

Congreso Internacional de Investigación
de

ACADEMIA JOURNALS.COM

Chiapas 2014

Co-patrocinado por



Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México



AcademiaJournals.com,
Una División de PDHTech, LLC
San Antonio, TX, EEUU



Universidad Autónoma de Chiapas
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México
Septiembre 2014

ISSN 1946-5351 Online

1948-2353 CD ROM

COLABORADORES ESPECIALES

El congreso cuenta con la valiosísima e imprescindible colaboración de la

Red Temática y de Investigación Desarrollo Organizacional y Empresarial formada por cuerpos académicos de



Asesor Internacional

Mr. George M. Pyle, M.A.

NetDataPad.com

San Antonio, TX



PRESIDENTE DE LA COMISIÓN ORGANIZADORA

Dr. Sabino Velázquez Trujillo
Ingeniería Industrial
[Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez](#)
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas,
México

COMITÉ DE PROGRAMA Y ARBITRAJE

Dr. Rafael Moras
[St. Mary's University](#)
San Antonio, TX, USA
Editor, [AcademiaJournals.com](#)

Lic. David Moras
[AcademiaJournals.com](#)

EQUIPO DE COLABORADORES DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIERREZ

Dr. Alejandro Medina Santiago
Dr. Reyner Rincón Rosales
Dr. Rafael Mota Grajales
M.C. Lucía Ma. Cristina Ventura Canseco
M.C. Ronay López Estrada
Dra. Sandy Luz Ovando Chacón
Dra. Teresa del Rosario Ayora Talavera
Dr. Nicolás Juárez Rodríguez
Dr. Jorge Luis Camas Anzueto
Dr. José Humberto Castañón González
Dr. Madain Pérez Patricio
Dr. Federico A. Gutiérrez Miceli
Dr. Miguel Abud Archila
Dr. Elías Neftalí Escobar Gómez
M.C. Walter Torres Robledo

EQUIPO DE COLABORADORES DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS

Dr. Manuel de Jesús Moguel Liévano
Dr. Hilario Laguna Caballero
Dr. José Roberto Trejo Longoria
M.C. Renán Velázquez Trujillo
M.C. Ronay López Estrada
Dra. Zoyli Mery Cruz
Dra. Blanca Molina
Dr. Rafael Blanco
Dra. Laura Velasco Estrada
Dr. Julio Ismael Camacho Solís

Eficiencia operativa en subsistemas de agua potable, su incremento a través de la implementación del control en válvulas hidráulicas

Ing. José Daniel Cobos de los Santos¹

Resumen— El objetivo de esta investigación fue buscar como regular la distribución de caudal en función a su demanda real en un distrito hidrométrico optimizando su consumo mediante la implementación de un sistema de regulación entre presión aguas abajo y presión aguas, esto con el fin de atacar el problema que acoge a la mayoría de los Organismo de Agua Potable que es la falta de agua en la red por una mala distribución o control de presiones. Este trabajo propone sentar las bases para la disminución de costo operativo de un distrito hidrométrico ya que al entregar únicamente el agua que demanda es posible realizar una redistribución de presiones y caudales en la red de distribución de un sistema de agua potable, para optimizar su funcionamiento y ahorrar agua; facilitar las labores de mantenimiento, control de fugas y ampliar la cobertura del servicio.

Se empleó un algoritmo de control con variables de estado usando un vector proporcional con retroalimentación que capaz de regular tanto el caudal del sistema como la presión de acuerdo a la ponderación de las ganancias proporcionales logrando resultados en la simulación muy satisfactorios sentado las bases para una futura implantación en campo.

Palabras clave— Agua, regulación, control, Caudal y Presión.

INTRODUCCION

A pesar de que el agua es un recurso abundante en nuestro planeta, y aunque más del 70% de su superficie está cubierta por agua, la escasez es hoy uno de los grandes retos que afronta la humanidad. Según reportes de la Organización Mundial de la Salud, solo el agua dulce constituye un 3% del total del agua presente al planeta, y el 70% de esta no está disponible, puesto que se encuentra congelada a los bancos de hielo polares y alas glaciares¹.

Nuestro país posee aproximadamente el 0.1% del total de agua dulce disponible a nivel mundial, lo que determina que un porcentaje importante del territorio esté catalogado como zona semidesértica. Esto implica, también, la necesidad de considerar al agua no sólo como un elemento vital, sino como un factor estratégico para el desarrollo global del país².

