

Cuadernos de I+D+i

23

Canal 
de Isabel II

Estudio de observabilidad
para la estimación
del estado hidráulico de la red
sectorizada de abastecimiento



© Canal de Isabel II 2016

Autores

Javier González Pérez
Roberto Mínguez Solana
Sarai Díaz García

Dirección del estudio

Bruno Rodríguez Rodríguez

ISSN de la edición impresa: 2254-8955

ISSN de la edición en soporte electrónico: 2340-1818

Depósito Legal: M-11431-2017

23

Estudio de observabilidad para la estimación
del estado hidráulico de la red sectorizada
de abastecimiento



Exclusión de Responsabilidad

Las afirmaciones recogidas en el presente documento reflejan la opinión de los autores y no necesariamente la de Canal de Isabel II.

Tanto Canal de Isabel II como los autores de este documento declinan todo tipo de responsabilidad sobrevenida por cualquier perjuicio que pueda derivarse a cualesquiera instituciones o personas que actúen confiadas en el contenido de este documento, o en las opiniones vertidas por sus autores.

Presentación

Los cuadernos de I+D+i de Canal de Isabel II forman parte de la estrategia de gestión del conocimiento de la empresa y del desarrollo de su Plan de Investigación, Desarrollo e Innovación.

Son elemento de difusión de proyectos e iniciativas desarrollados y auspiciados desde la Empresa para la innovación en las áreas relacionadas con el servicio de agua en el entorno urbano.

Exponen las diferentes problemáticas abordadas en cada proyecto junto con los resultados obtenidos. La intención al difundirlos mediante estas publicaciones es compartir las experiencias y conocimientos adquiridos con todo el sector de servicios de agua, con la comunidad científica y con cuantos desarrollan labores de investigación e innovación. La publicación de estos cuadernos pretende contribuir a la mejora y eficiencia de la gestión del agua y, en consecuencia, a la calidad del servicio prestado a los ciudadanos.

Los títulos aparecidos en la colección de Cuadernos de I+D+i son los que figuran en la tabla siguiente.

TÍTULOS EN LA COLECCIÓN DE CUADERNOS DE I+D+I

Nº colección	Año	Cuadernos Investigación, Desarrollo e Innovación publicados
1	2007	Transferencias de derechos de agua entre demandas urbanas y agrarias. El caso de la Comunidad de Madrid
2	2008	Identificación de rachas y tendencias hidrometeorológicas en el ámbito del sistema de Canal de Isabel II
3	2009	Participación de Canal de Isabel II en el Proyecto Internacional de Eficiencia en la de Isabel II (IDMF)
4	2008	Microcomponentes y factores explicativos del consumo doméstico de agua en la Comunidad de Madrid
5	2008	El agua virtual y la huella hidrológica en la Comunidad de Madrid
6	2008	Estudio de potenciales de ahorro de agua en usos residenciales de interior
7	2008	Investigación sobre potenciales de eficiencia con el empleo de lavavajillas
8	2010	Precisión de la medida de los consumos individuales de agua en la Comunidad de Madrid
9	2010	Proyecto de investigación para la definición y evaluación de la aplicabilidad de un bioensayo para la determinación de la toxicidad del agua utilizando embriones de pez Cebra
10	2010	Eficiencia en el uso del agua en jardinería en la Comunidad de Madrid
11	2010	Técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica para la evaluación de la demanda de agua para usos de exterior en la Comunidad de Madrid
12	2010	Estudio sobre la dinámica de cianotoxinas en dos embalses de abastecimiento de Canal de Isabel II
13	2011	Desarrollo de un sistema de validación, estimación y predicción de consumos horarios por sectores para la red de distribución de Canal de Isabel II
14	2011	Seguimiento de la consolidación del desarrollo urbano en la Comunidad de Madrid mediante técnicas de teledetección
15	2012	Experiencias para la recuperación del fósforo de las aguas residuales en forma de estruvita en Canal de Isabel II
16	2012	Integración de la predicción meteorológica en los módulos de gestión del sistema de abastecimiento de Canal de Isabel II, mediante modelos de aportación diaria
17	2012	Mejora de la capacidad de pronóstico de aportaciones mensuales y estacionales en el ámbito de Canal de Isabel II
18	2013	Aportación de nutrientes desde la cuenca al embalse de Pinilla. Incidencia en el proceso de eutrofización
19	2013	Un nuevo criterio para el cálculo del caudal de agua residual urbana
20	2014	Gestión de Ideas en Canal de Isabel II de Isabel II: la experiencia GENYAL

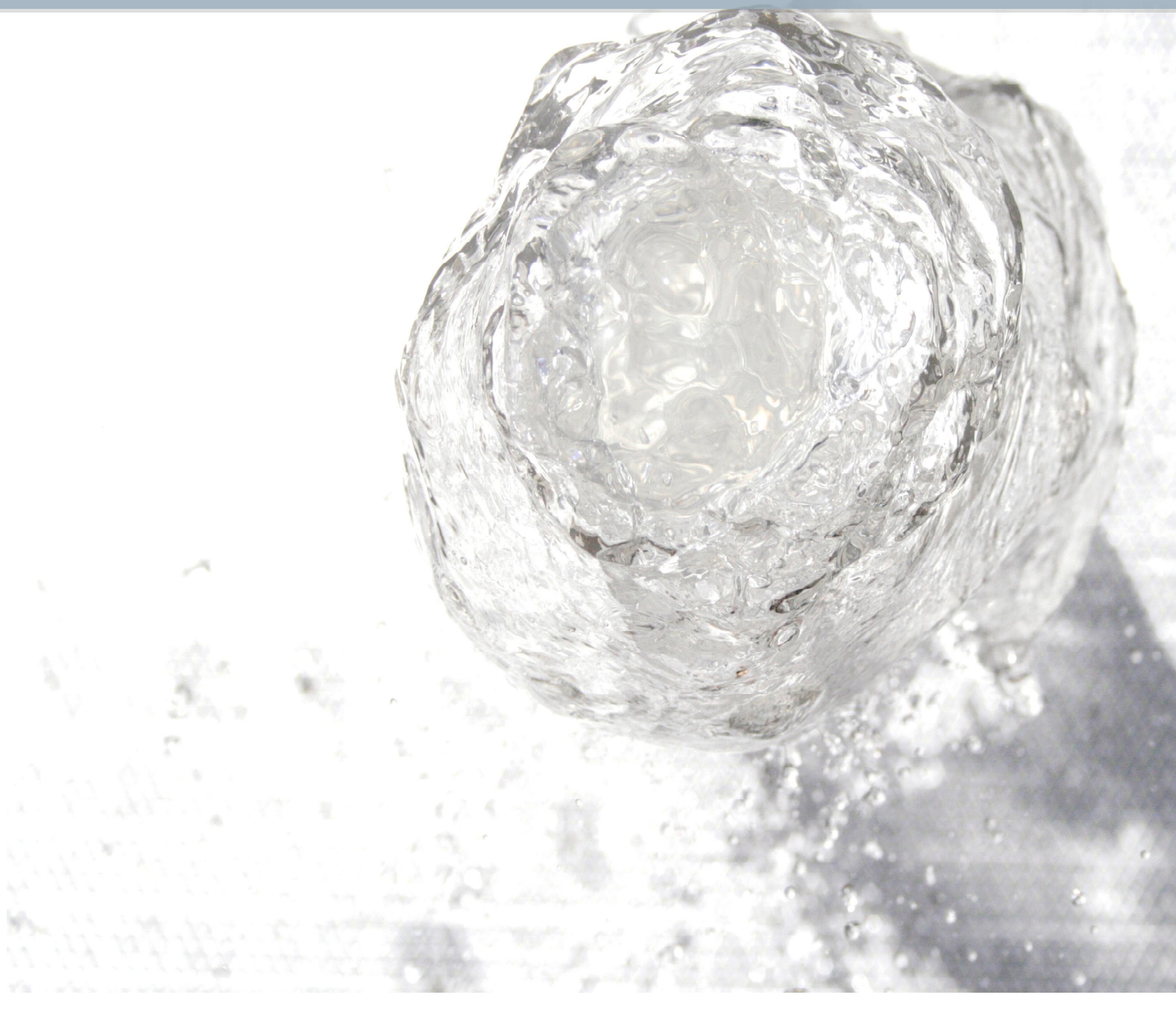
<i>Nº colección</i>	<i>Año</i>	<i>Cuadernos Investigación, Desarrollo e Innovación publicados</i>
21	2014	Investigación sobre técnicas para la medición de subsidencias relacionadas con la explotación de acuíferos
22	2015	Régimen de precipitaciones en la Cuenca del Lozoya y adyacentes

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Página
1. RESUMEN EJECUTIVO	10
2. INTRODUCCIÓN	19
2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
2.2. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	23
3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE ESTIMACIÓN DE ESTADO Y LA NECESIDAD PREVIA DEL ANÁLISIS DE OBSERVABILIDAD DE DICHO ESTADO	24
3.1. ESTIMACIÓN DE ESTADO	25
3.2. ANÁLISIS DE LA OBSERVABILIDAD	26
3.2.1. Identificación de regiones observables	27
3.2.2. Cuantificación de la incertidumbre de la observación	28
3.3. UBICACIÓN ESTRATÉGICA DE EQUIPOS DE MEDIDA ADICIONALES	30
4. ANÁLISIS DE LA RED ESTRATÉGICA	31
4.1. LA RED	32
4.2. ANÁLISIS DE EQUIPOS DE MEDIDA	32
4.2.1. Equipos de medida disponibles	32
4.2.2. Precisión de las medidas	33
4.3. JUSTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD DEL ANÁLISIS DE OBSERVABILIDAD	34
5. DEFINICIÓN Y TRATAMIENTO DE LAS ECUACIONES DEL MODELO HIDRÁULICO QUE GOBIERNA LA RED DE ABASTECIMIENTO PARA EL ANÁLISIS DE OBSERVABILIDAD	36
5.1. COMPONENTES BÁSICOS DE LA RED DE ABASTECIMIENTO	37
5.2. EL MODELO DE LA RED	37
5.2.1. Variables a considerar	38
5.2.2. Medidas posibles	39
5.2.3. Ecuaciones de gobierno del comportamiento hidráulico	39
5.3. CONSTRUCCIÓN DE LA MATRIZ JACOBIANA	40
5.3.1. Matriz Jacobiana básica	40
5.3.2. Inclusión de bombas y válvulas	42
5.3.3. Inclusión de sectores	43

