareas del proceso de sectorización

Según la (NC 969:2014: GEAAL), el procedimiento para el diseño de cada sector hidrométrico, se realiza primeramente el diagnóstico del sistema existente para realizar los trabajos preliminares como, la definición del equipo técnico que ejecutará los trabajos, el establecimiento del cronograma de ejecución y definición de aquellas actividades que por alguna razón no puedan ser asumidas por el personal de las Empresas de Acueducto y Alcantarillado (EAA) en el territorio y tengan que ser sub-contratadas a otras entidades, la adquisición del catastro actualizado en formato digital de la infraestructura urbana o rural existente a escala 1:2000.

Se deben definir los límites del sistema, así como identificar el desarrollo urbanístico e industrial, se necesita el conocimiento sobre el desarrollo prospectivo del área, para la elaboración del plano de la red actual con información actualizada del estado técnico de cada uno de sus tramos y componentes. Para la determinación del estado técnico de las tuberías se recomienda emplear técnicas multicriterio, pudiéndose tener en cuenta para ello los siguientes factores o criterios: el grado de envejecimiento, historial de fallos, inspección visual, corrosión, tipo de material, estado de las conexiones, impacto de roturas en el entorno, tráfico y carga a que está sometida la tubería, capacidad de conducción, (NC 969:2014: GEAAL)

Según la (NC 969:2014: GEAAL) para la determinación del estado técnico de los depósitos y estaciones de bombeo conectadas a la red se necesita gestionar y definir los datos de población, su distribución por zonas, densidad y tasa de crecimiento poblacional utilizando todas las fuentes posibles, viviendas, registros comerciales, consejos populares, etc.) Disposición de información geológica básica del área, perfil litológico especificando tipo de suelo y posible presencia del manto freático en las zonas de posibles acciones constructivas. Levantamiento de otras redes técnicas existentes (alcantarillado,

electricidad, comunicaciones, gas, etc.). Definición de los nudos donde sea posible la alimentación de los sectores desde las conductoras principales o secundarias, ubicar en plano los grandes consumidores, que son puntos vitales en la red con gran incidencia en su funcionamiento.

Según (Hernández, 2018), un sector hidrométrico es la unidad estructural del sistema de abasto, con delimitación física e hidráulica de sus redes de distribución e independencia operacional tecnológica y comercial (ver figura 1.1). Este sector es cerrado, cuando tiene independencia operacional tecnológica y comercial, que cuenta con hidrómetros en los puntos de entrada de suministro a las redes de distribución, y medrado el consumo de todos los clientes localizados dentro de sus límites.

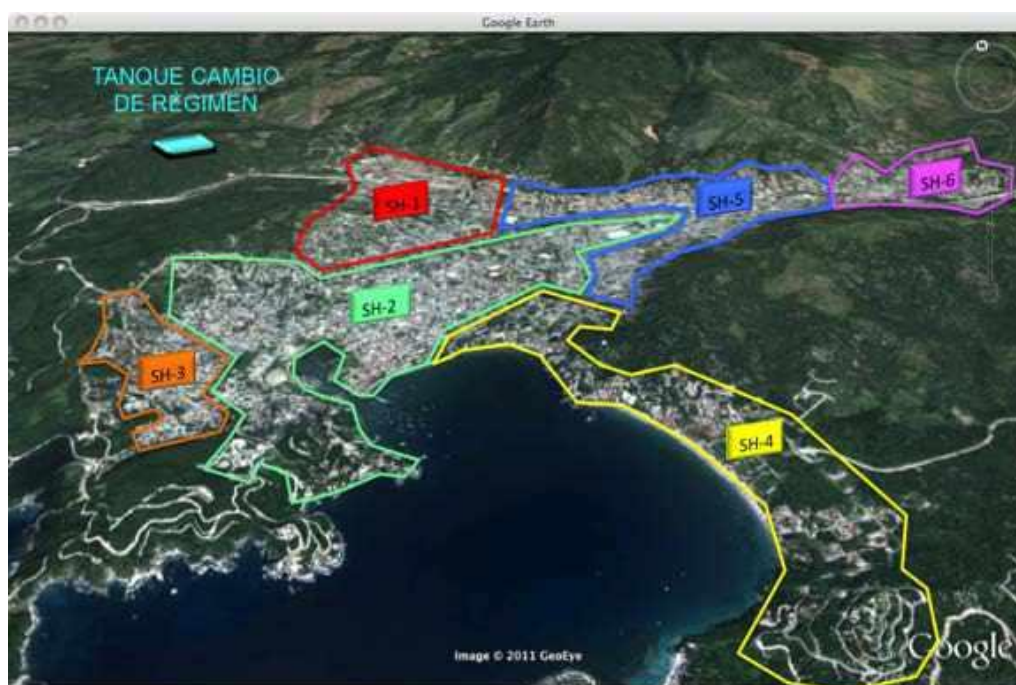


Figura. 1.1. Ejemplo de sectorización de un sistema distribución de agua potable. Fuente: Ochoa, (2020).

1.3. Aspectos a tener en cuenta para el diseño de sectores hidrométricos

A continuación, se indican un grupo de recomendaciones a tener en consideración para el establecimiento de las zonas de abasto y sectores hidrométricos (GEAAL, 2016).

Para llevar a efecto la sectorización de la red es preciso tener en cuenta consideraciones hidráulicas, geográficas, divisiones político administrativas, divisiones de la infraestructura comercial (rutas de facturación) y las consideraciones demográficas de la zona en estudio.

La demanda total de agua del sector hidrométrico se determina para acueductos rehabilitados por la NC 973:2013; y para acueductos no rehabilitados por lo establecido en la Resolución 287 del 2015 “Índice de consumo de agua para producciones y servicio”. Empleando la NC 973:2013 o la Resolución 287:2015 y teniendo en cuenta el inventario o padrón de usuarios residenciales y no residenciales, se determina la demanda por cuadra si es una red de distribución mallada, o por ramal de distribución si es una red abierta. La sumatoria de la demanda por cuerdas o ramales debe coincidir con la demanda total calculada del sector hidrométrico para el padrón de usuarios totales. Si la red es mallada, la demanda por nodo de la red se determina asignándole el 50% de las demandas de las cuerdas incidentes en el nodo. Si la red es abierta, para calcular la demanda por nodo del ramal se requiere el padrón de usuarios por cada nodo o acometida. El caudal total instantáneo promedio de suministro (m^3/s) (desde el tanque o estación de bombeo), al sector hidrométrico debe corresponderse con la demanda calculada (m^3/d) del sector hidrométrico por norma.