El Siglo XX se caracterizó por ser un periodo con tasas de crecimiento económico relativamente constantes y elevadas, cuyas fuentes fueron, entre otras, el rápido cambio tecnológico, el incremento en los intercambios internacionales y las transformaciones en las estructuras organizacionales³. Sin embargo, simultáneamente se ha presentado un deterioro continuo del medio ambiente con resultados adversos para los ecosistemas. Algunos recursos que parecían inagotables de pronto son escasos y adquieren propiedades de bienes económicos³.

El agua, que era un recurso libre, se va transformando en un bien económico: es escasa, cuesta y posee un mercado (semi-regulado por el Estado). Además de reconocerse como un factor de producción, el agua también es un bien de consumo, y su administración es uno de los problemas ambientales y de recursos más apremiantes, además de imponer grandes costos sobre la economía³.

Cabe destacar que el problema del agua no es privativo de nuestro país, se vislumbra a nivel internacional y amenaza convertirse como el mayor conflicto geopolítico del siglo XXI, ya que se espera que en los próximos años la demanda de este elemento rebase con mucho su suministro. Un hecho al que se le debe dar especial atención es el uso que se le da al recurso hídrico en nuestro país, en donde el 76.7% de agua de primer uso, superficial y subterránea, se destina a la agricultura; el 4.1% a la industria, el 5.1% a las termoeléctricas y el restante 14.1% al abastecimiento público⁴.

En resumen, para asegurar la implementación de la solución técnica y lograr cuencas y acuíferos en equilibrio, será necesario concentrarse en cuatro líneas de acción: incrementar la modernización y la tecnificación en distritos y unidades de riego hasta nivel parcelario, continuar con la construcción de infraestructura para abastecer zonas en crecimiento, impulsar la eficiencia de los sistemas de agua potable y saneamiento a través de sectorización y programas de reparación de fugas, e incrementar el uso de tecnologías eficientes en los hogares, comercios y la industria.

Por lo cual esta investigación pretende ser una herramienta en la tecnificación de la infraestructura hidráulica para elevar la eficiencia operativa de las redes de agua potable maximizando el recurso hidráulico de un sistema de agua potable.

¹ El Ing. José Daniel Cobos de los Santos es Líder de Especialidad en el Centro de Tecnología Avanzada CIATEQ A.C. (autor corresponsal) jose.cobos@ciateq.mx

CUERPO PRINCIPAL

Justificación de la investigación.

La necesidad del planteamiento de este proyecto nació de la experiencia de trabajar por más 5 años con Organismos Operadores de agua potable, detectando las mismas necesidades y fallas en cada uno de ellos, donde podemos resumir que el síntoma principal de la problemática es que “Nunca hay agua suficiente”.

La eficiencia de un sistema de abastecimiento de agua potable a ciudades se asocia con el proceso de captar, conducir, regularizar, potabilizar y distribuir el agua, desde la fuente natural hasta los consumidores, con un servicio de calidad total. Desde esta perspectiva, un sistema hidráulico para el abastecimiento de agua potable deja de ser eficiente cuando comienza a utilizar excesivos recursos humanos, materiales y económicos.

En la actualidad el crecimiento demográfico de las ciudades ha rebasado a la capacidad de abastecimiento de agua potable que puede dar un sistema operado de agua potable agregando las fallas en hermeticidad de la red e infraestructura, en los sistemas de bombeo e instalaciones electromecánicas antiguas, se tienen servicios discontinuos del agua a los usuarios (tandees), entrega de agua a los consumidores con bajas presiones, niveles de fugas de agua que llegan a alcanzar hasta el 50% del volumen suministrado, agua no potable en las tomas domiciliarias y excesivos consumos de energía en los equipos de bombeo con implicaciones económicas hasta del 35% de los ingresos del organismo operador.

Desde el punto de vista económico esta investigación propone sentar las bases para la disminución de costo operativo de un distrito hidrométrico ya que al entregar únicamente el agua requerida es posible realizar una redistribución de presiones y caudales en la red de distribución de un sistema de abastecimiento de agua potable, para optimizar su funcionamiento y ahorrar agua; facilitar las labores de mantenimiento y control de fugas; aprovechar las oportunidades de ahorro de energía y ampliar la cobertura del servicio como se muestra en la figura 1.

