INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL AGUA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ANÁLISIS, DISEÑO, OPERACIÓN Y GESTIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA CON EPANET

TOMO I

FORMACIÓN

Instituto Tecnológico del Agua

ANÁLISIS, DISEÑO, OPERACIÓN Y GESTIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA CON EPANET

Tomo I

INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL AGUA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

Enrique Cabrera Marcet
José Abreu

ANÁLISIS, DISEÑO, OPERACIÓN Y GESTIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA CON EPANET

FORMACIÓN

Instituto Tecnológico del Agua

INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

Enrique Cabrera Marcet
Instituto Tecnológico del Agua
Universidad Politécnica de Valencia

José Abreu
Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Coimbra

1. INTRODUCCIÓN

Las redes de distribución de agua a presión nacen con los abastecimientos urbanos hacia mediados del siglo XIX. En España el más antiguo es, muy probablemente, el de Madrid. El canal que llevaría el agua desde río Lozoya hasta la capital de España se acabó de construir el 24 de junio de 1858 y se financió por suscripción popular con la reina Isabel II como principal promotora de tal canal. No en vano la empresa que abastece de agua a toda la Comunidad de Madrid lleva su nombre. La traída de aguas había sido aprobada unos años antes, concretamente en 1851. Casi dos décadas más tarde, hacia 1867, se establece en Lieja la "Compagnie des Eaux de Barcelone" que iba a abastecer de agua a esta ciudad a través del Acueducto de Dos Rius.

Unos años después, en 1882, el Ayuntamiento de Sevilla encarga a la compañía de los ingleses (The Seville Water Company) el abastecimiento de agua a la ciudad por un periodo de 99 años, mientras que la Sociedad de Aguas Potables y Mejoras de Valencia se constituye, con el fin de abastecer la ciudad del Turia, en 1890, de tal manera que hacia finales del siglo XX las grandes ciudades españolas disponen de este servicio. Poco después, y dadas las ventajas que comportaba disponer de agua corriente en las viviendas, el ejemplo se extiende a toda España con inusitada rapidez de tal manera que a comienzos del siglo XX casi todos los núcleos urbanos de nuestro país disponen de este servicio.

Todos estos antecedentes explican que las más de las redes urbanas sean hoy centenarias y que, por ello, muchos kilómetros de sus tuberías también. Hablamos de un conjunto de conducciones cuya longitud total se aproxima a los 100.000 Km, la gran mayoría en el rango de los 500 - 50 mm de diámetro. Una estimación, la de la longitud total, realizada a partir de la relación 2 Km de red por cada mil habitantes, un valor bastante frecuente dadas las características topológicas de nuestras ciudades. La edad media actual (el valor ponderado del producto de la antigüedad por la longitud de cada tramo) es de unos 30 años si se admite que los casos estudiados con detalle en el Instituto Tecnológico del Agua son generalizables al conjunto del Estado. Una edad relativamente joven consecuencia de que las grandes expansiones urbanas han tenido lugar a partir de la década de los 60. Pero son muchos kilómetros que ya superan los 50 años, la edad adoptada como referencia para renovarlas. Una renovación necesaria si se quiere prestar este servicio con estándares de calidad propios del siglo XXI, y que exige inversiones enormes.

Pero de momento, y a diferencia de lo que ocurre en otros países, nadie en España se ha planteado de manera institucional la necesidad de renovar las redes. A modo de ejemplo, ya en 2001 los EEUU estimaban en 83.200 millones de dólares (EPA, 2001), la inversión necesaria hasta el 2021 para la actualizar las tuberías. En España, considerando un período de tiempo similar (20 años) pero a un ritmo de renovación anual más lento (del orden del 2%) se requeriría una inversión en torno a los 8.000 millones de euros. Unas cantidades que, ciertamente, imponen. Y aún cuando la modernización de estos sistemas no ha tenido por el momento cabida en una política del agua que en España, y a lo largo del siglo XX, se ha basado de manera exclusiva en la gestión de la oferta (Cabrera et al., 2002), todo parece indicar que en un plazo de tiempo no excesivamente largo, las cosas van a cambiar.

Así pues, mejorar las prestaciones de nuestras redes de distribución exige inversiones importantes. Pero como el dinero es limitado, y con el final de los fondos europeos que han permitido subsidiar el agua a la vuelta de la esquina, convendrá hacer las inversiones de la manera más juiciosa posible. Y para ello nada como conocer el estado de las redes, sus prestaciones y su funcionamiento. De ahí el interés de este Curso que revisa algunos de los aspectos más importantes relativos al análisis, diseño, operación y gestión de las redes, contando con la ayuda de un programa de cálculo amigable y potente como es EPANET. Un interés que crece si se tiene en cuenta su carácter gratuito. Y aún cuando tiene las notables limitaciones que se comentan en el presente capítulo (no permite simular el comportamiento de la red cuando es sometida a variaciones de carga muy rápidas), su potencial es enorme.

En resumen, pues, a resolver algunas de las cuestiones más relevantes relativas al análisis, diseño, operación y gestión de redes, apoyándonos en EPANET, se dedica este Curso.

2. PROBLEMÁTICA INHERENTE A LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN

En España, y cual se ha dicho, las tuberías a presión comienzan a utilizarse a mediados del siglo XIX, aún cuando los primeros suministros urbanos de agua se implantan con unas décadas de antelación en los países más ricos e industrializados. Dada la comodidad que supone, y que conlleva la erradicación no sólo de los tradicionales aguadores sino sobre todo de las periódicas enfermedades que a través del agua se transmitían, su implantación se lleva a cabo con una rapidez inusitada.

Sin embargo, y como su cálculo hidráulico resulta particularmente complejo porque exige la solución simultánea de un conjunto de ecuaciones no lineales, habrá que esperar hasta 1930, cuando el matemático Hardy Cross propone una serie de aproximaciones sucesivas que permiten alcanzar la solución con mucha mayor rapidez y comodidad, para sistematizar su análisis. Cross aplica inicialmente su propuesta al cálculo de estructuras, pero a los pocos años, concretamente en 1936, la adapta al cálculo de redes. Es ese año cuando publica en Urbana, la Universidad de Illinois, el artículo *"Analysis of Flow in Networks of Conduits or Conductors"* artículo que constituye el punto de partida del moderno análisis de redes. Con todo, y cual se detalla en el apéndice D del manual de EPANET (Algoritmo de Cálculo), el método de resolución que hoy se utiliza es el del Gradiente propuesto por Todini y Pilati en 1987. Más adelante se verá.

Con todo no es el objeto de este Curso entrar en cuestiones matemáticas relacionadas con el análisis de las redes, sino más bien conocer perfectamente la problemática que en la actualidad conlleva su manejo y gestión, sin olvidar en ningún momento los fundamentos teóricos en que descansan. Y es en ese sentido en el que se destaca la importancia que para el análisis de redes supuso la aparición del método de Cross. Como también la tendrá la irrupción, treinta años después, de los ordenadores digitales que van a posibilitar realizar los cálculos de una manera mucho más cómoda y sistemática. Y sin entrar en el detalle de la historia del análisis de redes y de los programas de cálculo que al mismo tiempo se han ido desarrollando (son estas cuestiones que competen a la próxima lección) si conviene subrayar que, tras la consolidación del uso de los ordenadores, son las dos últimas décadas las que verán los avances más significativos, relativos al tema que nos ocupa, habidos a lo largo del pasado siglo XX.