Para analizar las variaciones del caudal promedio durante el día, y estimar los valores máximo y mínimo de caudal, debe considerarse una curva teórica de modulación de demandas basada en la experiencia de operación. Los caudales instantáneos promedio por nodo de la red de distribución se determinan por las demandas calculadas por nodo. Este parámetro es fundamental para la modelación del comportamiento de los parámetros hidráulico de las redes del sector. Cada sector tendrá una única entrada principal. Una entrada secundaria se aceptaría si la misma se justifica durante las simulaciones realizadas. En una primera sectorización de la red esta debe dividirse en sectores con cotas topográficas similares para lograr la compensación hidráulica de las presiones y luego en pisos de presión (NC 969:2014: GEAAL).

El área de un sector no debe ser superior a 100 ha y no sobrepasar los 6000 habitantes, a continuación, los criterios de dimensionamiento recomendados con relación a la densidad poblacional expresado en (hab/ha). Se debe formular la propuesta de colocación de válvulas de seccionamiento de la red (que delimitaran los sectores, preferentemente de compuerta con cierre elástico) los macro medidores a la entrada de cada sector (caudal y presión) y la cantidad y tipo de hidrómetro a colocar en cada sector para medir el consumo de cada usuario. Los nodos del sector no deben tener diferencias topográficas mayores de

15 m, ni diferencia de presiones superiores a 15mca, en lugares con topografía ondulada esto puede definir los límites y tamaño del sector (NC 969:2014: GEAAL).

En la entrada de cada sector se colocarán válvulas de regulación (válvula de mariposa o de globo) o platillo con orificio calibrado para equilibrar la presión de entrada con relación al resto de los sectores cuya diferencia no debe ser mayor de 15mca. Tener en cuenta espejos de agua, ríos, arroyos, cañadas, canales, viales principales y elevaciones de terreno que constituyen de por sí límites físicos de la zona. Tener en cuenta homogeneidad del tipo de material de las tuberías de las redes de distribución, de la tipología de vivienda predominante, la existencia de grandes consumidores y las características económicas, sociales y culturales de la población residente. La entrada principal del sector debe contar con la instalación de un hidrómetro para la macro medición, la posibilidad de instalación eventual del caudalímetro ultrasónico para la verificación periódica del hidrómetro, y de un manómetro para la medición de presiones. La velocidad máxima en la entrada del sector no debe sobrepasar los 1,50 m/s. Se eliminará en lo posible las acometidas en tuberías principales. En acometidas seleccionadas de bajo consumo y próximas a nudos principales de la red debe concebirse la colocación de tomas para la instalación temporal o permanente de manómetros con la finalidad de realizar el control de presiones y la calibración del sector (NC 969:2014: GEAAL).

1.4. Criterios básicos para la creación de los sectores hidrométricos

En la creación de los sectores hidrométrico se deben de tener en cuenta tareas y etapas que complementan este proceso, y según (NC 969:2014: GEAAL), deben realizarse por orden de prioridad, las siguientes tareas:

- 1) Zonas con relieve topográfico uniforme para lograr la compensación hidráulica de las presiones.
- 2) Zonas factibles de independencia de operación hidráulica de las redes de distribución del sistema de acueducto construido.
- 3) Zonas que cuentan con una o más entradas independientes de suministro de agua a las redes de distribución que garanticen el caudal demandado por los clientes, y que esté comprobado el aislamiento hidráulico en sus límites físicos.

4) Determinación de la clasificación de los sectores hidrométricos en pequeño, mediano o grande según los parámetros de área territorial que ocupa, población residencial y densidad demográfica de la zona ver tabla 1.1.

Tabla 1.1. Parámetros de área territorial que ocupa, población residencial y densidad demográfica de la zona.

Fuente: GEAAL (2016).

Parámetro	Pequeño	Mediano	Grande
Área (ha)	$A < 20$	$20 < A < 50$	$A > 50$
Población Residente (hab)	$PR \leq 1500$	$1500 < PR \leq 3000$	$PR > 3000$
Densidad Poblacional (hab/ha)	$DP \leq 100$	$100 < DP \leq 200$	$DP > 200$

1.4.1. Ventajas de la sectorización hidrométrica del sistema de acueducto

En documento emitido GEAAL, (2016) que establece las siguientes ventajas:

1. Por su poca extensión territorial, regularidad del relieve topográfico, simplicidad estructural, e independencia de operación tecnológica, se simplifica y facilita el control, la evaluación y la optimización de la gestión de operación hidráulica, de saneamiento y comercial.
2. Facilita la elaboración y calibración de los modelos de simulación del comportamiento hidráulico del sistema tecnológico para diversos escenarios de operación, que incluyen:
 - a) El modelo de simulación del comportamiento hidráulico para las demandas promedio y máximas de los usuarios.
 - b) El modelo de simulación del comportamiento hidráulico para los consumos medidos
 - c) Modelos de simulación del comportamiento hidráulico para la evaluación preventiva de alternativas de operación del sistema de acueducto y el adecuado control de aplicación de éstas, que permite, además, la correcta toma de decisiones ante contingencias extremas

como los provocados por incendios, frecuentes períodos de intensas sequías, y los potenciales riegos generados por huracanes y terremotos a que está expuesto el territorio.

3. Facilita ejecutar racionalmente los programas de instalación de hidrómetros para la macro y micro medición con la finalidad de controlar y balancear los volúmenes de suministro de agua al sector hidrométrico y los volúmenes consumo de agua por tipo de usuario y las pérdidas físicas.

4. Conformar rutas de lectura de los hidrómetros y de facturación del servicio de abasto exclusivas del sector hidrométrico que permita el análisis y la reducción de las pérdidas de agua comerciales y las cuentas por cobrar.

5. Crear las bases de datos de clientes y las estadísticas del comportamiento histórico del consumo medido y facturado.

6. Se hace factible alcanzar un mayor equilibrio en la relación suministro – consumo medido – consumo facturado – demanda de agua.

7. Realizar estudios para la determinación del comportamiento de las demandas de aguas promedio y horarias para proponer regulaciones y curvas de modulación del comportamiento horario de las demandas para su utilización en la gestión de proyecto y de operación de sectores hidrométricos similares.

8. Establecer procedimientos operacionales para lograr la calidad, confiabilidad y seguridad del servicio de abasto en condiciones normales de explotación.

9. Aplicar eficaz y racionalmente el programa de reducción de pérdidas de agua.

Según (Vegas, 2012) la sectorización tiene varias desventajas dentro de ellas citamos:

- Disminuye la garantía de suministro respecto a las redes totalmente malladas, ya que una rotura en los puntos de alimentación al sector dejaría sin servicio a todo el sector. Para subsanar este inconveniente es recomendable que el sector esté preparado para poderse alimentar desde otras entradas alternativas que en condiciones normales permanezcan cerradas.
- Aumentan los tiempos de permanencia del agua en la red, lo cual es perjudicial desde el punto de vista de la calidad de la misma. Esto se debe a que aumenta el recorrido que el

agua debe hacer hasta llegar al abonado final, ya que las redes adoptan una tipología más ramificada.