	Página
6. IDENTIFICACIÓN DE REGIONES OBSERVABLES EN LA RED ESTRATÉGICA	45
6.1. ADAPTACIÓN DE LA METODOLOGÍA A LA RED ESTRATÉGICA	46
6.1.1. Metodologías adaptadas	46
6.1.2. Selección de la metodología óptima	52
6.2. IDENTIFICACIÓN DE REGIONES OBSERVABLES EN CONDICIONES NORMALES DE EXPLOTACIÓN	55
6.3. IDENTIFICACIÓN DE BOMBAS Y VÁLVULAS OBSERVABLES	57
6.4. IDENTIFICACIÓN DE VÁLVULAS DE DERIVACIÓN OBSERVABLES	58
6.5. IDENTIFICACIÓN DE ROTURAS OBSERVABLES	59
7. CUANTIFICACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE LA OBSERVACIÓN EN LA RED ESTRATÉGICA	60
7.1. ADAPTACIÓN DE LA METODOLOGÍA A LA RED ESTRATÉGICA	61
7.2. INCERTIDUMBRE PARA DEMANDAS MÁXIMAS	64
7.3. INCERTIDUMBRE PARA DEMANDAS MEDIAS	66
7.4. INCERTIDUMBRE PARA DEMANDAS MÍNIMAS	66
8. UBICACIÓN ESTRATÉGICA DE EQUIPOS DE MEDIDA ADICIONALES	68
8.1. ADAPTACIÓN DE LA METODOLOGÍA A LA RED ESTRATÉGICA	69
8.2. MEJORA DE LA INCERTIDUMBRE DE LA OBSERVABILIDAD PARA DIFERENTES ESCENARIOS DE INVERSIÓN	70
9. CONCLUSIONES	76
9.1. IDENTIFICACIÓN DE REGIONES OBSERVABLES	77
9.2. CUANTIFICACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE LA OBSERVACIÓN	78
9.3. UBICACIÓN ESTRATÉGICA DE EQUIPOS DE MEDIDA ADICIONALES	78
9.4. VIABILIDAD DE LA ESTIMACIÓN DE ESTADO	79
ANEXOS	80
ANEXO 1. GLOSARIO DE TÉRMINOS	81
ANEXO 2. REFERENCIAS	83
ANEXO 3. ÍNDICE DE FIGURAS	84
ANEXO 4. ÍNDICE DE TABLAS	85

1. Resumen Ejecutivo



Ficha Técnica

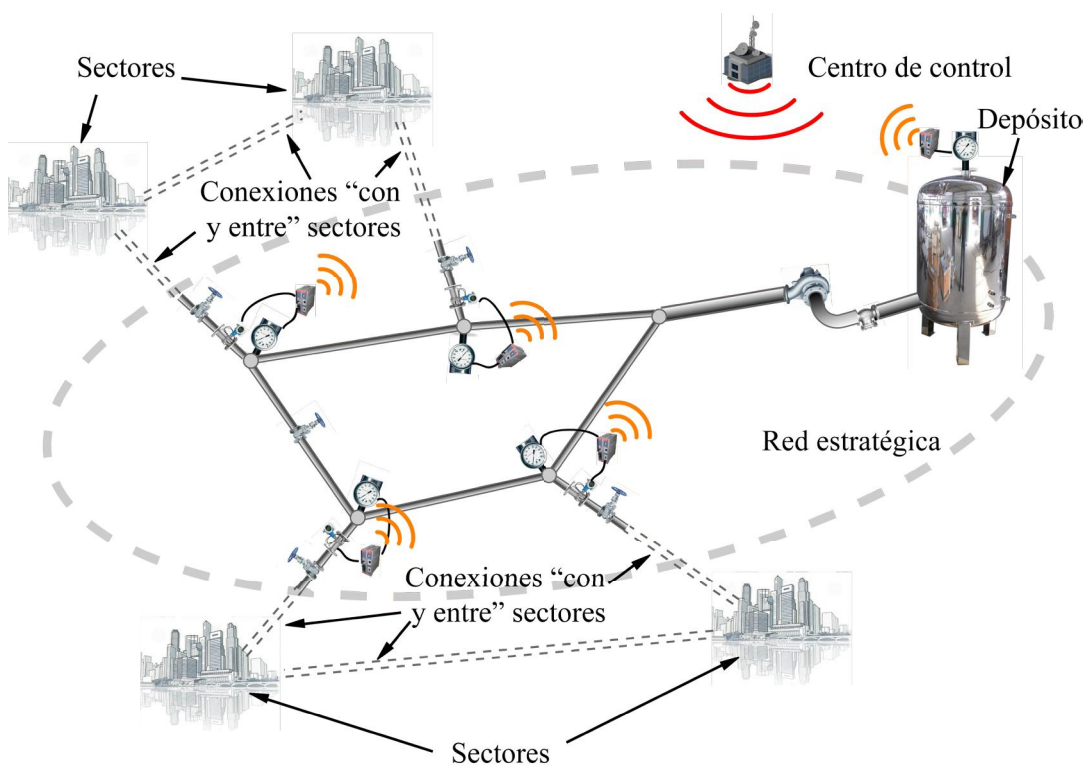
Título del proyecto	Estudio de observabilidad para la estimación del estado hidráulico de la red sectorizada de abastecimiento
Línea de investigación	Aseguramiento de la continuidad estratégica del servicio
Unidades de Canal de Isabel II implicadas	Subdirección I+D+i
Participación externa	Hidralab Ingeniería y Desarrollos, S.L.
Objeto y justificación del proyecto	Realización del estudio de observabilidad completo (identificación de regiones observables y cuantificación de la incertidumbre de la observación) de una red estratégica de abastecimiento, como paso previo a la implementación de herramientas para la estimación del estado hidráulico de un sistema en tiempo real. Propuesta de opciones de incremento de la monitorización para mejorar el resultado de la estimación de estado.
Contribución al estado del arte	Adaptación de las técnicas para la identificación de regiones observables existentes en la literatura a redes de abastecimiento. Concepto de observabilidad topológica. Implementación a gran escala. Adaptación de las técnicas para la cuantificación de la incertidumbre de la observación a grandes redes, minimizando los errores numéricos. Desarrollo de una estrategia para la ubicación de equipos de medida adicionales minimizando la incertidumbre del sistema.
Resumen del desarrollo del proyecto e hitos relevantes	Revisión del estado del arte y desarrollo de metodologías: adaptación a grandes redes. Identificación de regiones observables y de condiciones observables. Cuantificación de la incertidumbre de la observación. Propuesta de ubicaciones estratégicas para la incorporación de equipos de medida adicionales mejorando la incertidumbre.
Resumen de resultados obtenidos	Regiones observables en condiciones normales de operación y sensibilidad a cambios en la topología de la red. Incertidumbre de la observación en escenarios habituales de demanda. Ubicaciones estratégicas de nuevos equipos de medida para diferentes niveles de inversión.
Líneas de Investigación abiertas para la continuación de los trabajos	Desarrollo e implementación de técnicas para la estimación del estado hidráulico de la red sectorizada de abastecimiento en tiempo real y aplicaciones derivadas.

Resumen Ejecutivo

Canal de Isabel II viene realizando importantes inversiones para la puesta a punto y mantenimiento de sistemas de tecnología de la información, orientadas a monitorizar el funcionamiento de la red, cuya finalidad última es disponer de información sobre su estado para la toma de decisiones de explotación. Concretamente, ha trabajado en implementar un sistema SCADA¹ para la recopilación en tiempo real de los datos procedentes de los equipos de medida, que están distribuidos por toda la red de abastecimiento, y que complementa al sistema de información geográfica corporativo y a los modelos hidráulicos calibrados existentes de la red estratégica sectorizada. Esta red, denominada estratégica, está constituida por las arterias principales que suministran agua a los quinientos ochenta y dos (582) sectores establecidos en el Plan de Sectorización de la red de abastecimiento, llevado a cabo en el período 2005-2015.

El sistema SCADA proporciona información continua y en tiempo real de la red estratégica en unas ubicaciones concretas, tal y como se muestra esquemáticamente en la Figura 1.

FIGURA 1. ESQUEMA GENÉRICO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA RED SECTORIZADA



¹ SCADA: del inglés Supervisory Control and Data Acquisition.

En esta figura se representa la red estratégica, que está conformada por el conjunto de ETAP, depósitos, tuberías de distribución de agua, bombas, válvulas, etc., y que tiene como finalidad el transporte de agua desde las fuentes (en el caso de la Figura 1 el depósito), hasta la salida a los sectores de distribución. La red estratégica dispone de un modelo hidráulico para caracterizar su comportamiento, complementado por modelos de detalle en los sectores, que no son objeto del presente trabajo. Los dispositivos de medida instalados, envían las correspondientes medidas, en tiempo real, al centro de control. La clave para que el sistema funcione adecuadamente es que la gran cantidad de datos proporcionados por el sistema de monitorización se traduzca en una mejora de la operación y el servicio al usuario, siendo necesario el procesamiento de toda la información para su transformación en conocimiento real de la red de forma que sea útil para la toma de decisiones.

En este contexto se plantea la utilización de las denominadas **técnicas de estimación de estado**, utilizadas con éxito en otro tipo de redes de distribución más instrumentadas que las redes de transporte de agua, como por ejemplo las redes eléctricas, como herramientas adecuadas para esa transformación de las mediciones puntuales en conocimiento útil para la gestión y la operación del sistema.

Un “**estimador de estado**” es un algoritmo que permite deducir, tomando como base toda la información recopilada por el sistema SCADA y las ecuaciones que rigen el problema hidráulico, las condiciones de flujo en cualquier instante y cualquier punto de la zona de la red sometida a análisis. Por tanto, su implementación puede mejorar significativamente la operación de los sistemas de abastecimiento, puesto que es una herramienta básica para proporcionar información detallada sobre lo que está ocurriendo en la red, o la tendencia futura de la misma, procedente del procesamiento de miles de señales, que de modo manual resulta imposible de gestionar eficazmente en el tiempo. La estimación de estado puede llegar a utilizarse para detectar tendencias a corregir, cambios en la operación del sistema distintos de los programados, u otro tipo de incidencias como roturas, apertura de sectores, errores en sensores de medida automáticos, etc., que eventualmente pueden provocar la interrupción o la merma del servicio al cliente.

Asumiendo de nuevo la red esquemática de la Figura 1, en la que se muestran algunos de los elementos de una red, tales como depósitos, nodos, válvulas, bombas, sectores de abastecimiento, junto con cierta instrumentación de medida, el propósito de la estimación de estado es:

1. Conocer el valor más probable de las magnitudes que definen el flujo (caudales y presiones) en cualquier posición dentro de la red, a partir de las medidas y del modelo hidráulico de la misma, así como el cálculo de la incertidumbre asociada a dicha estimación.
2. Filtrar los posibles errores asociados a los instrumentos de medida, cuando un equipo no proporciona una medida coherente con el resto de medidas, ni es coherente con el estado hidráulico que de ellas se deriva.
3. Detectar posibles inconsistencias asociadas y eventuales incidencias en la red que aún no han sido notificadas, como pueden ser roturas, cambios en los puntos de suministro y consumo de agua en la red estratégica, maniobras en estaciones de bombeo, válvulas de apertura/cierre u otros elementos capaces de alterar la topología hidráulica de la red.

Esta información resulta fundamental en grandes redes para el control del sistema, ya que el volumen de información a considerar impide su interpretación por procedimientos manuales, requiriéndose sistemas automáticos y efectivos. La información que proporciona la estimación de estado es clave para conocer la situación en la que se encuentra una red hidráulica, y de la misma se pueden derivar distintas herramientas de apoyo a la gestión y explotación de la red, como herramientas de pronóstico, planificación, optimización de operaciones, conservación de equipos, etc.