Pese a sus limitaciones poder disponer hoy en día de EPANET es un lujo antaño impensable. En lo que sigue se presentan de manera sucinta, y a partir de aplicaciones prácticas concretas, las grades posibilidades que ofrece a la hora de tomar decisiones tendentes a propiciar la gestión moderna de una red de agua urbana. Los ejemplos que se presentan se han subdividido en cuatro bloques bien definidos: análisis, diseño, operación y gestión. En lo que sigue se exponen los fundamentos de cada uno de estos bloques.

Se analiza una red cuando a partir de unas características físicas bien establecidas (se conocen con detalle los datos de los elementos que integran el sistema, como las tuberías, depósitos y válvulas) y de la demanda que debe satisfacer (incluyendo en la misma su distribución espacial y temporal) se pretende conocer su respuesta. Una respuesta que generalmente se concreta en los niveles de presión, asimismo distribuidos en espacio y tiempo. El análisis, cuando las condiciones en el tiempo apenas si cambian, conviene efectuarlo con el modelo estático y, en caso contrario, con modelos dinámicos. Y aún cuando, de algún modo, cualquier análisis estático es ideal (todo cambia en el tiempo), siendo mucho más sencillo el estudio, cuando las condiciones de funcionamiento de la red varíen lentamente, siempre es el que más conviene realizar. Y ello es así porque en tal supuesto el error cometido con este análisis simplificado es muy reducido.

Analizar una red tiene un enorme interés pues es la única posibilidad para conocer de antemano si la respuesta obtenida es la deseada o si, por el contrario, conviene introducir en el sistema modificaciones que permitan alcanzar la respuesta que conviene.

En el segundo bloque se aborda el diseño de las redes que consiste en determinar los diámetros de las tuberías al objeto de que cumplan con unos estándares de calidad previamente definidos. Los estándares se agrupan, básicamente, en tres grandes bloques:

- Estándares hidráulicos. Los diámetros de las tuberías de la red de distribución deben poder satisfacer de manera simultánea la demanda punta de los abonados manteniendo un nivel de presiones adecuado. Y todo ello sin recurrir a aljibes (depósitos) en las viviendas sobre los que más adelante se volverá. En general (se trata de la Norma alemana, pues en España no hay norma de rango estatal) a la presión mínima se le asigna el valor de quince metros a lo que hay que añadir otros tres adicionales por cada planta de edificación permitida en la calle por la que la tubería discurre, y de acuerdo con las ordenanzas municipales (con el limite de cinco alturas).
- Estándares de calidad. El agua debe ser potable no sólo en el punto de inyección sino también en el grifo del abonado. Por ello es importante controlar la evolución del cloro, evitar los puntos muertos en la red (que propicia el estancamiento de agua en las tuberías) estudiar la evolución de los THM (trihalometanos), analizar la evolución de la calidad del agua debido a la mezcla procedente de dos fuentes de suministro diferentes, etcétera. De las condiciones de diseño puede obtenerse, por ejemplo, la conclusión de que es conveniente instalar una estación de cloración intermedia en la red, que apoye a la que habitualmente existe en cabecera.
- Estándares de fiabilidad. En caso de una avería en un punto determinado de la red, éste debe poder aislarse con válvulas de corte de manera que deje sin servicio al menor número de abonados posible. Obviamente, cuanto más mallada esté la red, más vías alternativas de suministro habrán y más fiable será el sistema.

El tercer bloque temático, de entre los cuatro en los que está organizado el Curso, se refiere a la operación de redes que, de algún modo, trata de las maniobras que hay que realizar para que el funcionamiento del sistema sea óptimo. Y hay bastantes cuestiones a optimizar. Desde los costes energéticos (procurando que el gasto de energía sea mínimo) hasta las presiones de la red que cambian en el tiempo porque los consumos hacen lo propio. Por todo ello es necesario introducir en el sistema mecanismos de control (válvulas que regulen la presión, niveles de los depósitos que provoquen el arranque o la parada de bombas, etcétera), de manera que al final la red funcione del modo más correcto posible.

El cuarto y último bloque del Curso, la gestión de la red, no es cuestión menor. Poder establecer criterios racionales que permitan conocer las tuberías que conviene en primer lugar renovar, apoyarse en los modelos existentes para gestionar mejor las presiones de manera que, sin dejar de cumplir los estándares de calidad impuestos, se minimicen las fugas o, incluso, integrar el modelo hidráulico de la red en el marco más general de un Sistema de Información Geográfico, son aspectos de notable importancia para el gestor de las redes urbanas de agua.

En la presente lección inicial se abunda en todo lo relativo al análisis de redes, porque los demás aspectos (diseño, operación y gestión) que importan al estudio de las redes de distribución se tratarán en capítulos posteriores de manera específica. No es ese el caso del análisis que sólo en esta sesión, y de manera específica, se estudia. Sobre todo en lo que respecta a sus fundamentos. De ahí la atención que se le presta. En cualquier caso y con referencia a los otros tres bloques que el Curso trata, se presenta un breve resumen de cada uno, incluyendo breve comentario relativo a todas las cuestiones que, por las lógicas limitaciones de espacio, no se pueden abordar en el Curso. Pero parece obvio el interés que tiene el que todo lector tenga conocimiento de su existencia.

3. ANÁLISIS DE REDES

Las condiciones de flujo en un sistema hidráulico pueden variar debido a cambios en las demandas, al arranque o paradas de bombas, a cambios de operación de los equipos de control (maniobras de apertura y cierre de válvulas) o al fallo de alguna componente del sistema. Los tiempos de respuesta de los diferentes fenómenos físicos es suficientemente diferente como para poder utilizar un modelo específico que incluya las simplificaciones apropiadas al caso. La capacidad de almacenamiento de los sistemas hidráulicos generalmente varía entre unas cuantas horas hasta unos pocos días. Por otra parte, los fenómenos transitorios tienen lugar con un tiempo de respuesta y duración de sus efectos, hasta alcanzar el nuevo régimen permanente, muy variables: desde algunos segundos hasta varios minutos. Por ello, y puesto que la demanda cambia suavemente en periodos de 5 a 30 minutos, puede suponerse que el efecto de los cambios sobre los caudales distribuidos puede ser inmediato en algunos supuestos o prácticamente invariable en otros, justificando plenamente en determinados supuestos el análisis estático y en otros el dinámico.

En sistemas complejos, pues, el análisis estático presenta un notable interés y, además, se utiliza también para diseñar redes. En cuanto al análisis de transitorios estos, según la escala de variación de tiempos, pueden ser rápidos o lentos. En estos últimos se puede utilizar bien una simulación en período extendido (modelo cuasi-estático) o bien el modelo rígido. Por el contrario, para flujos transitorios rápidos es menester utilizar el modelo elástico.

