



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Estudios Superiores Aragón

“DETECCIÓN DE FUGAS EN LÍNEAS DE CONDUCCIÓN MEDIANTE
EL EMPLEO DE COLONIAS DE HORMIGAS”

T E S I S

QUE PARA OBTENER TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A:

JOSÉ JUAN OSORIO MÉNDEZ

DIRECTOR DE TESIS:

M. en I. MARTÍN RUBÉN JIMÉNEZ MAGAÑA



México 2015

Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ARAGÓN

JEFATURA DE CARRERA DE
INGENIERÍA CIVIL

OFICIO No. FESAR/JCIC/439/2014.

ASUNTO: Sínodo.

LIC. JOSÉ GUADALUPE PIÑA OROZCO,
SECRETARIO ACADÉMICO,
P R E S E N T E.

Por medio del presente me permito relacionar los nombres de los profesores que sugiero integren el Sínodo del Examen Profesional del C. JOSÉ JUAN OSORIO MÉNDEZ, con Número de Cuenta: 41002763-3, con el tema de Tesis: "DETECCIÓN DE FUGAS EN LÍNEAS DE CONDUCCIÓN MEDIANTE EL EMPLEO DE COLONIAS DE HORMIGAS".

PRESIDENTE:	ING. MARIDEL ZÁRATE MORALES.
VOCAL:	M. en I. MARTÍN ORTIZ LEÓN.
SECRETARIO:	M. en I. MARTÍN RUBÉN JIMÉNEZ MAGAÑA.
SUPLENTE:	M. en I. MARIO SOSA RODRÍGUEZ
SUPLENTE:	M. en I. JOSÉ ANTONIO DIMAS CHORA

Quiero subrayar que el director de tesis es el M. en I. Martín Rubén Jiménez Magaña, el cual está incluido en base a lo que reza el Reglamento de Exámenes Profesionales de esta Facultad.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Netzahualcóyotl, Estado de México, 24 de octubre del 2014.

EL JEFE DE CARRERA

M. en I. MARIO SOSA RODRÍGUEZ



c.c.p. Lic. Ma. Teresa Luna Sánchez.- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
M. en I. José Antonio Dimas Chora.- Secretario Técnico de Ingeniería Civil.
M. en I. Martín Rubén Jiménez Magaña.- Director de Tesis.
Comité de Tesis.
Interesado.
MSR/mlev**

Agradecimientos

A Dios

Por permitirme culminar de la mejor manera esta etapa en mi vida y mostrarme el camino cuando más incierto se veía.

A la UNAM

Por brindarme la oportunidad y la confianza de alcanzar mis metas. Por darme las herramientas necesarias para enfrentar cualquier reto.

A la Facultad de Estudios Superiores Aragón

Por darme los mejores cuatro años y medio en la carrera de Ingeniería Civil.

A mis Profesores

Por ser parte fundamental en mi formación como ingeniero. Por darme la inspiración y la motivación de seguir preparándome.

Al M. en I. Martín Rubén Jiménez Magaña

Por su guía, paciencia y dedicación en este trabajo. Por ser una persona clave en mi vida.

Al M. en C. Luis Pomposo Viguera Muñoz

Por ser un profesor comprometido en el área de la hidráulica y compartir sus conocimientos con las nuevas generaciones de ingenieros.

Dedicatoria

A mi Padre

Por no desamparar a su familia estando lejos y por sacrificar tantos momentos especiales sin los tuyos.

A mi Madre

Por dedicar tiempo, alma y corazón incondicionalmente a la formación de sus hijos. Por ser el motor y la fuerza más fuerte que existe en mi vida. Te amo mamá.

A Fabiola

Por ser una linda, especial y buena hermana. Porque sin cruzar palabras sabes el significado de tu trascendencia en mí. Te amo chuparra.

A mis amigos

Bruno, Andrés, Daniel, Edson, Amauri, Mauricio, Atenea, Pamela, Mónica, Liliana, Erika, Luis, Adrián, Josvac, Anahí, Jessica, Adriana, Ever, Jennifer, Andrea, Michel, Abel, Octavio, Arturo, Oswaldo, Benjamín, Orlando, José Luis, Víctor, Keer, Emmanuel, Marco, Daniel, Juan, César, Oscar, Blanca, Ilse, Gabriela, Berenice, Olivia, Itzel, Lilian, Carolina, Paola, Efraín, Raúl, Erandi, Yesme, Paulina, Yanet, Omar, Luis Alanís, Daniel Sánchez, Jair, Antonio y a los que me faltaron por mencionar. Les agradezco su apoyo y la fe depositada en mí. Gracias totales.

ÍNDICE

Introducción	1
---------------------	----------

Capítulo

1. Generalidades sobre el funcionamiento hidráulico de líneas de conducción en flujo permanente; ecuaciones fundamentales de la hidráulica para el análisis del flujo en líneas de conducción	3
--	----------

1.1 Línea de conducción	4
--------------------------------	----------

1.1.1 Accesorios	5
------------------	---

1.1.1.1 Válvulas de seccionamiento	5
------------------------------------	---

1.1.1.2 Válvulas de flotador y altitud	7
--	---

1.1.1.3 Válvulas de admisión y expulsión de aire	8
--	---

1.1.1.4 Válvulas de retención	9
-------------------------------	---

1.1.1.5 Válvula de alivio de presión	12
--------------------------------------	----

1.1.1.6 Registros	13
-------------------	----

1.1.1.7 Desagües	14
------------------	----

1.1.1.8 Juntas	14
----------------	----

1.1.1.9 Estaciones reductoras de presión	15
--	----

1.1.2 Instalación de válvulas de admisión y expulsión de aires y desagües	16
---	----

1.1.3 Selección del material de la tubería	17
--	----

1.2 Información general	19
--------------------------------	-----------

1.3 Diseño geométrico	19
------------------------------	-----------

1.4 Diseño hidráulico	20
------------------------------	-----------

1.4.1 Ecuaciones para flujo permanente	21
--	----

1.4.1.1 Flujo permanente	22
--------------------------	----

1.4.1.2 Ecuación de continuidad	23
---------------------------------	----

1.4.1.3 Ecuación de la energía	25
--------------------------------	----

1.4.1.4 Ecuación de impulso y cantidad de movimiento	31
--	----

1.4.2 Pérdidas de energía por fricción	31
--	----

1.4.2.1 Hazen – Williams	32
--------------------------	----

1.4.2.2	Manning	33
1.4.2.3	Darcy - Weisbach	34
1.4.2.4	Swamee – Jain	35
1.4.3	Perdidas locales	35
1.4.4	Conducción por gravedad	36
1.4.5	Conducción por bombeo	37
1.4.6	Velocidades permisibles	38
1.5	Resumen	38

Capítulo

2.	<i>Estado del arte</i>	39
-----------	-------------------------------	-----------

Capítulo

3.	<i>Fundamentos sobre las Colonias de Hormigas (ACO, Ant Colony Optimization)</i>	45
-----------	---	-----------

3.1	Optimización de Colonias de Hormigas	45
3.2	Revisión de bibliografía	49
3.2.1	Depósitos de operación óptima	49
3.2.2	Monitoreo de Agua Subterránea a largo plazo (LTM)	50
3.2.3	Aplicaciones en recursos hídricos	50
3.2.4	Sistemas de distribución de agua	51
3.3	Investigaciones futuras	58
	Resumen	60

Capítulo

4.	<i>Implementación del ACO para localización de fugas en líneas de conducción. Ejemplo de aplicación. Análisis de resultados.</i>	61
-----------	---	-----------

Capítulo

5.	<i>Conclusiones y futuras aplicaciones</i>	69
-----------	---	-----------

	REFERENCIAS	71
--	--------------------	-----------

	ANEXO A	74
--	----------------	-----------

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. VÁLVULA DE MARIPOSA.....	6
FIGURA 2. VÁLVULA DE COMPUERTA.....	6
FIGURA 3. VÁLVULA DE FLOTADOR.....	7
FIGURA 4. VÁLVULA DE ALTITUD.....	8
FIGURA 5. VÁLVULA DE ADMISIÓN Y EXPULSIÓN DE AIRE.....	9
FIGURA 6. VÁLVULA CHECK O DE COLUMPIO.....	10
FIGURA 7. VÁLVULA DUO-CHECK.....	11
FIGURA 8. VÁLVULA CHECK SILENCIOSA.....	11
FIGURA 9. VÁLVULA ROTO - CHECK.....	11
FIGURA 10. VÁLVULA DE ALIVIO.....	13
FIGURA 11. REGISTRO.....	13
FIGURA 12. DESAGÜES.....	14
FIGURA 13. JUNTAS.....	15
FIGURA 14. TUBERÍA DE PVC.....	18
FIGURA 15. TUBERÍA DE HIERRO DÚCTIL.....	18
FIGURA 16. ECUACIÓN DE CONTINUIDAD.....	25
FIGURA 17. ECUACIÓN DE LA ENERGÍA APLICADA EN UN TRAMO DE RIO.....	30
FIGURA 18. ESQUEMA DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE.....	36
FIGURA 19. BOMBEO DE AGUA PARA GENERAR ENERGÍA.....	37
FIGURA 20. REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA DE AGUA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE COLONIA DE HORMIGAS (OSTFELD AND TUBALTZEV, 2008, WITH PERMISSION FROM THE AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE)).....	54
FIGURA 21. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA OPTIMIZACIÓN DE COLONIA DE HORMIGAS (OSTFELD AND TUBALTZEV, 2008, WITH PERMISSION FROM THE AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE)).....	57
FIGURA 22. DIAGRAMA DEL EJEMPLO DE LA LÍNEA DE CONDUCCIÓN CON EPANET.....	62
FIGURA 23 IMPRESIÓN DE RESULTADOS, MATLAB R2014B. DE CADA UNA DE LAS ITERACIONES EN EL ACO (ANT COLONY OPTIMIZATION).....	67
FIGURA 24. ACERCAMIENTO EN LA ITERACIÓN 7, DONDE SE PERCIBE EL EQUILIBRIO DE LA PRESIÓN, MATLAB R2014B.....	68

Introducción

En el presente trabajo se elaboró una investigación sobre el funcionamiento del ACO (Ant Colony Optimization) en la detección de fugas de agua potable a lo largo de una línea de conducción, apoyándose principalmente del programa MATLAB (MATrix LABoraty), con el cual se construyó el algoritmo que simula el comportamiento del modelo matemático ACO. Previamente a la utilización de este programa, se consultó EPANET ((U.S. Environmental Protection Agency), para visualizar la conducta de la línea de conducción en diversos escenarios bajo condiciones ideales y al presentar una fuga.

El desarrollo urbano está en constante crecimiento provocando la demanda de los servicios domiciliarios, sanitarios, productivos y económicos, por ende es indispensable tener un manejo adecuado de los recursos hídricos debido a la inevitable escases de ellos. Las fugas presentes a lo largo de una línea de conducción no es un tema ajeno a lo antes mencionado ya que la identificación de ellas es muy tardía causando la pérdida exuberante de agua. Para la detección inmediata de las fugas se ha recurrido a la instrumentación especializada, pero no siempre es factible debido al costo, por ello se ha recurrido a la aplicación de modelos matemáticos y al uso de software altamente equipado.

El documento se presenta en cinco capítulos. Los cuales abordan la información necesaria para el análisis de resultados y desarrollo posterior del tema de investigación.

En el capítulo uno se define el concepto de línea de conducción, además de hacer mención en las partes que la componen, tipo de material, consideraciones de diseño e instalación y ecuaciones empleadas en este tipo de proyectos.

El capítulo dos abarca la información relacionada con los trabajos de investigación e instrumentación hechos para la detección de fugas de agua potable en una línea conducción.

El tercer capítulo se habla de los fundamentos de la optimización de colonias de hormigas ACO (Ant Colony Optimization) en el empleo de los sistemas de abastecimientos de agua potable.

Dentro del capítulo cuatro se muestra la implementación de las formulas en un ejemplo de aplicación, descritas en el capítulo de fundamentos. El algoritmo del ACO se construye con ayuda de MATLAB ya que facilita los cálculos y el análisis de resultados mediante la impresión de gráficas.

Por ultimo tenemos el capítulo cinco en donde se hace mención de las futuras aplicaciones del ACO en la detección de fugas en oleoductos, así como también en la detección de tomas clandestinas.

Capítulo

1. Generalidades sobre el funcionamiento hidráulico de líneas de conducción en flujo permanente; ecuaciones fundamentales de la hidráulica para el análisis del flujo en líneas de conducción

La importancia por conocer el significado de una línea de conducción es vital, al igual que las partes que la conforman en su funcionamiento. Por ello en este capítulo se muestran algunas definiciones de organismos especializados en el área de la hidráulica, procurando atender el transporte del agua en condiciones óptimas de calidad, cantidad y presión.

Además se muestra la información general que se utiliza para el diseño geométrico e hidráulico de una línea de conducción, donde influirá el tipo de conducción, material de los tubos, tipo de terreno, cantidad de agua por disponible, generación de pérdidas por fricción o locales.

1.1 Línea de conducción

Una línea de conducción es parte del sistema que lleva agua, desde un sitio de conducción, hasta un tanque de regulación o planta de potabilización. Su capacidad se calcula mediante el uso del gasto máximo diario o con el que sea conveniente por parte de la fuente de abastecimiento.

Las líneas de conducción deben cumplir con ser de fácil inspección, paralelas a un camino, en caso contrario se analizara la alternativa de construir un camino de acceso, respetando el derecho de vía correspondiente a la línea de conducción. Se valorará que el engrosamiento en costo de éste, se verá compensado en escatimar los gastos de conservación de la conducción, además se podrá detectar y corregir las fugas o los daños en las tuberías (CNA, 1992).

En un sistema de abastecimiento de agua potable, se le considera línea de conducción al conjunto de tuberías integradas y dispositivos de control, que ayudan en el transporte del agua. Este transporte se hace en condiciones adecuadas de calidad, cantidad y presión, desde el lugar de abastecimiento, hasta el sitio de entrega de la población que lo requiere (SAGARPA, 2012).

Una definición similar pero con variantes, la podemos encontrar en el RCDF (2012), en donde se menciona que dentro de un sistema de abastecimiento de agua potable, se le define línea de conducción a la fusión complementada de tuberías, estaciones de bombeo, dispositivos de control y obras de arte, las cuales autorizan el acceso de agua a una fuente de abastecimiento, hasta un sitio de donde será distribuida en condiciones adecuadas de calidad, cantidad y presión.

Por parte de la CNA (1992) encontramos que denomina línea de conducción al grupo de ductos, estructuras de operación, de apoyo y exclusivas, destinado a conducir el agua desde la fuente de abastecimiento hasta el sitio de entrega.

Es importante saber que la fuente de abastecimiento por lo regular no se encuentra cerca de la población y a veces es necesario transportar el agua desde

distancias considerablemente largas. Por ello es necesario la construcción de líneas de conducción, que implican en su diseño aspectos como: calidad del agua, fragosidad de terreno, desnivel de la fuente con respecto a la población, y a las cargas que deberá soportar la tubería en su recorrido. Es necesario atender cada uno de estos aspectos con la cuidadosa selección de materiales y dispositivos de protección (IMTA, Recomendaciones de construcción, 1994).

1.1.1 Accesorios

Los accesorios en un línea de conducción por los regular son instalados para ayudar a aislar y drenar secciones de tuberías, ya que es de gran importancia hacer pruebas, inspecciones, limpieza, reparación y hasta procurar la seguridad de la instalación hidráulica (CNA, 1992).

1.1.1.1 Válvulas de seccionamiento

Una válvula de seccionamiento es utilizada para mantener un control del flujo en el interior del tubo, ya sea para impedir el transcurso del agua o disminuir el gasto a un valor demandado (CNA, 1997).

La CNA (1992) afirma que se debe analizar la conveniencia de instalar válvulas de seccionamiento en las líneas de conducción que admitan confinar tiradas de red, para ejecución y manutención, sin necesidad de vaciar la totalidad de la instalación.

Comúnmente se utilizan válvulas de mariposa para diámetros grandes y bajas presiones, en caso contrario se hace uso de las válvulas de compuerta.