- Sectorizar una red conlleva una fuerte inversión inicial ya que no se trata únicamente de instalar válvulas y caudalímetros en determinados puntos del sistema, sino que a veces se requiere reforzar ciertos tramos de tubería para garantizar la presión de suministro.

1.5. Principios que sustentan la sectorización hidrométrica

La sectorización tiene como principio mejorar el rendimiento técnico de la red de abasto teniendo en cuenta que debe ser aprovechada al máximo toda el agua que entra al circuito, para lo que se hace necesario conocer en detalle la red de distribución. Definir la instalación de los medidores necesarios para contabilizar el agua que entra a cada sector, así como de cada usuario de manera independiente. Aumentar el horario de servicio en las zonas más afectadas. Mejorar las presiones de servicio. Estricto control de todos los clientes, manteniendo una vinculación estrecha con la actividad comercial para la depuración correspondiente de sus bases de datos. Todo esto permite asegurar un servicio eficiente con el consiguiente ahorro de los recursos hídricos (NC 969:2014: GEAAL).

Garantizar la eficiencia en los sectores hidrométricos es muy importante, para ello se necesita lograr que no haya fugas, ni fallas, ni roturas. Según Ochoa, (2020) el problema de fugas se agudiza por la deficiencia en los procesos de medición, control operacional, comunicación y participación de usuarios, formación de recursos humanos, sectorización de la red, facturación y padrón de usuarios, reparación de fugas catastro de redes.

Las fugas se incrementan en proporción al incremento de la presión (ver figura 1.2).



Figura 1.2. Ejemplo de fuga en un sector hidrométrico. Fuente: Ochoa, (2020).

Q_{fugas} - es el gasto de las fugas, C- un coeficiente constante, H- la carga hidráulica (presión), x un exponente que puede variar entre 0,5 y 2,5 dependiendo de la flexibilidad de los materiales de la red.

Las fugas causan pérdida de carga hidráulica

Según Ochoa, (2020) se provocan las fugas por el personal del organismo operador, al no cumplir con las normas y especificaciones oficiales (ver figura 1.3), es decir:

- NO utilizan los materiales adecuados
- Construyen deficientemente las instalaciones
- Suscitan operaciones de riesgo en los bombeos
- NO aplican a tiempo el mantenimiento preventivo y correctivo a la red.



Figura 1.3. Otros tipos de fugas en sectores hidrométricos. Fuente: Ochoa, (2020).

Según (Fragoso *et.al*, 2016) los criterios a seguir para llevar a cabo la división en sectores, parten de la infraestructura existente y de las diferentes zonas de presión en operación normal antes de iniciarse el proceso, de lo que resulta una primera propuesta de sectorización, y las adecuaciones que siguen, pueden realizarse atendiendo las siguientes recomendaciones:

1) Generalmente se pueden considerar de 1 a 5 sectores por cada 100 hectáreas (1 km²); en zonas con alta densidad de población, los sectores pueden ser de 10 a 15 hectáreas. Algunos expertos dimensionan los sectores en función del número de usuarios o de tomas.

2) Cualquiera de las recomendaciones que haya sido seleccionada para definir el tamaño de los sectores, deberá ajustarse a la geometría de la red, sobre todo a la adaptación de las condiciones de operación actuales y la facilidad de contar con un punto de suministro, aunque siempre será prudente contar con una alimentación de respaldo, aunque ésta se mantenga cerrada y sólo se utilice en contingencias.

3) Minimizar las variaciones de presión de servicio al interior del sector; esto es, mantener una cierta uniformidad de presiones entre los 15 y 50 mca, correspondientes a la dinámica mínima y estática máxima, respectivamente.

4) Siempre será conveniente verificar las velocidades del agua, las que podrán estar comprendidas entre 0,6 y 2,0 m/s.

Algunas recomendaciones complementarias, que buscan contar con un sistema de distribución confiable, son las siguientes:

- Mantener interconexiones entre sectores y entre fuentes de suministro, con válvulas cerradas, de modo que puedan derivarse caudales en casos extraordinarios.
- Verificar la capacidad de conducción de las líneas principales, considerando las situaciones de emergencia en las que deban alimentar a otros sectores. De ser necesario, incrementar el diámetro de esa tubería.

Finalmente, la selección del esquema de sectorización idóneo será aquél que mejor se adapte a las necesidades propias de cada sistema de distribución, pero, ante todo, evaluar el costo en la construcción de nuevas líneas de conducción y tanques de regulación, cortes, instalación de válvulas, etc.

1.6. Instrumentos de medición

Los instrumentos de medición son una herramienta importante a la hora de hacer un análisis de eficiencia de un sector hidrométrico, ya que permite conocer y monitorear los valores de gasto y presión para un análisis de su comportamiento hidráulico.

Existen diferentes tipos de instrumentos de medición, ejemplo de esto es el utilizado para medir el caudal que consiste en programar las unidades de medición (l/s), salida de pulsos por m³), establecer rangos de medición y el sentido del flujo junto con un totalizador (ver figura 1.4 y 1.5).



Figura 1.4. Visitas de campo realizadas a los puntos de instalación de los medidores electromagnéticos.
Fuente: Ochoa, (2020).



Figura 1.5 Medidor electromagnético en tanque bajo lado Norte y Sur, respectivamente. Fuente: Ochoa, (2020).

Con la instalación (ver figura 1.6) y puesta en marcha de estos medidores se hace posible la medición continua de los caudales de agua que se inyectan al sistema de agua potable. Estas mediciones muestran que, en promedio, se extraen 100 L/s de los pozos y un máximo de 170 L/s. Los medidores colocados cuentan con un dispositivo almacenador de datos que permite visualizar las actuales políticas de operación de los pozos.



Figura 1.6. Instalación de Medidores Electromagnéticos. Fuente: Ochoa, (2020).

1.7 Criterios de sectorización utilizados internacional y nacionalmente

Según (Moreno, 2018) a nivel internacional se encuentran los criterios con los que se realiza la sectorización o la generación de áreas de medición por distritos (DMA), del Centro de Investigación en la Industria del Agua del Reino Unido aplicabilidad en los Estados Unidos de Norte América. No todos los criterios de sectorización siguen motivos netamente hidráulicos; algunos se enfocan sobre alguna evaluación económica, como mantener un balance en el costo de las obras de sectorización y detección de fugas contra el ahorro de agua esperado. Otros criterios siguen simplemente lineamientos geográficos, como trazar los límites de los sectores siguiendo fallas naturales del terreno, ríos o incluso vías principales; Otros tienen un carácter comercial, como dividir por zonas políticas o por estratos socioeconómicos. Estas metodologías son las tradicionalmente usadas y, en general, es difícil conformar un límite de sectorización.