No obstante, antes de plantear un procedimiento de estimación de estado, es necesario evaluar en qué proporción los equipos de medida instalados actualmente en la red permiten observar lo que ocurre en ella. Este análisis en redes de gran tamaño tiene en la práctica tres retos:

- i. realizarlo de modo automático, pues aunque su análisis manual sería posible, el tamaño de la red a analizar y el número de combinatorias a procesar lo hace impracticable por procedimientos manuales;
- ii. adaptar la formulación general del problema a las ecuaciones que gobiernan el flujo hidráulico de redes de distribución de agua, sumando la singularidad de tratar redes de transporte de agua a sectores de distribución, y
- iii. tratar un problema que, por su disparidad de órdenes de magnitud en la dimensión de sus variables, está mal condicionado numéricamente, y requiere el uso de tratamientos especiales.

El objetivo de este trabajo de investigación busca salvar estos tres retos que aparecen en la aplicación de las técnicas de análisis de observabilidad al problema de flujo en grandes redes sectorizadas de transporte de agua. De modo práctico su aplicación pretende responder a las siguientes cuestiones:

- a. Con la configuración actual de medidas en la red, ¿sobre qué elementos/variables del flujo se va a poder hacer una estimación de magnitud y sobre cuáles no? Es decir, ¿qué elementos/variables de flujo están dentro de una región observable y cuáles no lo están?
- b. En caso de poner en duda el funcionamiento de ciertos elementos que configuran la topología de la red, tales como bombas y válvulas, ¿en cuáles de esos elementos se podría inferir su estado más probable y en cuáles no se cuenta con información suficiente? Este concepto de observabilidad topológica es novedoso en el estado del arte de redes de distribución de agua, y derivado del presente estudio con motivo de los problemas prácticos que se presentan en la explotación de grandes redes de abastecimiento.
- c. En caso de que se produzca una rotura en la red estratégica o se produzca alguna derivación inicialmente no contemplada, ¿en qué puntos de la red se podría detectar su existencia y en cuáles no?
- d. Dado que toda medida está sujeta a errores, y se mide con una determinada precisión, no existiendo nunca medidas exactas, se debe evaluar el efecto de las precisiones de los equipos de medida sobre la incertidumbre de la observación en aquellos elementos/variables que están dentro de una región observable de la red, dando respuesta a preguntas tales como: ¿qué incertidumbre tiene la estimación?, ¿qué magnitud mínima debe tener el caudal de rotura para ser observable de acuerdo con los equipos de medida disponibles y el escenario de caudales observado?, o ¿qué alteración de flujo debe producir un cambio en la topología para ser identificable?

Como se ha mencionado anteriormente, este trabajo se enmarca dentro de un reto más general, el de la aplicación de la estimación de estado como herramienta de apoyo para la mejora de la gestión de la red estratégica gestionada por Canal de Isabel II. Para ello, se ha realizado el análisis de observabilidad completo de dicha red, el cual incluye los mencionados procesos de identificación de regiones observables y cuantificación de la incertidumbre de la observación. Finalmente, y como resultado de haber sido posible la resolución del problema de observabilidad en redes de transporte de agua, se ha abordado el problema de optimizar la ubicación de nuevos equipos de medida para la mejora de la observabilidad. En este trabajo se ha definido el problema de optimización que plantea dicha cuestión, y se ha desarrollado un algoritmo que permite su resolución. Ello ha permitido proporcionar como resultado del presente trabajo una serie de opciones de incremento de la monitorización como complemento al diagnóstico de la observabilidad, instalando equipos de medida adicionales con el objeto de mejorar los resultados anteriores y así también mejorar la respuesta del sistema en una posterior estimación de estado.

Este proyecto supone una contribución en sí mismo, ya que nunca antes se había analizado en profundidad la observabilidad de un gran sistema de abastecimiento de agua. Tradicionalmente, el estado de una red se ha estimado partiendo de una topología de la red supuesta y de una predicción de las demandas en los puntos de consumo, que pueden considerarse pseudo-medidas o medidas con un nivel de error muy por encima de los instrumentos de medición automáticos. Hasta el momento el número de puntos de medida disponibles de modo automático en una red no eran tan altos como para pretender conocer su estado a partir de la información del sistema de telemedida. Sin embargo, el aumento progresivo del número de puntos de medida orientados a tener un mayor control sobre lo que ocurre en la red, tendencia en la que ha contribuido muy notablemente la sectorización de las redes, hace posible conocer no sólo las variables directamente telemedidas, sino también identificar un gran conjunto de variables (flujo o presión en distintos puntos) y condiciones (apertura o cierre de válvulas, bombes, puntos de consumo o suministro alternativos) en las que puede encontrarse la red. El estudio de observabilidad identifica aquellas variables/condiciones sobre la situación de la red para las que la estimación de estado puede dar respuesta.

A continuación se resumen, a grandes rasgos, las partes fundamentales y principales aportaciones de este estudio.

RED ESTRATÉGICA GESTIONADA POR CANAL DE ISABEL II

El estudio se ha desarrollado sobre la red estratégica gestionada por Canal de Isabel II en la Comunidad de Madrid, que da suministro al conjunto de sectores de distribución. Debido a las dimensiones de este sistema, el conocimiento previo de la topología de la red y de los equipos de medida existentes en la misma resulta indispensable para identificar las regiones observables y cuantificar su incertidumbre. En este respecto, la red estratégica que permite el transporte de agua potable en la Comunidad de Madrid presenta del orden de 57.000 nodos y más de 50.000 tubos, dándose en sus 3.300 kilómetros de longitud condiciones de flujo muy diversas entre sí.

Por su parte, en lo que respecta a los equipos de medida disponibles, la red objeto de estudio presenta un alto nivel de instrumentación, con más de 1.000 caudalímetros, casi 400 contadores, del orden de 650 sensores de presión y 240 medidores de nivel en depósitos. Buena parte de los equipos se concentra en el control de las entradas a los sectores, como se corresponde con la filosofía de la sectorización en una red de abastecimiento. Como en cualquier sistema, pueden producirse fallos en estos equipos (fallo del sensor, telemetría, etc.), por lo que parte de las medidas existentes no se encuentran disponibles en ciertos instantes de tiempo, lo cual puede traer consigo una reducción de las regiones observables del sistema o un aumento de la incertidumbre en las mismas. En este sentido, debe destacarse que Canal de Isabel II cuenta con una herramienta propia, **CHYPRE**, que proporciona estimaciones de consumo (pseudomedidas) en los sectores que podrían suplir en ciertos escenarios el fallo de las medidas existentes, si bien a costa de un notable incremento de la incertidumbre. La observabilidad permite conocer qué variable/condición es identificable en la red y con qué precisión o umbral de sensibilidad, aprovechando el conjunto de información (medidas y pseudo-medidas) disponible en cada momento en la misma.

IDENTIFICACIÓN DE REGIONES OBSERVABLES

La identificación de regiones observables es un planteamiento que permite evaluar si se pueden “observar” o estimar las diferentes variables hidráulicas (flujo, demanda y nivel piezométrico) en una zona de la red para una configuración de medidas determinada. Se considera que una variable se encuentra dentro de una región observable cuando existen relaciones algebraicas suficientes para determinar su valor a partir de las medidas disponibles. El fundamento de esta técnica consiste en evaluar el número de filas linealmente independientes de la denominada matriz jacobiana del sistema, que contiene las relaciones básicas entre las variables de la red. Así pues, la primera contribución de este proyecto consiste en adaptar la construcción de esta matriz a una red de abastecimiento genérica, donde debe incorporarse la existencia de elementos singulares y propios de estos sistemas (bombas, válvulas, sectores de consumo, etc.). En este respecto, se introduce en este proyecto el concepto de “observabilidad topológica”, no abordado en la literatura científica hasta el momento, que consiste en analizar si es posible conocer el estado de las bombas y válvulas del sistema además del estado hidráulico de la red, en particular conocer si estos elementos están abiertos o cerrados, o en general la diferencia de energía que producen entre su entrada y su salida. Por otro lado, se ha extendido el análisis de observabilidad a los sectores de abastecimiento, con el fin de saber si es posible conocer la forma en la que se abastecen los sectores, ya que cuentan con conexiones con diferentes nodos de la red estratégica e incluso entre ellos (véase la Figura 1). A diferencia de la red estratégica, en las conexiones entre sectores sólo se consideran las ecuaciones de balance de agua (sin incluir las ecuaciones de conservación de energía), lo cual requiere la adaptación del análisis de regiones observables. Esta adaptación es otra de las aportaciones de este estudio, incluyendo por primera vez elementos sectores y conexiones entre sectores, junto con otros tipos de elementos ya habituales en las redes hidráulicas, como nodos, tuberías, bombas, válvulas, depósitos, etc. e integrados aquí por primera vez dentro de un marco general de identificación automática de regiones observables.

La siguiente innovación consiste en la adaptación de las metodologías existentes para el análisis de la matriz jacobiana relacionadas con redes de abastecimiento, en su mayoría desarrolladas para sistemas eléctricos, donde la utilización de estas técnicas es la orden del día. Concretamente, en este trabajo se ha evaluado el rendimiento de las denominadas técnicas del *null-space*, de optimización, algebraica, binaria y estocástica, que se han sometido a un análisis multicriterio, para identificar la más adecuada con vistas a su implementación en la red estratégica gestionada por Canal de Isabel II. Tras considerar seis criterios relativos al tipo de información involucrada en el proceso, su potencial y su coste computacional, el método algebraico resulta el más adecuado, siendo su agilidad para la combinación con técnicas de estimación de estado su característica más destacable.

Como se ha comentado anteriormente, el análisis de regiones observables es un procedimiento dinámico muy dependiente de las condiciones en las que se efectúe. Sin embargo, dado que el número de válvulas interiores, válvulas fronteras de apertura o cierre de nuevos puntos de suministro y consumo, o grupos de bombeo incluidos en la red es muy alto y la combinatoria de situaciones posible resulta inmanejable, es necesario su análisis automático y eficiente. Para valorar la capacidad de observación de todos los elementos de control topológico de la red se han evaluado una a una, dudando de la condición de cada elemento por separado, las posibilidades de observar el estado de las bombas y las válvulas ante un cambio de operación, los flujos derivados a la red de distribución desde la red estratégica y las posibles roturas en la red principal.

CUANTIFICACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE LA OBSERVACIÓN

La cuantificación de la incertidumbre de la observación se realiza tradicionalmente a partir de la matriz jacobiana del sistema, que permite propagar la incertidumbre de las medidas a las variables mediante el método FOSM², ampliamente utilizado en el ámbito hidráulico y que en este caso se ha aplicado al ajuste de mínimos cuadrados ponderado sin restricciones que representa el problema de estimación de estado. Si bien el método FOSM es aplicado tradicionalmente, su adaptación a la red estratégica no es inmediata, dado el tamaño de la red, y la disparidad de los órdenes de magnitud de las variables que allí se producen. En concreto, se aprecian diferencias significativas en orden de magnitud de las condiciones de flujo, puesto que se alternan elementos asociados a velocidades prácticamente nulas con otros elementos sometidos a intensos flujos, además de amplias diferencias en el tamaño de las conducciones, o los gradientes hidráulicos. Esta variabilidad ha requerido la adaptación de la metodología tradicional a grandes redes con el objeto de mantener controlados los errores numéricos. Concretamente, se ha optado por introducir restricciones de tipo hidráulico al problema, implementando además una técnica de descomposición por valores singulares (SVD³) para afrontar el planteamiento matemático no discutido en la literatura. Con esta metodología se han evaluado las incertidumbres asociadas a los escenarios habituales en la red estratégica para escenarios de demanda máxima, media y mínima.