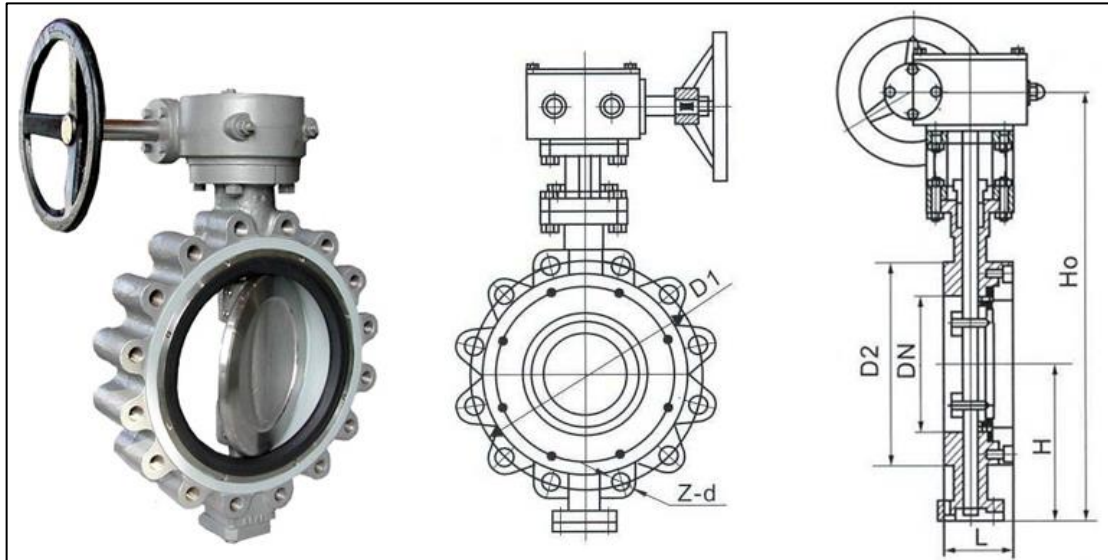


Figura 1. Válvula de mariposa

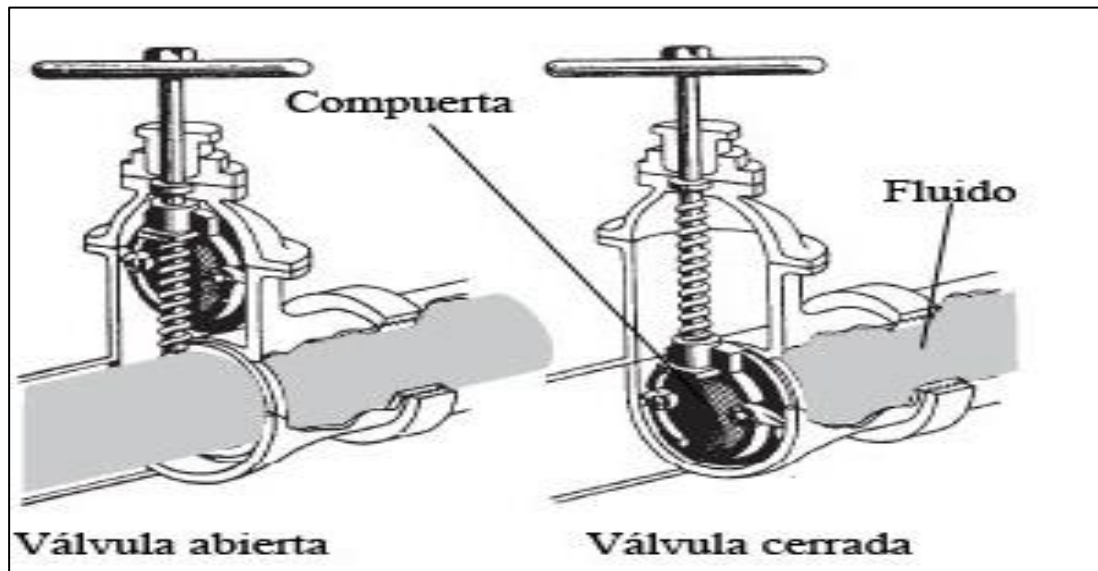


Figura 2. Válvula de compuerta

1.1.1.2 Válvulas de flotador y altitud

Por lo regular se utilizan las válvulas de flotador cuando se tiene la conexión de una línea de conducción hacia un tanque de regulación.

Estas válvulas de flotador controlan el nivel máximo que se tiene en el tanque, siendo activadas directamente por un flotador. Las válvulas de este tipo pueden ser de acción directa o indirecta. Cuando es de acción directa es colocada a una elevación próxima al nivel máximo del agua, junto al tanque. Son recomendadas para diámetros de descarga de hasta 200 mm. Sin embargo si la válvula es de acción indirecta es colocada a una elevación inferior y en el exterior del tanque.

También podemos manejar las válvulas de altitud que son una variación de las anteriores válvulas. Se colocan a una elevación inferior al nivel máximo del agua y cercanas al depósito, manipulan el llenado del mismo por medio de un piloto hidromecánico, el cual sustituye al flotador, operan primordialmente con la presión hidráulica que aporta una línea de diámetro pequeño, ligada al tanque (CNA, 1992).



Figura 3. Válvula de flotador



Figura 4. Válvula de altitud

1.1.1.3 Válvulas de admisión y expulsión de aire

La instalación de válvulas de admisión y expulsión de aire se hace en los puntos elevados de la línea a presión. El funcionamiento es automático al momento de remover el aire desplazado por el llenado de la línea, aunque se puede presentar la acumulación en puntos específicos.

Otro propósito de las válvulas automáticas es permitir la admisión de aire en el sistema de la tubería, pues esto ayuda a evitar el colapso debido a una presión negativa.

El diámetro adecuado de la válvula dependerá del conducto y de las velocidades que se utilicen para vaciar la conducción, por lo consiguiente se debe determinar la cantidad de gasto de aire que se admita o se expulse.

Las válvulas eliminadoras de aire se agregan a este conjunto, las cuales acceden a eliminar pequeñas proporciones de aire alojadas en los puntos más elevados de la línea (CNA, 1992).



Figura 5. Válvula de admisión y expulsión de aire

1.1.1.4 Válvulas de retención

Este tipo de válvulas son esenciales para evitar fenómenos transitorios, producidos por alguna suspensión de energía programada o imprevista. Cuando esto ocurre la masa de agua actúa como un flujo descendente hacia el equipo de bombeo, provocando daños severos. Por ello la importancia de usar estas válvulas para interrumpir el flujo inverso y proteger el equipo.

La CNA (1992) hace la recomendación de algunas válvulas de retención que pueden ser utilizadas en proyectos de líneas de conducción.

- i. Válvula Check tradicional, comúnmente llamada de columpio. Es una válvula de transpaso externo y cierre con asiento de hule o metal, que cuenta con una cámara amortiguadora cuya función es permitir el flujo en una dirección y cerrar herméticamente cuando la presión en el lado de la descarga es mayor que del lado de la entrada.



Figura 6. Válvula check o de columpio

- ii. Válvula duo-check. Es una válvula para uso general que desarrolla el trabajo de cualquier válvula de retención convencional frente a la tradicional es más liviana y de menor tamaño. A diferencia de las válvulas tradicionales, divide la abertura de la válvula por la mitad, la zona sin apoyo del plato se reduce, disminuyendo el peso respecto a la lenteja convencional, para las pérdidas de carga son relativamente mayores que en el anterior.



Figura 7. Válvula duo-check

- iii. Válvula Check silenciosa. Su característica principal es efectuar un cierre más o menos lento con lo cual se consigue prolongar la vida de la válvula y casi eliminar el ruido que producen las otras.



Figura 8. Válvula check silenciosa

- iv. Válvula Roto - check. Su operación es semejante a la válvula check tradicional, teniendo la ventaja de efectuar un cierre lento y hermético además de que se puede instalar un dispositivo externo para controlar los tiempos de apertura y cierre.



Figura 9. Válvula roto - check

1.1.1.5 Válvula de alivio de presión

Este tipo de accesorio es utilizado para mantener integro el equipo de bombeo, tuberías e instrumentos contra un aumento de presión generado por el arranque o paro del equipo de bombeo. La válvula de alivio permite la salida del flujo a la atmosfera cuando la presión en el interior de la tubería se sobrepasa en un límite establecido.

En la apertura de la válvula de alivio se encuentra una válvula solenoide, la cual al interrumpirse el suministro eléctrico, da paso a un circuito hidráulico o neumático que abre la válvula momentos antes de ocurrir el ascenso de presión.

En el interior de la válvula se localiza un elemento actuando, hecho por un pistón, el cual debido a su posición ayuda al funcionamiento hidráulico del mismo. La manipulación de este pistón se hace por medio de una válvula piloto calibrada, que funciona con una presión determinada, ya que es una válvula de aguja de presión para pequeños flujos. El piloto de control de la válvula puede ser hidráulico, eléctrico o ambos.

Las válvulas de alivio de presión más usuales son las de pistón y las de diafragma, se recomienda que tengan ambas clases de control.

Al definir el uso de válvulas de alivio, su diámetro se determinará en función del gasto de escurrimiento en la red a la que se conecta y de las presiones creadas por el golpe de ariete.

La localización de estas válvulas se hará después de los elementos de control o al inicio de la tubería de descarga. También se pueden colocar en cada una de las bombas del sistema, entre check y la de seccionamiento, por medio de una "T" de acero o fierro fundido (CNA, 1992).



Figura 10. Válvula de alivio

1.1.1.6 Registros

Los registros son relevantes durante la construcción, permitiendo la inspección y resarcimientos. Cuando se cuenta con grandes orificios, la separación de los registros varia entre 250 a 500 metros (CNA, 1992).



Figura 11. Registro

1.1.1.7 Desagües

Estos elementos permiten hacer limpieza en la tubería durante su construcción, además de desaguarla en caso de requerir mantenimiento, se debe tener en cuenta la instalación de válvulas de seccionamiento en las partes bajas. Si la línea es de longitud y diámetro considerable, se analizará la separación entre desagües, tomando en cuenta el tiempo indispensable para vaciarla (CNA, 1992).



Figura 12. Desagües

1.1.1.8 Juntas

Es importante establecer los tipos de juntas que se emplearan en el proyecto, considerando los trabajos externos e internos que se presenten en la línea, tipo de terreno, agresividad del suelo. La CNA (1992) recomienda utilizar juntas en los siguientes casos

- i. Para absorber movimientos diferenciales de la tubería (en la conexión con una estructura, en caso de sismos, etc)

- ii. Para absorber movimientos en la tubería por efectos de la temperatura
- iii. Para unir la tubería del mismo o de diferente material
- iv. Para unir tuberías con piezas especiales y válvulas



Figura 13. Juntas

1.1.1.9 Estaciones reductoras de presión

En caso de que el perfil del terreno presente depresiones bastante pronunciadas, sería algo útil y económico el colocar depósitos intermedios, conocidos como cajas rompedoras de presión, su objetivo es fragmentar la línea piezométrica, causando la disminución en la altura de presión, estableciendo un nuevo nivel estático. Gracias a este accesorio se puede escoger una tubería de menor espesor que implica un menor costo.

Esta estación reductora de presión puede emplearse para proteger a las tuberías, válvulas y accesorios de tubería de las altas presiones, así mismo como de mantener las presiones máximas de servicio dentro de una red de distribución (SAGARPA, 2012). Se recomienda que las presión estática máxima no sea mayor al

80 % de la presión nominal de trabajo de las tuberías a utilizarse, se mantendrá un equilibrio en las presiones de servicio de los accesorios y válvulas a emplearse (SAGARPA, 2012).

1.1.2 Instalación de válvulas de admisión y expulsión de aires y desagües

Cuando se pone en funcionamiento la conducción es necesario expulsar el aire de la tubería para permitir que el tubo pueda llenarse de agua. En ocasiones esto no es necesario, pues se mantienen llena la tubería con ayuda del perfil.

Para lograr el llenado y el vaciado de la tubería se emplean las válvulas de admisión y expulsión de aire, estas hacen la doble función de expulsar el aire cuando la tubería se llena o admitir aire cuando se vacía (SAGARPA, 2012).

Se recomienda tener especial atención en la topografía de un terreno, ya que de ser accidentada se colocarán válvulas de admisión y expulsión de aire en las partes más elevadas del perfil, en caso contrario en que la topografía sea regular, se ubicarán cada 1500 metros como máximo y en los puntos más altos del perfil de la conducción (RCDF, 2012). Sin embargo SAGARPA (2012) recomienda colocar válvulas eliminadoras de aire y válvulas de admisión y expulsión de aire en todos los puntos elevados de la conducción y en los tramos largos sensiblemente planos a distancias de 400 a 800 m.

En longitudes de terreno con pendientes altas, ascendente o descendente, se debe estudiar la conveniencia de situar válvulas de admisión o expulsión de aire en puntos intermedios.

Los desagües suelen utilizarse en el vaciado de la conducción, en caso de roturas hechas por su operación, suelen colocarse en los puntos más bajos del perfil (RCDF, 2012).

1.1.3 Selección del material de la tubería

En los sistemas de agua potable los materiales con mayor uso para la fabricación de tuberías son: Fierro Galvanizado (FoGo), fibrocemento, concreto presforzado, cloruro de polivinilo (PVC), hierro dúctil y polietileno de alta densidad (SAGARPA, 2012).

El RCDF (2012), recomienda hacer la selección del material de la tubería en base a las especificaciones establecidas del material y las condiciones de los códigos aceptables, estándares y dimensionales. Tomando en cuenta los requerimientos de servicio, y parámetros tales como: resistencia mecánica, resistencia a la corrosión, facilidad de instalación, costo de suministro e instalación, costo de operación y mantenimiento, y vida útil de la tubería, considerando la capacidad hidráulica de la conducción.

Las conducciones con gastos pequeños y con diámetro menor o igual a 0.15 m, utilizan tuberías hechas a base de cloruro de polivinilo (PVC), sin embargo si los diámetros son mayores a 0.15 m y con presiones bajas de 14 kg/cm^2 , se hará uso de tuberías de asbesto – cemento. Una excepción más, ocurre cuando se tiene un diámetro mayor a los 0.60 m en la conducción, con presiones mayores a los 10 kg/cm^2 , el ingeniero proyectista tendrá el juicio para elegir tuberías de asbesto – cemento, concreto presforzado o acero. Para conducciones con presiones superiores a 14 kg/cm^2 , se analizará entre usar tubería de concreto presforzado o acero. El criterio económico estará determinado por el tipo de tubería, su diámetro y el espesor (SAGARPA, 2012).



Figura 14. Tubería de PVC



Figura 15. Tubería de hierro dúctil

1.2 Información general

El RCDF (2012) menciona que dentro del diseño de una línea de conducción se debe tener en cuenta el uso de planos topográficos, en donde se pueda localizar plantas y elevaciones; mediante una selección de alternativas se definirá la ruta más conveniente para efectuar el levantamiento. El proyectista encargado de la obra puede utilizar la información existente en la zona, como:

- Mapas topográficos, hidrográficos, geológicos, etcétera.
- Cartas de uso, normalmente editadas por el Instituto Nacional de Estadística, Geográfica e Información (INEGI). Estas cartas permitirán definir posibles afectaciones sobre el derecho de vía propuesto.
- Fotografías aéreas, cuya toma podría ser conveniente en caso de que no se cuente con mapas o cartas.

1.3 Diseño geométrico

Establecer el trazo de una línea de conducción lleva a combinar aspectos económicos y de funcionamiento hidráulico, teniendo en cuenta que el segundo aspecto tiene que ver con el diseño hidráulico, que se describirá más adelante.

Para la elección más conveniente de una línea de conducción, es necesario contar con un proceso de selección que ayude a elegir la propuesta más adecuada para el proyecto. Teniendo en consideración que cada una de las alternativas deberá ser evaluada; tomando en primera instancia la negociación de las afectaciones a terceros por el derecho de paso de la conducción. En cada una de estas propuestas se valorará el costo total del sistema, incluyendo las estructuras necesarias para su operación, mantenimiento y la eficiencia en el funcionamiento hidráulico.

Por lo general se procurará que los trazos estén ubicados por calles, derechos de vía de carretera, líneas de transmisión eléctrica, líneas de ferrocarriles, veredas, o límites de predios.

La tubería deberá seguir el perfil del terreno. Cuidando que si la misma se encuentra en zanja, la excavación en roca sea la mínima. La ubicación tendrá que ser la más favorable, por el costo de la construcción a las presiones hidráulicas resultantes. El cuidado de la línea del gradiente hidráulico es de gran importancia, ya que mientras la conducción se mantenga cerca a esta línea, la presión será menor en los tubos; teniendo esta solicitud se puede tener un ahorro en la tubería. Las presiones altas en la línea del gradiente hidráulico se podrán mermar con la instalación de almacenamientos auxiliares, un ejemplo de ellos son los embalses y las cajas rompedoras de presión. La línea de conducción vista en planta, buscare que el trazo de la tubería sea lo más recto posible (RCDF, 2012).

1.4 *Diseño hidráulico*

Dentro del diseño hidráulico se hace el análisis a lo largo de la línea de conducción, utilizando las ecuaciones a flujo permanente. A esto se le incluye las pérdidas por fricción del material y las pérdidas locales debido a los cambios de dirección del flujo, sin embargo el diseño cambia si la conducción es por gravedad o bombeo, dependiendo de las condiciones del terreno, la población o especificaciones del proyectista. Las velocidades recomendables en los diseños hidráulicos dependen del tipo de material, con la intención de evitar la erosión, la cual dificulta el transporte del líquido.

El problema de optimización del diseño de nuevos sistemas de distribución de agua es abiertamente definido como la selección de la combinación de menor costo de sus componentes de forma que queden satisfechas las demandas de agua y las restricciones de diseño, incluso bajo la ocurrencia de determinadas situaciones de fallo, garantizando un adecuado grado de fiabilidad al sistema. En la práctica esta

optimización puede tomar muchas formas debido a que son varios componentes que pueden encontrarse en un sistema de distribución y son diversos además los criterios de funcionamiento y restricciones de diseño para dichos sistemas (Montalvo et al., 2007).

1.4.1 Ecuaciones para flujo permanente

Cuando se analizan los problemas hidráulicos ya sea en conductos a superficie libre (canales) o conductos a presión (tuberías), es de gran importancia saber cuáles son las ecuaciones fundamentales de la hidráulica que ayudan en el análisis de ellos. Estas ecuaciones consideran la capacidad de un flujo para transportar materia y el mecanismo por el cual cambian sus propiedades de un sitio a otro. Estableciendo como axioma que en los fluidos se satisfagan los principios básicos de la mecánica del medio continuo (Sotelo, 1974).

- a) Conservación de la materia (principio de continuidad).
- b) Segunda ley de Newton (impulso y cantidad de movimiento).
- c) Conservación de la energía (primera ley de la termodinámica).
- d) Segunda ley de la termodinámica.

Para el análisis de flujo en líneas de conducción se hará uso de las tres primeras ecuaciones, ya que la cuarta es muy poco utilizada en flujos líquidos.

El principio de conservación de la materia o del transporte de masa permite derivar la primera ecuación fundamental, conocida comúnmente como ecuación de continuidad. Se toman diferentes consideraciones respecto a esta, dadas por el tipo de flujo que se maneje o las hipótesis que se establezcan.