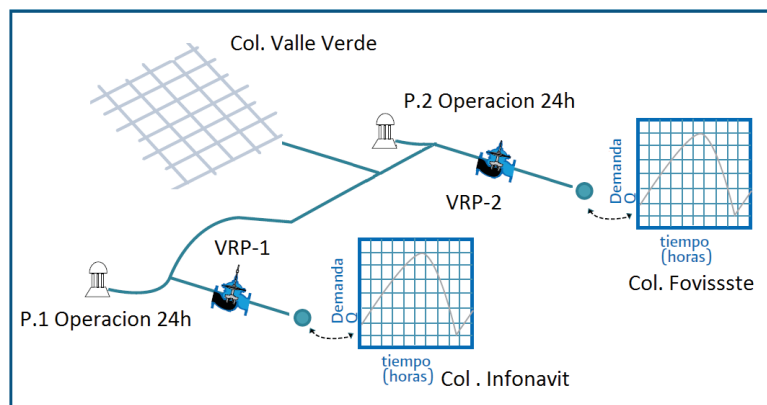


Figura 1. Sistema de Control propuesto con regulación de demanda, pudiendo logra recuperar caudales para su distribución en otra colona.

La característica principal de un proyecto de eficiencia hidráulica, a diferencia de un proyecto tradicional hidráulico, es la de lograr este objetivo utilizando los mismos recursos que se aplican actualmente, tal cual lo plantea esta investigación al trabajar sobre infraestructura hidráulica existente como las válvulas reguladoras.

Objetivos

Como objetivo central de la investigación tenemos regular la distribución de Caudal en función a su demanda real en un distrito hidrométrico, optimizando su consumo mediante la implementación de un sistema de regulación entre presión aguas abajo y presión aguas arriba, en sector hidrométrico el cual deberá estar instrumentado con una red de telemetría para su implementación en campo desglosando en los siguiente puntos:

- La elaboración y verificación de un Modelo matemático de una Válvula Reguladora de Presión doble cámara cuerpo en Y, que nos permita realizar simulaciones del sistema hidráulico.
- Diseñar e implementar un lazo de control con el Modelo de la Válvula, que el cual nos permita regular el Caudal mediante la regulación de las presiones aguas arriba y aguas abajo
- Sentar las bases teóricas y técnicas para la futura implementación del sistema en una red de Telemetría de CIATEQ, basadas y validadas a través de predicciones numéricas del comportamiento dinámico del referido sistema hidráulico de distribución de agua.

Alternativas para el control de caudal con válvulas hidráulicas.

En el mercado actualmente hay soluciones integrales para la regulación del caudal y la presión en redes de agua potable mediante válvulas hidráulicas, hay muchas marcas comerciales como Bermad, Dorot o Claval, todas tienen los mismos principios hidráulicos la única diferencia está en el diseño de la válvula, empaques o forma de los vástagos; por lo tanto será necesario hacer el análisis del funcionamiento de una sola marca.

La Válvula de Bermad modelo 720 (Figura 2) es una válvula de control de operación hidráulica accionada por diafragma; que reduce la presión alta aguas arriba a una presión menor y constante aguas abajo sin que le afecten las fluctuaciones en la demanda o en la presión aguas arriba⁵.

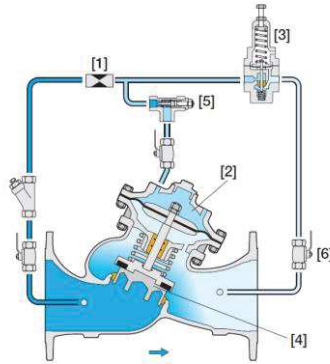


Figura 2. Operación de Válvula Bermad Modelo 720

Tiene la ventaja de tener operación independiente ya que es impulsada por la presión de la línea. Es de cámara doble y tiene el diafragma protegido, además cuenta con un diseño flexible la cual le permite incorporar funciones adicionales como control de solenoide o preferencia de regulación automática; por último tiene un cuerpo ancho en “Y” lo cual garantiza una mínima pérdida de presión.

Como resultado, la presión promedio de la red disminuye notablemente y así se reducen los gastos ocasionados por fugas, roturas, mantenimiento y energía. El área sombreada en la figura 3 representa las horas y niveles de pérdida reducida.