En lo que sigue se presenta una descripción de las diversas particularidades de cada uno de estos modelos aplicados a sistemas complejos. Se comienza con el modelo estático que, por constituir la base de EPANET, se trata con mayor detalle. Es, además pieza clave en la construcción del modelo cuasi-estático que también incluye el paquete informático que nos ocupa. Los modelos dinámicos (rígido y elástico) son tratados, sobre todo el último, de una manera mucho más concisa, incidiéndose sobre todo en los conceptos.

3.1. Modelo estático

3.1.1. Introducción. Características topológicas.

En este apartado se efectúa un rápido repaso de los fundamentos básicos de la formulación matemática del problema de análisis en régimen permanente de sistemas hidráulicos complejos como lo son las redes de distribución de agua a grandes núcleos urbanos. Se estudia a través de los llamados modelos estáticos o *modelos de equilibrio hidráulico*. Este tipo de modelos permite predecir la respuesta del sistema (caudales internos que circulan a través de sus elementos así como las presiones en los nudos), conocida su configuración y características (comportamiento e interconexión de los diferentes elementos), bajo una situación operativa de funcionamiento determinada (estado de consumos y condiciones definidas en los puntos de alimentación).

Los principales elementos que forman parte de una red hidráulica y que tienen relevancia en el problema de análisis estático son: tuberías, depósitos, válvulas y bombas. Todos estos elementos son en este tipo de análisis considerados *estáticos* y, por tanto, su comportamiento se describe a través de relaciones algebraicas. Las tuberías y válvulas son elementos resistentes (disipan energía) y las bombas elementos transformadores cuya misión es proporcionar energía de presión adicional al fluido (en función del caudal trasegado). Por otra parte, los depósitos constituyen también fuentes de alimentación de presión al sistema (elementos fuente de presión ideal). Por este hecho, en el análisis estático, los depósitos son considerados nudos del sistema. Es decir, un depósito se simulará haciendo coincidir el mismo, como veremos a continuación, con un nudo de altura piezométrica conocida (correspondiente al nivel de agua del depósito) y el caudal de inyección a la red desde el mismo será una incógnita del problema. La descripción más detallada de los componentes, incluyendo su caracterización matemática, se aborda en el capítulo 3 de este Curso.

Conviene, antes de empezar, repasar la terminología que normalmente se utiliza. En primer lugar las *líneas* que se pueden corresponder con tuberías reales (además de bombas o válvulas) o con una determinada asociación de las mismas (eliminando eventualmente ramales poco significativos) que puede incluir además agrupaciones de otros elementos como codos, tés y válvulas de corte (siempre que estén abiertas), pero efectuado las simplificaciones de manera que no afecten la capacidad conductiva real del sistema. Como veremos a continuación, en el análisis hidráulico los consumos se consideran concentrados en los nudos del modelo. Asimismo, una línea del sistema puede ser definida, en general, como un conjunto de elementos del sistema conectados entre dos puntos a través de la cual circula un caudal uniforme, y cuyo comportamiento hidráulico global puede ser descrito mediante una *ecuación constitutiva algebraica*, o sea, por una relación entre el caudal circulante y la diferencia de alturas piezométricas entre los citados puntos extremos.

Una vez agrupados todos los elementos del sistema en las correspondientes líneas, los extremos de cada línea serán *nudos* del sistema. Por lo tanto, definiremos un nudo como un punto de unión de líneas del sistema o bien un punto terminal o de origen de las mismas. De este modo un sistema de distribución, cualquier sea su nivel de complejidad, puede esquemáticamente ser representado, a efectos de análisis hidráulico, por un conjunto de "*nudos*" y "*líneas*" (Figura 1). El agua fluye a lo largo de las líneas y entra o sale del sistema en los nudos (a través de los depósitos o como fuentes externas de caudal, $S=S_Q$). Este esquema, que constituirá la base topológica del modelo, deberá representar con suficiente aproximación el conjunto de todas las líneas y su conexionado.

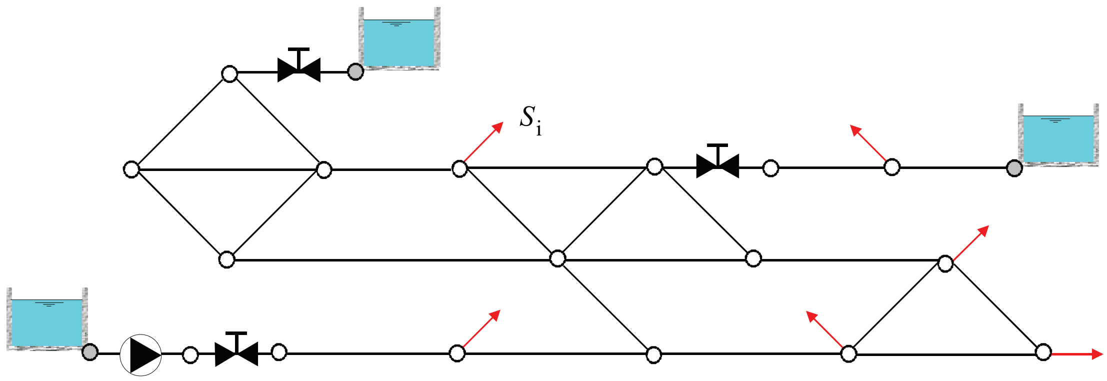

FIGURA 1. ESQUEMA FÍSICO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA.

Ahora bien, según el tratamiento matemático que en el modelo se le da a un nudo, puede ser de *conexión* (o *nudo de caudal*) o de *altura piezométrica fija* (o *nudo de presión*). En lo que sigue se describe el papel de cada uno de ellos.

Un *nudo de conexión* (nudo de caudal) es un punto en el que dos o más líneas confluyen o también por donde un caudal puede entrar o salir del sistema. Como en un problema de análisis el consumo, *S,* es un dato del problema, la presión en el citado nudo será la incógnita a determinar. Un *nudo de altura piezométrica fija* es un punto en el que la presión se mantiene constante. Tal ocurre en una conexión a un depósito de regulación o a una zona de presión invariante. En éstos, la incógnita es por regla general el caudal externo que aportan o consumen del sistema.

Por otra parte, atendiendo a sus características topológicas, un sistema puede ser ramificado, mallado o mixto. Un sistema ramificado se caracteriza por tener una forma arborescente, cuyas líneas se subdividen formando ramificaciones (cualesquiera dos nudos sólo pueden ser conectados mediante un único trayecto). Los sistemas mallados, como su nombre indica, se caracterizan por la existencia de mallas. Una *malla* es un circuito cerrado (tiene su origen y final en el mismo nudo) formado por varias líneas. Por otra parte, las mallas primarias o elementales de un sistema son circuitos de líneas cerrados dentro del sistema que no contienen a su vez otros circuitos cerrados en su interior.