En el inciso “c)” se instaure la relación que existe entre las fuerzas resultantes que actúan en una partícula y el cambio del tiempo en la cantidad de movimiento. Dependiendo de su forma de aplicación se pueden obtener dos ecuaciones. La

primera llamada de la energía; calcula las transformaciones de energía mecánica dentro de un flujo y las disipaciones de energía calorífica. La otra sería la del impulso y cantidad de movimiento, determina las fuerzas que se producen en un flujo, siempre y cuando se conozca la variación de la cantidad de movimiento y las restantes fuerzas.

En la ecuación de conservación de energía, relaciona la presión, densidad, temperatura, velocidad, elevación trabajo mecánico y cantidad de calor dirigido al flujo. Se pueden hacer reducciones significativas al momento de analizar un flujo de líquidos (Sotelo, 1974).

1.4.1.1 Flujo permanente

Sotelo (1974) indica que un flujo será permanente si las características en un punto se mantienen continuas en cualquier momento. Dicho de otra forma, si las variaciones entre ellas son poco permisibles respecto a sus valores medios y éstos cumplen con no variar respecto al tiempo.

Por parte de Ranauld (1969) encontramos una definición similar a la anterior para describir al flujo permanente. El cual se presenta en un punto cualquiera, en donde la velocidad de las sucesivas partículas que ocupan a ese punto en los sucesivos momentos es la misma, por ende la velocidad es constante respecto al tiempo, aunque puede variar dependiendo la ubicación del punto.

En la mayoría de los problemas técnicos prácticos se da por sentado condiciones de flujo permanente. Debido a que el flujo permanente resulta ser simple en su análisis, ya que el tiempo resultaría un desafío como variable independiente. Sin embargo en la práctica el flujo permanente es una excepción más que una regla (Sotelo, 1974).

1.4.1.2 Ecuación de continuidad

En la ley de conservación de la masa se postula que está no se puede crear ni destruir; originando así la ecuación de continuidad, la que establece que dentro de un sistema hidráulico se mantendrá un balance en el gasto de entrada, el volumen que se almacena y el gasto de salida. Considerando todas las cantidades volumétricas. De la siguiente forma matemática se puede expresar la ecuación de continuidad (Simon, 1986).

$$Q_{ent} - Q_{sal} = \text{cambio en el almacenamiento}$$

En el caso de no ser permisible el cambio en el almacenamiento, como cuando se tiene una tubería llena, el lado derecho de la ecuación se reducirá a cero.

$$Q_{ent} - Q_{sal} = 0$$

Que el lado derecho de la ecuación se reduzca a cero, significa que el gasto que entra es igual al gasto que sale (Simon, 1960).

Así mismo de acuerdo al principio de conservación de la materia, se define esta expresión como el fluido que entra por unidad de tiempo a un volumen específico de un fluido, una parte del mismo se queda almacenada en el interior y lo demás sale del volumen. Si el volumen en estudio es de forma y magnitud constantes, el almacenaje será indefinido (Sotelo, 1974).

Por parte de Ranald (1969) encontramos que la ecuación de continuidad es una consecuencia del principio de conservación de la masa. Para un flujo

permanente, la masa de fluido que recorre cualquier sección de una corriente de fluido, por unidad de tiempo, es constante. La relación es la siguiente

$$Q = A_1 * V_1 = A_2 * V_2 = constante ; en \frac{m^3}{seg}$$

En donde

- Q= Gasto, en m³/seg
- A₁= Área en la sección uno en m²
- V₁= Velocidad media en la sección uno, en m/seg
- A₂= Área en la sección dos, en m²
- V₂= Velocidad media en la sección dos, en m/seg

Por parte de cada uno de los autores encontramos definiciones que nos ayudan a complementar el concepto de la continuidad, y para fines prácticos mencionaremos lo que se encuentra en el RCDF (2012). En el cual se establece la invariabilidad del gasto, en cada una de las secciones del conducto.

$$Q = V * A$$

En donde

- Q= Gasto, en m³/seg
- V= Velocidad media de flujo, en m/seg
- A= Es el área de la sección transversal del conducto, en m²

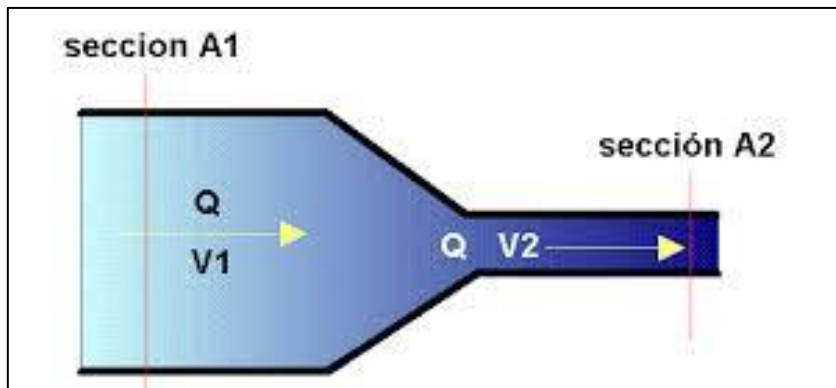


Figura 16. Ecuación de continuidad

1.4.1.3 Ecuación de la energía

La ley de conservación de la energía forma parte de un concepto dentro del área de física, en donde se establece que la energía no puede perderse, aunque se transforme en otras estructuras. Es decir, el axioma pretende que en un sistema hidráulico la suma de todas las energías es una constante y se presenta de la siguiente manera (Simon, 1986).

$$\begin{aligned}
 \text{energía cinética} &= \frac{v^2}{2g} \\
 \text{energía de presión} &= \frac{p}{\gamma} \\
 \text{energía de elevación} &= y \\
 \hline
 \text{energía hidráulica total} &= E
 \end{aligned}$$

Su forma matemática es:

$$E = \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + y = \text{constante}$$

Esta ecuación se conoce como ecuación de Bernoulli, en honor a un importante investigador en el área de la hidráulica.

La energía total disponible “E” disminuye a lo largo de la dirección del flujo del líquido entre dos puntos. Por lo consiguiente la ecuación de conservación de la energía toma la siguiente distribución (Simon, 1986):

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + y_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + y_2 + h_L$$

Donde

- Los subíndices 1 y 2 se refieren a puntos que aparecen en el campo de flujo.
- El término h_L se refiere a la energía perdida en forma de calor. Esta energía calorífica extraviada está intrínseca en el ambiente mediante un incremento poco visible en la temperatura que se desvanece en la atmósfera envolvente. Además h_L se le conoce como la pérdida de carga a presión, debido a que representa la aparente reducción de la altura de la energía hidráulica total disponible “E”, a medida que pasa el agua de un lugar a otro.
- Todos los términos tienen dimensiones de elevación, que es medida a partir de un plano horizontal de referencia.
- La suma de $\frac{p}{\gamma} + y$ se le da el nombre de altura piezométrica o línea de gradiente hidráulico. Esta línea está siempre por debajo de la línea de gradiente de energía total; la separación entre ellas será la carga de energía cinética, del punto de donde se realice la medición piezométrica.

Cuando la ecuación de energía es aplicada en recorridos, se afirma que el flujo de agua en tuberías está siempre acompañado de pérdidas de presión debidas a la fricción del agua hacia las paredes del mismo cuerpo que lo aloja (SAGARPA, 2012), manteniendo una permanencia de la energía entre dos secciones transversales del conducto, uno y dos (RCDF, 2012).

Por otra parte encontramos que la ecuación de Bernoulli también recibe el nombre de ecuación de conservación de la materia. Esta se presenta dentro de un flujo ideal en movimiento, constituida por tres tipos de energía (Fragoso, 2014):

- i. Energía potencial de posición. Se debe a la altura a la cual se ha elevado un cuerpo

$$Ez = W * h = m * g * z$$

- ii. La energía cinética o de velocidad. Se debe al movimiento de un cuerpo

$$Ev = \frac{1}{2} * m * v^2$$

- iii. Energía potencial de presión. Capacidad del fluido para realizar trabajo mediante la presión a la que se encuentre sometido

$$Ep = P * \frac{m}{\rho}$$

Donde

- $W = \text{Peso}$
- $m = \text{Masa}$
- $g = \text{Aceleracion de la gravedad}$
- $v = \text{Velocidad}$
- $P = \text{Presión}$
- $\rho = \text{Densidad}$

Fragoso (2014) retoma los tres tipos de energía para deducir por medio de ellas la ecuación de Bernoulli. Teniendo en cuenta el enunciado clásico de la conservación de energía que nos dice “en un sistema cerrado, la energía no se crea ni se destruye solo se transforma” por ende la suma de las energías permanece constante. La deducción se expresa de la siguiente manera:

La suma de las energías en la sección 1 = La suma de las energías en la sección 2

Eposición1 + Epresión1 + Evelocidad1 = Eposición2 + Epresión2 + Evelocidad2

$$Ez1 + Ep1 + Ev1 = Ez2 + Ep2 + Ev2$$

$$mgZ_1 + \frac{P_1 m}{\rho} + \frac{1}{2} m v_1^2 = mgZ_2 + \frac{P_2 m}{\rho} + \frac{1}{2} m v_2^2$$

Fragoso (2014) dice que es muy difícil saber la cantidad de fluido actuante en un fenómeno hidráulico, por lo que se recomienda utilizar la energía por unidad de peso, recibiendo en nombre de energía específica.

Se divide entre (mg) la ecuación anterior, quedando de la siguiente manera:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}$$

Si sabemos que $\rho * g = \gamma$, podemos simplificarla a:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

Su forma reducida se escribe:

$$\sum H_1 = \sum H_2 = CTE$$

Esta ecuación enuncia que la suma de las pérdidas en la sección uno es igual a la suma de las perdidas en la sección dos. Refiriéndose a que la suma de las

energías específicas, alturas o cargas mantienen una permanencia a lo largo del conducto.

De la deducción obtenida por Fragoso (2014), se puede describir los elementos que integran a la ecuación de conservación de la energía. El primer término es “Z”, conocida como altura piezométrica o cota topográfica, hace referencia a la distancia vertical medida a partir de un plano horizontal de referencia, hasta el eje de la tubería.

La altura o carga de presión denotada por la siguiente forma $\frac{P}{\gamma}$, es el segundo elemento que encontramos en la ecuación de Bernoulli, da lugar a la distancia vertical que va desde el eje de la tubería hasta la línea piezométrica. Por último encontramos a la distancia vertical que va desde la línea piezométrica, hasta la línea de energías totales, conocida como carga de velocidad y su estructura es $\frac{v_1^2}{2g}$.

La ecuación de conservación de la energía por parte de Simon (1960) y de Fragoso (2014) varía un poco respecto a cómo se encuentra en el Reglamento de Construcción del Distrito Federal (2012), en donde el arreglo de esta ecuación es la más utilizada para esclarecer los problemas hidráulicos, debido a que se consideran las pérdidas de energía y las pérdidas locales.

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \sum_1^2 h_f + \sum_1^2 h_L$$

Donde

- $g = \text{Aceleración de la gravedad}, 9.81 \frac{m}{s^2}$
- $P = \text{Presión, en } \frac{kg}{m^2}$
- $v = \text{velocidad media en el conducto, en } \frac{m}{s}$
- $Z = \text{Carga de posición, en } m$

- $\gamma =$ *Peso específico del agua, en $\frac{kg}{m^3}$*
- $h_f =$
Pérdidas de energía, o carga, por fricción desde la sección 1 a la 2
- $h_L =$ *Pérdidas locales, desde la sección 1 a la 2*

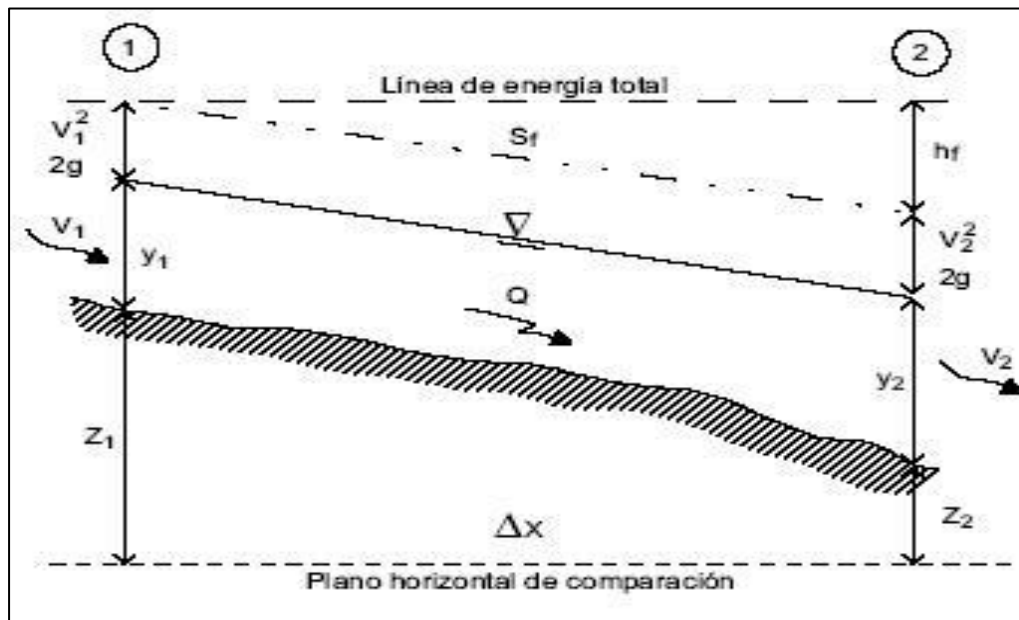


Figura 17. Ecuación de la energía aplicada en un tramo de río

1.4.1.4 Ecuación de impulso y cantidad de movimiento

La ecuación de impulso y cantidad de movimiento es una aplicación de la segunda ley de Newton en forma vectorial. En el RCDF (2012), se observa su organización bajo condiciones técnicas:

$$\sum_1^2 \vec{F} = \frac{\gamma}{g} * Q[(\beta\vec{V})_2 - (\beta\vec{V})_1]$$

Donde

- $\sum F$ = Representa la resultante de todas las fuerzas resultantes que actúan sobre el elemento líquido comprendido entre las secciones 1 y 2 considerado como cuerpo libre.
- γ = *Peso específico del agua, en $\frac{kg}{m^3}$*
- g = *Aceleración de la gravedad, $9.81 \frac{m}{s^2}$*
- Q = *Gasto, en m^3/s*
- v = *velocidad media en el conducto, en $\frac{m}{s}$*
- β = *coeficiente de Boussineq, se considera $\cong 1$ para fines prácticos*

1.4.2 Pérdidas de energía por fricción

En las líneas de conducción se genera una resistencia a la fricción debido a que las paredes del tubo que alojan al agua producen este efecto de resistencia al movimiento. Algunas de las formulas recomendadas por la CNA (2007), son:

- a) Hazen – Williams
- b) Manning
- c) Darcy – Weisbach

1.4.2.1 Hazen - Williams

$$Q = 0.278531 CD^{2.63} J^{0.54}$$

$$J = \frac{10.641}{C^{1.85}} * \frac{Q^{1.85}}{D^{4.87}}$$

Donde

- Q= gasto, en m³/seg
- D= diámetro, en m
- C= coeficiente de razonamiento, que depende de la naturaleza del material de la tubería

$$J = \frac{hf}{L} ; \text{perdida de descarga unitaria, en m/m}$$

- hf = perdida por fricción, en m. correspondiente a un tramo de tubería de longitud
- L= Longitud de la tubería, en m

Otra versión de la ecuación de Hazen- Williams

$$Q = 0.0177435938 CD^{2.63} S^{0.54}$$

Donde

- Q= gasto, en L/seg
- D= diámetro, en pulg
- C= coeficiente de capacidad hidráulica
- S= gradiente hidráulico, en m/m

$$S = \frac{hf}{L}$$

- hf = pérdidas por fricción, en m
- L = longitud de la tubería, en m

1.4.2.2 Manning

$$V = \frac{1}{n} * Rh^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$

Donde

- V = velocidad del flujo, en m/s
- n = coeficiente de rugosidad de la tubería
- Rh = radio hidráulico, en m, A/P
- S = pendiente hidráulica, en m/m, hf/L

Para hacer la deducción de la ecuación de Manning, nos apoyaremos de

$$Rh = \frac{A}{P} = \frac{\frac{\pi(D^2)}{4}}{\pi(D)} = \frac{D}{4}$$

Por continuidad

$$Q = A * V$$

$$Q = \frac{\pi(D^2)}{4} * \frac{1}{n} * \left[\frac{D}{4}\right]^{\frac{2}{3}} * \left[\frac{hf}{L}\right]^{\frac{1}{2}}$$

Quedando lo siguiente

$$Q = 0.3117 * \frac{D^{\frac{8}{3}} (hf^{\frac{1}{2}})}{L^{\frac{1}{2}} (n)}; \text{Despejando } (hf)$$

$$hf^{\frac{1}{2}} = \frac{n \left(L^{\frac{1}{2}} \right) Q}{0.3117 \left(D^{\frac{8}{3}} \right)}; \text{Se eleva al cuadrado}$$

$$hf = 10.3 \frac{n^2 Q^2 L}{D^{16/3}}$$

Finalmente se obtiene

$$hf = Q^2 * L * K$$

Asumiendo que

$$K = 10.3 \frac{n^2}{D^{16/3}}$$

Donde

- hf= pérdidas por fricción, en m
- L= Longitud de la tubería de conductos, en m
- D= diámetro de la tubería, en m

1.4.2.3 Darcy - Weisbach

$$hf = f \frac{LV^2}{D2g}$$

Donde

- hf= pérdidas por fricción, en m
- f = factor de fricción, el cual es obtenido en función del número de Reynolds y de la rugosidad relativa

- L= longitud de la línea de conducción, en m
- D = diámetro interior de la tubería, en m
- V = velocidad media del flujo, en m/s

1.4.2.4 Swamee - Jain

Swamee - Jain se obtiene de relacionar la ecuación de Manning con Darcy-Weisbach y nos sirve para calcular el factor de fricción.

$$f = \frac{8gn^2}{Rh^{\frac{1}{3}}}$$

Donde

- f= factor de fricción de Darcy – Weisbach
- g= 9.81 m/seg²
- n= coeficiente de rugosidad de Manning
- Rh= Radio hidráulico, en m

1.4.3 Perdidas locales

El RCDF (2012), afirma que por lo general en las líneas de conducción, las pérdidas locales se ignoran, debido a que es un valor relativamente despreciable en función de la pérdida total. Pero si el trazo de la línea presenta demasiados cambios de dirección o de diámetro, debidos a condiciones especiales de topografía o espacio, se deberán considerar estas pérdidas.