² FOSM: del inglés First Order Second Moment

³ SVD: del inglés Singular Value Decomposition

UBICACIÓN ESTRATÉGICA DE EQUIPOS DE MEDIDA ADICIONALES

Es indudable que el aumento de la información del sistema en función de medidas adicionales tiene dos efectos inmediatos: el primero es el aumento de la redundancia, que permitiría detectar mayor número de inconsistencias, y el segundo es una reducción de la incertidumbre en las inmediaciones de la ubicación del nuevo dispositivo. Así pues, la identificación de posibles ubicaciones para la instalación de aparatos de medida adicionales se puede realizar con el objeto de **extender las zonas observables** del sistema en determinados escenarios, o bien para **reducir la incertidumbre de las observaciones**. Ambos enfoques tienen como resultado una mejora de la observabilidad del sistema, siendo notable su efecto en un posterior proceso de estimación de estado. En este proyecto, y a causa del alto nivel de instrumentación de la red estratégica gestionada por Canal de Isabel II, donde las derivaciones hacia sectores de consumo están monitorizadas, se ha optado por la segunda de las opciones, que pretende mejorar la calidad de las observaciones.

La metodología empleada para la ubicación de equipos de medida adicionales supone una contribución en sí misma, ya que se plantea como un proceso de optimización que busca las posiciones más convenientes entre las variables que han registrado los máximos valores de incertidumbre en la fase anterior. La definición del problema de optimización, integrando el problema de identificación de regiones observables, y de estimación de la incertidumbre asociada anteriormente expuesto, aporta una herramienta de gran utilidad para la planificación de inversiones. Concretamente, se ha trabajado con cuatro niveles de inversión, que permiten evaluar la sensibilidad de la incertidumbre general del sistema a la mejora de la monitorización. Para ello, se ha optado por un parámetro adimensional que evalúa el nivel de observabilidad de cada escenario con respecto a un estado de referencia, permitiendo realizar una valoración de la mejora alcanzada para los distintos intervalos de inversión, y que puede evaluarse sobre distintos tipos de variables en la red (consumos, flujos en tuberías, presiones, etc.). Así mismo, el estudio demuestra que existen notables diferencias dentro de un mismo escenario entre el índice de precisión en la observación que se consigue sobre las variables de tipo presión y sobre las variables de tipo consumo, resultando estas últimas las que se observan con peor precisión.

El estudio de observabilidad realizado sobre la red de Canal de Isabel II pone de manifiesto el alto potencial que ofrecen los sistemas de teled medida implantados en redes sectorizadas para conocer el estado del sistema en grandes redes de transporte, permitiendo extender la capacidad de observación e identificación de condiciones particulares de la red más allá de las variables directamente medidas. Se muestra por tanto que la estimación de estado hidráulico, como herramienta dinámica posterior, tiene una gran capacidad potencial para controlar el estado en el que se encuentra la red, detectando con anticipación incidencias significativas que han ocurrido y que no han sido notificadas, lo que permitirá ofrecer un servicio de alto valor para la toma de decisiones en la explotación.

2. Introducción



2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Canal de Isabel II gestiona la red de abastecimiento de agua potable de la Comunidad de Madrid, una de las mayores redes de distribución de agua en Europa, con más de 17.000 kilómetros de longitud. Para ello, dispone de sofisticadas tecnologías y sistemas de ayuda en la gestión, que se ven actualizadas y modernizadas de forma continuada para mejorar la eficacia y eficiencia en la explotación de la red.

Un ejemplo de estas técnicas es el **Plan de Sectorización de la red de abastecimiento** que se ha llevado a cabo en el periodo 2005-2015, el cual ha permitido identificar 582 sectores, también llamados DMA⁴, que son zonas aisladas hidráulicamente entre sí pero conectadas con las arterias principales mediante un número reducido de puntos de entrada y salida. Así, el sistema se estructura en una red principal (denominada **estratégica**) de aproximadamente 3.300 kilómetros que abastece los sectores existentes, entre los que también existe posibilidad de conexión para garantizar la satisfacción de la demanda en casos concretos. Este proceso ha supuesto un importante cambio en la forma de entender la gestión del sistema, permitiendo alcanzar un mejor conocimiento del patrón de consumos y de la consiguiente circulación de agua en la red principal. Además, la identificación de las arterias principales hace más viable la monitorización de la red en tiempo real, al menos a nivel estratégico.

Precisamente en esta línea, Canal de Isabel II ha realizado recientemente importantes inversiones en lo que respecta a la puesta a punto y mantenimiento de sistemas de tecnología de la información (TIC⁵), orientados a monitorizar el comportamiento de la red y tomar decisiones en consecuencia. Concretamente, se ha trabajado en la implementación de un sistema para la recopilación en tiempo real de los datos procedentes de todos los equipos de medida existentes (también llamados SCADA), que complementa al sistema de información geográfica (SIG⁶) corporativo y a los modelos hidráulicos calibrados existentes. Sin embargo, a pesar de que esta plataforma proporciona información continua y en tiempo real de la red, la gran cantidad de datos recopilada por el sistema no se traduce automáticamente en una mejora de la operación y el servicio al usuario, sino que hace falta transformar toda la información en conocimiento real de la red para que sea útil para la toma de decisiones, tanto a corto plazo (operaciones diarias y resolución de contingencias), como a medio y largo plazo (expansión, mantenimiento, etc.). Para ello, las técnicas más adecuadas son las denominadas **técnicas de estimación de estado**.

A grandes rasgos, las técnicas de estimación de estado consisten en la implementación de un algoritmo que permite deducir, partiendo de toda la información recopilada por el sistema SCADA y las ecuaciones que gobiernan el problema hidráulico, las condiciones del flujo en cualquier instante y cualquier punto de la red. Es decir, la estimación de estado es una técnica que permite inferir el estado hidráulico del sistema basándose en el conjunto de datos o medidas disponibles. Por su parte, el conocimiento de las presiones en todos los nodos y los flujos en todas las conducciones sentaría las bases para luego evaluar el funcionamiento de la red de distintas formas (indicadores de calidad del servicio, garantía de suministro, etc.) y en distintos escenarios (posibles roturas, riesgo de corte de suministro, etc.).

⁴ DMA: del inglés District Metered Area

⁵ TIC: Tecnologías de Información y Comunicación

⁶ SIG: del inglés Geographic Information System

Así pues, el propósito de la estimación de estado es:

1. Conocer el valor más probable de los caudales y presiones existentes en cualquier posición dentro de la red, a partir de las medidas y del modelo hidráulico de la misma, así como calcular la incertidumbre asociada a dicha estimación.
2. Filtrar los posibles errores asociados a los instrumentos de medida, cuando un equipo no proporciona una medida coherente con el resto de medidas, ni es coherente con el estado hidráulico que de ellas se deriva.
3. Detectar posibles inconsistencias y eventuales incidencias en la red que aún no han sido notificadas, como pueden ser roturas, cambios en los puntos de suministro y consumo de agua en la red estratégica, maniobras en estaciones de bombeo, válvulas de apertura/cierre u otros elementos capaces de alterar la topología hidráulica de la red.

Esta información resulta fundamental en grandes redes para el control del sistema, ya que el volumen de información a considerar impide su interpretación por procedimientos manuales, requiriéndose **sistemas automáticos y efectivos**. La información que proporciona la estimación de estado es clave para conocer la situación en la que se encuentra una red hidráulica, y de la misma se pueden derivar distintas herramientas de apoyo a la gestión y explotación de la red, como herramientas de pronóstico, planificación, optimización de operaciones, conservación de equipos, etc.

Sin embargo, la implementación de las técnicas de estimación de estado no es sencilla en la práctica. La realidad es que cualquier configuración de medidas no es válida para caracterizar el estado de flujo y presión en una cierta zona de la red. Por este motivo, antes de plantear un procedimiento de estimación de estado es necesario evaluar la capacidad de la configuración actual de puntos de medida en la red para observar lo que ocurre en ella. Esto es lo que se denomina **análisis de observabilidad**, que básicamente pretende responder a las siguientes cuestiones:

- a. Con la configuración actual de medidas en la red, ¿sobre qué elementos/variables del flujo se va a poder hacer una estimación de magnitud y sobre cuáles no? Es decir, ¿qué elementos/variables de flujo son observables y cuáles no lo son? Este proceso de identificación de regiones observables puede realizarse además para diferentes supuestos, como pueden ser el hecho de poner en duda el funcionamiento de ciertos elementos que configuran la topología de la red (tales como bombas y válvulas) o evaluar la capacidad para la detección de roturas o apertura de derivaciones inicialmente no contempladas.
- b. Dado que toda medida está sujeta a errores, y mide con una determinada precisión, no existiendo nunca medidas exactas, se debe evaluar el efecto de las precisiones de los equipos de medida sobre la incertidumbre de la observación en aquellos elementos/variables que sean observables, dando respuesta a preguntas tales como: ¿qué incertidumbre tiene la estimación?, ¿qué magnitud mínima debe tener el caudal de rotura para ser observable de acuerdo con los equipos de medida disponibles y el escenario de caudales observado?, o ¿qué alteración de flujo debe producir un cambio en la topología para ser identificable?

Con el fin último de garantizar la adecuada implementación de un posterior proceso de estimación de estado, se ha realizado este proyecto de I+D+i, cuyo objeto es valorar la aplicabilidad de los servicios de medida de la observabilidad a la red gestionada por Canal de Isabel II, cuantificando, de modo concreto para la red objetivo, el nivel de observación que proporciona el sistema de medidas automáticas actualmente implementado. Para ello, se ha planteado una metodología y se ha investigado, y finalmente planteado, una metodología con la que se ha realizado el análisis de observabilidad completo de dicha red, el cual incluye los mencionados procesos de identificación de regiones observables y cuantificación de la incertidumbre de la observación. En este trabajo se proponen además una serie de opciones de evaluación del incremento de la monitorización como complemento al diagnóstico de la observabilidad existente, instalando equipos de medida adicionales con el objeto de mejorar los resultados anteriores y así, también mejorar la respuesta del sistema en una posterior estimación de estado. Se ha evaluado los incrementos de mejora en la incertidumbre de la observación a través de un indicador cuantitativo de referencia.