Identificadas las L líneas y los N nudos del sistema ($N=NJ+NF$, siendo NJ el número de nudos de conexión y NF el número de nudos de altura piezométrica fija), el número M de mallas elementales cumple la relación, a partir de la teoría de grafos, bien conocida:

$$M = L - N + 1 \qquad (1)$$

y que resulta válida para cualquier tipo de red. Por ejemplo, para el sistema presentado en la Figura 1 se tiene N=20 y L=26, por lo que el número de mallas elementales del sistema es: $M = L - N + 1 = 26 - 20 + 1 = 7$

3.1.2. Ecuaciones básicas

Independientemente de la forma de interconexión del sistema y del tipo y características propias de los elementos que lo configuran, el estado estacionario responde a dos principios básicos que dan pie a otras tantas ecuaciones: la de continuidad y la de energía. De este modo para cada uno de los N nudos "*i*" del sistema se deberá verificar la ecuación de continuidad que se expresa de acuerdo:

$$\sum_{j=1}^{n} Q_{ij} = S_i \qquad i = 1, 2, \ldots, N \qquad (2)$$

donde el índice j referencia todos los nudos conectados directamente al nudo i en tanto que N corresponde al número total de nudos del sistema. A la expresión anterior hay que asignarle un criterio de signos (Figura 2). Consideraremos un caudal interno, Q_{ij}, positivo cuando el fluido circula del nudo i al nudo j (caudal divergente del nudo) y negativo en el caso contrario (caudal que converge en el nudo). Para los caudales externos S_i se adopta el criterio opuesto de manera que los consumos son siempre negativos.

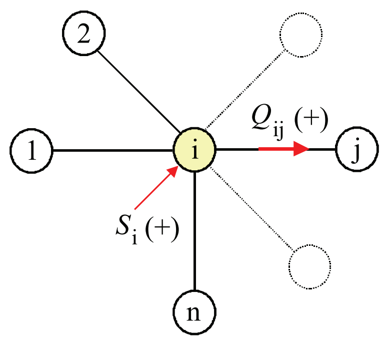

FIGURA 2. CRITERIO DE SIGNOS PARA LA ECUACIÓN DE CONTINUIDAD EN UN NUDO GENÉRICO I.

Si N es el número de nudos del sistema, podremos construir un sistema de N ecuaciones del tipo (2), conjunto al que es posible añadir una ecuación más, la que tiene en cuenta el balance global de caudales para toda la red, que supone exigir el cumplimiento de que "la suma de todos los consumos ha de ser igual a la de aportes".

$$\sum_{i=1}^{N} S_i = 0 \qquad (3)$$

Sin embargo, esta expresión se puede obtener asimismo sumando las N ecuaciones del sistema (2). En consecuencia, las ecuaciones que imponen la conservación de masa (continuidad) proporcionan N relaciones independientes (de las N+1 posibles).

En términos genéricos, la ecuación de energía o ecuación de Bernoulli es aplicable entre dos secciones rectas cualesquiera del sistema, en particular, entre los extremos de cada línea del modelo o a un conjunto de ellas integradas en una malla. Establece que la diferencia de energía (alturas piezométricas) H_i - H_j es igual a las pérdidas por rozamiento y pérdidas menores más la energía añadida al flujo a través de bombas. Lógicamente ΔH_{ij} representa la pérdida de carga total y H_{bomba} el aporte total de energía en el trayecto *i-j*.

$$H_i + H_{bomba} = H_j + \Delta H_{ij} \qquad (4)$$

Ahora bien, tanto para los elementos bombas como para los elementos resistentes se pueden establecer unas leyes de comportamiento propias que relacionan el caudal circulante con, respectivamente, la altura manométrica y la pérdida de carga – *ecuación característica o constitutiva del elemento* -. La combinación de esta ecuación con (4) permite sustituir ΔH_{ij} o H_{bomba} por una función del caudal. Salvo en el caso de válvulas especiales (también denominadas automáticas o multifuncionales y que se verán en la lección correspondiente a las válvulas), en las que la diferencia de alturas depende no solo del caudal sino de las mismas alturas en sus extremos (puesto que cabe la posibilidad de que adopten modos de funcionamiento diferentes), la ecuación que modela el comportamiento de una línea pueda representarse, de manera más simple, como

$$H_i + H_f = f\,(Q_{ij}) \qquad (5)$$

Así, por ejemplo, y cual veremos,

- Si la línea únicamente dispone de elementos resistentes (tubería, válvulas, etc.) es posible escribir (5) como:

$$H_i - H_j = \Delta H_{ij} = R_{ij}\, Q_{ij} \left| Q_{ij} \right| \qquad (6)$$

  en donde el término R_{ij} representa aquí un coeficiente de resistencia hidráulica global de la línea *i-j*, dado por $\dfrac{8\, f_{ij}\, L_{ij}}{g\, \pi^2 D_{ij}^5}$ para un elemento tubería (ecuación de Darcy - Weisbach), y por $\dfrac{8\, k_{ij}}{g\, \pi^2 D_{ij}^4}$ para un elemento válvula o cualquier otra pérdida de carga singular.

- Si la línea corresponde a un elemento bomba se tiene:

$$H_i - H_j = -H_{bomba} = -\left(A + BQ + CQ^2\right) \qquad (7)$$

En el caso de las válvulas especiales (se utilizan en sistemas de suministro de agua y en instalaciones industriales para controlar presiones y caudales) la ecuación (6) tiene que ser generalizada, puesto que la pérdida de carga que estos elementos provocan depende no solamente del caudal que los atraviesa, sino de otras variables como, por ejemplo, las propias alturas piezométricas en sus extremos. De tal manera que se puede escribir:

$$H_i - H_j = f^*(Q_{ij}, H_i, H_j, ...) \tag{8}$$

El análisis más detallado del comportamiento de las válvulas se estudia en la lección que estudia los elementos de protección, regulación y control.

3.1.3. Formulaciones para la resolución del equilibrio hidráulico

La formulación matemática del problema de análisis estático consiste en establecer un sistema de ecuaciones de forma que el número de incógnitas iguale al número de ecuaciones independientes. Se han propuesto distintas formulaciones para la resolución del problema, que fundamentalmente difieren entre sí en el tratamiento del sistema de ecuaciones. Las dificultades típicas provienen de la no linealidad y del gran número de ecuaciones que, en general, hay que resolver. Para simplificar la exposición se admite que el sistema se compone exclusivamente de líneas que se modelan mediante (5). Estas ecuaciones se combinan con las ecuaciones de continuidad (2) para formar el conjunto de *N+L* ecuaciones que sigue:

Si contamos con un sistema de este tipo en el que dejamos como incógnitas los *L* caudales internos que

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{n} Q_{ij} = S_i & N = NJ + NF \text{ ecuaciones} \\ H_i - H_j = f(Q_{ij}) & L \text{ ecuaciones} \end{cases} \tag{9}$$

circulan por las líneas, las *NJ* alturas piezométricas en los nudos de conexión (las *NJ* demandas serán dato) y los *NF* caudales externos aplicados en los nudos de altura conocida, el número total de incógnitas (*N+L*) es igual al número de ecuaciones independientes y la solución existe y es única[(1)]. No obstante, en general, no es necesario resolver de manera simultánea la totalidad de las ecuaciones anteriormente planteadas.

Con respecto a la unicidad de la solución, conviene subrayar que para que el problema tenga efectivamente una única solución es necesario que al menos exista un nudo de altura piezométrica conocida (o que esta sea una función conocida del caudal externo). De otro modo sería posible conocer la diferencia de alturas piezométricas entre cada par de nudos del sistema pero no su altura piezométrica. O dicho de otro modo, existirían infinitos valores de alturas piezométricas en los nudos que cumplirían con las condiciones del problema.