Las pérdidas locales de energía se producen en distancias considerablemente cortas, por accesorios de la conducción como: codos, tes, cruces, válvulas (CNA, 1997).

Se hace uso de la siguiente fórmula para calcular las pérdidas locales

$$hl = k \frac{V^2}{2g}$$

Donde

- K= constante que depende del tipo de pieza especial
- hl= pérdida local, en m
- $V^2/2g$ = Carga de velocidad, en m

1.4.4 Conducción por gravedad

La conducción por gravedad se presenta cuando la elevación del agua en la fuente de abastecimiento es mayor que la carga piezométrica que se necesita o existe en el punto de entrega del líquido.

Su diseño de este tipo de conducción consiste en determinar el diámetro comercial del tubo, que lleve el gasto requerido con una pérdida de carga en la conducción igual a la disponible. La carga disponible es aprovechada para generar energía eléctrica, mientras que el diámetro comercial se calcula en base al análisis económico correspondiente (RCDF, 2012).

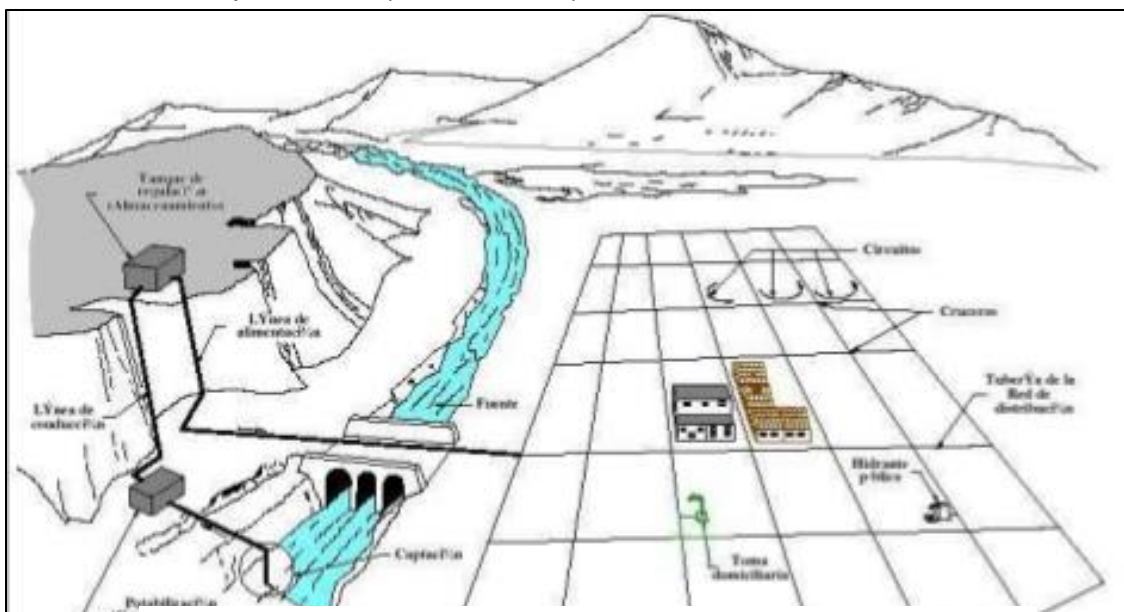


Figura 18. Esquema de un sistema de abastecimiento de agua potable.

1.4.5 Conducción por bombeo

Cuando se tenga una elevación menor por parte de la fuente de abastecimiento respecto a la carga piezométrica solicitada en la entrega, se utilizara la conducción por bombeo. Dentro del equipo de bombeo se cubrirá la carga requerida para vencer el desnivel existente entre la succión y el lugar de descarga de la línea de conducción, incluyendo las pérdidas locales y las causadas por la fricción.

En este tipo de conducción es necesario hacer el estudio para adquirir el diámetro económico, por ello se hace la consideración de alternativas para la elección del diámetro de la tubería. El RCDF (2012), considera que el diámetro económico debe cubrir los siguientes conceptos a valor presente, procurando que la suma entre ellos sea la mínima:

- Costo de la tubería y su colocación
- Costo de la energía para el bombeo

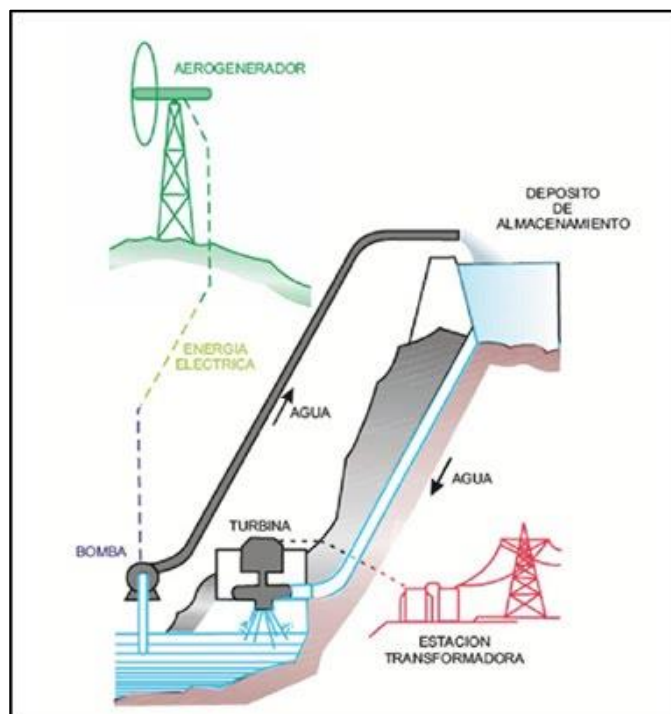


Figura 19. Bombeo de agua para generar energía

1.4.6 Velocidades permisibles

En el RCDF (2012) se recomienda mantener una velocidad mínima de 5 m/s dentro del flujo, debido a que se puede presentar la sedimentación de algunas partículas alojadas en el agua. Así mismo se atenderán las velocidades máximas, las cuales pueden producir la erosión o el deterioro de la tubería. Para cuidar las velocidades máximas permisibles se hace uso de una tabla, considerando que el líquido es limpio o poco turbio.

Tabla 1.1 Velocidades máximas permisibles

Material de la tubería	Velocidad máxima (m/s)
Concreto simple hasta 0.45 m de diámetro	3.0
Concreto reforzado de 060 m de diámetro o mayores	3.5
Asbesto – cemento	5.0
Acero galvanizado	5.0
Acero sin revestimiento	5.0
Acero con revestimiento	5.0
Polietileno de alta densidad	5.0
Plástico PVC	5.0

1.5 Resumen

Atendiendo la variedad de definiciones para una línea de conducción se puede tener el libre albedrío de crear nuestro propio concepto, respetando las condiciones que se hacen por parte de organismos especializados. El diseño de la misma, está estrechamente relacionado con la pérdida de presión, la cual influye en el diseño de cualquier tubería. Primordialmente se pueden dividir estas pérdidas de presión en pérdidas mayores o de fricción y en pérdidas locales, cada uno de ellas se puede calcular por medio de las ecuaciones de Hazen-Williams, Manning o Darcy-Weisbach, por ende el diseño en general consiste en obtener el diámetro en función

de las pérdidas de carga, considerando el gasto que se transporta y el material de la tubería.

Hay dos tipos de operación en las tuberías, ya sea por gravedad o bombeo, pero el análisis que se hará en este trabajo será solo en condiciones por gravedad, es decir por diferencia de niveles, bajo flujo permanente.

Capitulo

2. Estado del arte

En este capítulo encontraremos los trabajos que se han hecho respecto a la detección de fugas en líneas de conducción. También conoceremos los alcances de cada una de las técnicas o métodos empleados, prestando una mayor atención hacia las técnicas heurísticas; ya que la técnica de Optimización de Colonias de Hormigas pertenece a este grupo.

Fuentes-Mariles et al. (2011) definen a una fuga como la salida de agua no administrada en cualquiera de los componentes del sistema de distribución de agua potable, se pueden encontrar en uniones de tuberías, codos, roturas de conductos y

válvulas. El 85 % de agua no contabilizada en México se debe a fugas en la red de distribución, llegando a un 36.7 % del agua total en la red (IMTA, 2010).

Una de las complicaciones de la detección de fugas es que la mayoría de estas no se encuentran visibles, por ende para disminuirlas es indispensable contar con alguna herramienta capaz de estimar su localización, así como sus caudales (Fuentes-Mariles et al., 2011). En muchas ocasiones una fuga no se manifiesta y, si lo hace, se manifiesta en un lugar muy distante del que se encuentra. El principal problema no es que tanta agua sale por la fuga, sino el tiempo que se tarda en detectarla (Gama et al., 2010).

En los sistemas de conducción de agua a presión es común que se presenten fugas de este líquido. Las fugas pueden presentarse por agrietamiento transversal, aplastamiento o agrietamiento longitudinal de las tuberías, la corrosión, el mal junteo de los tubos o la falla de las válvulas que pueden incrementar las fugas en una red (Fuentes-Mariles et al., 2011). Una fuga puede ser ocasionado por diversos factores como los ya antes mencionados, sin embargo podemos hallar otros (Farrer, 1979):

- **Alta presión en la red:** la presión afecta principalmente a los cruces de la red. Cuando se tiene una fisura menor, la presión hace que esta crezca.
- **Tránsito vehicular:** las tuberías cuyas uniones son rígidas, son las más susceptibles a dañarse por los efectos del tránsito. Estos casos se presentan cuando la tubería se encuentra a una profundidad inadecuada, y con ello, a la afectación de las cargas del tráfico.
- **Movimiento del suelo:** las tuberías presentan fallos debidos a sismos o por características propias del suelo, los cuales cambian su estructura, como es el caso de las arcillas.
- **Defectos en el material:** Un material de baja calidad merma la vida útil de una tubería, genera reparaciones costosas y frecuentes que redundan en un desperdicio de agua. En el costo por reparación de una tubería en una calle asfáltica, el 24% corresponde solamente a la tubería, siendo el 76% restante, los gastos de mano de obra y obra civil.

- **Deficiencias en la instalación y operación:** la mano de obra no calificada puede afectar la vida útil de la instalación. Aquí se incluye la falta de herramienta o equipo inadecuado para su instalación.
- **Golpe de ariete:** Se presenta por corte en la energía eléctrica del sistema o deficiencias en la operación de la red. Genera sobrepresiones que producen fallos en la tubería y desplazamientos de los atraques.
- **Edad de la tubería:** Después de la vida útil de la tubería, se presenta una mayor vulnerabilidad a los fallos (Burn et al., 1999).

Por parte de Burn et al. (1999), encontramos el listado de algunos métodos para la detección de fugas, estos son los siguientes:

- **Métodos acústicos:** Consiste en la detección de fugas por medio de ruido o vibraciones. Estos son generados por el agua cuando escapa del tubo a presión. Se tiene definidas las frecuencias que genera el agua.
- **Inyección de gas trazador en el agua:** Se inyectan gases no tóxicos, insolubles en el agua y más ligeros que el aire. Comúnmente se usa helio e hidrogeno. El gas se inyecta y sale por las grietas, fisuras o zonas porosas de la tubería, atraviesa el suelo y es detectado por sensores.
- **Termografía:** El agua que escapa por la tubería cambia la temperatura del suelo adyacente a este. Dicho cambio de temperatura se puede detectar por escáneres infrarrojos.
- **Radar:** Se envía un pulso electromagnético al suelo por medio de un radar. El pulso rebota parcialmente cuando encuentra una diferencia entre dos materiales. Con estos datos se puede calcular la profundidad del cambio. Las fugas se pueden ubicar mediante los espacios en el suelo que el agua haya generado al momento del flujo o mediante el cambio de densidad por el suelo saturado de agua.
- **Registadores de presión y flujo:** Estos registradores pueden ir en el interior o en el exterior de la tubería y pueden trabajar por detección de ruido, mediante algún dispositivo mecánico, etc. Pueden ser automatizados, con conexión a SMS, etc.

El costo es elevado al utilizar los métodos de inspección electromagnética, de termografía y de radar, sin embargo si los métodos hacen uso de sustancias trazadoras y de sensores en el interior de la tubería se puede incurrir en la contaminación del agua. El método acústico a pesar de sus desventajas ante factores externos como el ruido ambiental, equipos de bombeo o tránsito vehicular (Tafari et al., 1997), es el más común en usarcé (De Silva et al., 1999).

Los métodos mencionados en la parte de arriba son los más convencionales en la práctica de detección de fugas de agua potable, pero con el paso del tiempo la era computacional ha influido en la creación de nuevos métodos por rutinas de optimización y métodos heurísticos. El funcionamiento de estos métodos toma como base la medición de las presiones, obteniendo satisfactorios resultados (Ramírez et al., 2013). Las mediciones de gastos en una red de tuberías de agua potable son laboriosas, por ello es preferible trabajar con lecturas de las presiones, además resultan económicas (Fuentes-Mariles et al., 2011).

Los métodos computacionales heurísticos se componen por variables estocásticas que se solucionan mediante prueba y error. El tiempo necesario para encontrar una solución exitosa influye mucho en estos métodos (Ramírez et al., 2013).

De los primeros trabajos no heurísticos realizados para la detección de fugas, encontramos el de los investigadores del Instituto de Ingeniería Sánchez et al. (1996), en donde se describe un método para localizar los tubos de una red de abastecimiento de agua potable en los que existen fugas relativamente grandes. El cálculo de los gastos y presiones de flujo permanente se basa en un proceso iterativo que se utiliza extensamente en México. El método propuesto es bastante seguro y fácil de emplear, pues solo requiere de la medición de cargas en los puntos de cruce.

Las aportaciones hechas con las técnicas heurísticas o evolutivas para la detección de fugas, son las siguientes:

Fuentes – Mariles et al (2011), estimaron el gasto y la localización de la fugas en una red de tuberías de agua potable aplicando Algoritmos Genéticos. Se considera que la red funciona en flujo permanente a presión y que solo existe una fuga por cada tubería de la red. Se emplea la teoría de la computación evolutiva, en particular, un algoritmo genético simple como herramienta de búsqueda para solución óptima. Este proceso es iterativo hasta reducir el error entre las cargas medias y las calculas con este método. Los resultados obtenidos en este trabajo, determinaron que los algoritmos genéticos son herramientas robustas para problemas de optimización, debido a que los valores arrojados son precisos, con un porcentaje de error bajo.

Belsito et al. (1998), determinaron el tamaño y la ubicación de las fugas aplicando redes neuronales artificiales. En la investigación se identificaron fugas con un volumen igual al 1% del flujo de entrada, además de localizar fugas con una presión del 50% en emanaciones pequeñas.

Izquierdo et al. (2010), hicieron la detección de fugas empleando la PSO (Particle Swarm Optimization), con diversidad enriquecida en la red de Hanoi. El método se basó en la diferencia de presiones físicas y las obtenidas con la PSO. Se consensó que la PSO fue de gran ayuda para la detección de fugas, debido a que las diferencias de presiones fueron menores a 0.15 mca.

Ramirez et al. (2013), detectaron y estimaron las fugas en redes de abastecimiento de agua. Se empleo la PSO para el procedimiento numérico, mientras que EPANET se encargó del cálculo hidráulico. La rutina proporciona una configuración de gastos en los que se distinguen las fugas de los consumos. Se concluyó que la rutina es amigable, fácil de manipular y muy estable. La velocidad de esta metodología es alta a comparación de otras técnicas heurísticas.

Kumar et al. (2012), propusieron un esquema novedoso, basado en la teoría de conjuntos en bruto y maquinas de vectores de soporte (SVM), para el problema de la detección de falsas fugas en una tubería. Computacionalmente (SVM), se integro con la técnica de inteligencia de enjambres: Colonia Artificial de Abejas

(ABC), este algoritmo imita el comportamiento de búsqueda inteligente de alimento de las abejas melíferas. Los resultados experimentales abogan por el uso del método propuesto para la detección de fugas con la máxima precisión.

Haghighi et al. (2012), detectaron fugas de agua y calibraron el factor de fricción en redes de agua potable, con la Optimización de Fuerza Central. Este método heurístico está inspirado en la cinemática gravitacional, en el que pequeños objetos en el espacio son arrastrados por otros más grandes. Se concluyó que la Optimización de Fuerza Central es fácil de implementar, computacionalmente eficiente y tiene una notable actuación en la resolución de problemas de detección de fugas.