En algunas ciudades del mundo la eficiencia física oscila entre 30% y 50%, pero aquellas que han trabajado duro, durante décadas, para resolver las fugas han podido bajarla al 15%. Algunas ciudades en Japón y Alemania, con infraestructura reconstruida totalmente después de la guerra y bajo estrictas normas de calidad, tienen pérdidas del orden del 10% respecto del volumen a la entrada del sistema. En 1996 el Banco Mundial publicó y analizó algunas estadísticas para ciertas ciudades del mundo. Aparecen casos como los de Sao Paulo, Brasil o de Bogotá, Colombia donde se aprecia que durante algunos años los indicadores de eficiencia mejoraron, seguramente gracias a buenos programas de control

de fugas, pero posteriormente las ineficiencias crecieron quizá por descuido en los programas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este acápite se abordan los elementos relacionados con la metodología de trabajo, los análisis de la metodología, caso de estudio y se aportan los elementos necesarios para la confección de procedimientos.

2.1. Metodología de trabajo

La metodología que se siguió para este estudio está compuesta por tres etapas de trabajo y cuenta con el siguiente esquema (ver figura 2.1).

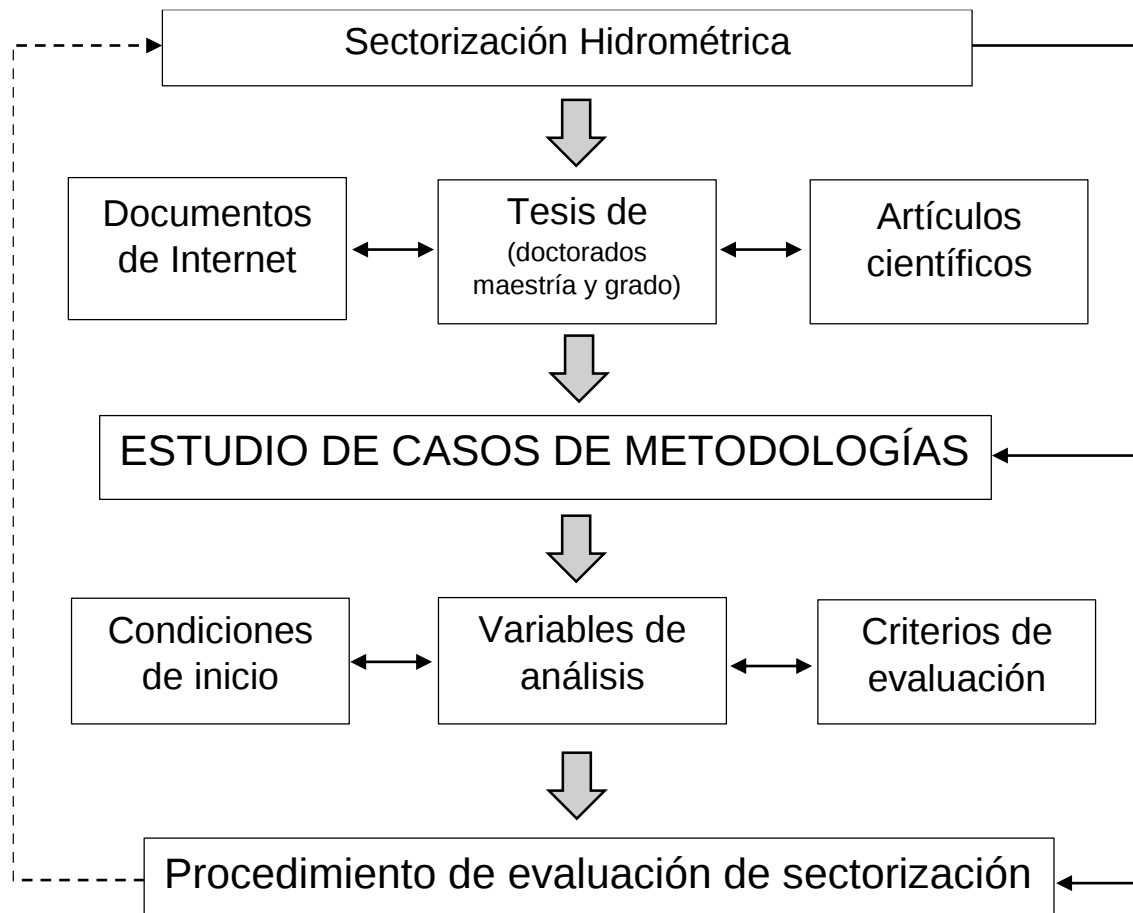


Figura 2.1. Esquema conceptual de la metodología. Fuente: Elaboración propia, (2021).

Las etapas consisten en:

Etapa 1: Sistematización de los documentos teóricos conceptuales para el análisis metodológico. Esta etapa se caracteriza por la búsqueda y recopilación de toda la documentación técnica, científica y metodológica relacionada con la temática. Se utilizan los métodos histórico- lógicos, el método cualitativo de la investigación social (Villabella, 2015) y el de análisis-síntesis.

Etapa 2: Estudio y análisis de casos de metodologías. En esta etapa se hace una valoración de los procederes y acciones metodológicas que a nivel internacional y nacional se desarrollan en función de los estudios de sectorización, con el objetivo de identificar variables, criterios y condiciones que permitan hacer una evaluación del comportamiento de los sistemas hidrométricos.

Etapa 3: Identificación y selección de criterios. Esta etapa parte de la valoración de las metodologías estudiadas y se identifican y seleccionan los elementos conceptuales (condiciones, criterios y variables), por el cual se debe regir el procedimiento para la evaluación de los sectores hidrométricos.

2.2. Metodologías y variables de estudio

En varios países se han utilizado diferentes metodologías para el estudio de sectorización, de las cuales se plantean criterios en este trabajo.

Una de las metodologías planteada es la de Campbell, (2013), Valencia España donde propone seguir la línea de Aprendizaje Automático Computacional (ML, Machine Learning). Con este método se hace una primera exploración de las características de la red y mediante un algoritmo de formación de clústeres en jerarquía, en combinación con medidas de validación de clústeres, se determina el número de clústeres en que se puede realizar la partición de la red.

Otra variante de método de aprendizaje no supervisado, en específico clústering espectral, con el cual se logra una partición en la que se minimice el número de válvulas necesarias. Esta optimización también tiene en cuenta los pesos que se asocian a las características que se emplean en la partición, de manera tal que, si una de las características es muy importante para la partición, a esta se le asigna un peso muy alto con respecto a las otras y la forma de los sectores se verá altamente influida por ella. Los pesos que se asocian a la suma de matrices kernel en el paso anterior, son estimados con la herramienta AHPcalc.