De acuerdo con el juego de datos/incógnitas considerado, en cada nudo hay dos variables (H_i,S_i), de las que una será dato y la otra incógnita. Así, las *NJ* ecuaciones de continuidad del sistema (9) forman un sistema con *L* incógnitas (los caudales internos, Q_{ij}), puesto que el conjunto de variables a resolver sólo contiene caudales. Por otra parte, por cada nudo adicional de altura piezométrica conocida se obtiene una nueva ecuación de continuidad, pero también una nueva incógnita: el caudal de nudo S_i, por lo que el número de incógnitas caudal del conjunto de las *N* ecuaciones de continuidad pasará a ser *L+NF*. Este hecho permite en el caso de

[(1)] Cabe, por supuesto, otro juego de incógnitas diferente al aquí definido y que, puesto que escapa del propósito del presente capítulo, no se considera. El lector interesado puede encontrar información al respecto en Garcia-Serra (1988), Wood y Funk (1993) o Cabrera et al. (1996).

redes ramificadas con un único nudo de altura piezométrica conocido, como se verá a continuación, desacoplar las *NF* ecuaciones de continuidad del sistema (9).

Para una red ramificada se cumple $L = N - 1$. Si, además, el sistema ramificado contiene un único nudo de altura piezométrica conocida, las $NJ = N$-1 ecuaciones de continuidad correspondientes a los nudos de conexión (y que constituyen un sistema de ecuaciones lineales), pueden ser resueltas independientemente del sistema de ecuaciones energéticas, puesto que ellas solas permiten determinar los caudales circulantes por cada una de las L=N-1 líneas del sistema a partir de los datos de consumo en los nudos de la misma. A su vez, el caudal externo, S_i, aportado por el depósito puede ser determinado directamente mediante la ecuación de continuidad o, alternativamente, a partir del balance global de consumos y aportes (3). Así, desde un punto de vista del cálculo hidráulico, se puede describir una red ramificada como aquella en que la determinación de los caudales que circulan por las líneas se puede realizar sin conocer las características de las propias líneas. Basta con conocer los consumos de la red y la conectividad del sistema. Dado que las características hidráulicas de las tuberías y bombas son conocidas, sustituyendo los caudales obtenidos anteriormente en el sistema de ecuaciones de energía, constituido por L=N-1 ecuaciones del tipo (4), se obtienen finalmente, empezando por la altura especificada en el nudo de altura piezométrica conocida, las alturas piezométricas en los $NJ = N$ -1 nudos de conexión del sistema.

Por contraposición, la distribución de caudales en las líneas de una red mallada sí depende de las características hidráulicas de las mismas. Por otra parte, desde el punto de vista topológico, un sistema con varios puntos de alimentación y sin mallas, dada su estructura arbórea, puede considerarse ramificado, si bien hidráulicamente (desde el punto de vista del cálculo) es un sistema mallado. En definitiva, siempre que un sistema contenga mallas o, alternativamente, siendo ramificado disponga de más de un nudo de altura piezométrica conocida, las *NJ* ecuaciones de continuidad (2) combinadas con las *L* ecuaciones de línea forman, como veremos a continuación, un sistema acoplado de ecuaciones no lineales que permiten determinar los *L* caudales internos de las líneas así como las *NJ* alturas piezométricas en los nudos de conexión. El cálculo de los caudales externos aplicados a cada uno de los nudos de altura conocida, se efectuará una vez determinados los caudales de línea, aplicando las *NF* ecuaciones de continuidad.

En sistemas mallados el sistema de ecuaciones de continuidad lo componen *N* ecuaciones, mientras incluye como incógnitas L+NF caudales de línea (L>N-1). Resulta, pues, evidente que aquel sistema no basta para determinar las incógnitas Q_{ij}. En el caso particular de un sistema ramificado con varios nudos de altura piezométrica conocida se cumplirá que L=N-1, pero por cada nudo de altura conocida aparece una nueva incógnita: el caudal aportado o consumido en el nudo S_i. El número total de caudales incógnitas en las *N* ecuaciones de continuidad es, pues, L+NF=N-1+NF>N, (dado que NF>1), por lo que el sistema formado por las ecuaciones de continuidad no es suficiente.

Sin embargo, en ambos casos, las *NJ* ecuaciones de continuidad y las *L* ecuaciones de energía de (9) constituyen un sistema de NJ+L ecuaciones algebraicas que permite la determinación de los caudales internos Q_{ij} de las líneas y de las alturas H_i en los nudos de conexión. Tal sistema no puede ser resuelto mediante un método directo, puesto que las ecuaciones de energía son no lineales. El método del gradiente propuesto por Todini (1979) y posteriormente mejorado por Todini y Pilati (1987) y Salgado (1988) ha demostrado robustez y adquirido una notable aceptación entre la comunidad científica, tanto que en la actualidad es, probablemente, el método de resolución más empleado en el análisis de redes. Y así, por ejemplo, es el algoritmo utilizado en el más popular de los paquetes de cálculo, el EPANET (Rossman, 1994) al que el presente Curso se refiere.

Además de contar con las *L* ecuaciones de línea y *N* ecuaciones de nudo formuladas a través del sistema (9), se pueden plantear *M* ecuaciones de malla. Estas ecuaciones resultan de aplicar el principio de “conservación” de la energía mecánica (4), a un circuito cerrado. Por ello, la suma algebraica de las pérdidas de carga y de la energía proporcionada al fluido a lo largo de un circuito cerrado debe ser nula.

Ahora bien, como las $L+N+M$ ecuaciones anteriores no son independientes, para resolver el problema de análisis se han venido proponiendo diversas alternativas que difieren en la formulación del sistema de ecuaciones. Todo ello en aras a reducir su tamaño y dotarlos de mejor convergencia. Nos referimos a los ya clásicos planteamientos de la *formulación por nudos* (ecuaciones en H), *formulación por líneas* (ecuaciones en Q) y *formulación por mallas* (ecuaciones en ΔQ).

Cada una de las alternativas presenta ventajas e inconvenientes. Así, por ejemplo, si bien la formulación por mallas es la que da lugar a un sistema con menor número de ecuaciones (M ecuaciones), exige determinar un conjunto inicial de caudales que satisfagan la continuidad en todos los nudos. Por otra parte, la formulación por mallas (y también por líneas) requiere información adicional en la definición de mallas independientes así como en la formulación de las ecuaciones de malla asociadas.

Tras lo expuesto, y aunque comporta resolver un conjunto de ecuaciones mayor, la formulación planteada para aplicar el algoritmo del gradiente de Todini y Pilati (1987) ha adquirido gran aceptación entre la comunidad científica. En ello tiene mucho que ver el que se genera una matriz de coeficientes que además de ser simétrica tiene alta dispersión, es decir, con una mayoría de entradas nulas, hecho que permite la utilización de técnicas eficientes de reordenamiento, adecuadas para matrices dispersas y que simplifican significativamente el sistema a resolver pues permiten almacenar y operar sólo con los elementos de valor no nulo de la matriz de coeficientes.