El propósito de los métodos para la detección de fugas es encontrar parámetros de fugas, incluyendo el número, la ubicación y tamaño del área de la fuga. Además, los factores de fricción de tubería aumentan con la edad del sistema debido a la deposición y corrosión (Haghighi et al., 2012). Los métodos convencionales no alcanzan a cubrir la solicitud de las fugas en el sistema de abastecimiento, por ello los avances científicos han dado paso a los métodos heurísticos, la mayoría de ellos están inspirados por los movimientos al azar y la evolución gradual de la naturaleza (Haghighi et al., 2012). Al utilizar los métodos heurísticos para la detección de fugas se comparan las condiciones obtenidas por el algoritmo contra las condiciones físicas dominantes. Al requerir solamente datos de la red, esenciales para el mantenimiento, operación y servicio (caudal inyectado, consumos de los usuarios y registro de las presiones), hacen a que estos métodos sean económicamente viables de utilizar en la localización de fugas (Ramirez et al., 2013) y puede ser empleado junto con instrumentos de detección de fugas (geófonos, varillas de sondeo, equipo electrónico) para que sea más eficaz su ubicación y proceder a realizar las reparaciones con una mayor garantía de éxito (Fuentes-Mariles et al, 2011

Capítulo

3 ■ Fundamentos sobre las Colonias de Hormigas (ACO, Ant Colony Optimization)

En este apartado encontraremos los fundamentos en los que se sostiene la técnica evolutiva de Optimización de Colonias de Hormigas aplicado a los Sistemas de abastecimiento de agua potable. El modelo matemático inspirado en el comportamiento de las hormigas para recolectar su alimento, estando carentes de la vista, llama la atención de los investigadores por conocer cómo es que las hormigas pueden crear rutas de ida y vuelta, dejando un rastro de feromonas en su recorrido por las comida, haciéndose el camino más óptimo aquel que contiene mayor influencia de feromonas.

3.1 Optimización de Colonias de Hormigas

Propuesto por Dorigo (1992), la Optimización de Colonias de Hormigas (ACO) es una disciplina evolutiva computacional estocástica combinatoria inspirada en el comportamiento de las colonias de hormigas. Uno de los problemas de estudio por los etólogos es entender cómo las hormigas que son casi completamente ciegas pueden lograr establecer rutas cortas de su nido a sus fuentes de alimentación y de vuelta. Se encontró que las hormigas se comunican información al dejar pistas de feromonas. Una hormiga al moverse deja, en cantidad variable, algunas feromonas sobre el suelo para marcar su camino. Mientras una hormiga aislada se mueve

esencialmente al azar, encuentra un rastro previamente establecido, es capaz de abandonar y decir con una alta probabilidad de seguirlo, así refuerza la pista con su propia feromona. El comportamiento colectivo que surge es en consecuencia una respuesta positiva: donde cuanto más las hormigas sigan una pista, más atractiva esa pista se convierte para ser seguida; por lo tanto la probabilidad con la que una hormiga elige un camino aumenta con el número de hormigas que previamente eligieron el mismo camino. Este comportamiento elemental inspiró el desarrollo de ACO (Dorigo, 1992).

ACO ya ha sido aplicado con éxito a un de numero de problemas difíciles de optimización combinatoria tales como el problema del viajante de comercio (TSP) o el problema de asignación cuadrática (QAP), pero aun así a solo un número limitado de estudios en el análisis de sistemas de recursos hídricos.

Considere la posibilidad de una colonia de hormigas moviéndose en una grafica $G(N, E)$ donde N es el conjunto de nodos (puntos de decisión) $i = 1, \dots, N$ y E es el conjunto de bordes (enlaces) $e = 1, \dots, E$, el esquema básico del ACO (siguiendo a Dorigo et al, 1996), incluye los siguientes pasos:

1

■ La probabilidad de la K -ésima hormiga situada en el nodo i en la etapa t , para elegir un borde de salida e es:

$$P_{e,i}^k(t) = \frac{[\tau_e(t)]^\alpha [\eta_e]^\beta}{\sum_{e \in i+(t)} [\tau_e(t)]^\alpha [\eta_e]^\beta} \quad (1)$$

Donde: $P_{e,i}^k(t)$ = la probabilidad de la k -ésima hormiga en el nodo i en la etapa t , para elegir el borde e ; $\tau_e(t)$ = la intensidad de feromonas (cantidad por unidad de longitud) presente en el borde e en la etapa t ; $i+(t)$ = El conjunto de bordes de salida (es decir, todas las direcciones admisibles de salida) del nodo i a la etapa t ; η_e , α , and β = parámetros (; η_e = visibilidad, α , β = parámetros que controlan la importancia relativa de la cantidad de feromona presente en el borde e en la etapa t , ver Dorigo et al., 1996).

2. ■

La intensidad de feromonas en $\tau_e(t + 1)$ es actualizada usando (2)-(4):

$$\tau_e(t + 1) = \rho \tau_e(t) + \Delta\tau_e(t + 1) \quad (2)$$

$$\Delta\tau_e(t + 1) = \sum_{k=1}^A \Delta\tau_e^k(t + 1) \quad (3)$$

$$\Delta\tau_e^k(t + 1) = \begin{cases} \frac{R}{C_k(t)} & \text{if the } k\text{-th and used edge } e \text{ at stage } t \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

Donde: ρ = un coeficiente menor que uno que representa una intensidad de evaporación de feromonas entre la etapa consecutiva; A = número total de hormigas; R = una constante de recompensa de feromonas; y $C_k(t)$ = el costo de la solución generada por la hormiga k durante la etapa t [por ejemplo, la longitud completada de un recorrido por K -ésima hormiga al problema del viajero comerciante (TSP) en la etapa t].

3. ■

La generación de una solución [es decir, $C_k(t)$] por la k -ésima hormiga en la etapa t es denominada iteración, mientras que la realización de todas las soluciones de las hormigas en la etapa t denota un ciclo. Por lo tanto

las hormigas completaron iteraciones mediante la generación de soluciones, y una vez que todas las hormigas han producido soluciones, un ciclo (es decir, una etapa) ha sido completa. Los parámetros del algoritmo del algoritmo son: α , β , η_e , ρ , R ; el número de hormigas A , y una penalización inducida por soluciones no factibles. Un pseudo-código de un algoritmo de optimización de colonia de hormigas como se describió anteriormente, puede tomar la siguiente forma:

Inicialización

- Conjunto: $t = 0$; $\tau_e(0), \Delta\tau_e(0) = 0 \forall e \in E$; distribuir las hormigas en A (k indexada)
- Conjunto de los parámetros en la colonia de hormigas: α , β , η_e , ρ and R .
- Calcular $P_{e,i}^k(0) \forall e \in E$ usando (1)

Esquema principal

REPETIR

Repetir

- Para la k -ésima hormiga situada en el nodo i se genera una solución mediante un camino aleatorio sobre $G(N, E)$ usando $P_{e,i}^k(t)$ (por ejemplo, para el TPS visita a todos los poblados una sola vez).
- Calcular $C_k(t)$ – el costo producido de la solución por la k – ésima hormiga.

Hasta A (Número total de hormigas)

Actualizar el mejor costo de solución encontrado.

Calcular $\tau_e(t + 1) \forall e \in E$ usando (2) – (4)

Calcular $P_{e,i}^k(t + 1) \forall e \in E$ usando (1)

Conjunto: $t \leftarrow t + 1$

HASTA T_{\max} donde: T_{\max} = número máximo de ciclos (etapas) o hasta no mejorar la óptima solución se encontrara en alguna etapa consecutiva.

3.2 Revisión de bibliografía

La optimización de colonia de hormigas es una nueva disciplina computacional evolutiva para la comunidad de sistemas de recursos hídricos. Sólo unos pocos modelos fueron desarrollados hasta el momento. Se hicieron intentos para emplear colonia de hormigas para la operación de los embalses, el agua subterránea de monitorio a largo plazo, para algunos problemas generales de los recursos hídricos, y en particular para el diseño y operación de sistemas de distribución del agua. En esta sección se incluye una breve descripción de estos esfuerzos.

3.2.1 Depósitos de operación óptima

Kumar y Reddy (2006) propusieron un algoritmo de optimización de colonia de hormigas para un sistema de embalses multipropósito. Para adaptar el ACO para su problema, una serie de tiempo finito de entradas, la clasificación de volumen en el depósito en varios intervalos, y la definición de los comunicados de depósito para cada periodo de tiempo con respecto a un criterio optimalidad preferido, se han establecido. El algoritmo de ACO se comparó con un Algoritmo Genético real codificado (GA). Moeini y Afshar (2009) usaron tres formulaciones del sistema de hormigas max – min para la operación óptima de los embalses que usan dos conjuntos de variables de decisión – almacenamiento y comunicados, y tres representaciones de forma grafica. Los resultados en los sistemas de hormigas máx – min, fueron comparados entre si y con dos algoritmos evolutivos heurísticos tradicionales: algoritmos genéticos (GA) y optimización de apareamiento de abejas (HBMO). Se demostró que la formulación en el sistema de hormigas máx – min tuvo

éxito en resolver el problema de operación óptima de los embalses con los ajustes de los comunicados, mejor que otros. Dariane y Moradi (2009) usaron optimización de colonia de hormigas para dominios continuos (ACOR) para resolver el problema de comunicados óptimos de los embalses. Los autores disminuyeron sustancialmente el esfuerzo computacional requerido para ejecutar un problema de optimización basado en colonia de hormigas, y compararon su modelo para una formulación de algoritmo genético.

3.2.2 Monitoreo de Agua Subterránea a largo plazo (LTM)

Li et al. (2004) desarrollaron un modelo híbrido con colonia de hormigas y algoritmos genéticos para el monitoreo de agua subterránea a largo plazo, maximizando el muestreo costo-efectividad. Para el monitoreo de agua subterránea a largo plazo es necesario evaluar las condiciones in-situ de actualización del sistema de recuperación y anunciar el cierre de los sitios de control de agua subterránea. Su optimizada formulación en la red Agua Subterránea – Monitoreo (es decir, la programación de la localización y muestreo) como los recursos de monitoreo de agua subterránea son caros, en consecuencia son limitados. Li y Chan Hilton (2005, 2006a, 2006b) implemento Li y Chan (2004) por el formulamiento de la optimización LTM para la minimización del número de pozos de monitoreo con restricciones en la estimación de errores y calidad de los datos; y para la reducción de un plan de actividades de supervisión, mientras la reducción de distorsiones en la información recibida por la disposición del monitoreo inicial. Se recibieron óptimos globales o soluciones casi óptimas.

3.2.3 Aplicaciones en recursos hídricos

Ali et al. (2009) usaron optimización de colonia de hormigas para acelerar la convergencia de la técnica de la evolución diferencial (DE). Su metodología, intitulada evolución diferencial de colonia de hormigas (ACDE), utilizando la

población inicializada de hormigas basada en técnicas de aprendizaje, utiliza una metodología de localización aleatoria, y simulan el movimiento de hormigas para refinar la mejor solución encontrada en cada iteración. La ACDE fue aplicada en diferentes problemas de prueba incluyendo un simplificado sistema de recursos hídricos. Abbapour et al. (2001) utilizaron optimización de colonia de hormigas para calibrar un modelo hidráulico de suelo insaturado. El uso de colonia de hormigas remplazo el tradicional enfoque de modelación inversa y se encontró un éxito en la superación de parametrización relacionada a anteriores problemas de optimización. Li et al. (2006) desarrollaron un método híbrido de recocido simulado de colonia de hormigas para estimar los parámetros en el agua subterránea. El problema inverso de identificación de parámetros fue formulado como un problema de optimización. Transmisividad y coeficientes de almacenamiento para un modelo de flujo en agua subterránea en régimen transitorio de dos dimensiones se calibraron con las técnicas propuestas.

3.2.4 Sistemas de distribución de agua

La primera introducción de optimización de colonia de hormigas para la gestión de sistemas de distribución de agua fue de Maier et al. (2003). Maier et al. aplicaron un arreglo tradicional de colonia de hormigas para la optimización de dos puntos de referencia gravitacional con una carga en condiciones de sistemas de distribución de agua. Zecchin et al. (2005) estudiaron la parametrización de optimización basada en colonias de hormigas para los sistemas de distribución de agua y las directrices sugeridas para seleccionarlos. Christodoulou y Ellinas (2010)) propusieron un algoritmo de optimización de colonia de hormigas para el enrutamiento eficiente de las redes de tuberías para mejorar su eficiencia y capacidad de recuperación. López-Ibañez et al. (2008) utilizaron colonia de hormigas para optimizar la operación de bombeo en sistemas de distribución de agua. Ostfeld A. y Tubaltzev A. (2008) generalizan los estudios de Maier et al. (2003) y López-Ibañez et al (2008) para mutuamente optimizar el diseño y operación de los sistemas de distribución de agua en condiciones prolongadas de carga, bombeo y tanques. El algoritmo de Ostfeld A.

y Tubaltzev A. (2008) se basa en Dorigo et al. (1996) y Marier et al. (2003), y se compone de las siguientes etapas:

1. Representación: el problema de diseño de menos costo es discretizado y simbolizado en la forma de un grafico con los vínculos que representan los valores de variables de decisión, y los nodos – puntos de decisión.
2. Inicialización: Una colonia de hormigas A “comienza a caminar” desde el nodo de INICIO (ver fig. 1) al nodo FINAL con cada hormiga se tiene una probabilidad igual para elegir un especifico enlace en cada nodo (es decir, cada enlace tiene una feromona igual de intensidad inicial de 1 unidad). Cada rastro de hormiga completo (es decir, de principio a fin). Comprende una posible solución de diseño. Al final de esta etapa se genera un conjunto de soluciones de diseño al azar (es decir, rutas aleatorias) igual al número de hormigas. (2a) Cada solución es evaluada usando EPANET (USEPA, 2002) con una penalización inducida a soluciones no factibles [es decir, soluciones que violen las restricciones mínimas permisibles de presión en los nodos de consumo (siguiendo a Maier et al., 2003)]. (2b) Un conjunto (denotado por Δ) de las soluciones de menor costo se seleccionan para la actualización de feromona, (por ejemplo, las mejores veinte soluciones de hormigas de un conjunto inicial A de mil).
3. Actualización de feromona: Cada uno de los enlaces que participan en la mejor solución de i- ésima ($i \in \Delta$) se añade una cantidad igual de feromona para $Cost_{m\acute{a}x}/Cost_i$ donde $Cost_{m\acute{a}x}$ es el costo más alto entre el mejor conjunto (es decir, Δ) de las hormigas, $Cost_i$ es el costo de la solución de la presente i – ésima de la mejor solución. Usando este mecanismo de enlaces que participaron en soluciones más bajas recibirán una cantidad alta de feromona (es decir, su probabilidad para ser elegida en iteraciones subsecuentes aumentará).
4. Probabilidad de actualización: Actualizar los enlaces salientes posibles en el nodo j:

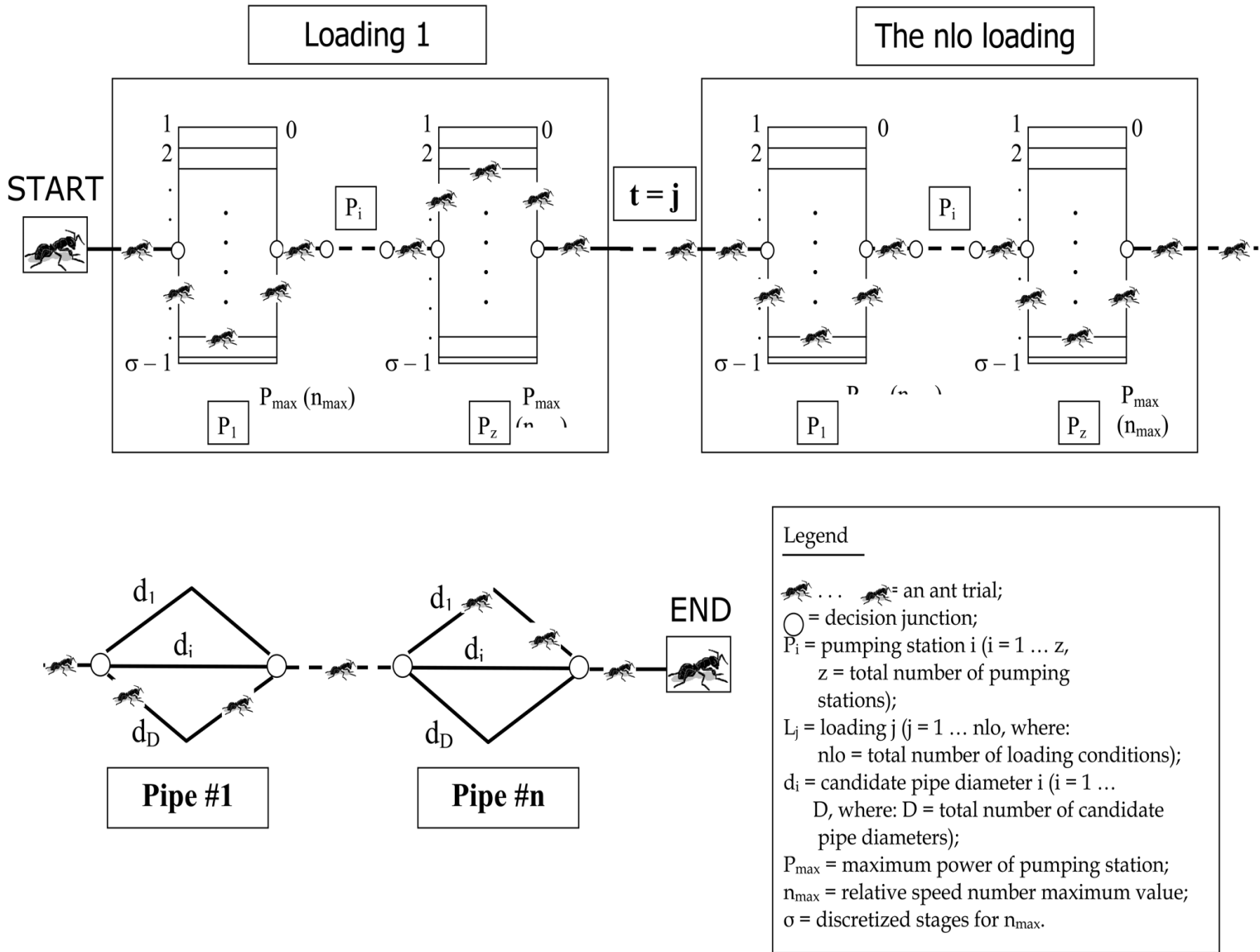
$p_i / \sum_{i=1}^{N_j} p_i = \text{where: } p_i = \text{la probabilidad de escoger el enlace } i; N_j = \text{número de enlaces de cada nodo } j, \text{ y } ph_i = \text{cantidad de feromona en el enlace } i.$

5. Iterar: volver a la etapa (2b) con una fracción de γ del número inicial de las hormigas A (es decir, γA), mientras se mantiene la mejor solución (es decir, elitismo), si un número predefinido de iteraciones no ha alcanzado aún.