Propuesta metodológica

Por todo ello, el grueso de los trabajos realizados en este estudio puede dividirse en cuatro actividades principales, que describen la propuesta metodológica a realizar de modo general:

- **Análisis de la red estratégica gestionada por Canal de Isabel II**
- **Identificación de regiones observables bajo distintos supuestos**
- **Cuantificación de la incertidumbre de la observación bajo distintos supuestos**
- **Proposición de ubicaciones para la instalación de dispositivos adicionales en el sistema con el fin de mejorar los resultados anteriores**

El desarrollo de estas cuatro tareas ha permitido avanzar en el estado del conocimiento en este campo, probar la aplicabilidad de estas técnicas a grandes redes de abastecimiento de agua potable y evaluar la viabilidad de la implementación de técnicas de estimación de estado en la red estratégica gestionada por Canal de Isabel II. En este sentido, debe destacarse que este proyecto supone una contribución en sí mismo, ya que nunca antes se había analizado en profundidad la observabilidad de un gran sistema de abastecimiento de agua. Tradicionalmente, el estado de una red se ha estimado partiendo de una topología de la red supuesta y de una predicción de las demandas en los puntos de consumo, que pueden considerarse pseudo-medidas o medidas con un nivel de error muy por encima de los instrumentos de medición automáticos. Hasta el momento el número de puntos de medida disponibles de modo automático en una red no era tan alto como para pretender conocer su estado a partir de la información del sistema de telemedida. Sin embargo, el aumento progresivo del número de puntos de medida orientados a tener un mayor control sobre lo que ocurre en la red, tendencia en la que ha contribuido muy notablemente la sectorización de las redes, hace posible conocer no sólo las variables directamente telemedidas, sino también identificar un gran conjunto de variables (flujo o presión en distintos puntos) y condiciones (apertura o cierre de válvulas, bombeos, puntos de consumo o suministro alternativos) en las que puede encontrarse la red. El estudio de observabilidad identifica aquellas variables/condiciones sobre la situación de la red para las que la estimación de estado puede dar respuesta.

2.2. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

A continuación se describen brevemente las distintas etapas del proyecto de investigación realizado, y que conforman la estructura de este documento.

Formulación del problema de estimación de estado y valoración de la observabilidad del estado: necesidades previas

Se describen los principios básicos del problema de estimación de estado en redes de agua, los cuales ponen de manifiesto la necesidad de efectuar el análisis de observabilidad del estado del sistema a través del conjunto de medidas disponibles como paso previo.

Análisis de la red estratégica gestionada por Canal de Isabel II

Se realiza un análisis de la red estratégica gestionada por Canal de Isabel II, objeto de este estudio, con el objetivo de identificar y caracterizar la topología de la red, simplificando el número de elementos que compone la misma, a los efectos del estudio de observabilidad.

Definición y tratamiento de las ecuaciones del modelo hidráulico que gobierna la red de abastecimiento

Se describe el modelo de la red y el proceso de construcción de la matriz jacobiana, que contiene las relaciones entre las variables hidráulicas y las medidas existentes, y resulta esencial para el desarrollo del análisis de observabilidad.

Identificación de regiones observables en la red estratégica

Se presentan las metodologías implementadas a escala de prototipo para la identificación de regiones observables, así como los resultados obtenidos bajo varios supuestos con la metodología seleccionada para su aplicación a la red gestionada por Canal de Isabel II, presentándose los estadísticos principales.

Cuantificación de la incertidumbre de la observación en la red estratégica

Se detalla la metodología adoptada en esta investigación para cuantificar la incertidumbre de la observación, presentándose los estadísticos principales obtenidos de su aplicación bajo varios supuestos.

Ubicación estratégica de equipos de medida adicionales

Se presentan la metodología adoptada y los resultados obtenidos en lo que respecta a la ubicación de equipos de medida adicionales en la red estratégica basándose en los resultados anteriores.

Conclusiones

Finalmente, se exponen las conclusiones que se extraen del análisis realizado, con especial énfasis en la viabilidad de la implementación de técnicas de estimación de estado.

Además, el documento incluye un glosario de los términos y acrónimos utilizados en el desarrollo de este trabajo.

3. Formulación del problema de estimación de estado y la necesidad previa del análisis de observabilidad de dicho estado



En general, un “**estimador de estado**” es un algoritmo que debe proporcionar el estado hidráulico más probable de la red dado un conjunto de medidas disponibles en un determinado instante de tiempo, que serán proporcionadas por el sistema SCADA implementado. Sin embargo, como se adelantaba en el capítulo anterior, los resultados de la estimación de estado sólo son fiables para las variables observables, que son aquellas variables hidráulicas (flujos, demandas y presiones) que pueden deducirse u observarse a partir de los equipos de medida existentes y cuya incertidumbre puede ser cuantificada.

Los aspectos básicos de la formulación del problema de estimación de estado y las bases para el análisis de observabilidad se presentan en contexto en los apartados siguientes, donde también se pone de manifiesto el interés de la instalación de dispositivos de medida adicionales para mejorar la operación del sistema.

3.1. ESTIMACIÓN DE ESTADO

El problema de estimación de estado se plantea de forma que el conjunto de medidas existente permita inferir las denominadas “*variables de estado*”, que constituyen el mínimo conjunto de variables que permiten caracterizar el flujo en la red, y en función de las cuales se determinarán el resto de variables del sistema gracias a las ecuaciones que rigen el problema hidráulico.

Así pues, en una red de abastecimiento cualquiera se puede trabajar con un vector de medidas teórico

$\mathbf{z} \in \mathbb{R}^m$, que podría incluir potencialmente medidas de presión o consumo en los nodos, de nivel en los depósitos o de flujo en las conducciones. Por su parte, existirá un vector que contenga las variables

de estado $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, que a lo largo de esta investigación serán considerados los niveles piezométricos en los nodos puesto que cualquier combinación de niveles piezométricos lleva a una solución real de la red, lo cual puede no suceder si se consideran los flujos en los tubos como variables de estado.

Finalmente, existirá una relación no lineal $\mathbf{g}: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ entre medidas y variables de estado para un cierto sistema, que resulta de la aplicación de las ecuaciones de conservación de masa y energía.

Esta relación puede escribirse matemáticamente como:

$$\mathbf{z} = \mathbf{g}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (1)$$

Que representa un sistema no lineal de ecuaciones donde $\boldsymbol{\varepsilon}$ son los errores asociados con las medidas, típicamente asumidos como gaussianos con media cero, es decir, $E[\boldsymbol{\varepsilon}] = 0$ y matriz varianza-covarianza $\mathbf{R}_z$.

La estimación de estado consiste en encontrar los valores más probables de las variables de estado resolviendo el siguiente problema de mínimos cuadrados:

$$\underset{\mathbf{x}}{\text{Min}} F(\mathbf{x}) = \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{R}_z^{-1} \boldsymbol{\varepsilon} = [\mathbf{z} - \mathbf{g}(\mathbf{x})]^T \mathbf{R}_z^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{g}(\mathbf{x})], \quad (2)$$

Donde $\hat{\mathbf{x}}$ corresponde a la solución óptima del problema. Nótese que los errores se multiplican por la inversa de la matriz varianza-covarianza asociada a los errores de medida, y como éstos suelen asumirse independientes, se trata de una matriz diagonal. La función objetivo minimiza la suma de los errores cuadrados definidos por la expresión (1), permitiendo asignar menor incertidumbre a aquellas medidas con errores de desviación estándar más bajos.

El problema, sin restricciones, planteado en la expresión (2) se resuelve habitualmente utilizando el método de las ecuaciones normales, que permite calcular la solución óptima de las variables de estado resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones lineales de forma iterativa:

$$[\mathbf{J}_{(v)}^T \mathbf{R}_z^{-1} \mathbf{J}_{(v)}] \Delta \hat{\mathbf{x}}_{(v+1)} = [\mathbf{J}_{(v)}^T \mathbf{R}_z^{-1}] (\mathbf{z} - \mathbf{g}(\hat{\mathbf{x}}_{(v)})), \quad (3)$$

Donde $\mathbf{J}_{(v)} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ es la matriz jacobiana de las medidas (ver epígrafe 5.3. "Construcción de la matriz Jacobiana") en el óptimo $\hat{\mathbf{x}}_{(v)}$ y v es un contador de iteraciones. La solución óptima se puede ir actualizando como $\hat{\mathbf{x}}_{(v+1)} = \hat{\mathbf{x}}_{(v)} + \Delta \hat{\mathbf{x}}_{(v+1)}$.

3.2. ANÁLISIS DE LA OBSERVABILIDAD

De acuerdo con la ecuación (3), una condición teórica suficiente para la existencia de solución única al problema de estimación definido por la expresión (2) es que el sistema resulte compatible determinado, es decir, que la matriz $\mathbf{J}$ sea de rango completo n . Si la matriz jacobiana presenta rango completo, la

matriz $[\mathbf{J}_{(v)}^T \mathbf{R}_z^{-1} \mathbf{J}_{(v)}]$ es invertible y el sistema es observable, pero aparte de esta reflexión, el análisis de observabilidad ha recibido poca atención en el estudio de las redes de distribución de agua. En el apartado siguiente se presenta cómo se puede afrontar este primer aspecto del análisis de observabilidad, que básicamente evalúa las relaciones algebraicas entre variables para identificar aquellas que pueden estimarse a partir de la configuración de medidas existente. El reto en grandes redes es la realización de dichas comprobaciones de modo automático y eficiente, ya que en la literatura científica siempre se implementa en ejemplos muy simplificados.

Sin embargo, para analizar la observabilidad de las variables hidráulicas no sólo basta con evaluar las relaciones algebraicas existentes entre ellas, sino que también es necesario cuantificar la incertidumbre con la que se puede aspirar a conocer la variable gracias a los equipos de medida disponibles. En el epígrafe 3.2.2. "Cuantificación de la incertidumbre de la observación" se justifica la importancia de esta cuantificación en grandes sistemas de abastecimiento, presentándose además la metodología tradicionalmente adoptada para ello. Posteriormente, dentro de este cuaderno se expone la propuesta metodológica resultante de este trabajo para abordar el problema de grandes redes.

3.2.1. Identificación de regiones observables

Tal y como se comentaba al inicio de este apartado, un primer aspecto que debe afrontar el análisis de observabilidad es la identificación de regiones observables, que consiste en la detección de qué variables pueden deducirse a partir de las medidas existentes en la red gracias a las ecuaciones de gobierno del flujo. Para ello, basta con evaluar las relaciones algebraicas existentes entre las variables gracias a las mencionadas ecuaciones, que constituyen el modelo hidráulico de la red. Aunque este modelo y la construcción de la matriz jacobiana asociada se presentarán en detalle en el capítulo titulado **“Modelización de la red de abastecimiento para el análisis de observabilidad”**, la idea es que será necesario evaluar las relaciones entre variables. Como se comentaba anteriormente, la idea básica consiste en evaluar el rango de la matriz, esto es, identificar el número de filas o columnas linealmente independientes con el objeto de identificar qué variables de estado podrían deducirse al resolver el problema de estimación de estado planteado en la ecuación (3).

Una de las causas del bajo nivel de implementación de técnicas para la identificación de regiones observables en redes de abastecimiento de agua es el hecho de que conocidos los niveles en los depósitos y los consumos en los nodos, el flujo siempre se puede resolver, o lo que es lo mismo, la red siempre resulta observable desde el punto de vista de disponer de las suficientes relaciones algebraicas para determinar todas las variables del sistema. Sin embargo, su resolución pasa por asumir hipótesis sobre el valor de los consumos reales, las condiciones de funcionamiento de la red (rugosidades, pérdidas de energías locales, entre otras), etc., hipótesis que pueden tener un alto nivel de incertidumbre vinculada. En este sentido, si para determinar el estado de una red de abastecimiento se cuenta como información de partida con los consumos que en todos los puntos se producen y los niveles en los depósitos, y no se ponen en duda ni los parámetros de los distintos elementos, ni las características topológicas de la red, la red es observable desde el punto de vista matemático (el conjunto de elementos de la red se encuentra dentro de una región observable) aun sin disponer de ninguna medida adicional, aunque en la práctica las incertidumbres vinculadas a dicha observación puedan ser muy altas.