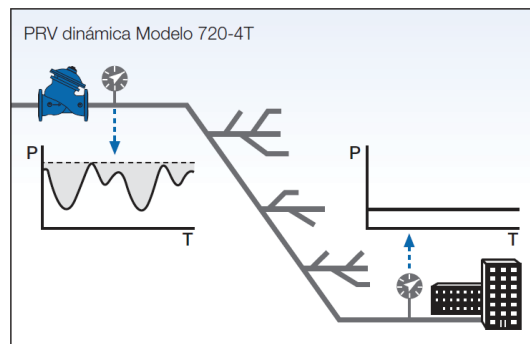


Figura 3. Operación de VPR Válvula Reductora de Presión.

Como se en la figura 3 la VPR regula la variación de la demanda de caudal aguas abajo (P2) a un valor predefinido, esta operación reduce costo inherentes por fugas, roturas, mantenimiento y energía pero no optimiza el consumo de presión aguas arriba (P1) ya que siempre tiene que regular aguas abajo respecto a la demanda manteniendo un mismo valor de P2 en todo momento, incluso durante las horas de bajo consumo, la cual no es necesaria para cubrir la demanda de caudal en esos momento como se muestra en la figura 4 durante los horarios matutinos y nocturnos.

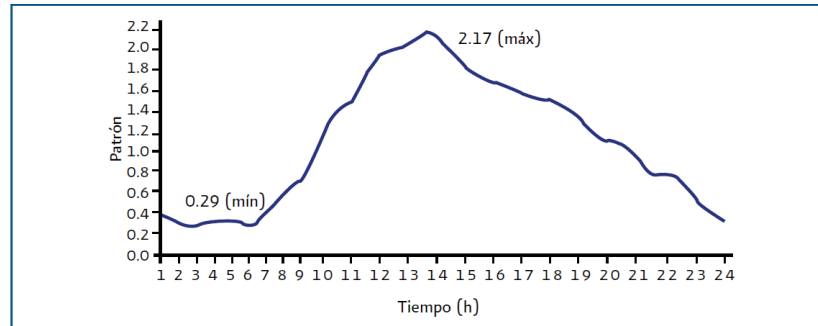


Figura 4. Curva típica de variación de la demanda de agua en una red de agua

Otro problema que puede llegar a tener este tipo de válvulas, es la falta de control de caudal al presentarse una fuga en la red hidráulica, dado que se presenta una depresión aguas abajo y el piloto manda abrir el vástago provocando un mayor dispendio del recurso.

Método

Para el presente trabajo fue necesario analizar el funcionamiento de las válvulas hidráulicas automáticas, como sus fundamentos físicos para poder crear mediante el modelado de cada uno de los elementos que componen las válvulas hidráulicas automáticas usando sus principios físicos, se pretende simular con relativa precisión y generalidad el comportamiento real de dichas válvulas para una vez creado el modelo un control que nos permita cumplir los objetivos planteados.

Modelado del Sistema

Considerando la metodología de modelado sobre el análisis de pérdida de carga en un punto singular mostrado en la ecuación 1.

$$h_1 - h_2 = [K - (K * GA)^n] * \frac{(Q)^2}{2g} \text{ Ecuación 1.}$$

Por otro lado, un regulador proporcionará una respuesta determinada frente a las condiciones de límite existentes aguas arriba y aguas abajo del mismo. Dichas condiciones de límite son relaciones del tipo $h_1(Q)$ y $h_2(Q)$. Así, la ecuación de ajuste sería la curva característica de una bomba centrífuga carga- capacidad como se muestra en la ecuación 2.

$$h_1 = a * Q^2 + b * Q + c \text{ Ecuación 2.}$$

$$Q = K_Q \sqrt{h_1 - h_2} \text{ Ecuación 3.}$$

$$K_Q = \frac{1}{K_v^2} \text{ Ecuación 4.}$$

Tomando como hecho que la fuerza cinética de nuestro modelo será suministrada por una bomba en la ecuación 2 a , b y c son los coeficientes de ajuste de la curva característica de una bomba a velocidad nominal de giro. Y en la ecuación 3 donde el factor K_Q tiene la relación indicada en la ecuación 4 donde K_v es un valor que se obtiene experimentalmente o en la mayoría de los casos la entrega el fabricante.

El uso del modelo implica la resolución del sistema de ecuaciones definido por Ecuación 1, Ecuación 2 y Ecuación 3 donde hay que tomar en cuenta la función de perturbación en este modelo será llamada P3d la cual determinará si el modelo será en un régimen permanente o variable. El resultado de dicho modelo, para una VRP sin piloto será determinado con valores de K , ωn , K_v , a , b , c y P3d fijado, que consiste en un punto de funcionamiento (h_1 , h_2 , Q) en función de GA (grado de apertura de la válvula) que será el punto donde se ejecuta la acción de control.