Una descripción formal completa del algoritmo propuesto se da en la fig.2. Incorpora los siguientes pasos:

1. El contador de iteraciones de colonia de hormigas se establece en uno
2. La intensidad de feromona $\tau_e(1)$ presente en cada enlace $e \in \{1, 2, \dots, E\}$ $t = 1$ es establecido en uno.

Figura 20. Representación del sistema de agua para la optimización de Colonia de Hormigas (Ostfeld and Tubaltzev, 2008, with permission from the American Society of Civil Engineers (ASCE))



3. Los parámetros de colonia de hormigas son definidos: t_{\max} = número total de iteraciones de colonia de hormigas; α = parámetro de control de la importancia relativa de feromona (ajustado a uno); β = un parámetro de control de la importancia relativa de la heurística locales (ajustado a uno); ρ = un parámetro de persistencia de feromonas (ajustado a uno); A = número inicial de hormigas; γ = una fracción del número inicial de hormigas utilizadas para $t > 1$ (es decir, uso de hormigas γA para $t > 1$); Δ = número de hormigas mejores utilizadas para la actualización de feromona; n_{\max} = subido obligado del número de las estaciones de bombeo de velocidad relativa; σ = número discreto n_{\max} (es decir, la resolución de discretización de n_{\max}); y PC = coeficiente de costo de penalización lineal.
4. El número inicial de hormigas A son establecidos en los nodos de INICIO (ver figura. 1).
5. La probabilidad $P_{e, i}(t)$ para seleccionar el enlace de salida e en el nodo i en la iteración t ($t = 1$) es calculada:

$$P_{e, i}(t) = \frac{[\tau_e(t)]^\alpha [\eta_e]^\beta}{\sum_{e \in i^+(t)} [\tau_e(t)]^\alpha [\eta_e]^\beta} \quad \forall e \in \{1, 2, \dots, E\}$$

Donde: i^+ = el conjunto de enlaces de salida en el nodo i ; η_e visibilidad de enlace e (no se utiliza como $\beta = 0$).

6. El contador del rastro de hormiga k se establece en uno.
7. La solución de la primera hormiga ($k = 1$) rastro $\emptyset_k(1)$ [$P_{e, i}(1)$] se generan a través de un paseo aleatorio al nodo final (ver fig. 1).
8. El costo de la solución de prueba de la primera hormiga ($k = 1$) $C_k(1)$ [$\emptyset_k(1)$] se calcula:

Etapas (9) y (10) garantía de que todas las hormigas realizarán sus senderos. La etapa de inicialización concluye con el mantenimiento de las mejores soluciones Δ fuera del número inicial de hormigas A .

Esquema principal

11. La intensidad de feromona $\tau_e(t + 1)$ presente en el enlace e de la iteración $t + 1$ es calculada utilizando las ecuaciones (2) y (3):

$$\tau_e(t + 1) = \rho \tau_e(t) + \sum_{k=1}^A \Delta \tau_e^k(t + 1) \quad \forall e \in \{1, 2, \dots, E\} \quad (6)$$

$$\Delta \tau_e^k(t + 1) = \left[\begin{array}{ll} \frac{C_{max\Delta}(t)}{C_k(t)[\phi_k(t)]} & \text{if the } k\text{-th ant (} k \in \Delta \text{) used edge } e \text{ at iteration } t \\ 0 & \text{otherwise} \end{array} \right] \quad \text{eqs. (7)}$$

Donde: $\Delta \tau_e^k(t + 1)$ = la intensidad de feromona añadida por la k -ésima hormiga en el enlace e de la iteración $t + 1$; y $C_{max\Delta}(t)$ = el costo de salida máximo de solución de las mejores hormigas Δ en la iteración t . En la etapa (12) la probabilidad $P_{e,i}(t + 1)$ para elegir el enlace de salida e en el nodo i de la iteración $t + 1$ es calculada.

En la etapa (13) las hormigas x_A son colocadas en el nodo de inicio (ver fig. 1). De la Etapa (14) hasta la (18) corresponden de la (6) hasta la (10); en la etapa de elitismo (19) se invoca (es decir, mantiene sin cambios la mejor solución obtenida en todas iteraciones); etapa (20) y (21) garantizan que todas las iteraciones se realizan. El algoritmo termina con la mejor solución de colonia de hormigas obtenida $\phi^*(t_{max})$, y su correspondiente costo $C^*(t_{max})$.

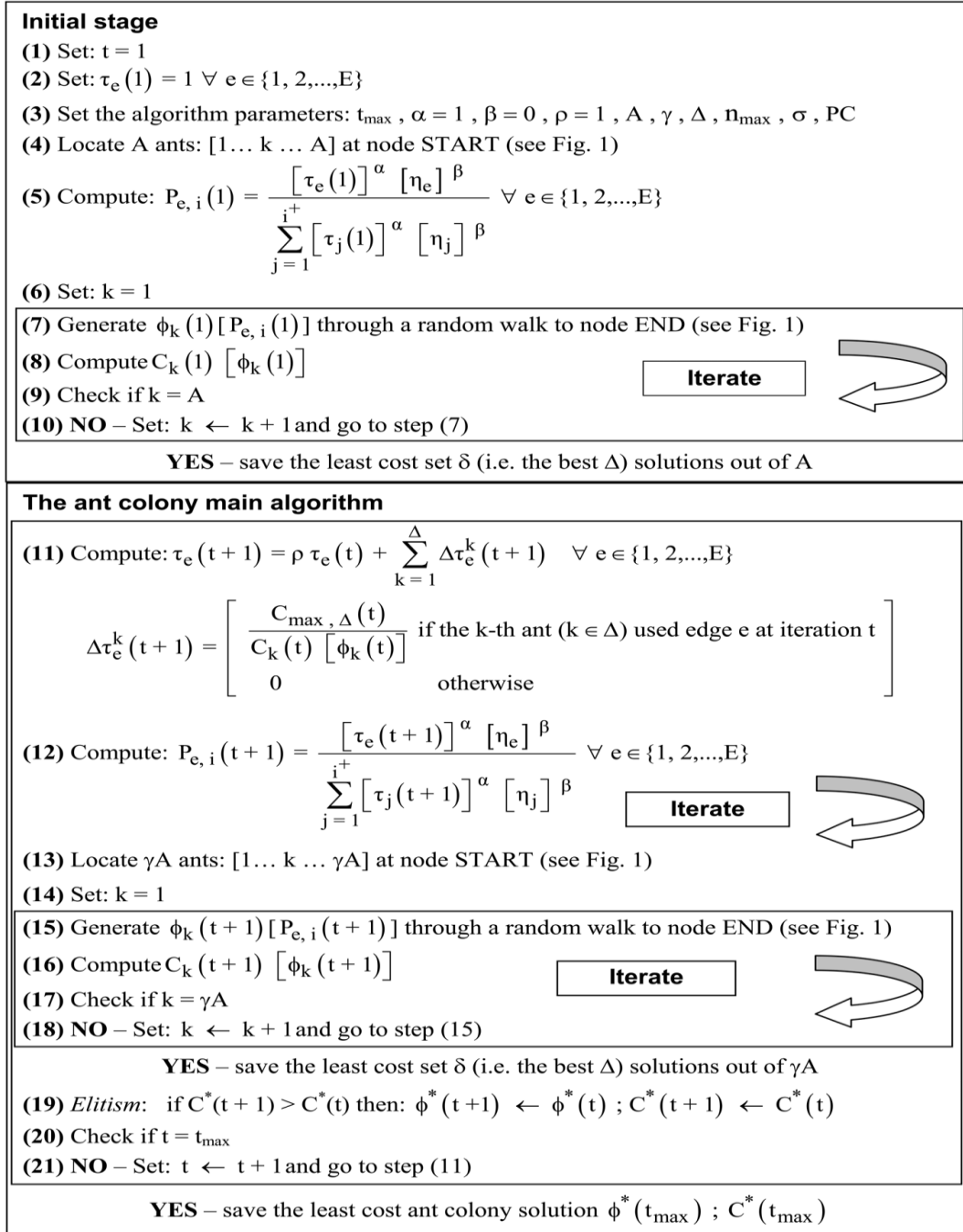


Figura 21. Diagrama de flujo de la optimización de Colonia de Hormigas (Ostfeld and tubaltzev, 2008, with permission from the American Society of Civil Engineers (ASCE))

3.3 Investigaciones futuras

La optimización de colonia de hormigas para el análisis de sistemas de recursos hídricos está en la etapa temprana de aprovechamiento, como se represento en la revisión de la literatura descrita anteriormente.

Se han desarrollado aplicaciones para las operaciones óptimas de depósito, el seguimiento a largo plazo, algunos de los problemas generales de los recursos hídricos, y el diseño y operación de sistemas de distribución de agua.

Aun así, la mayor parte de la comunidad de sistemas de recursos hídricos aún no ha utilizado el potencial del uso de la optimización de colonia de hormigas, como ocurrió en otras disciplinas de investigación, como la ingeniería estructural. La investigación es, pues, casi completamente abierta para el desarrollo y la aplicación de algoritmos de optimización de colonia de hormigas para los problemas y el análisis de sistemas de recursos hídricos.

Los retos de la utilización de optimización basada en colonias de hormigas en el análisis de sistemas de recursos hídricos varían con el tema y objetivo de interés. Sin embargo, comúnmente, para el análisis de sistemas de recursos hídricos es la compleja naturaleza probabilística inherente de los sistemas físicos, tales como las aguas subterráneas, las cuencas hidrográficas, los sistemas distribución, entre otros. Aquellos con rendimiento no lineal y dureza en la descripción del comportamiento de los sistemas físicos. Como un resultado, casi cualquier modelo de sistemas de recursos hídricos que, obviamente, tiene que capturar su física como limitaciones del modelo es altamente compleja. Algoritmos no lineales tradicionales, tales como los algoritmos de tipo gradiente son entonces muy limitados.

Como todo problema tiene su estructura única y equilibrio entre sus variables de decisión y formulaciones, el reto de desarrollar algoritmos de colonias de hormigas para el análisis de sistemas de recursos hídricos es principalmente en la adaptación de las características de los problemas específicos con una formulación de colonia de hormigas. Esto requiere que el modelador explore diferentes vías de

formulaciones tales que el modelo resultante sea computacionalmente factible. Este es un tremendo reto que capta la mayor parte de los aspectos de innovación de nuevo modelado y aplicación.

A continuación se presentan los principales campos del análisis de sistemas de recursos hídricos para los que se podrían desarrollar y aplicar nuevos modelos de optimización de colonia de hormigas:

Cambio climático: la variabilidad del clima y el cambio, la gestión adaptativa, la toma de decisiones

Aguas subterráneas: la estimación de parámetros, operación, contaminación, remediación

Embalses: operación, diseño, la inclusión de consideraciones de calidad del agua

Sistemas de distribución de agua: los modelos de red – optimización, calibración y verificación, de desarrollo y aplicación; sistema hidráulico de la red – estado de equilibrio, transitorios; FUGAS – detección de fugas, administración de fugas, estudios de campo; uso del agua - monitoreo, estimación y simulación, usuarios finales; trabajos de campo – estudios de rastreo, pruebas de presión, estudios de casos; intrusión de contaminantes y la seguridad del agua – detección, identificación de la fuente, la respuesta; vulnerabilidad de la red – las evaluaciones de seguridad, la fiabilidad de la red, la respuesta a desastres, nuevos problemas; calidad del agua en la red – supervisión en tiempo real y modelado, exposición de la dosis, mezcla y dispersión, tanques de almacenamiento, gestión de activo, mantenimiento, expansión del sistema y rehabilitación; sistemas sostenibles de distribución de agua – diseño y operación, reutilización del agua y suministro, sistemas de distribución dual

Economía del agua: demanda del agua – instalaciones domiciliarias, comerciales; suministro de agua – costo de producción, estudios de eficiencia,

cambio tecnológico, estudios de la industria; valoración de los servicios de agua – servicios ecológicos, navegación de saneamiento, recreación, riego, industriales.

Política del agua: transfronterizo, sequía, inundaciones, navegación, recreación, riego, industrial, clima, energía

Cuencas y cuencas fluviales: manejo de cuencas, agua y energía del sistema, aplicación de las predicciones hidrológicas y previsiones, las mejores prácticas de administración, las aguas pluviales

Resumen

La técnica evolutiva propuesta por Dorigo (1992) se ha empleado desde el monitoreo de aguas subterráneas, hasta la detección de fugas en sistemas de abastecimiento de agua potable, en donde se a hecho uso de un algoritmo especializado en la optimización de colonia de hormigas. Este método ha sido viable en el análisis de problemas de detección de fugas, debido a la efectividad y bajo costo de utilización.

Capítulo

4. Implementación del ACO para localización de fugas en líneas de conducción. Ejemplo de aplicación. Análisis de resultados.

En este capítulo se aplicaran los fundamentos recopilados de la Optimización de Colonia de Hormigas en un ejemplo de aplicación para el análisis de los resultados que se obtengan en su estudio. Como primera instancia se hace uso de EPANET para conocer las características hidráulicas de la línea de conducción, que nos ayudaran a pasar las ecuaciones del modelo matemático (ACO), al programa de programación MATLAB.

Descripción del ejemplo de aplicación.

Se tiene una línea de conducción por gravedad, cuya longitud equivale a 1610 metros. El **nodo A** se localiza a 2413.24 metros y el **nodo B** a 2398.35 metros. El gasto que circula por la línea es de 20 ltrs/seg, con un diámetro de 200 mm y una “C=140” de Hazen – Williams.

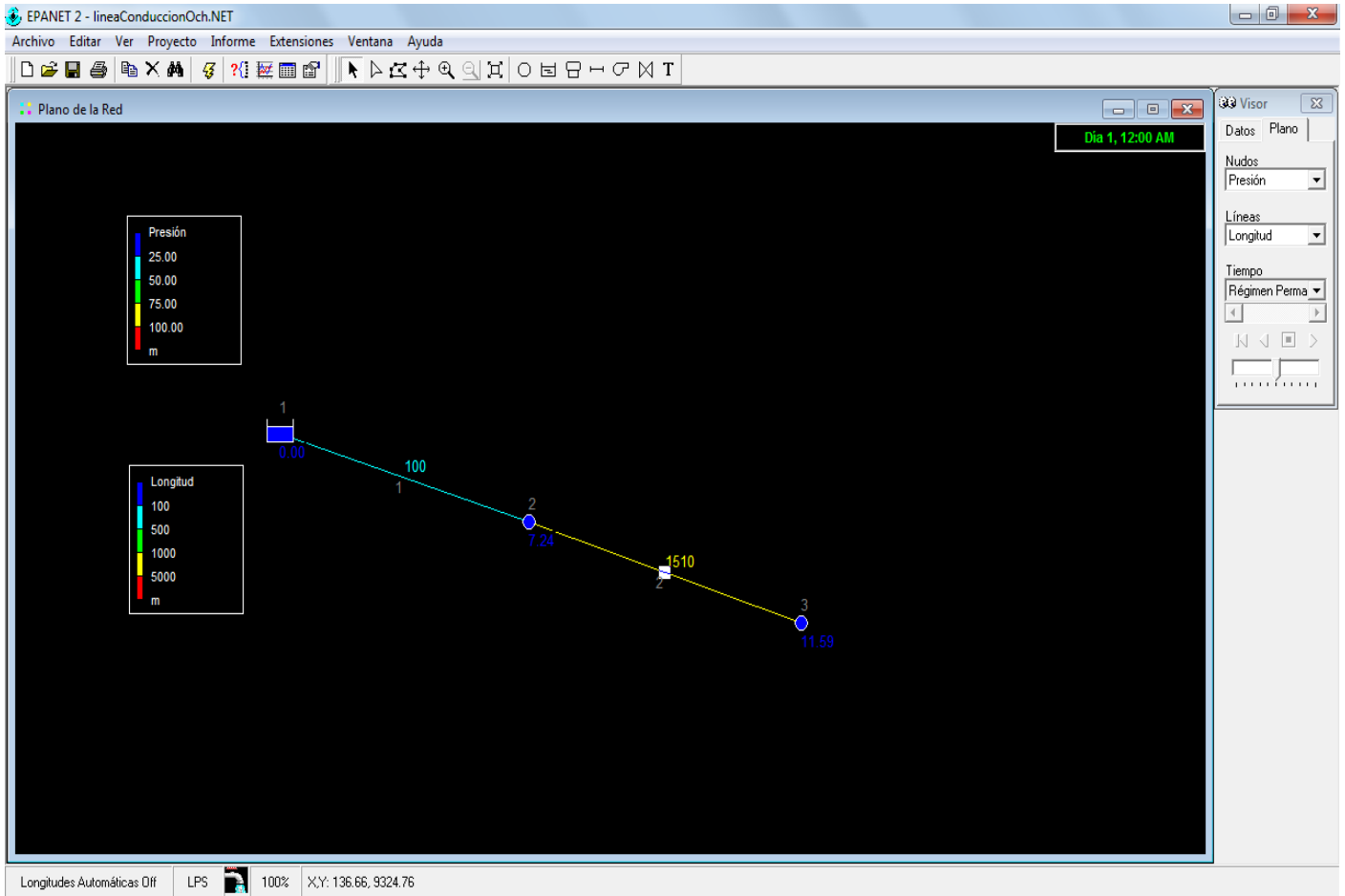


Figura 22. Diagrama del ejemplo de la línea de conducción con EPANET

Se realizó una primera evaluación con EPANET, como se puede ver en la Figura 22, agregando todos los datos necesarios para su funcionamiento. La línea de conducción en condiciones ideales presenta en su parte final una presión de 11.59 metros. Si se supone que existe una fuga de 3 litros/seg en los primeros 100 metros de la línea de conducción, la presión cambia debido a la disminución del flujo que transita en la conducción.