A pesar de ello, si se quiere controlar y limitar la incertidumbre vinculada al funcionamiento de la red, se deben introducir medidas de variables que, aun siendo estas variables previamente observables, reduzcan la incertidumbre del valor estimado de la misma y ayuden también a reducir la incertidumbre en el resto de variables no medidas directamente antes que confiar en la representatividad y calibración del modelo de funcionamiento hidráulico. En este caso el problema se maneja como un problema de propagación y cuantificación de la incertidumbre, no poniéndose en duda la existencia de suficientes relaciones algebraicas para que el sistema se mantenga observable.

Sin embargo, cuando en una red existen bombas y válvulas y la variabilidad de su estado y funcionamiento se pone en duda, estos elementos introducen incógnitas en el sistema que hacen necesario recurrir a medidas o asunciones adicionales para lograr que dichos elementos resulten observables. No es posible conocer si una bomba, o una válvula, se encuentran abiertas, o cerradas, si no se dispone de suficientes medidas relacionadas con su estado de funcionamiento, ya sean directas o indirectas. En este caso, el análisis de observabilidad, desde el punto de vista de evaluar la disponibilidad de suficientes relaciones algebraicas, es imprescindible como punto de partida para conocer si el estado de dichos elementos es observable. Cumpliéndose esta condición, la posibilidad de observar realmente o de modo práctico su estado dependerá también de la incertidumbre vinculada en las medidas y las variables derivadas dependientes o relacionadas con dichas medidas.

Por otro lado, el funcionamiento de los equipos de medida no es perfecto, y esporádicamente algunos de ellos dejan de transmitir la información por algún tipo de fallo, bien en el propio equipo, o bien en el procedimiento de transmisión. Lo cual hace que la configuración de medidas disponible pueda variar con el tiempo. Por tanto, es necesario desarrollar un procedimiento automático y eficiente que permita deducir los elementos que están dentro de una región observable para una configuración de medidas dada y que pueda ser evaluado dinámicamente.

Es importante resaltar que la matriz jacobiana juega un papel crucial en el análisis de las regiones observables del sistema, puesto que recoge las relaciones básicas entre variables. Además, la matriz mantiene las relaciones estructurales entre medidas y variables de estado incluso si la expresión (1) se

linealiza con respecto a un punto cualquiera $\mathbf{x}_0$:

$$\Delta \mathbf{z} = \mathbf{J}_0 \Delta \mathbf{x} + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (4)$$

Donde $\Delta \mathbf{z} = \mathbf{z} - \mathbf{g}(\mathbf{x}_0)$ es el vector residual de medidas, $\Delta \mathbf{x}$ es la variación incremental del estado del sistema y $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}$ corresponde a la variación incremental de los errores. La matriz $\mathbf{J}$ va ahora acompañada de un sufijo ($\mathbf{J}_0$) para indicar que debe ser particularizada para un estado físico real

posible $\mathbf{x}_0$, es decir, que la observabilidad se analiza para escenarios de flujo concretos. Así pues, una vez establecido el escenario objeto de estudio, la identificación de zonas observables requiere la implementación de una técnica matemática que permita evaluar el rango de la matriz jacobiana. En el capítulo titulado “Identificación de regiones observables en la red estratégica”, se abordan en detalle las posibles estrategias.

3.2.2. Cuantificación de la incertidumbre de la observación

Además de evaluar las zonas potencialmente observables según las relaciones existentes entre variables, es necesario juzgar la precisión con la que éstas se podrían observar. En este respecto, debe mencionarse que las técnicas de estimación de estado y análisis de observabilidad fueron concebidas en los años 70 del pasado siglo con el objeto de caracterizar el estado de grandes sistemas eléctricos, típicamente bien instrumentados y con ratios de redundancia (cociente entre el número de medidas existente y el número de medidas mínimo requerido para alcanzar la observabilidad) muy superiores a uno. Sin embargo, las redes de distribución de agua se han caracterizado tradicionalmente por su bajo nivel de instrumentación. Para suplir esta carencia, la falta de medidas reales se ha venido complementando con predicciones de consumo, también denominadas *pseudomedidas*. En este sentido, debe mencionarse que todas las medidas, ya sean procedentes de aparatos o predicciones, están asociadas a una incertidumbre que provoca una desviación en los resultados de la estimación de estado, siendo la incertidumbre considerablemente mayor cuando se trata de *pseudomedidas*, ya que éstas son sólo estimaciones basadas en datos previamente registrados. Por este motivo, la cuantificación de la incertidumbre de la observación resulta fundamental en sistemas de abastecimiento de agua para distinguir la mejora que un conjunto de medidas producen en la precisión frente a la situación de sólo disponer de *pseudomedidas*.

En el caso concreto de la red estratégica gestionada por Canal de Isabel II, el proceso de sectorización llevado a cabo ha permitido un mayor control de los consumos existentes en la Comunidad de Madrid, habiéndose colocado durante esta transformación aparatos de medida de caudal en las salidas a la mayor parte de los sectores. Paralelamente, se ha desarrollado por parte de Canal de Isabel II una aplicación informática, denominada CHYPRE⁷, que permite estimar el consumo de los sectores y su incertidumbre asociada. La información proporcionada por CHYPRE es, al fin y al cabo, una *pseudomedida* de los consumos en cada uno de los sectores, que podría suplir la lectura del aparato de medida de caudal correspondiente en caso de fallo de éste por diversas causas (fallo del sensor, fallo de telemetría, etc.), con el consiguiente aumento de la incertidumbre del sistema.

La incertidumbre de la observación se ha venido cuantificando tradicionalmente utilizando las expresiones utilizadas para evaluar la incertidumbre de un ajuste de mínimos cuadrados ponderado como es el problema de la estimación de estado. Para ello se utiliza la relación linealizada entre variables de estado y medidas:

$$\Delta \hat{x} = [J^T R_z^{-1} J]^{-1} [J^T R_z^{-1}] \Delta z \quad (5)$$

Donde en este caso $\Delta z = z - g(\hat{x})$ y $J \in \mathbb{R}^{m \times n}$ es la matriz jacobiana de medidas evaluada en la solución óptima del problema (2).

De esta forma, aplicando el método FOSM⁸ a esta expresión para propagar la incertidumbre de las medidas disponibles a las variables de estado, se puede obtener la matriz de varianza-covarianza de las variables de estado $R_{\hat{x}}$, que resulta:

$$R_{\hat{x}} = [J^T R_z^{-1} J]^{-1} \quad (6)$$

Nótese que una condición teórica suficiente para cuantificar la incertidumbre es que la matriz J sea de rango completo, es decir, que el sistema sea observable. Esta condición implica que se pueda calcular la inversa que conduce a la obtención de la matriz de varianza-covarianza en (6).

Una vez calculada $R_{\hat{x}}$, la matriz de varianza-covarianza del resto de variables hidráulicas $R_{Q,q}$ (bien sea para flujos Q o demandas q) puede deducirse aplicando de nuevo el método FOSM:

$$R_{Q,q} = J_{Q,q} R_{\hat{x}} J_{Q,q}^T \quad (7)$$

Donde $J_{Q,q}$ se refiere a la parte de la matriz jacobiana de medidas que relaciona los flujos y las demandas con los niveles piezométricos (tomadas como variables de estado en este proyecto), respectivamente.

⁷ CHYPRE, aplicación propia que permite estimar el consumo en los sectores y la incertidumbre asociada en la red gestionada por Canal de Isabel II. Se recomienda consultar Carrasco y García (2011) para más detalle.

⁸ Del inglés, First Order Second Moment

De esta forma, se obtiene la incertidumbre de la observación para todas las variables hidráulicas del sistema, siendo el objetivo de la posterior fase de ubicación de equipos de medida adicionales minimizar su valor, tal y como se describe brevemente a continuación.

3.3. UBICACIÓN ESTRATÉGICA DE EQUIPOS DE MEDIDA ADICIONALES

El problema comúnmente denominado “**ubicación óptima de equipos de medida**” se refiere al planteamiento que permite seleccionar de forma objetiva las posiciones más convenientes para la instalación de dispositivos de medida adicionales con vistas a mejorar el comportamiento del sistema en lo que respecta a un criterio determinado. En este estudio concreto, se hablará en todo momento de ubicación de equipos de medida adicionales con el objetivo de mejorar la respuesta del sistema frente a la estimación de estado, que es el fin último al que va orientado este estudio, siempre condicionado a un nivel de inversión determinado.

A tal efecto, los métodos de ubicación de equipos de medida adicionales pueden clasificarse en dos grandes grupos:

- 💧 **Métodos basados en garantizar condiciones mínimas de observabilidad:** En este caso el objetivo es aumentar la resiliencia del sistema de medida, garantizando el mantenimiento de la observabilidad de ciertas variables o de la red completa ante la pérdida de alguna medida, sin importar en primera aproximación la incertidumbre de la estimación, aunque esté relacionada con el número de equipos de medida instalados.
- 💧 **Métodos basados en la disminución de la incertidumbre:** En este caso el objetivo es la colocación de dispositivos de forma que se reduzca la incertidumbre de las variables localizadas en las regiones observables, que puede contener al conjunto de variables y elementos del sistema, para así tener una mayor certeza sobre el funcionamiento de la red, facilitar su gestión, permitir la detección de roturas, etc.

En cualquier caso, generalmente al añadir nuevos equipos de medida se mejoran ambas condiciones, pero la diferencia entre estas dos opciones se encuentra en la definición de la función objetivo del problema de optimización en que se traduce cada una de las estrategias. En este trabajo se ha optado por la segunda de las opciones, ya que, como se verá en los capítulos titulados “**Identificación de regiones observables en la red estratégica**” y “**Cuantificación de la incertidumbre de la observación en la red estratégica**”, el hecho de disponer de estimaciones de medida procedentes del sistema CHYPRE y de información con diferente nivel de precisión sobre los niveles en los depósitos produce situaciones en las que el conjunto de elementos que compone la red está dentro de una región observable que cubre toda la red, dando en cambio como resultado incertidumbres mejorables en la observación de las diferentes variables hidráulicas del sistema.

De este modo, con la estrategia de ubicación de nuevos dispositivos se tratará de reducir la incertidumbre de las variables más relevantes del sistema, lo cual repercutirá a su vez de forma indirecta en la mejora de la resiliencia del sistema ante la pérdida de alguna medida. La metodología implementada en la red estratégica con este objeto se explicará en detalle en el capítulo “**Ubicación estratégica de equipos de medida adicionales**”, puesto que ha venido en buena parte condicionada por el resultado de los análisis de observabilidad e incertidumbre realizados.

4. Análisis de la red estratégica



Este capítulo recoge el análisis de la red estratégica gestionada por Canal de Isabel II y del conjunto de equipos de medida disponibles en la misma. De esta forma, se pone en contexto la realidad sobre la que se lleva a cabo este estudio.

4.1. LA RED

La red estratégica gestionada por Canal de Isabel II transporta el agua potable desde las estaciones de tratamiento hasta el conjunto de sectores que forman la red de distribución. A grandes rasgos, los elementos que componen la red estratégica son los descritos en la Tabla 1.