En resumen, de cuanto antecede se concluye que el análisis de redes constituye un problema matemáticamente simple, aunque extraordinariamente laborioso, si bien hoy en día gracias al creciente uso y a la potencia de los ordenadores no representa inconveniente alguno. En la práctica el verdadero problema del análisis de redes es el conocimiento de los datos de partida. Porque de la bondad de ellos (rugosidades y diámetros efectivos de sus líneas, distribución y evolución temporal de consumos en los nudos, etc.) depende la fiabilidad de cualquier modelo elaborado a partir de una red existente.

3.2. Modelo cuasi-estático

En el modelo descrito los valores obtenidos (resultados de un análisis estático) tienen validez exclusivamente instantánea (estado del sistema en un momento), y corresponden así a una fotografía del sistema. Tradicionalmente, las tuberías se dimensionan, en lo que a diámetro (o capacidad de transporte) se refiere, considerando el estado estacionario del sistema más desfavorable y, por ello los modelos estáticos constituyen una herramienta auxiliar de los modelos de diseño (con frecuencia, dentro de un proceso iterativo).

Ahora bien, centrándonos, una vez más, en los sistemas de distribución de agua, se constata que el principio de asegurar el suministro en todo momento conduce a un mallado muy fino y a una red sobredimensionada que se caracteriza por zonas de estancamiento y largos períodos de retención (Cohen, 1993). Ocurre que los consumos (y, por tanto, los caudales que circulan por las tuberías del sistema y las presiones) no se mantienen constantes, sino que presentan fluctuaciones diarias importantes. Por otro lado, las cotas de los niveles de agua en los depósitos de regulación sufren variaciones debidas al balance instantáneo de masa de agua del sistema. Las estaciones de bombeo arrancan o paran (o existe variación en la velocidad de rotación y/o número de bombas en funcionamiento), y las válvulas son maniobradas para operar adecuadamente el sistema. De hecho, si queremos gestionar los sistemas de manera eficiente manteniendo los valores de las diferentes variables en sus valores óptimos, hay que regularlos.

Por consiguiente, el modelo cuasi-estático, también denominado *simulación en período extendido*, y que superpone diferentes fotografías instantáneas estáticas, es de gran utilidad en el análisis de la evolución del comportamiento de los sistemas hidráulicos a presión en la escala de tiempos larga, con vistas a obtener la gestión y el diseño (sobre todo los volúmenes de regulación de los depósitos) más adecuado de los mismos. Para ello hay que simular la evolución de las variables asociadas a la red (presiones, niveles y caudales) para un periodo amplio de tiempo (24 horas, por ejemplo) cumpliendo el balance de masas en el sistema de acuerdo con las previsiones de consumos.

Para acometer el estudio de los niveles de calidad de agua (modelos de calidad) en los que se analiza la evolución temporal y espacial de un contaminante u otra sustancia en el agua (por ejemplo cloro libre residual) son también necesarios modelos en período extendido (simulación dinámica). Sólo de este modo se pueden determinar evoluciones temporales de sustancias, tiempos de viaje de las mismas por el interior de la red, etc.

Como se ha indicado ya con anterioridad, cuando las condiciones de contorno varían gradualmente en el tiempo, es aceptable despreciar los efectos elásticos e inerciales en las ecuaciones fundamentales (la mayor parte de redes hidráulicas, -por sus muchos kilómetros de tubería-, tienen gran inercia) lo que equivale a efectuar la hipótesis de que los equilibrios hidráulicos se establezcan de un modo casi instantáneo, máxime cuando la escala de tiempos de nuestro análisis es larga (varias horas). El modelo cuasi-estático en realidad es el resultado de superponer una secuencia de estados estacionarios a lo largo de un cierto período de tiempo (período de simulación). Cada solución estacionaria corresponde a un instante distinto y a un diferente estado del sistema. Son pues las mismas ecuaciones que gobiernan el flujo en las tuberías, pero tras un intervalo de tiempo transcurrido, Δt, se actualizan la totalidad de las variables. En este sentido, la característica dinámica le viene conferida por el hecho de disponer de una serie de condiciones de contorno lentamente variables en el tiempo que van cambiando es estado del sistema.

La ecuación dinámica que rige el llenado/vaciado de un depósito cuyo nivel se admite varía lentamente en el tiempo (para lo que es posible despreciar la inercia) adopta la forma

$$A_{d_i}\frac{dz_i}{dt}-\sum_{j=1}^{n}Q_{ij}+S_i=0 \qquad i=1,2,\ldots,N_d \tag{10}$$

en donde A_{di} es la área de la sección transversal del depósito i, z_i es el nivel de agua en el mismo, n el número de tuberías que convergen (divergen) en el depósito, a las cuales está asociado un caudal interno Q_{ij}; S_i es la aportación (o demanda) al depósito, que en este tipo de modelo puede ser una función conocida del tiempo – condición de contorno no dinámica *autónoma*. Finalmente en la expresión (10) el parámetro N_d coincide con el número de depósitos. El conjunto de las ecuaciones del tipo (10) son las que confieren el carácter dinámico al modelo cuasi-estático.

Del punto de vista de su formulación, este problema es muy semejante al anterior (análisis estático), bastando en sustituir las NF ecuaciones de continuidad estáticas del problema estacionario por las correspondientes NF ecuaciones dinámicas del tipo (10), suponiendo que los diferentes nudos de altura piezométrica conocida del modelo estático corresponden a depósitos de nivel variable. Sin embargo, desde el punto de vista matemático, esta variación conlleva a dos alteraciones fundamentales del problema. En primer lugar, las NF ecuaciones diferenciales, al contrario del que ocurría en el caso estacionario, no se encuentran ahora desacopladas del resto del sistema de $NJ+L$ ecuaciones. En segundo lugar, ya no tenemos que resolver un sistema de ecuaciones algebraicas si no un sistema de ecuaciones algebraico-diferencial.

Para poner de manifiesto la naturaleza dinámica del problema, así como sus métodos de resolución en el caso de sistemas complejos, se considera, como se ilustra en la Figura 3, el caso más sencillo de un problema de este tipo. Se trata de un sistema con dos depósitos de nivel variable conectados por una tubería de sección constante (se supone que las secciones rectas de los depósitos son suficientemente grandes con relación a la sección recta de la tubería para que los niveles de agua varíen con suficiente lentitud y así poder despreciar la inercia del fluido en su interior). Supóngase, inicialmente, una aportación externa S_1 al depósito 1 y una demanda S_2 al depósito 2 iguales, de forma que se alcanza un régimen permanente ($S_1= S_2= Q_0$, siendo Q_0 el caudal de régimen en la tubería). En un instante t=0, estos caudales externos se anulan ($S_1= S_2= 0$) y se pretende calcular el vaciado del depósito 1 y el correspondiente llenado del depósito 2, así como la evolución a lo largo del tiempo del caudal en la tubería de conexión.