Según Campbell, (2013), la inclusión de emisores de fugas dentro de las características a tomar en cuenta; así, las zonas pueden ser aisladas en función del nivel de fugas que reporten. El valor de λA de la suma de matrices kernel se estima por un análisis de costos para diferentes particiones. Una vez hecha la inclusión de emisores de fugas dentro de las características a tomar en cuenta; así, las zonas pueden ser aisladas en función del nivel de fugas que reporten. El valor de λA de la suma de matrices kernel se estima por un análisis de costos para diferentes particiones. Una vez hecha la partición, se elige la entrada de cada sector. Para elegir la entrada de un sector dado, lo primero es determinar las líneas que, de manera independiente (mientras el resto de las líneas que conectan al sector con la red de alta están cerradas), pueden abastecer al mismo por 24 horas. Estas se definen como líneas candidatas. Luego, se cierran todas las líneas del sector en que se hará la primera evaluación, mientras una de las líneas candidatas se deja abierta. Las restantes líneas de la red se dejan abiertas. Bajo este escenario, se calcula para el sector dado el Coeficiente de Pérdida de Potencia (CPP) y el Índice de Resiliencia (IR). Luego se procede de la misma manera para el resto de las líneas candidatas. Como resultado, se obtienen dos rankings de valores de eficiencia energética del sector, a partir de los cuales se puede seleccionar la mejor opción de alimentación del mismo.

Algunas de las variables que se toman en cuenta en esta metodología es el peso, suma de matrices kernel, partición, Coeficiente de Pérdida de Potencia (CPP), índice de Resiliencia.

Según el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, (2017), para determinar la eficiencia de un sector se plantea un sistema de múltiple calificación basado en el riesgo de incumplir el nivel de servicio preestablecido por el gestor del abastecimiento. En este sentido, se analiza el comportamiento de cada sector con base en los tres principales aspectos que aseguran la calidad y eficiencia en la prestación del servicio que percibe el usuario final: continuidad del servicio, calidad del agua suministrada y régimen adecuado de presiones.

Esta metodología está compuesta por las siguientes etapas:

- (a) cálculo de los indicadores adecuados
- (b) normalización de cada indicador
- (c) definición de los factores de combinación para los indicadores de cada objetivo, y
- (d) comparativa entre soluciones introduciendo los costos

Una de las variables que se utiliza en esta metodología es el área de afectación que es el tiempo durante el cual unos conjuntos de propiedades verán su servicio afectado por la reparación de la eventual rotura, acompañado por la continuidad del servicio, calidad del agua suministrada, régimen adecuado de presiones y eficiencia.

En algunos contextos, las particularidades urbanísticas hacen muy difícil la instalación de Unidades Operativas de Control (UOC) en algunos sitios. Mediante los rankings anteriores se pueden estimar entradas alternativas en las que el operador no tenga que lidiar con aspectos constructivos muy complejos. En algunos casos, se podría considerar un aumento de diámetro de alguna línea que no sea la primera en ambos rankings, y así lograr que las presiones en el sector sean similares a las que se obtendrían si se emplease la primera alternativa, eficiencia del sector.

El resultado de las tres primeras etapas es una función paramétrica que evalúa cada uno de los objetivos, primero de manera individual y luego combinada, cuantificando la vulnerabilidad de la red, con el fin de ayudar a la toma de decisiones por parte de los operadores del servicio. La aplicación de esta función es un test de vulnerabilidad que permite priorizar aquellos sectores con una mayor debilidad a la hora de asignar inversiones adicionales en redes existentes.

Otra de las metodologías que se plantea en este trabajo es la aplicada por (Salguero *et al*, 2017) donde se basa en la teoría de grafos para el desarrollo de los cálculos. Para plantear esta metodología se deberán tener presentes los siguientes tres conceptos:

En primer lugar, y para poder abordar los aspectos topológicos y de conectividad, la red de distribución se considera un grafo no dirigido, es decir, aquel en que las líneas no tienen una dirección definida (o lo que es lo mismo, no se conoce la dirección del caudal). Asimismo, conviene subrayar que los vértices son los nudos de consumo de la red de distribución. En segundo lugar, y debido a la complejidad y volumen de cálculos a realizar, será necesario el empleo de un sistema multi-agente. Un agente es un sistema capaz de actuar independientemente según los cambios en el medio e interactuar con otros. Actúan conjuntamente formando un sistema inteligente de agentes, logrando adaptarse al ambiente y sus posteriores modificaciones para cumplir los objetivos fijados. Por último, el algoritmo de Prim (Prim 1957) permite a partir de una línea, determinar cuál de las líneas adyacentes a ésta tiene un menor peso y, por tanto, se engloba en el sector. Esto es, el

algoritmo selecciona la tubería adyacente con menor eficiencia energética y lo añade al sistema.

La metodología desarrollada a continuación presenta un procedimiento para la localización de aquellas zonas donde la eficiencia energética sea menor, es decir, donde la diferencia entre la presión de los nudos y la entrada mínimo de servicio sea mayor.

El proceso de cálculo tiene como únicos datos de entrada a la red actual y la longitud mínima de red que debe contener cada sector y da como resultado la definición de un conjunto (cluster) de tuberías y nudos cuya distribución corresponde con conjuntos con el menor rendimiento energético, y los pasos que sigue son los siguientes:

1. Do
2. For $i=1$ to número de nudos. Inicio en el nudo i e introducción de este en el conjunto de cálculo.
3. Selección de las líneas adyacentes y sus nudos opuestos no incluidos de los nudos que componen el conjunto de cálculo.
4. While $j=1$ to número de líneas adyacentes. Cálculo de la eficiencia energética en los pares líneas-nudos seleccionados.
5. End While
6. Se introduce al conjunto cálculo aquel par que presente menor rendimiento energético.
7. Cálculo del rendimiento energético del nuevo conjunto de cálculo. De esta manera, se puede comprobar si la eficiencia energética mejora con el nuevo par introducido.
 - a) IF (eficiencia energética) $k+1 < (\text{eficiencia energética}) k$ and $L > L_{\min}$
 - b) Se almacena el valor de la nueva eficiencia energética y el subconjunto de elementos que lo componen. Ir al paso 6. Se pretende encontrar el grupo de elementos con una eficiencia energética menor a partir del nudo inicial i escogido. Asimismo, se establece un criterio de longitud mínima para evitar sectores muy pequeños. Por tanto, se obtiene para cada iteración (para cada nudo i inicial) un conjunto de cálculo que tenga una menor eficiencia energética.

8. End for. Se obtiene un subconjunto de elementos (eficiencia energética) k con la menor eficiencia energética de las n (número de nudos) iteraciones realizadas.

9. Se excluyen del algoritmo los nudos y líneas englobados en este subconjunto.

10. While longitud tuberías restantes $> L_{min}$

Aunque este algoritmo consiga dividir toda la red de distribución en diferentes clusters, estos no se pueden entender como sectores finales debido a que no se encuentran aislados entre sí. Para definir la sectorización final se debe considerar cuales son las tuberías de interconexión que deben ser cerradas para aislar el sector.