TABLA 1. ELEMENTOS QUE COMPONEN LA RED ESTRATÉGICA

<i>Elementos</i>	<i>Número de elementos</i>
Depósitos	310
Nodos sin demanda	56.514
Nodos con demanda	697
Conducciones	44.333
Válvulas de corte	14.344
Válvulas de regulación	602
Bombas	447

4.2. ANÁLISIS DE EQUIPOS DE MEDIDA

Una vez caracterizada la red, el otro elemento esencial que permite identificar las variables observables y cuantificar la incertidumbre de la observación es el conjunto de medidas disponibles, que determina el éxito de la estimación de estado. En este apartado se identifican los equipos de medida que se encuentran en el sistema y se vinculan éstos con una, o más variables hidráulicas, dentro del modelo de la red, que será descrito en detalle en el próximo capítulo.

4.2.1. Equipos de medida disponibles

Existen tres grandes tipos de equipos de medida en la red:

- 💧 Caudalímetros y contadores, que permiten la medida de caudal. La Tabla 2 recoge las estadísticas de estos aparatos, donde se puede apreciar que un 55% de los caudalímetros y un 48% de los contadores ubicados sobre la red estratégica se utilizan para medir flujo en conducciones, mientras que el resto permite controlar flujos derivados en las entradas a los sectores.
- 💧 Medidores de presión. Existen 490 sensores de presión junto a caudalímetros, y 170 sensores de presión junto a contadores. Además, se localizan 40 registradores de presión adicionales en la red, cuya cota deberá ser conocida para un posterior proceso de estimación de estado.
- 💧 Medidores de nivel en depósitos. El total de depósitos con al menos un elemento de medida es de 241.

TABLA 2. CAUDALÍMETROS Y CONTADORES EN LA RED ESTRATÉGICA

	<i>Clasificación</i>	<i>Número elementos</i>
Caudalímetros	Total red estratégica	1.112
	Midiendo flujo en tubos de la red	609
	Midiendo flujo en entradas a sectores	503
Contadores	Total red estratégica	399
	Midiendo flujo en tubos de la red	190
	Midiendo flujo en entradas a sectores	209

En este respecto existen otras señales telemedidas, como puede ser la presión en otros puntos de la red, la posición de válvulas o estado de las bombas, etc. Sin embargo, en el momento de la realización de este estudio no pudo identificarse, de modo fiable, la variable o estado de la red que la mayor parte de ellos miden concretamente, por lo que se han descartado en esta fase, siendo en la práctica mayor el número de equipos instalados de los que se indican en la Tabla 2.

4.2.2. Precisión de las medidas

La precisión de las medidas disponibles en la red determina la calidad de los resultados del análisis de observabilidad. En concreto, en esta investigación resulta esencial para la cuantificación de la incertidumbre de la observación.

Entre los factores que pueden tener un mayor impacto en la precisión de una medida se encuentran el escalón mínimo de medida, el principio de medida, y otros errores, como los debidos a la falta de calibración periódica y deterioro general del equipo por antigüedad o nivel de uso. En este trabajo se han asumido las precisiones de medida recogidas en la Tabla 3.

TABLA 3. PRECISIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDIDA

<i>Equipo de medida</i>	<i>Clasificación</i>	<i>Número elementos</i>
Caudalímetros y contadores	Caudal si velocidad > 0,3 m/s	2% + EEM*
	Caudal si velocidad < 0,3 m/s	5% + EEM*
Medidores de presión	Presión en nodo	0,025 bar
Medidores de nivel	Nivel en depósito	0,025 m

*EEM: Error inducido por el Escalón de Medida, que se ha considerado de 1 m^3 , con lecturas cada hora

4.3. JUSTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD DEL ANÁLISIS DE OBSERVABILIDAD

Como se comentaba en el epígrafe “Planteamiento del problema”, el **análisis de observabilidad**, y en particular la **identificación de regiones observables**, han recibido poca atención en sistemas de abastecimiento de agua. Esto se debe a que los sistemas de distribución de agua se suelen considerar completamente dentro de una región observable puesto que:

- 1) se adoptan estimaciones o predicciones de demanda basadas en registros históricos para contrarrestar la escasez de equipos de medida existentes (*pseudomedidas*) y
- 2) el estado de los elementos que pueden alterar la topología de la red, como son las bombas y las válvulas, se suele asumir conocido.

Sin embargo, estas asunciones no resultan válidas para el caso de la red estratégica gestionada por Canal de Isabel II por las razones que a continuación se indican.

Por un lado, es cierto que la red estratégica dispone de un sistema propio denominado CHYPRE que proporciona pseudomedidas o estimaciones de consumo en los sectores en tiempo real, así como su incertidumbre asociada. Sin embargo, estas estimaciones están asociadas a valores de incertidumbre muy superiores a los propios de medidas procedentes de los equipos disponibles en la red, que ofrecen una mayor certeza con vistas a la posterior implementación de un procedimiento de estimación de estado. No obstante, y pese al gran número de equipos instalados en el sistema, no todos los equipos proporcionan medidas en tiempo real, ya que en cualquier red de distribución se puede producir el fallo puntual de algún aparato, ya sea por un fallo del sensor, un fallo en el sistema de telemetría, etc. Esta pérdida de información puede traer consigo un deterioro de las regiones observables existentes en la red o bien un aumento de la incertidumbre de ciertas variables del sistema. Por ejemplo, si se produce el fallo de un caudalímetro que mide la salida a un sector, posiblemente esta medida pueda sustituirse por una pseudomedida (dada por CHYPRE), causando sólo un aumento de la incertidumbre de la estimación de estado. Por su parte, si se produce la caída de un sensor de presión y no existe medida redundante alternativa, este fallo podría traer consigo que esa variable deje de ser observable. Nótese que en cualquiera de los dos casos se produciría un deterioro en el resultado de la estimación de estado, ya sea porque aumente la incertidumbre de la estimación o porque ciertas variables dejen de ser observables.

A esta realidad debe sumarse además, la gran cantidad de elementos singulares existentes en la red estratégica. En este respecto, la existencia de una bomba o una válvula añade una incógnita al sistema, ya que su estado puede ser abierto o cerrado dependiendo de la operación de la red y/o las condiciones de flujo. De esta forma, aun cuando las condiciones normales de operación son conocidas en la red estratégica, pueden darse situaciones en las que se produzcan desviaciones con respecto a esta situación a causa de una maniobra, un fallo mecánico, etc. de alguna de las casi 450 bombas y 15.000 válvulas existentes. En caso de que se produzcan alteraciones de este tipo, que invalidan las curvas características asumidas, no todas las variables tienen por qué resultar dentro de una región observable, de modo que es necesario disponer de una herramienta que permita identificar los elementos y/o condiciones observables en diferentes situaciones, así como la incertidumbre de la estimación que se obtendría en cada una de ellas.

Por último, hay que tener presente que uno de los motivos de la implementación de sistemas SCADA para la monitorización de redes de agua es la detección de fugas. Así, la presencia de una rotura desde el punto de vista de modelado, puede considerarse análoga a la presencia de una demanda. Esto supone que se introduce una incógnita adicional en el sistema y por lo tanto es necesario conocer si la presencia de una rotura en una ubicación concreta podría ser detectada con los instrumentos próximos. En este caso concreto se ha analizado la presencia de roturas en nodos de tránsito, de forma que se pase de demanda nula a demanda desconocida en caso de que exista una fuga.

Por tanto, la posibilidad de fallo de los equipos de medida existentes y la gran cantidad de elementos singulares que pueden alterar la topología de la red y la posible existencia de roturas hacen necesario llevar a cabo un estudio de observabilidad completo como paso previo a la estimación de estado. Así, la identificación de zonas observables y la cuantificación de la incertidumbre de la estimación en distintos escenarios permitirán sacar el máximo partido a las inversiones realizadas en monitorización.

5. Definición y tratamiento de las ecuaciones del modelo hidráulico que gobierna la red de abastecimiento para el análisis de observabilidad



En vista de la necesidad de llevar a cabo el análisis de observabilidad, como paso previo a la estimación de estado en la red estratégica gestionada por Canal de Isabel II, es preciso definir cómo se va a realizar la modelización de la red de abastecimiento. Según el modelo de red planteado, se presenta también en este capítulo el proceso de construcción de la matriz jacobiana del sistema, imprescindible para implementar los procedimientos de identificación de regiones observables y cuantificación de la incertidumbre de la observación en esta investigación, tal y como se ha comentado en el capítulo “Formulación del problema de la estimación de estado y la necesidad previa del análisis de observabilidad de dicho estado”.

5.1. COMPONENTES BÁSICOS DE LA RED DE ABASTECIMIENTO

Un sistema cualquiera de abastecimiento de agua puede representarse como una red $N=(V,L)$, formada por un conjunto de vértices o nodos (V) interconectados mediante un conjunto de tubos o conducciones (L). Por su parte, dentro de la categoría de vértices o nodos pueden distinguirse:

- Nodos de demanda o aportación V^Q , donde el agua es extraída o introducida al sistema, respectivamente
- Nodos de tránsito V^T , donde el flujo no abandona ni entra al sistema, sólo continúa
- Depósitos V^D , en los que se almacena agua,

Cuya distinción es importante con vistas al montaje del modelo hidráulico.

En lo que respecta a las conducciones, se utiliza un criterio de signos según el cual la dirección de flujo en los tubos se asume positiva cuando el agua se mueve del nodo de menor numeración al de mayor numeración. Consecuentemente, se pueden definir dos conjuntos Ω_i^O y Ω_i^I para cada nodo i , correspondientes a los flujos de salida del nodo i al resto de nodos con numeración $j > i$ conectados con i a través de un tubo, y los flujos de entrada al nodo i procedentes del resto de nodos con numeración $j < i$ conectados con i a través de un tubo, respectivamente.

5.2. EL MODELO DE LA RED

Una vez que se han definido los componentes básicos del modelo hidráulico de la red, es necesario establecer las variables asociadas a cada uno de ellos, las posibles medidas en la red y las relaciones que existen entre las distintas variables que lo constituyen. Es importante resaltar que en este trabajo se asume una aproximación pseudo-estática que considera el flujo permanente, de forma que se pueden analizar tiempos sucesivos como si fuesen independientes. Por este motivo, las variables y las ecuaciones involucradas se consideran independientes del tiempo t .

5.2.1. Variables a considerar

Comenzando por la definición de las variables, en general, las variables hidráulicas involucradas en una red genérica de distribución de agua en un determinado tiempo son:

- Presión en cada nodo ($p_i; \forall i \in V$). Una red presenta tantas variables de presión como número de nodos $n = n_n + n_d$ haya en la red, donde n_n representa el número de nodos que no son depósitos y n_d el número de depósitos existentes.
- Nivel piezométrico en cada nodo ($h_i; \forall i \in V$). Al igual que en el caso de la presión, existen $n = n_n + n_d$ variables de nivel piezométrico.
- Flujo en cada tubo ($Q_{ij}; \forall ij \in L$). Existen tantas variables de caudal en los tubos como número de tubos n_p haya en la red.
- Demanda (consumo) o aportación al sistema en cada nodo ($q_i; \forall i \in (V^Q \cup V^T)$), que es positivo para aportaciones, negativo para demandas, y cero en los nodos de tránsito. Hay tantas variables de demanda como número de nodos que no son depósitos n_n haya en la red. Nótese que sólo se considera la existencia de consumos en nodos que no son depósitos, puesto que los depósitos actúan como condiciones de contorno de la red, motivo por el cual sólo serán tenidos en cuenta en términos de nivel piezométrico en el modelo de red adoptado.