Debemos tener en consideración los siguientes casos en la línea de conducción

- 1) Si no hubiera fuga a lo largo de línea de conducción
 - a) Por el nodo B transita todo el gasto
 - b) Se considera una presión en condiciones ideales

- 2) Si hubiera fuga en la línea de conducción
 - a) La línea piezométrica tiene diferente comportamiento. Observación en EPANET.
 - b) El gasto de salida en el nodo B será igual al gasto de diseño menos el gasto de fuga.

- 3) Se tiene los siguientes datos de entrada en el modelo del ACO
 - a) La presión en el nodo B en condiciones ideales, la cual se calculó en EPANET. Dicha presión se tomara como referencia ya que el ACO deberá encontrar la combinación adecuada entre el gasto de fuga y la longitud para que presión en el punto de estudio sea aproximadamente la de referencia.
 - b) El gasto de diseño es propuesto
 - c) La longitud de la línea de conducción es propuesto
 - d) El tipo de materia y el diámetro de la tubería es propuesto

Secuencia del algoritmo

- 1) Generar una población inicial de hormigas de manera aleatoria entre 0 y 100 metros.
- 2) Evaluar la Función Objetivo (F.O)

$$F.O = \frac{1}{(PREF - PCALC)^2}$$

Donde

PREF= Presión de Referencia

PCAL= Presión calculada en EPANET o por medio de formulas

- 3) Calcular los rastros de feromonas con las siguientes ecuaciones

$$i) \quad \tau(t + 1) = \rho\tau(t) + \Delta\tau(t)$$

Donde

ρ = coeficiente representativo de la persistencia de la feromona. Puede encontrarse entre los valores mayores a 0 y menores a 1, para poder simular la evaporación de la feromona.

$\Delta T(t)$ = cantidad de feromona que será adicionada en la unión (i, j), en la iteración (t). La cantidad de feromona está en función de las soluciones encontradas, depositada por la k-ésima hormiga.

$$\text{ii) } \Delta\tau(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau^k(t)$$

Donde

m= número de hormigas

$\Delta\tau^k(t)$ = cantidad de feromona depositada por la K – ésima hormiga

$$\text{iii) } \Delta\tau^k(t) = \begin{cases} Q/(f(s_k(t))); & \text{si } (i,j) \in s_k(t) \\ 0; & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Donde

Q= factor de recompensa propuesto 11 000 000.00

$(f(s_k(t)))$ = valor de la función objetivo F.O

4) Calcular la eficiencia η

$$\eta = \frac{1}{\text{F.O}}$$

Donde

F.O= Función Objetivo

5) Repetir el ciclo hasta que haya una estabilidad en el algoritmo, con ayuda de la siguiente ecuación

$$P_{i,j}(t) = \frac{[\tau(t)^\alpha][\eta^k]^\beta}{\sum[\tau(t)^\alpha][\eta^k]^\beta}$$

Donde

P= probabilidad de que unión i,j sea seleccionada en la iteración t

η = deseabilidad de la unión. Favorecen las opciones cercanas a la longitud y gasto de fuga.

T=concentración de la feromona

α y β = parámetros establecidos en método de ACO

Una vez determinada la secuencia del algoritmo del ACO se prosigue con la elaboración e interpretación de las formulas en el programa de programación MATLAB. Este programa es de gran utilidad cuando se requiere hacer una gran cantidad de cálculos, ya que cuenta con una memoria de almacenamiento amplia para guardar variables, pero es indispensable su manejo adecuado del lenguaje de programación. Se debe tener en consideración que el ejemplo de aplicación es propuesto y por ello los resultados obtenidos estarán sujetos en función de los parámetros antes predeterminados.

Para la presentación del algoritmo ACO en MATLAB (ANEXO A), se consideró dejar comentario en cada línea código para facilitar al lector la interpretación de cada uno de los comandos utilizados.

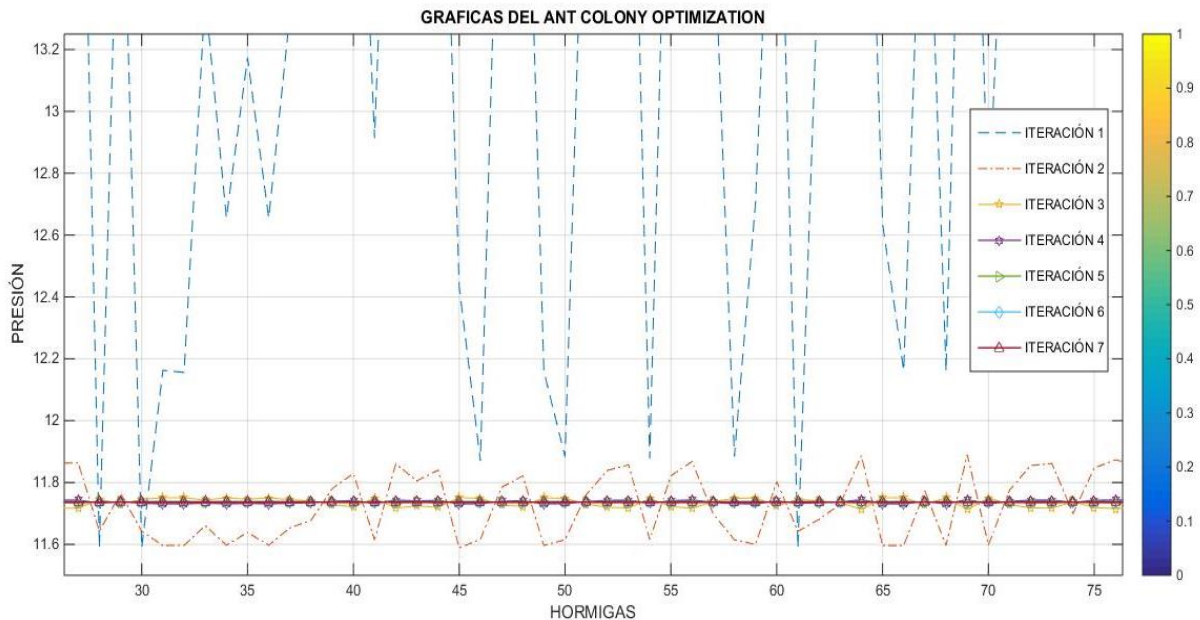


Figura 23 Impresión de resultados, MATLAB R2014b. De cada una de las iteraciones en el ACO (Ant Colony Optimization).

Una vez impreso los resultados del algoritmo ACO (ANEXO A), que se elaboró en Matlab se puede observar el comportamiento en cada una de las iteraciones, las cuales alcanzaron una estabilidad en la séptima rutina. Se debe tener en consideración que la propuesta de aplicación de este algoritmo fue para dar solución al ejercicio de aplicación, ya que los modelos matemáticos evolutivos dependen de ciertas restricciones del diseño hidráulico, causando una infinidad de variables difíciles de atender. Lo antes mencionado se puede ilustrar en la Figura 23 y 24, ayudando en el análisis de resultados para el lector. Al generarse las primeras 100 hormigas aleatoriamente, la primera iteración arroja presiones bastante disparadas, conforme avanza el programa las hormigas alcanzan nuevos valores dependiendo la probabilidad en sus resultados de acierto, por ende las hormigas paran, al encontrar una probabilidad muy cercana a lo óptimo de las condiciones del sistema.

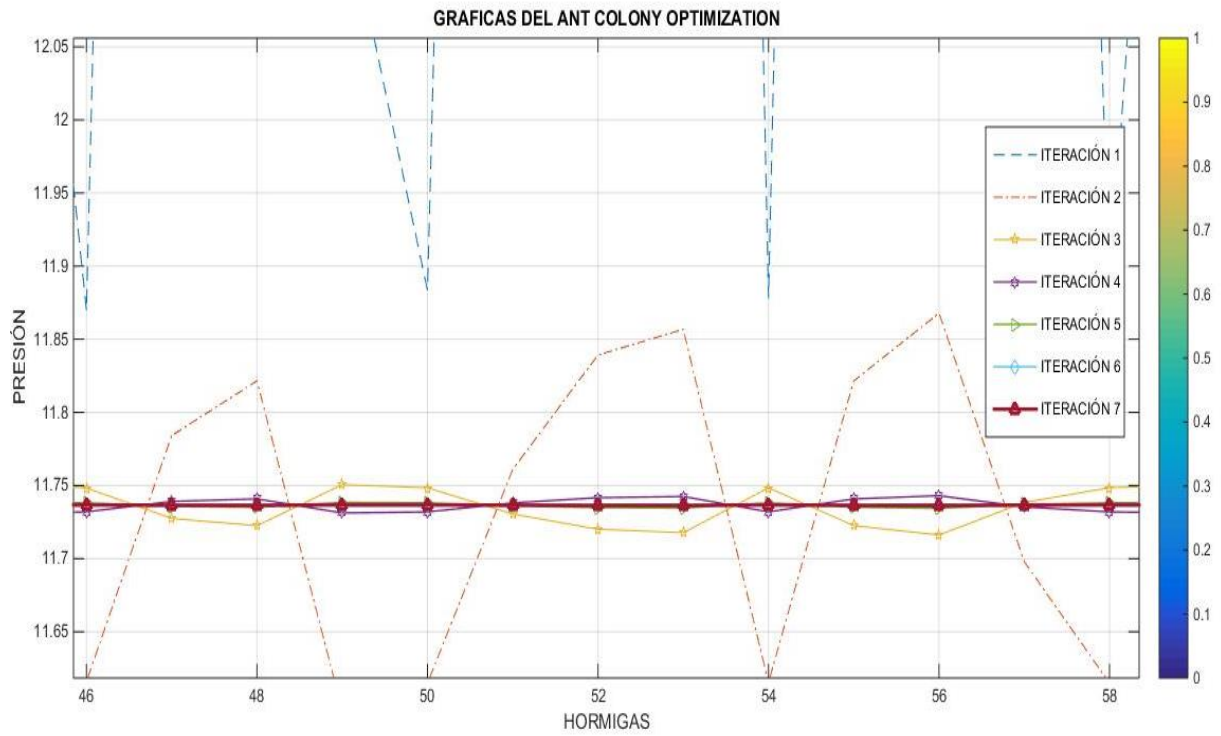


Figura 24. Acercamiento en la Iteración 7, donde se percibe el equilibrio de la presión, MATLAB R2014b.

Capítulo

5. Conclusiones y futuras aplicaciones

Con la revisión bibliográfica hecha sobre los trabajos de investigación en la detección de fugas de agua potable a través del uso de modelos evolutivos y la utilización de instrumentación especializada se obtuvo la información requerida para la propuesta del algoritmo de Optimización de Colonias de Hormigas. Dicho algoritmo cuenta con las formulas establecidas por Dorigo (1992), quien determino su uso en el análisis de los sistemas de abastecimiento de agua potable.

La propuesta del algoritmo de Optimización de Colonias de Hormigas ACO (Ant Colony Optimización), se realizó en una línea de conducción, debido a la importancia que esta tiene desde su punto de captación del agua, hasta la cobertura del abastecimiento en la red de una determinada población. Por lo regular en el transporte del líquido suele presentarse fugas, que difícilmente pueden ser ubicadas sino se cuenta con las herramientas necesarias. Por ello el estudio en la detección de fugas.

Como primer paso en la elaboración del algoritmo ACO, se recurrió a EPANET para simular el comportamiento de la línea de conducción en escenarios ideales y al momento de presentarse una incidencia. Observándose una diferencia en la presión al final de la línea en entornos perjudiciales, debido a que la fuga cambia tanto a lo largo de la línea como en la cantidad de caudal desalojado. Estas variables dentro del análisis de línea son fundamentales para soportar el modelo, pues al encontrar una estabilidad en ellas, la probabilidad aumenta en la optimización de resultados.

Una vez establecido lo anterior, se prosigue con la conformación del algoritmo en el programa MATLAB, en donde se realizó la programación necesaria para cada uno de los ciclos de cálculo. Es importante mencionar que todos los modelos matemáticos tienen sus restricciones y limitaciones, pues siempre dependen de las condiciones del problema a solucionar.

El algoritmo ACO formulado en MATLAB encontró un equilibrio en la séptima iteración, en donde se halla la longitud y caudal ideal, estabilizando la presión en el punto final de la línea de conducción. Sin embargo la investigación queda abierta para futuras modificaciones en el algoritmo ACO, llevando su aplicación en oleoductos o en detección de tomas clandestinas.

REFERENCIAS

- Belsito, S., Lombardi, P., Andreussi, P., & Banerjee, S. (2010). Leak detection in liquefied gas pipelines by artificial neural networks. *AIChE Journal*, 44(12), 2675-2688.
- Burn, S., De Silva, D., Eiswirth, M., Hunaindi, O., Speers, A., & Thornton, S. (1999). Pipe leakage-future challenges and solutions. *Pipes Conference*, 12-14. Wagga Wagga, N.S.W.
- CNA. (1992). Lineas de conducción. En C. N. Agua, *Lineamientos Técnicos para la elaboración de estudios y proyectos de agua potable y alcantarillado sanitario, segunda sección* (págs. 5-27,5-34). México, D.F: CNA.
- CNA. (1997). Clasificación de las conducciones . En C. N. Agua, *Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento: conducción agua potable* (págs. 10-22). México: CNA.
- De Silva, D., Mahford, & Burn, S. (2011). Computer aided location and sizing in pipe networks. *Urban Water Security Alliance Technical Report No 17*.
- Farrer, H. (1979). Control de fugas en redes de distribución de agua. *Taller para ingenieros sobre operación y mantenimiento de sistemas de abastecimiento de agua potable y alcantarillado* (pág. 30p). Lima-Perú: CEPIS.
- Fuentes-Mariles, O., Rodriguez-Vázquez, K., & Palma-Nava, A. (2011). Estimación y localización de fugas en una red de tuberías de agua potable usando algoritmos genéticos. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 12(2), 235-242.
- Gama, L., Sánchez, M., & Ochoa, C. (1 de Febrero de 2010). Diseño de una interfaz para la detección de fugas de agua. *Revista Digital Universitaria*, 11(2), 1-xx-11-xx.

- Giles, R. (1969). Fundamentos del flujo de fluidos. En R. Giles, *Mecánica de los fluidos e hidráulica* (págs. 70-96). México, D.F.: McGRAW-HILL.
- Haghighi, A., & Ramos, H. M. (5 de Marzo de 2012). Detection of Leakage Freshwater and Friction Factor Calibration in Drinking Networks Using Central Force Optimization. *Water Resour Manage*, 26(8), 2349-2364.
- IMTA. (1994). Recomendaciones de construcción. En E. Valdez, & A. Vázquez González, *Abastecimiento de agua potable* (Vol. II). DF, México: Instituto Mexicano de tecnología del Agua.
- IMTA. (2010). *El agua se pierde 43.2 % en fugas: ONU*. Obtenido de <http://www.imta.gob.mx/interbacional/index.php/noticias-internacionales/nociticias-del-sector-hidrico-internacional1243-elagua-se-pierde-432-en-fugas-onu.html>
- Izquierdo, J., Montalvo, I., Pérez-Gracia, R., & Alonso, C. (2010). Swarm Intelligence for Optimization in the Urban Water Industry, Modelling Simulation and Optimization.
- Kumar Mandal, S., T.S. Chan, F., & Tiwari, M. (2012). Leak detection of pipeline: An integrated approach of rough set theory. *Expert Systems with Applications*(39), 371-380.
- Montalvo Aragon, I., Izquierdo Sebastián , D., & Pérez Garcia, D. (2007). Aplicacion de la optimización de colonia de hormigas al diseño de sistemas de distribución de agua. *Seminario Iberoamericano sobre Planificación y Operación de Sistemas de abastecimiento de agua*. (págs. 1-9). Morelia, Mich. (México): UPV.
- Ramírez-Gutiérrez, J., Mora-Rodríguez , J., Moltavo, I., & Jiménez-Magaña, M. (2013). Detección y estimación de fugas en redes de abastecimiento de agua mediante Particle Swarm Optimization (PSO) y EPANET. *XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de abastecimiento y drenaje*.

- RCDF. (2012). Tuberías a presión. En L. Arnal Simón, & M. Betancourt Suárez, *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal* (págs. 997-1006). México, D.F.: Trillas.
- SAGARPA. (2012). Líneas de conducción por gravedad. *Dirección General de Apoyos para el Desarrollo Rural*, 1-29.
- Sánchez Bribiesca, J. L., & Fuentes Maníes, Ó. A. (Marzo de 1996). Método para la detectar fugas mayores en una red de agua potable. *Ingeniería del Agua*, 3(1), 59-68.
- Simon, A. (1986). Leyes de la mecánica en los fluidos. En A. Simon, *Hidráulica Práctica* (págs. 40-42,49-52). México, D.F.: LIMUSA.
- Sotelo, G. (1976). Ecuaciones fundamentales de la hidráulica. En G. S. Ávila, *Hidráulica General* (págs. 111-121). México, D.F.: LIMUSA.
- Tafari, A., Yezzi, J., Watts, D., & Carlyle, J. (April de 1997). Leak detection and leak location in underground pipelines. *International oil spill conference proceedings*, 1997(1), 379-381.