La mejora fundamental consistente en aplicar la metodología planteada en este trabajo reside en la obtención de sectores en los que la distribución de presiones sea más homogénea muestra presiones más homogéneas para cada sector, y por tanto se permite una mayor reducción de la presión y, en consecuencia, del volumen fugado. En cambio, si se obtiene una sectorización según criterios prácticos se obtiene una distribución de presiones más heterogénea.

Las variables que se utilizan en esta metodología son:

N_c - representa el número de clúster o sectores.

N_n - El número nudos.

A_{ij} - tomará el valor de 1 si el elemento pertenece al sector y cero en el resto de los casos.

η_{ei} - corresponde con la eficiencia energética del elemento i .

C_j - será la eficiencia energética de los elementos que forman el sector j .

A continuación, se valida la propuesta de la metodología planteada por Campbell, (2013), que mediante la simulación hidráulica en EPANET 2.0, propone que el parámetro que se considera para tal valoración es la presión en los nodos, tanto a la hora de mayor consumo, así como a la hora en la cual el consumo es menor.

La misma sigue los pasos siguientes:

1. Preparación del modelo matemático de la red en EPANET 2.0 con distribución de coeficiente de emisores y balance de caudales.

2. Clústering jerárquico de la red, para obtención del dendrograma.
3. Validación del procedimiento de clústering jerárquico mediante el CPCC.
4. Ponderación de las características de la red mediante AHP.
5. Transformación de la red en un grafo no dirigido.
6. Obtención de la matriz kernel de la matriz L del grafo.
7. Obtención de las matrices kernel de las matrices de disimilaridad de las características de la red.
8. Suma de las matrices kernel de los pasos 6 y 7, con las ponderaciones obtenidas en el paso 4.
9. k-means de los valores propios de la nueva matriz kernel.
10. Selección de las entradas de cada sector (en el escenario de mayor consumo).
11. Modelización matemática de la propuesta de sectorización.

Como alternativa Campbell, (2013) plantea estudiar una mejora en los índices energéticos de toda la red. Esto se logra variando las fronteras entre los sectores. En el ejemplo posterior, se muestra una variación al esquema de sectorización inicial que reduce levemente la disipación de energía. Dado que las posibilidades de variación son muchas, sería una tarea exhaustiva probar todas estas sin contar con una herramienta informática para tal fin. Se espera en el futuro poder desarrollar un procedimiento heurístico que permita probar muchos escenarios, permitiendo encontrar el mejor esquema posible.

La metodología planteada anteriormente contiene varias ventajas que permiten una mayor eficacia a la hora de realizar una sectorización en una red hidráulica, estas son:

- Aplicabilidad en redes de abastecimiento de agua potables de mediana y gran extensión:

En muchas redes de distribución de agua potable (RDAP) de mediana y gran extensión (más de 1000 km de extensión de tuberías), las fuentes de abastecimiento no se encuentran dentro de la ciudad y/o cuentan con un número de fuentes muy limitados. Esto hace inviable el establecimiento de micro sectores con una fuente exclusiva. Se pueden establecer únicamente macro sectores con una fuente exclusiva, pero luego estos serían

poco útiles para los objetivos de un plan de control activo de fugas, en vista que se dispondría de menor grado de sensibilidad para registrar cambios anómalos de caudal.

- Mayor eficiencia en el control activo de fugas:

La otra ventaja se relaciona con el control activo de fugas. Es ampliamente reconocido, que el mayor volumen de fugas en las RDAP se reporta en las líneas y accesorios de conexión de menor diámetro (al ser estas líneas más sensibles a cambios de presión, ser manipuladas en muchos casos por personal ajeno a las compañías de agua o simplemente recibir poco mantenimiento). También, en estas líneas es más complicada la detección de una fuga. Al separar la red troncal de la sectorización, se enfocan los esfuerzos de gestión de fugas sobre el punto central en donde se produce el problema.

- Ahorro de costos por implementación:

La metodología también presenta ventajas en términos económicos, ya que, al no incluir la red troncal, los caudalímetros tendrán menor diámetro. Es importante tener en cuenta que es recomendable ubicar los caudalímetros dentro de una caja de registro (UOC, unidad operativa de control). Al segregar la red troncal, las UOC son más pequeñas (por ende, más económicas) y se ubican en vías menos traficadas, con lo cual, su construcción implica un menor grado de complejidad.

- Flexibilidad operacional

Las RDAP cambian constantemente en respuesta a la demanda. Esta respuesta en muchas ciudades se produce de una manera anárquica. Al mantener la red de troncal segregada, se hace más simple la modificación del esquema de sectorización para enfrentar las necesidades eventuales.

Otra metodología es la propuesta en Cuba (NC 969:2014: GEAL), la misma está agrupada en tres etapas de trabajo, las cuales se muestran a continuación:

Etapa 1. Descripción del sistema de abasto del circuito hidrométrico en estudio, teniendo en cuenta: consideraciones hidráulicas, geográficas, topográficas, poblacional y de infraestructura estatal.

Etapa 2. Cálculo de la demanda total de agua del sector hidrométrico por la NC973:2013 para sector poblacional; y para el sector estatal por la Resolución 287/2015 “Índice de consumo de agua para producciones y servicio”.

La norma de explotación (NC-973:2013) del INRH, brinda información sobre la dotación (Dot) y coeficientes de irregularidad K1, K2 y K h se dan en dependencia del tamaño de la población al igual que la dotación.

La ecuación utilizada es: $Q = \text{Pob} * \text{Dot} * K1 * K2 / 86400$

Etapa 3. Determinación del comportamiento de los parámetros hidráulicos del sector hidrométrico, a través de la modelación o simulación de la red de abasto, en régimen permanente para dos escenarios, utilizando el software Epanet.

- Simulación de la red en régimen permanente con entrega del caudal máximo horario, con ciclo de 24 horas.
- Simulación de la red en régimen permanente con entrega del caudal máximo horario, según el ciclo establecido.

Etapa 4. Análisis de los resultados y de comportamiento del servicio de abasto de agua potable.

En esta metodología las variables que se utilizan son el caudal (Q), la población (Pob), la dotación (Dot) y los coeficientes de irregularidad K1, K2 y K h.

Finalmente, al hacer una evaluación profunda de estas metodologías se llegó a la conclusión de que están conformadas básicamente por etapas que permiten definir el problema, donde prevalece la toma de datos, tipos de tratamiento, simulaciones y formas de intervención. Sin embargo no existe prácticamente una relación entre las metodologías aquí planteadas, con respecto a las variables y factores utilizados existe una variedad de métodos que identifican de manera cuantitativa el comportamiento de estas en función del diseño o delimitación de los sectores hidrométricos, pero carecen de elementos que permitan hacer una evaluación técnica del comportamiento de estos en su proceso operacional, de aquí la necesidad de elaborar un procedimiento para evaluar su eficiencia operacional a través del transcurso del tiempo.