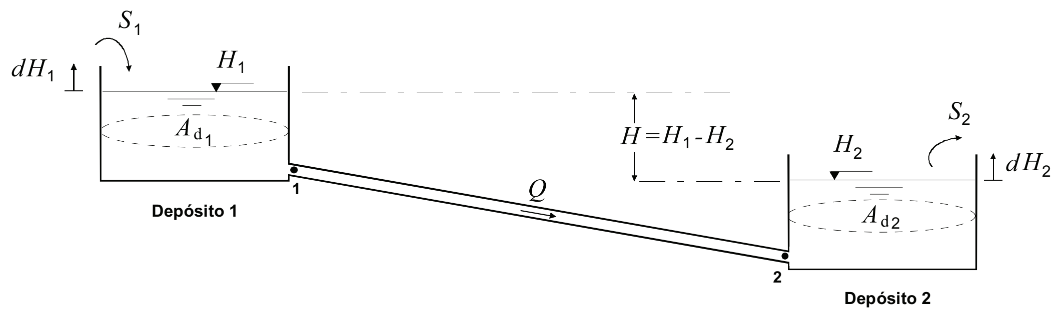

FIGURA 3. FLUJO DE AGUA ENTRE DOS DEPÓSITOS DE NIVEL VARIABLE.

Despreciando las pérdidas de carga localizadas, la ecuación estática de la tubería se escribe:

$$H_1 - H_2 = R\,Q^2 \tag{11}$$

A su vez la ecuación dinámica (10) aplicada a los depósitos 1 y 2 proporciona:

$$\frac{dH_1}{dt} = -\frac{Q}{A_{d_1}} \qquad \text{y} \qquad \frac{dH_2}{dt} = \frac{Q}{A_{d_2}} \tag{12}$$

a partir de las cuales podemos escribir:

$$dH = dH_1 - dH_2 = -\left(\frac{1}{A_{d_1}} + \frac{1}{A_{d_2}}\right) Q\,dt = -\frac{2}{C_d^*}\,Q\,dt \tag{13}$$

Combinando (13) con (11) resulta

$$\frac{dH}{dt} = -\frac{2}{C_d^*\sqrt{R}}\sqrt{H} \tag{14}$$

donde $C_d^* = 2\left(\frac{1}{A_{d_1}} + \frac{1}{A_{d_2}}\right)^{-1}$ es el parámetro que caracteriza la capacitancia equivalente de los depósitos. En el caso de $A_{d_1} = A_{d_2} = A_d$, $C_d^* = A_d$.

La solución al problema dinámico, demanda resolver la ecuación diferencial (14). En este ejemplo, debido a su extrema sencillez, es posible llevar a cabo una integración analítica que proporciona para *h*=*h*(*t*)

$$H = \left(\sqrt{H_0} - \frac{1}{C_d^*\sqrt{R}}\,t\right)^2 \tag{15}$$

y para el caudal,

$$Q = Q_0 - \frac{1}{R\,C_d^*}\,t \tag{16}$$

ecuaciones que evidencian la dependencia de la solución de la resistencia R de la tubería y de la capacitancia C_d^* de los depósitos.

En un sistema complejo la ecuación (11) se sustituye por el sistema de $N+L$ ecuaciones no lineal (9) que caracteriza el comportamiento estático global y, por tanto, el problema ya no admite una solución analítica. Además, el sistema debe resolverse de manera simultánea con las ecuaciones que gobiernan el comportamiento dinámico de las variaciones de nivel en los depósitos, pues, como hemos visto en el ejemplo simple anterior, se trata de un problema acoplado.

Así, las componentes clave de un modelo cuasi estático (ver Figura 4, donde se presenta de forma esquemática un diagrama de flujo de un modelo de este tipo) son:

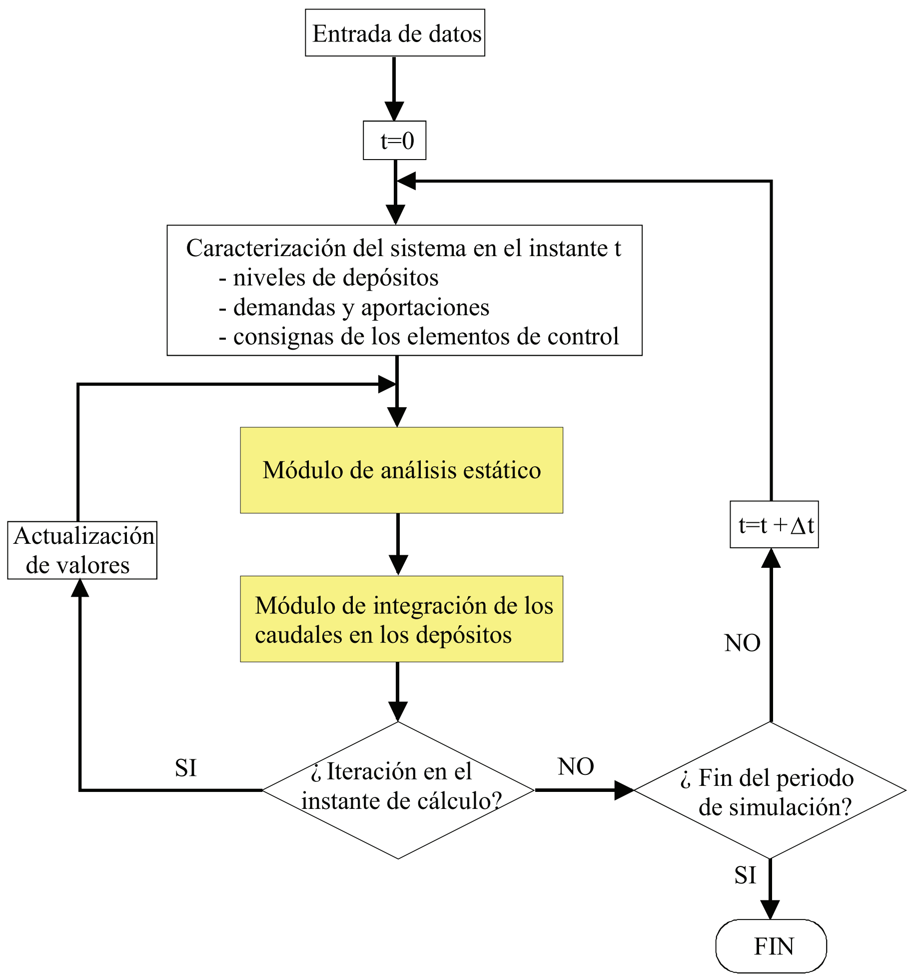

FIGURA 4. DIAGRAMA DE FLUJO DEL MODELO CUASI-ESTÁTICO.

- *Módulo de análisis estático*: para un determinado instante genérico *t*, en el que se dispone de un escenario dado de consumos en los nudos, unos niveles de agua en los depósitos y unos estados de los diferentes elementos del sistema (bombas y válvulas), este módulo proporciona los valores de los caudales circulantes por las tuberías y de las alturas piezométricas en los nudos de conexión del sistema.
- *Módulo de integración de los caudales en los depósitos*: con los valores obtenidos de caudales en las líneas que concurren en los depósitos (modelo estático) y a partir de las curvas de demanda en los nudos y

las leyes de variación del volumen de agua en los depósitos, se procede a través de un esquema de integración de las ecuaciones dinámicas de los depósitos a efectuar el balance de masas en el sistema de forma a obtener las variaciones de los niveles en los depósitos. Este esquema de integración permite además interconectar entre sí a lo largo del tiempo la secuencia de soluciones estáticas que se van obteniendo.