Para fines del modelo usamos el valor de K con un valor designado por el usuario para simular la pérdida de carga de una manera directamente proporcional a la apertura de la válvula, ya que los valores de K se deben obtener de manera experimental y para los fines de este trabajo usaremos modelo es para proponer una estrategia de control.

Donde debemos tomar las siguientes consideraciones para nuestro Modelado:

- K_p nos permite ajustar el coeficiente de pérdida de carga en la Válvula Hidráulica la cual debe tener su valor máximo en su punto próximo al cierre total del opérculo y valor mínimo en su punto máximo de apertura del mismo
- W_n será una constante dentro del modelo de la válvula determinada por el área transversal de la válvula determinada en m^2
- Aire, burbujas, viscosidad y fricción sobre la línea son constantes físicas que son ignoradas en el modelo

- Temperatura en el líquido constante
- La posición de la tubería es horizontal la presión energía cinética aportada para el movimiento viene de bombeo

Validación del Modelo

Se puede tomar como válido el modelo desarrollado del sistema de pérdida de carga generada por la Apertura/Cierre de la válvula ya que analizando el comportamiento de sus variables principales P1, P2 y Q siguen la dinámica del sistema como en un circuito hidrométrico real donde los principales puntos a verificar son los siguientes parámetros

- P1 y P2 se igualan al tener la válvula abierta al 100% debido que no estamos generando una pérdida de carga al permitir el paso completo del fluido.
- P1 Tiene su valor más alto cuando está cerrado el paso en válvula por completo el paso del fluido generado un $Q=0$ por lo tanto nuestra línea de bombeo esta presurizando la línea hasta el límite de su capacidad.
- La pérdida de carga en P2 es casi en proporción al cierre de la válvula y P2 jamás es mayor a P1 en su estado permanente.
- Tenemos una aumento de Q entre el 50% y el 80% de apertura de la válvula, debido a que son los puntos donde el diferencial de presión es mayor, por la pérdida de carga generada en cierre de la válvula, por lo tanto aumenta la aceleración y el caudal, agregado a esto que el área de paso del líquido no se ha reducido lo suficiente como para afectar a la decremento del flujo.
- En el sistema contamos con P1 la cual es la carga generada por la bomba conocida como “aguas arriba” ; P2 es la presión conocida como “aguas abajo” generada inmediatamente después de la válvula producida por la pérdida de carga que genera el cierre de la válvula sobre P1, pero esto no es suficiente para simular al 100% la dinámica del modelo, es necesario incluir un factor de diseño el cual puede ser constante o variable en función al sistema que se quiera simular, este factor es conocido como “demanda del distrito hidrométrico” (valor en el modelo como Pd) ya con esta variable en el diseño se puede configurar la demanda, la cual se resta a P2 generando a P3. Esta presión haría el diferencial con P1 para genera el caudal que demanda el distrito hidrométrico.
- Si la demanda del distrito hidrométrico (Pd) es 0 aunque tengamos una apertura del 100% en la válvula, el caudal en el estado permanente será 0, solo tendremos el flujo generado por el diferencial de presión que había en un inicio hasta que se presurizara la línea por completo, P1 y P2 estarían con el mismo valor máximo de diseño de la bomba que en este caso es 87 mH20.

En base a esta información y de acuerdo a la experiencia que se tiene en la operación de válvula hidráulicas, se puede notar que los resultados de la simulación coinciden en tiempo y comportamiento con el sistema real de un distrito hidrométrico. Adicional a la validación de con la hoja de especificaciones de la válvula en el caudal. De modo que el modelo del sistema cumple con lo requerido para su empleo en el diseño de un controlador para el este sistema.