2.3. Aspectos relevantes a tener en cuenta en el análisis del procedimiento

De las metodologías utilizadas se pueden obtener aspectos relevantes que permiten realizar una valoración de las distintas variables a utilizar en el procedimiento propuesto.

Uno de los aspectos que se pueden considerar es lo planteado por Ochoa, (2020) y Moreno, (2018), los cuales abordan un criterio que refiere que es necesario en cualquier sector hidrométrico considerar la eficiencia y con ello las fugas o pérdidas de agua que se producen en el sistema.

Plantean que un sistema se considera eficiente cuando las fugas son menores de un 15% y lo consideran para países desarrollados que tienen las redes en excelentes condiciones y que oscilan entre 30% y 50% en países subdesarrollados que tienen una infraestructura envejecida, es el caso de países que tienen un bajo nivel económico como Cuba (ver figura 2.2).

Ineficiencia física del sistema de agua



Figura 2.2. Ineficiencia física del sistema de agua. Fuente: Ochoa, (2020).

Otro elemento importante a considerar para garantizar eficiencia en un sector hidrométrico es lo planteado por Campbell, (2013) sobre mantener el control de la calidad del agua, teniendo en cuenta el cumplimiento de los parámetros descritos en las normas establecidas por cada país.

En el logro de una adecuada evaluación de la calidad del agua, en el caso de Cuba, se deben considerar los parámetros mostrados en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Características físicas y componentes químicos que pueden afectar la calidad del agua potable. Fuente: (NC 827: 2012).

Tabla 1 — Características físicas y componentes químicos que pueden afectar la calidad organoléptica del agua potable

Tipo	Característica	LMA
Físicas	Olor y sabor	Inodora y sabor agradable característico
	Turbiedad	5 UNT
	Color real	15 UC
Químicas	pH	6,5 – 8,5
	Sólidos totales disueltos	1 000 mg/L
	Dureza total (como carbonato de calcio)	400 mg/L
	Cloruros	250 mg/L
	Sustancias activas al azul de metileno	0,5 mg/L
	Compuestos fenólicos (referidos al fenol)	0,002 mg/L
	Aluminio	0,2 mg/L
	Cobre	2,0 mg/L
	Hierro	0,3 mg/L
	Sodio	200 mg/L
	Sulfatos	400 mg/L
	Zinc	5 mg/L

Estos indicadores se aplican a las aguas de consumo humano, procedentes de sistemas de abastecimiento, con tratamiento convencional, en todo el territorio nacional para tener una mayor calidad a la hora del abastecimiento a una población.

Un aspecto importante también a considerar es el control del comportamiento de las presiones en la entrada y en el interior de cualquier sector hidrométrico, por eso se hace muy significativo, la ubicación de estaciones pitométricos en puntos clave del sector, con el objetivo de controlar el comportamiento de las presiones a la entrada y en toda la red, así como los gastos de circulación y entrega.

De acuerdo con el comportamiento de presiones se considera teniendo en cuenta el criterio planteado anteriormente que la eficiencia tiene que ser mayor que un 15% para establecer que el sector está en un estado de operación extremadamente eficiente, si se encuentra en el rango de un 30-50% es eficiente y si es mayor que 50% es ineficiente.

A estos aspectos en el que coinciden los criterios de los autores de las metodologías estudiadas, y que es de gran peso en el comportamiento de eficiencia y calidad en la operación de un sector hidrométrico es la continuidad del servicio, ya que un servicio continuo permite la estabilidad del sistema y la tranquilidad de los usuarios, mientras que un servicio por ciclo implica proporciona incomodidad a los usuarios desde el punto de vista

de confort y aumenta las posibilidades de la propagación de enfermedades por contaminación y vectores.

Estos aspectos analizados, en este acápite, se consideran de gran importancia para realizar un proceso de evaluación técnica en los sectores hidrométricos, por lo que demuestran la importancia y la necesidad de establecer criterios para la propuesta de un procedimiento en función de organizar los aspectos a seguir para su evaluación.

3. Fundamentos de la propuesta del procedimiento

Una vez analizadas todas las bases teóricas conceptuales de las metodologías que abordan la temática de estudio, se procede a plantear principios para una propuesta de un procedimiento para la evaluación técnica en sectores hidrométricos de abastecimiento de agua. Se propone que el procedimiento cuente con objetivos generales, condiciones de inicio, variables de evaluación y criterios para la valoración. Se plantea un esquema de trabajo el cual se puede observar en la figura 3.1.

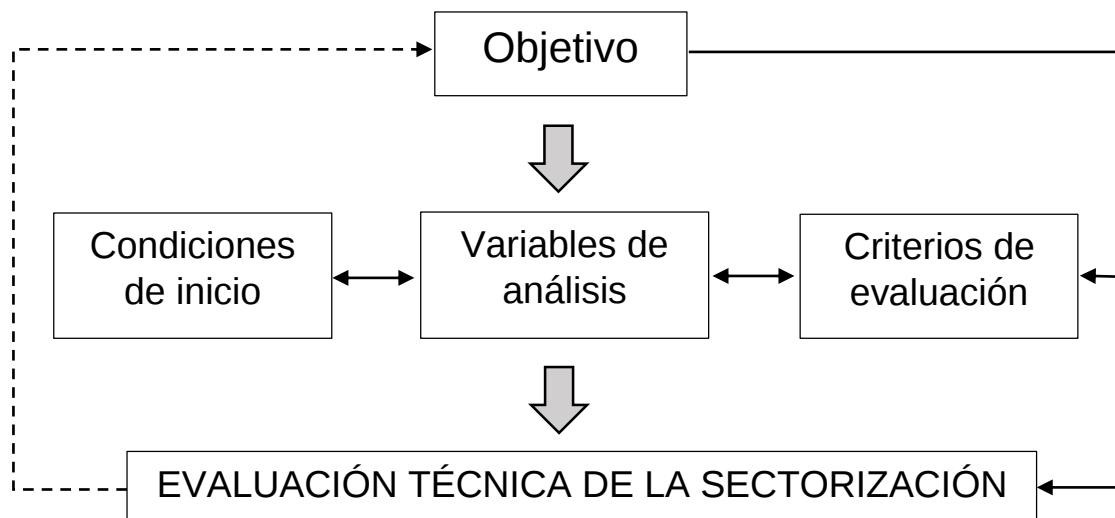


Figura 3.1. Esquema conceptual del procedimiento. Fuente: Elaboración propia, (2021).

El procedimiento cuenta con tres pasos fundamentales:

Primero: se realizar la definición del objetivo, elemento importante para dar respuesta a la problemática planteada.

Segundo: se deben de tener en cuenta tres elementos:

- El cumplimiento de las condiciones de inicio, para lograr un análisis certero de la situación de comportamiento hidráulico del sector hidrométrico en estudio.
- La caracterización de las variables de análisis, para valorar el comportamiento técnico del sector hidrométrico.
- Aplicar los criterios de evaluación.