Estos modelos, además de describir la evolución de los volúmenes de agua en los depósitos y las variaciones de estado del equipamiento electromecánico, permiten incluir asimismo reglas de operación (arranque o parada de grupos de bombeo en función de los consumos, de las presiones o de los niveles de agua de los depósitos, las condiciones de actuación de válvulas de control, etc.). Un proceso que, en general, requiere iteraciones en cada instante de cálculo.

Por otra parte, el módulo de cálculo debe contener un algoritmo que contemple la modificación de los estados de los elementos tales como líneas (que pueden quedar desconectadas por el hecho de que se encuentran conectadas a depósitos que eventualmente estarán completamente llenos o vacíos) válvulas (abiertas o cerradas) o bombas (en marcha o paradas). Dichas modificaciones han de poder realizarse tanto con consignas temporales como mediante consignas función de los valores que adopten otras variables del sistema. En este último caso, en general, es necesario utilizar una técnica iterativa para cada intervalo de cálculo.

Las diferencias entre los diferentes modelos o esquemas de integración numérica dependen del modo de discretizar la ecuación diferencial (10). El método más simple es el método explícito de Euler. La integración de (10) mediante el método de Euler, entre dos instantes de tiempo consecutivos (t, t+Δt), conduce a

$$z_i(t+\Delta t) = z_i(t) + \frac{\Delta t}{A_{d_i}}\left[Q_i(t) + S_i(t)\right] \tag{17}$$

donde se ha definido como Q_i el sumatorio de todos los caudales internos que convergen (divergen) del depósito, $Q_i = \sum_{j=1}^{n} Q_{ij}$.

Desde un punto de vista físico, la expresión (17) expresa la hipótesis de que el balance de caudales en el depósito es constante durante el intervalo de tiempo Δt. Esta hipótesis, en el caso del sistema de la Figura 3, hace, por ejemplo, que el vaciado del depósito 1 sea más rápido en el modelo numérico que en el modelo analítico (Abreu et al., 1995). Por ello, al utilizar esta técnica es necesario tener especial atención en la elección del intervalo de discretización para así no correr el riesgo de que los resultados del modelo se aparten de modo significativo de los valores del sistema real. Técnicas más precisas para integrar la ecuación (14) fueron presentadas por Rao y Bree (1977), basándose en el método de Euler modificado y utilizando un esquema de predicción-corrección.

Sin embargo, desde el punto de vista matemático, es interesante observar que, tal como ocurría en el caso estacionario, al resolver el problema a través del método explícito las condiciones de contorno depósito (en esto caso, considerado de nivel variable) se desacoplan con relación a las ecuaciones de equilibrio hidráulico del resto del sistema. Con los valores de los caudales obtenidos en las líneas que concurren en los depósitos, se procede a calcular los valores en los niveles de los mismos. Debido a esta forma de resolución del problema, y por cuanto se trata de una sucesión de estados estacionarios, algunos autores no consideran este tipo de análisis propiamente dinámico. Sin embargo, esta circunstancia es consecuencia de la forma particular de resolución del problema que no de la formulación matemática del mismo. En la realidad, como anteriormente se vio, el comportamiento dinámico de las variaciones de nivel en los depósitos se encuentra acoplado al comportamiento estático de la red de tuberías.

Cual se verá en la próxima lección, son numerosos los paquetes comerciales existentes en el mercado que han sido desarrollados para llevar a cabo el análisis en periodo extendido de redes. Se destacan:

- KYPIPE desarrollado en Lexington, en la Universidad de Kentucky (Wood,1991); http://www.kypipe.com
- H2ONET desarrollado por la empresa MWH Soft Inc (Montgomery Watson,1996) http://www.mwhsoft.com;
- EPANET desarrollado por la Environmental Protection Agency (USA) y cuyos desarrollos pueden seguirse en Rossman (1994);

Conviene subrayar que, actualmente, la generalidad de estos programas incorporan módulos de calidad que completan sus amplias prestaciones. Desde esta óptica EPANET, desde su aparición en 1992, es el punto de referencia.

3.3. Modelos dinámicos

A la hora de modelar el movimiento de los fluidos en el interior de las tuberías a presión, el modelo dinámico "cuasi-estático" no incluye dos aspectos especialmente significativos que es menester tomar en consideración cuando los cambios que se desean modelar son más rápidos. En particular el término de inercia y el término elástico. Y así, cuando se desea estudiar las variaciones de presión a lo largo de la red debidos a los cambios de demanda o a la variación de los niveles de agua en los depósitos de cabecera, parece claro que estas variaciones son los suficientemente lentas como para que los cambios de velocidad y de presión que inducen en el agua circulante y en los nudos de la red sean muy discretas. Y, en consecuencia, los efectos debidos a la inercia del agua (se trata de un fluido de elevada densidad cuyos cambios de velocidad suponen un consumo o un aporte, -según el signo de la aceleración-, de energía al conjunto del sistema) y la elasticidad del sistema (cuando se comprimen tanto el fluido como la tubería tienen capacidad para almacenar energía que devuelven en cuanto la presión desciende) no es menester incluirlos en el modelo.

Pero claro, hay situaciones en las que los cambios de flujo son muy son importantes y el modelo debe incluir los dos efectos precedentes (inercia y elasticidad). Es el caso de un reventón en una conducción, una maniobra brusca de una válvula, el arranque o parada de una bomba o, en fin, el conocido problema de la intrusión patógena, con entrada de agua en la conducción, por causa de una depresión, que previamente se ha fugado. En función de que se incluya uno sólo o los dos efectos, se llega a los dos modelos dinámicos tradicionales que se presentan en lo que sigue. El primero de ellos toma en consideración sólo uno de los dos efectos, la inercia del agua en la tubería y es conocido por modelo rígido (antaño se le nombraba como modelo de oscilación en masa) mientras que el que considera los dos efectos es el modelo elástico, más conocido por golpe de ariete.

A la modelación matemática de las líneas que cada uno de estos modelos hace, y que veremos sucintamente a continuación, hay que añadir las condiciones de contorno de cada caso, unas condiciones de contorno que incluyen la fuente perturbadora que debe modelarse de manera que refleje con rigor la generación de la perturbación y su posterior modificación. La enorme variedad de elementos que en la práctica podemos encontrar (válvulas, ventosas, bombas, calderines, etcétera) hace que la representación matemática de las condiciones de contorno sea uno de los aspectos más complejos y que mayores desafíos comporta a la hora de construir modelos dinámicos. En general su tratamiento es el mismo para cualquiera de los modelos inerciales que existen, el elástico y rígido. Apoyándose el presente Curso en el software EPANET, no es del caso detallar las ecuaciones que modelan cada una de las condiciones de contorno que en la práctica se pueden presentar y que, en cualquier caso, pueden consultarse en Abreu (2004). Con todo sí parece oportuno referir las limitaciones de EPANET presentando los modelos rígido y elástico y explicando en qué casos es menester aplicarlos y ante los cuales EPANET no es solvente.

Para seguir leyendo haga click aquí