Controlador

De acuerdo a lo resultados obtenidos de la simulación y en base a lo planteado en nuestra hipótesis donde sabemos que el problema a resolver contaba con más de una variable en nuestro proceso, se ha propuesto la implementación de un algoritmo por variables de estado utilizando un vector proporcional por retroalimentación, la idea de un planteamiento de esta naturaleza es que tiene que ser capaz de correr en dispositivos que hay en sistemas SCADA's tales como PLC o UTR, en base a esto se buscó una solución que fuera capaz de tener el control de nuestras variable y su vez tuviera la factibilidad de ser programado en controladores de campo de bajo costo como los que están en el mercado. Con este fundamento se construyó el controlador sobre el modelo tal cual se ve en la Figura 5

Figura 5. Modelo con Controlador por medio de Vector Proporcional mediante una selección de Ganancias

COMENTARIOS FINALES

Se ha implementado un algoritmo de control en un sistema de simulación de pérdida de carga en una válvula reguladora de presión sin piloto, en un modelo de un distrito hidrométrico con el objetivo de optimizar el recurso hídrico mediante regulación entre presión aguas abajo y presión aguas. Esto tiene su importancia tanto en ahorros de costo operativo como la factibilidad de realizar redistribución de presiones y caudales en la red. En base a los resultados de la investigación se concluye que:

- A partir de las ecuaciones de pérdida de carga en un punto y en conjunto con ecuaciones del fabricante de la Válvula Reguladora de presión, se pudo desarrollar el modelo del sistema de pérdida de carga, pero para tener todas las condiciones óptimas para poder efectuar el control fue necesario incluir más subsistemas para contar con todas las variantes que influyen en un distrito hidrométrico, como una condición de límite de presión aguas arriba que puede ser una bomba o un tanque; un elemento que aplique la carga cinética del movimiento del agua en la red; esto con el fin de poder mesurar la optimización del P1 al momento de la reducción del caudal por medio de la regulación de la válvula. Asimismo se incluyeron dos subsistemas más para el cálculo del Caudal en la válvula y la operación de apertura y cierre de la válvula en respuesta a la señal de control. Se validó el modelo al revisar los puntos principales de su dinámica operativa, se realizó una estimación del factor de pérdida de carga de la válvula, ya que esa constante solo puede ser obtenida por medio de la experimentación y para fines de esta investigación una aproximación al comportamiento es suficiente para la implementación del control.
- Se implementó un algoritmo de control con variables de estado usando un vector proporcional con retroalimentación, el cual fue capaz de regular tanto el caudal del sistema como la presión de acuerdo a valor de las ganancias proporcionales, en este caso se demostró que siempre tiene que haber un valor mayor en una ganancia, para que el error de la variable sea el mínimo tal cual se mostró en la experimentación, es por eso que se optó por establecer criterios de control para cambiar valor de las ganancias por medio de un subsistema adicional llamado observador, que de acuerdo a la evolución de P3 va conmutar entre las ganancias que reducen el error prácticamente a 0 según sea el caso a controlar Q o P. Con dicho algoritmo se logró el control del caudal llevando su valor al punto de referencia, si las condiciones del sistema lo permiten y se evitó la sobre presión en la red durante horarios nocturnos de bajo consumo, logrando así un incremento en P1 de hasta el 12% de acuerdo al sistema configurado en la experimentación pudiendo incrementar este valor de ahorro solo con variando la referencia del caudal y presión.
- Se logró implementar un algoritmo de control que de acuerdo a nuestros objetivos debía ser posible programar en sistema SCADA, ya que en su mayoría estos sistemas cuenta con PLC o UTR con un nivel de programación medio (Escalera o Estructurado). Esto representaba que la resolución matemática fuera sencilla para poder hacer esto en campo, con una respuesta rápida; debido a esto se optó por un vector proporcional con retroalimentación y un observador con un control selectivo de las ganancias, dejando como base para un seguimiento del proyecto el llevar a cabo este control en un PLC o UTR para una Red de Telemetría.

Con lo anterior se demuestra que es posible un control para tener un suministro mínimo necesario en un distrito hidrométrico y a su vez tener un control de seguridad para evitar las sobrepresiones en la red y el despido de caudal en horas de bajo consumo, tal cual se ve en los resultados de la experimentación. Todo esto controlando la pérdida de carga y estableciendo criterios de control para nuestro observador.

REFERENCIAS

¹ JEAN FRANÇOIS DOSSIER Gestión Integrada de los recursos hídricos: nuevas orientaciones para preparar el futuro Oficina Internacional del Agua 2003.

² JULIA CARABIAS, ROSALBA LANDA Agua, medio ambiente y sociedad, hacia la gestión de los recursos hídricos en México Investigación Gladis Torres Fuente: Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI).

³ COMISION NACIONAL DEL AGUA Situación del subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. México Edición 2012.

⁴ COMISION NACIONAL DEL AGUA Agenda del Agua 2030 México Edición 2012.

⁵ BERMAD WW-720 Válvula reductora de presión Modelo 720 PC7WS20 09 México.