Tercero: Realizar la evaluación técnica del sector hidrométrico, a través de la valoran los criterios de selección.

3.1. Objetivo

El objetivo consiste en realizar la evaluación técnica del comportamiento operacional de los sectores hidrométricos.

3.2. Condiciones de inicio

Las condiciones de inicio son de obligatorio cumplimiento para lograr un proceso de evaluación adecuado. Las mismas consisten en:

- Contar con estaciones pitométricas y un adecuado monitoreo de las presiones y caudales.
- Contar con los modelos matemáticos de comportamiento hidráulico del sistema, en caso de que no existan, contar con los planos del sistema de distribución, con los sus datos topográficos y la caracterización del sistema.
- Las demandas de agua utilizadas por los usuarios del sector y el levantamiento de usuarios.

3.3. Variables de análisis propuestas

Las variables de análisis que se declaran:

- Continuidad del servicio
- Calidad del agua
- Comportamiento de presiones
- Estado de fugas o salideros

3.4. Criterios de evaluación

Los criterios de evaluación tienen en cuenta el comportamiento de las variables.

En la variable continuidad del servicio, considera:

- Servicio continuo
- Servicio por ciclo < 3 días
- Servicio por ciclo > 3 días

En la variable calidad del agua, debe de cumplirse lo establecido por las normas de calidad en el caso de Cuba la NC 827:2012.

En la variable comportamiento de las presiones, se deben de cumplir con lo establecido en la NC:973/13, el rango de presiones debe de estar entre (14-50) mca.

En la variable estado de fugas y salideros, se considera tres criterios:

- Pérdidas <15%
- 15%>Pérdidas <30%
- Pérdidas >30%

3.5. Evaluación técnica de la sectorización

En la evaluación técnica de la sectorización, se establecen tres clases:

Evaluacion extremadamente eficiente, cumple con los criterios:

- Servicio continuo
- Cumple con los parámetros de calidad
- Cumple con el rango de presiones
- Pérdidas <15%

Evaluacion eficiente, cumple con los criterios:

- Servicio por ciclo < 3 días
- Cumple con los parámetros de calidad
- Cumple con el rango de presiones

- 15%>Pérdidas <30%

Evaluación ineficiente, cumple con los criterios:

- Servicio por ciclo > 3 días
- No cumple con los parámetros de calidad
- No cumple con el rango de presiones
- Pérdidas >30%

CONCLUSIONES

1. Los fundamentos teóricos analizados contribuyeron a la descripción del marco referencial del estudio de sectores hidrométricos para la elaboración de la propuesta del procedimiento de evaluación técnica de sectores hidrométricos, dando cumplimiento al objetivo y comprobación de la hipótesis.
2. Las metodologías están conformadas básicamente por etapas que permiten definir el problema, donde prevalece la toma de datos, tipos de tratamiento, simulaciones y formas de intervención, pero carecen de un procedimiento que permitan hacer una evaluación técnica del comportamiento de los sectores hidrométricos en su proceso operacional.
3. Se identificaron tres condiciones de partida para aplicar el procedimiento propuesto y cuatro variables tales como: continuidad del servicio, calidad del agua, comportamiento de presiones y estado de fugas o salideros, y se plantearon los criterios de evaluación.
4. Se confeccionó una propuesta de procedimiento para la evaluación técnica de los sectores hidrométricos el cual consta de condiciones de inicio, variables, criterios de análisis y evaluación, que permiten evaluar la eficiencia de los sectores hidrométricos en su comportamiento operacional.

RECOMENDACIONES

1. Realizar la validación del procedimiento a través de un estudio de casos.
2. Introducir los resultados de esta investigación en el 3er año de la carrera, como forma de actualizar la temática abordada en pregrado.
3. Que se cumplan las condiciones iniciales para poder aplicar el procedimiento de evaluación técnica.
4. Se recomienda realizar un plan de instalación de los sistemas pitométricos antes de aplicar el procedimiento.

BIBLIOGRAFÍA

Alvarado, E.; Gil, S.; Nelson, J. A.; Espinoza, H. (2017). Manual de Medición de Caudales, Guatemala.

Bonilla Ramírez. R. (2018). Estudio técnico del sector hidrométrico de la Zona Sur de Guantánamo, circuito #1. Trabajo de Diploma. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba.

Campbell González. E, (2013). Propuesta para una Metodología de Sectorización de Redes de Abastecimiento de Agua Potable. Tesis de maestría Universidad Politécnica de Valencia, España.

Del Rosario Rodríguez, K. L. (2013). Herramientas estadísticas para el manejo de recursos hidráulicos subterráneos. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, VOL. XXXIV, No. 1, 73-88.

Del Rosario Rodríguez. K. L. (2013). Herramientas estadísticas para el manejo de recursos hidráulicos subterráneos. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, vol. xxxiv, No. 1, 73-88.

GEAAL (2016). "Procedimiento de sectorización hidrométrica de sistemas de acueducto en explotación". Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. La Habana, Cuba.

González Mancera, A. (2020). Medición de variables hídricas asociadas a plantas de generación hidroeléctricas. Universidad de los Andes, Argentina.

González Trujillo, M. (2017). Metodología para la evaluación del comportamiento espacial de la humedad por capilaridad en edificaciones. Tesis de doctorado. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba.

Hernández González, A. (2018). Estudio técnico del sector hidrométrico de la Zona Sur de Guantánamo, circuito No. 4. Tesis de grado. Universidad de Oriente.

Moreno Colina. J. I. (2018). Sectorización de la Red del Acueducto para la ciudad de Jatibonico. Trabajo de diploma. Universidad de Las Villas. Las Villas, Cuba.

Ochoa Alejo, L. H. (2020). La sectorización de redes de agua potable. Proyecto ejecutivo y plan maestro de sectorización de redes y eficiencia energética integral. Ciudad de México, México.

Pedraza Martínez, J. A. (2017). Manual para un proyecto de eficiencia energética e hidráulica integral en un sistema de agua y saneamiento. La Habana, Cuaba.

Toxky López. G. (2012). La sectorización en la optimización hidráulica de redes de distribución de agua potable. Tesis de grado de maestría en ingeniería civil. Instituto Politécnico Nacional, México.

Vásquez Yánez. C. X. (2018). Determinación de niveles de consumo y propuesta de sectorización de la red de distribución del sistema de agua potable de la ciudad de Sucúa, cantón Sucúa, provincia de Morona Santiago. Tesis de grado. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador.

Vegas Niño. O. T. (2012). Herramientas de ayuda a la sectorización de redes de abastecimiento de agua basadas en la teoría de grafos aplicando distintos criterios. Departamento de Ingeniería Hidráulica y medio ambiente. Universidad Politécnica de Valencia, España.

Villabella, C. (2015). Los métodos en la investigación jurídica. Algunas precisiones. Universidad Nacional Autónoma de México.