ANEXO A

Código en MATLAB

```
%EN EL PRESENTE PROGRAMA SE HACE USO DEL ACO (ANT COLONY OPTIMIZATION), EL
%QUAL NOS PERMITE DETERMINAR LAS FUGAS A LO LARGO DE UNA LINEA DE
%CONDUCCIÓN. EL OBJETIVO PRINCIPAL DEL PROGRAMA ES HAYAR LA PRESION DE
%SALIDA ADECUADA CUANDO SE PRESENTAN FUGAS Y COMPARARLA CON LA PRESIÓN DE
%REFEBNCIA PARA QUE SE REALICEN LOS AJUSTES.
clear; clc % ES RECOMDABLE LIMPIAR Y BORRAR LAS VARIABLES EN EL COMMAND
WINDOW
%PARA EVITAR QUE EL ARCHIVO ADQUIERA VALORES DISTINTOS A LOS ASOCIADOS.

%-----
%VARIABLES DEFINIDAS POR EL MODELO MATEMATICO ACO (ANT COLONY OPTIMIZATION)

P_REFE=12.40; %PRESION DE PREFERENCIA EN CONDICIONES DE FUGA EN EPANET,
%UNIDADES EN METROS
RO=0.9;% COEFICIENTE REPRESENTATIVO DE LA PERSISTENCIA DE LA FEROMONA
%PUEDA ENCONTRARSE ENTRE 0 Y 1, PARA SIMULAR LA EVAPORACIO DE LA FEROMONA
Q=11000000; %FACTOR DE RECOMPENA
ALFA=0.5; %PARAMETRO DETERMINADO POR ACO
GAMMA=0.3; %PARAMETRO DETERMINADO POR ACO
LONTOTAL=1610; % LONGITUD TOTAL DE LA LINEA DE CONDUCCION, EN METROS
CAUDAL=20; % GASTO QUE CIRCULA POR LA TUBERIA, M3/S
LONFUGA= 100; % LONGITUD DE LA FUGA, PROPUESTO
CFUGA=3; % GASTO DE FUGA, M3/S, PROPUESTO
c=140; %coeficiente de Hazen-williams
i=1;%CONTADOR i
j=1;%CONTADOR j
k=1;%CONTADOR k
hormiL=fix(100*rand(1,100)); %LONGITUDES ALEATEORIOS
hormiG=fix(20*rand(1,100)); %GASTOS ALEATORIOS
dif=0.00000001; %LA VARIABLE dif, PERMITE ITERAR HASTA
%OPTENER EL EQUILIBRIO EN EL RESULTADO

% SOLICITUD DE LOS DATOS CORRESPONDIENTES AL USUARIO: LONGITUD, GASTO Y
% DIAMETRO
longitud=input('longitud total de la linea de conduccion, en metros: ');
ucaudal= input('Caudal propuesto en m3/s: ');
```

```

diametro= input('Diamtro de la tubería, en metros: ');
%CALCULO DE LAS PERIDIDAS EN EL NODO DE SALIDA C/ HAZEN-WILLIAMS
%CON UN GATO DE FUGA DE 0.003 M3/LTRS A UNA DISTANCIA DE 100 METROS, LA
%PRESEION EN EL NODO DE SALIDA ES DE APROXIMADAMENTE 12.40
hf2= (10.674*(Ucaudal^1.852/(c^1.852*diametro^4.871)))*longitud
%###TERMINA LA PRIMERA PARTE

%-----
%SE CONSIDERAN 100 NUMEROS ALEATORIOS DE LONGITUDES(HORMIGAS) Y
%20 ALEATORIOS PARA CAUDALES.CON ELLOS SE OPTIENEN LAS RESPECTIVAS
%PRFESIONES EN LOS PUNTOS DE INTERES

for num=i:1:100 %CICLO UNO PARA LOS 100 NUMEROS ALEATORIOS
    HMIGA(i)=num;
    %CALCULO DE LAS PRESIONES
    pcalcu(i)=14.89-
((10.674*(Ucaudal^1.852/(c^1.852*diametro^4.871)))*hormiL(i)+(10.674*((CAUD
AL-hormiG(i))/1000)^1.852/(c^1.852*diametro^4.871))*(LONTOTAL-hormiL(i)));
    %APLICACION DE LAS FORMULAS DEL ACO(ANT COLONY OPTIMIZATION), YA
    %DESCRITAS EN LA TESIS
    FO(i)=1/((P_REFE-pcalcu(i))^2);% FACTOR OBJETIVO
    DELTAO(i)=Q/(FO(i)); %CANTIDAD DE FEROMONA DEPOSITADA
    ROTAO(i)=RO*(FO(i)); %PERSISTENCIA DE LA FEROMONA
    Tao(i)=DELTAO(i)+ROTAO(i); %CANTIDAD DE LA FEROMONA ADICIONADA EN LA
    %UNION POR CADA UNA DE LA ITERACIONES
    efi(i)=1/FO(i); % EFICIENCIA

    i=1+i; %CONTADOR i AUMENTADO EN UNA UNIDAD PARA PASAR A LA SIGUIENTE
    % ITERACIÓN
end %TERMINA EL CICLO UNO

S1=sum(Tao); %SUMATORIA DE LA CANTIDAD DE LA FEROMONA
S2=sum(efi); %SUMATORIA DE LA EFICIENCIA
PRO=(S1^ALFA*S2^GAMMA); % CALCULO DEL NUMERADOR EN LA ECUACION
% DE LA PROBABILIDAD

%EN EL SIGUIENTE CICLO SE RETOMAN LAS SUMATORIAS DE LA CANTIDAD DE
%FEROMONA Y LA EFICIENCIA PARA EL CALCULO DE LA PROBABILIDAD. ADEMAS DE
%GENERAR LOS NUEVAS LONGITUDES Y GASTO.

for categoria=j:1:100 %CICLO DOS

```

```

part1(j)=((Tao(j)^ALFA).*(efi(j)^GAMMA));% DENOMINADOR DE LA ECU.
                                % DE PROBABILIDAD
PROBA(j)=part1(j)./PRO; % CALCULOS DE LAS PRIMERAS PROBABILIDADES
% GENERACION DE LAS NUEVAS LONGITUDES Y GASTOS PARA SEGUIR CON EL
% ANALISIS DE LA DETECCION DE FUGAS.
NEWLON(j)=PROBA(j)*1610;
NEWQ(j)= PROBA(j)*20;

###TERMINA LA SEGUNDA PARTE DEL ALGORITMO, EN DONDE SE PRESENTA LAS
###PROBABILIDADES OPTENIDAS JUNTO CON LAS NUEVAS LONGITUDES

%-----
if PROBA(j) >= dif %CICLO TRES. SE CONDICIONA A LAS PROBABILIDADES
                    %OBTENIDAS A QUE SI SON MAYORES A LA VARIABLE
                    %dif,DEBERAN PROSEGUIR CON EL SIGUIENTE CALCULO.
                    % AL ENTRAR A TERCER CICLO CON EL CONDICIONAL "if", SE
                    % CALCULARAN LAS NUEVAS PRESIONES PARA EL MODELO DEL ACO.
                    newpre(j)= 14.89-
((10.674*(Ucauda1^1.852/(c^1.852*diametro^4.871)))*NEWLON(j)+(10.674*((CAUD
AL-NEWQ(j))/1000)^1.852/(c^1.852*diametro^4.871))*(LONTOTAL-NEWLON(j)));
%#ok<SAGROW>
                    %ACTUALIZACION DE LAS FORMULAS DEL ACO ( ANT COLONY
                    %OPTIMIZATION) UTILIZADAS EN EL PRIMER CICLO DEL ALGORITMO.
                    NEWFO(j)=1/((P_REFE-newpre(j))^2); % FUNCION OBJETIVO
                    NEWDELTAO(j)=Q/(NEWFO(k));          %CANTIDAD DE FEROMONA DEPOSITADA
                    NEWROTAO(j)=RO*(NEWFO(k));          %PERSISTENCIA DE LA FEROMONA
                    NEWTao(j)=NEWDELTAO(j)+NEWROTAO(j);% PERSISTENCIA DE LA FEROMONA
                    NEWefi(j)=1/NEWFO(j);                % EFICIENCIA

end % TERMINA EL CICLO TRES ##if
j=j+1; % ACTUALIZACION DEL CONTADOR "j" EN UNA UNIDAD

end % TERMINA EL CICLO DOS ##for

NWS1=sum(NEWTao); % SUMATORIA DE LAS NUEVAS CANTIDADES DE
                    % DE FEROMONAS
NWS2=sum(NEWefi); % SUMATORIA DE LA EFICIENCIA
NWPRO=(NWS1^ALFA*NWS2^GAMMA); % NUMERADOR DE LA EC. DE PROBA.

%CON EL CICLO -for- DE NUEVO SE HACEN LAS APROXIMACIONES DE LAS
%PROBABILIDADES. ASI SE PROSEGUIRA HASTA ENCONTAR UNA ESTABILIDAD EN

```

```

%EL SISTEMA DEL ACO.
for categoriaUNO=k:1:100 % CICLO CUATRO

    part2(k)=((NEWTao(k)^ALFA).*(NEWefi(k)^GAMMA)); %DENOMINADOR
                                                    %EC. PROBA
    PROBAUNO(k)=part2(k)./NWPRO; % NUEVAS ACERCAMIENTOS EN LAS
                                % EN LAS PROBABILIDAD
    % UNA VEZ QUE SE OBTIENEN LAS NUEVAS PROBABILIDADES, SE
    % PROSIGUE A LA ACTUALIZACION DE LAS LONGITUDES Y GASTOS.
    NEWLONUNO(k)=PROBAUNO(k)*1610;%%ACTUALIZACION LONGITUD
    NEWQUNO(k)=PROBAUNO(k)*20;    %%ACTUALIZACION GASTOS
    ###SE TERMINA LA TERCERA PARTE

    % -----
    %CONDICIONAL PARA PROCEGUIR CON EL EQUILIBRIO DEL ACO
    if PROBAUNO(k)>= dif %CICLO QUINTO
    % CALCULO DE LAS PRESIONES
    newpredos(k)= 14.89-
((10.674*(Ucaudal^1.852/(c^1.852*diametro^4.871)))*NEWLONUNO(k)+(10.674*((C
AUDAL-NEWQUNO(k))/1000)^1.852/(c^1.852*diametro^4.871))*(LONTOTAL-
NEWLONUNO(k)));
    % APLICACION DE LAS ECUACIONES DEL MODELO MATEMATICO DEL ACO
    NEWFODOS(k)=1/((P_REFE-newpredos(k))^2);
    NEWDELTAODOS(k)=Q/(NEWFODOS(k));
    NEWROTAODOS(k)=RO*(NEWFODOS(k));
    NEWTaodos(k)=NEWDELTAODOS(k)+NEWROTAODOS(k);
    NEWefidos(k)=1/NEWFODOS(k);
    end % TERMINA CICLO QUINTO ##if
    k=k+1; % SE ACTUALIZA EL CONTADOR "k", UNA UNIDAD

end        %TERMINA CICLO CUARTO ## for

    %SUMATORIAS
    NWSS1=sum(NEWTaodos); % CANTIDAD DE FEROMONAS
    NWSS2=sum(NEWefidos); % EFICIENCIA
    NWPRO1=(NWSS1^ALFA*NWSS2^GAMMA); %NUMERADOR DE LA EC.
PROBA.
g=1; % INICIALIZACIÓN DEL CONTADOR "g"

for categoriaDOS=g:1:100 %CICLO SEXTO
    % DENOMINADOR DE LA EC. DE PROBA
    part3(g)=((NEWTaodos(g)^ALFA).*(NEWefidos(g)^GAMMA));

```

```

PROBADOS(g)=part3(g)./NWPRO1; % PROBABILIDADES
% ACTUALIZACION DE LA LONGITUD Y EL GASTO
NEWLONDOS(g)=PROBADOS(g)*1610;%LONGITUD
NEWQDOS(g)=PROBADOS(g)*20; %GASTO
###TERMINA LA CUARTA PARTE

%---
%SE SIGUE TRABAJANDO DE LA MISMA MANERA, NO CAMBIAN LAS
%FORMULAS SOLO SE ACTUALIZAN CON LOS NUEVOS RESULTADOS.
if PROBADOS(g)>= dif %CICLO SEPTIMO
% CALCULO DE PRESIONES
newpretres(g)= 14.89-
((10.674*(Ucauda1^1.852/(c^1.852*diametro^4.871))))*NEWLONDOS(g)+(10.674*((C
AUDAL-NEWQDOS(g))/1000)^1.852/(c^1.852*diametro^4.871))*(LONTOTAL-
NEWLONDOS(g));
%FORMULAS DEL MODELO DEL ACO
NEWFOTRES(g)=1/((P_REFE-newpretres(g))^2);
NEWDELTAOTRES(g)=Q/(NEWFOTRES(g));
NEWROTAOTRES(g)=RO*(NEWFOTRES(g));
NEWTaotres(g)=NEWDELTAOTRES(g)+NEWROTAOTRES(g);
NEWefitres(g)=1/NEWFOTRES(g);
end %TERMINA CICLO SEPTIMO
g=g+1; % ACTUALIZACION DEL CONTADOR "g", EN UNA UNIDAD
end
%TERMINA CICLO SEXTO
%SUMATORIAS
NWSSS1=sum(NEWTaotres); %CANTIDAD DE FEROMONA
NWSSS2=sum(NEWefitres); % EFICIENCIA
NWPRO2=(NWSSS1^ALFA*NWSSS2^GAMMA);% NUMERADOR EC. PROBA.
s=1; % CONTADOR "g" (INICIALIZACIÓN)

for categoriaTRES=s:1:100 %CICLO OCTAVO
%DENOMINADOR DE LA EC. DE PROBABILIDAD
part4(s)=((NEWTaotres(s)^ALFA).*(NEWefitres(s)^GAMMA));
PROBATRES(s)=part4(s)./NWPRO2;% ACTUALIZACIÓN DE PROBABILIDADES
%ACTUALIZACIÓN DE LAS LONGITUDES Y GASTOS
NEWLONTRES(s)=PROBATRES(s)*1610;
NEWQTRES(s)=PROBATRES(s)*20;
###TERMINA LA QUINTA PARTE

%-----
if PROBATRES(s)>= dif %CICLO NOVENO
%CALCULO DE PRESIONES

```

```

        newprecuatro(s)= 14.89-
        ((10.674*(Ucaudal^1.852/(c^1.852*diametro^4.871)))*NEWLONTRES(s)+(10.674*((
        CAUDAL-NEWQTRES(s))/1000)^1.852/(c^1.852*diametro^4.871))*(LONTOTAL-
        NEWLONTRES(s)));
        %FORMULAS DEL MODELO DE ACO
        NEWFOCUA(s)=1/((P_REFE-newprecuatro(s))^2);
        NEWDELTAOCUA(s)=Q/(NEWFOCUA(s));
        NEWROTAOCUA(s)=RO*(NEWFOCUA(s));
        NEWTaocua(s)=NEWDELTAOCUA(s)+NEWROTAOCUA(s);
        NEWeficua(s)=1/NEWFOCUA(s);
        end % TERMINA CICLO NOVENO
        s=s+1; % SE ACTUALIZA EN UNA UNIDAD EL CONTADOR "s"
end      % TERMINA CICLO OCTAVO
        %SUMATORIAS
        NWSSSS1=sum(NEWTaocua); %CANTIDAD DE FEROMONA
        NWSSSS2=sum(NEWeficua); % EFICIENCIA
        NWPRO3=(NWSSSS1^ALFA*NWSSSS2^GAMMA); %NUMERADOR EC. PROBA.
h=1; % CONTADOR "h" (INICIALIZACIÓN)

for categoriaCUA=h:1:100 %CICLO DECIMO
        % DENOMINADOR DE LA EC. DE PROBABILIDAD
        part5(h)=((NEWTaocua(h)^ALFA).*(NEWeficua(h)^GAMMA));
        PROBACUA(h)=part5(h)./NWPRO3;% ACTUALIZACIÓN DE LA PROBABILIDAD
        % ACTUALIZACION DE LAS LONGITUDES Y GASTOS
        NEWLONCUA(h)=PROBACUA(h)*1610; % LONGITUD
        NEWQCUA(h)=PROBACUA(h)*20;      % GASTO
        %### TERMINA SEXTA PARTE

        %-----
        if PROBACIN(t)>= dif %CICLO 13
        %CALCULO DE PRESIONES
        newpreseis(t)= 14.89-
        ((10.674*(Ucaudal^1.852/(c^1.852*diametro^4.871)))*NEWLONCIN(t)+(10.674*((C
        AUDAL-NEWQCIN(t))/1000)^1.852/(c^1.852*diametro^4.871))*(LONTOTAL-
        NEWLONCIN(t)));
        %APLICACIÓN DE FORMULAS DEL MODELO ACO
        NEWFOS(t)=1/((P_REFE-newpreseis(t))^2);
        NEWDELTAOS(t)=Q/(NEWFOS(t));
        NEWROTAOS(t)=RO*(NEWFOS(t));
        NEWTaos(t)=NEWDELTAOS(t)+NEWROTAOS(t);
        NEWefis(t)=1/NEWFOS(t);

```

```

        end % TERMINA CICLO 13
        t=t+1; % AUMENTA "t" EN UNA UNIDAD
    end      % TERMINA CICLO 12

%IMPRESIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS 100 HORMIGAS Y SUS PRESIONES,
%RESPECTO A CADA ITERACIÓN, PARA EL ANALISIS DE RESULTADOS

plot (HMIGA, Pcalcu); grid on;

hold on
plot (HMIGA, newpre)
plot (HMIGA, newpredos)
plot (HMIGA, newpretres)
plot (HMIGA, newprecuatro)
plot (HMIGA, newprecinco)
plot (HMIGA, newpreseis)

xlabel('HORMIGAS'); ylabel('PRESIÓN');
hold off

```

Published with MATLAB® R2014b