El resto de los parámetros necesarios para definir el estado del sistema:

- como la cota de los nodos ($e_i; \forall i \in V$),
- la longitud ($L_{ij}; \forall ij \in L$),
- diámetro ($D_{ij}; \forall ij \in L$) y
- rugosidad de los tubos ($r_{ij}; \forall ij \in L$),

Se asumen conocidos para los problemas de análisis de observabilidad y estimación de estado aquí presentados puesto que se entiende que éstos ya han sido objeto de una calibración previa. Además, nótese que la presión y el nivel piezométrico son una misma variable, puesto que se puede pasar fácilmente de una a otra considerando la cota del nodo $h_i = p_i + e_i$. A su vez, y como se comentaba en el capítulo “Formulación del problema de estimación de estado: necesidades previas”, las variables de estado son consideradas precisamente los niveles piezométrico de los nodos.

5.2.2. Medidas posibles

Existen tantas medidas posibles como variables contiene el modelo. Por tanto, existen tres tipos de medidas posibles, uno para cada uno de los tipos de variables involucradas:

- Nivel piezométrico en cada nodo ($\tilde{h}_i; \forall i \in V$)
- Flujo en cada tubo ($\tilde{Q}_{ij}; \forall ij \in L$)
- Demanda o consumo en cada nodo que no es depósito ($\tilde{q}_i; \forall i \in (V^D \cup V^T)$)

La tilde se refiere a que se tratan de medidas, pudiendo estar asociadas tanto a lecturas de un aparato de medición como a pseudomedidas, siendo la única diferencia la incertidumbre asociada con vistas a la posterior estimación de estado.

De esta forma, el siguiente vector incluye todas las posibles medidas en la red:

$$\mathbf{z} = (\tilde{h}_i; \forall i \in V, \tilde{Q}_{ij}; \forall ij \in L, \tilde{q}_i; \forall i \in (V^D \cup V^T))^T \quad (8)$$

5.2.3. Ecuaciones de gobierno del comportamiento hidráulico

Las relaciones entre las distintas variables involucradas, o lo que es lo mismo, entre las medidas existentes y las variables del sistema, constituyen el modelo hidráulico de la red. A continuación se definen estas relaciones, expresadas en función de las variables de estado por medio de la ecuación de conservación de masa o de balance en los nodos que no son depósitos ($\forall i \notin V^D$) y de la ecuación de conservación de energía o de pérdidas a lo largo de los tubos:

- Nivel piezométrico en cada nodo $\tilde{h}_i$: si se mide cualquier nivel piezométrico, se conoce inmediatamente la correspondiente variable de estado, es decir, $\tilde{h}_i = h_i; \forall i \in V$.
- Flujo en cada tubo $\tilde{Q}_{ij}$: la medida de cualquier flujo en un tubo se puede relacionar con los niveles piezométricos en sus nodos extremos i y j conforme a la siguiente expresión:

$$\tilde{Q}_{ij} = \frac{1}{K_{ij}^{\frac{1}{b}}} (h_i - h_j) |h_i - h_j|^{\frac{1}{b}-1}; \forall ij \in L, \quad (9)$$

Donde b es un coeficiente exponencial que depende de la ecuación de pérdidas considerada, es decir, $b=1.852$ para la ecuación de Hazen-Williams o $b=2$ para la ecuación de Darcy-Weisbach o Manning, y K_{ij} es el coeficiente de rugosidad del tubo. Nótese que se trabaja con valores absolutos para introducir el efecto del signo.

- Demanda en cada nodo $\tilde{q}_i$: la medida de cualquier demanda $q_i; \forall i \in (V^Q \cup V^T)$, permite establecer un balance con los flujos de entrada y salida al nodo en cuestión utilizando la ecuación de conservación de masa, que para fluidos incompresibles resulta:

$$\tilde{q}_i = - \sum_{\forall j \in \Omega_i^I} Q_{ij} + \sum_{\forall j \in \Omega_i^O} Q_{ij}; \forall i \in (V^Q \cup V^T), \quad (10)$$

Donde $\tilde{q}_i$ se considera negativo si el agua sale del sistema, positivo si es una aportación, o cero si se trata de un nodo de tránsito ($\tilde{q}_i = 0; \forall i \in V^T$). Además, es posible sustituir los flujos por el nivel piezométrico en los nodos utilizando la expresión (9), quedando así expresadas las demandas en función de las variables de estado.

5.3. CONSTRUCCIÓN DE LA MATRIZ JACOBIANA

5.3.1. Matriz Jacobiana básica

La matriz jacobiana de medidas del sistema incluye las derivadas parciales de primer orden de todas las variables que pueden ser medidas en la red con respecto a los niveles piezométricos en los nodos, que son las variables de estado. Así pues, la matriz jacobiana presenta tantas columnas como nodos n , cada una de las cuales está asociada con un nivel piezométrico $h_i; \forall i \in V$, y tantas filas como el número total de medidas m que pueden tomarse en el sistema, representado por el vector dado por la ecuación (8).

La estructura de una matriz jacobiana genérica para una red de distribución de agua cualquiera resulta:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial h_n} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial \tilde{h}_n}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_n}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_n}{\partial h_n} \\ \frac{\partial \tilde{Q}_1}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_1}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_1}{\partial h_n} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial \tilde{Q}_{n_p}}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_p}}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_p}}{\partial h_n} \\ \frac{\partial \tilde{q}_1}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_1}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_1}{\partial h_n} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial \tilde{q}_{n_n}}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_{n_n}}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_{n_n}}{\partial h_n} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Donde n_p y n_n representan, respectivamente, el número de tubos donde se puede medir el flujo (número total de tubos) y el número de nodos donde las demandas pueden ser medidas y/o estimadas (número total de nodos que no son depósitos).

De esta forma, el primer bloque de la matriz jacobiana se corresponde con la matriz identidad I_n de dimensiones $n \times n$, ya que si se mide el nivel piezométrico en un nodo, la variable es observable en ese punto.

Por su parte, el segundo bloque, referido al flujo en los tubos, puede calcularse como:

$$\frac{\partial \tilde{Q}_{ij}}{\partial h_k} = \begin{cases} -\frac{1}{bK_{ij}^{\frac{1}{b}}} |h_i - h_j|^{\frac{1}{b}-1} & \text{si } k=i \\ \frac{1}{bK_{ij}^{\frac{1}{b}}} |h_i - h_j|^{\frac{1}{b}-1} & \text{si } k=j; \forall ij \in L, \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (12)$$

Donde i y j ($i < j$) corresponden, respectivamente, al nodo inicial y final del tubo.

Finalmente, el tercer bloque está asociado a las medidas de demanda, cuyas derivadas parciales pueden expresarse como:

$$\frac{\partial q_i}{\partial h_k} = -\sum_{\forall j \in \Omega_i^I} \frac{\partial Q_{ij}}{\partial h_k} + \sum_{\forall j \in \Omega_i^O} \frac{\partial Q_{ij}}{\partial h_k}; \forall i \in (V^D \cup V^T), \quad (13)$$

Donde las derivadas parciales de los flujos con respecto a los niveles piezométricos involucrados pueden obtenerse utilizando la expresión (12).

Una vez comprendida la estructura de la matriz jacobiana, es importante recordar que ésta debe ser calculada para un determinado estado de flujo, de modo que la matriz (11) quede particularizada

(J_0) para un estado físico real posible x_0 . Además, el estado hidráulico adoptado debe cumplir la condición adicional de no presentar flujo nulo en ninguno de los tubos, ya que esta particularidad

llevaría a una indeterminación matemática $\frac{1}{0}$ en las expresiones $\frac{\partial \tilde{Q}_{ij}}{\partial h_k}$, produciendo un mal

condicionamiento numérico de la matriz jacobiana. Finalmente, para su aplicación en la identificación de regiones observables se puede trabajar con la matriz normalizada de J_0 , que se calcula dividiendo los elementos de cada una de ellas por el máximo valor absoluto de cada fila. Esta estrategia reduce los errores numéricos derivados de la aplicación de los diferentes métodos para el análisis de la observabilidad.

5.3.2. Inclusión de bombas y válvulas

En vista del análisis de la red estratégica realizado en el capítulo anterior, se detecta la importancia de los elementos tipo bomba y válvula en la red gestionada por Canal de Isabel II, y en general para la explotación de cualquier red. La presencia de estos elementos concede flexibilidad a la operación de la red, permitiendo la apertura/cierre de ciertas conducciones y el ajuste del régimen de presiones en el sistema. Por tanto, aunque el estado de las bombas y válvulas sea *a priori* conocido en condiciones normales de operación, puede dejar de serlo en algunas circunstancias como resultado de ciertas maniobras. Por este motivo, en redes tan complejas como la gestionada por Canal de Isabel II surge la necesidad de plantear la denominada “**observabilidad topológica**”, que consiste en analizar si, para un conjunto de medidas dado, es posible conocer no sólo el estado hidráulico de la red sino también las conexiones que se producen entre sus elementos, y en particular, el estado de las bombas y válvulas en la misma.

Incorporar la observabilidad topológica implica incluir la existencia de las válvulas y las bombas en la matriz jacobiana del sistema, que deberá ser igualmente de rango completo para que el sistema resulte observable. Puesto que en última instancia se desea conocer el estado de cada uno de estos elementos, es necesario introducir tantas variables de estado adicionales como número de válvulas y bombas existan. En concreto, se seleccionan como variables de estado adicionales los caudales circulantes por las válvulas ($Q_{V_{ij}}; \forall ij \in L^V$) y bombas ($Q_{B_{ij}}; \forall ij \in L^B$), siendo L^V y L^B el conjunto de válvulas y bombas existentes en la red, respectivamente. Así pues, la inclusión de las válvulas y bombas requiere añadir tantas columnas adicionales como número de elementos de este tipo existan.

Por otro lado, estos dos tipos de elementos se introducen en el sistema como tubos o elementos tipo línea de longitud cero, siendo posible la medición de los niveles piezométricos en sus nodos inicial y final (que serán medidas disponibles o candidatas según la configuración de medidas de la red). Además, en función de que se disponga de información sobre la curva característica de la bomba o válvula o no, se pueden adoptar dos enfoques:

-  Si **no se dispone de información sobre la curva característica** del elemento singular, no es posible establecer ninguna relación entre el caudal que circula por la bomba o válvula y los niveles piezométricos en los nodos extremos. Además, como el caudal que circula por una bomba o válvula no se puede medir en ese elemento como tal (aunque sí se podrá medir en el tubo inmediatamente anterior o siguiente), no se incluyen filas correspondientes a caudal en estos elementos singulares. Por tanto, estos dos grupos de columnas adicionales presentan valores nulos en todas las medidas de caudal. Además, también presentan ceros en las filas correspondientes a medidas del nivel piezométrico, puesto que se asume que no se dispone de información específica sobre las curvas características o de pérdidas del elemento. Por su parte, estas variables de estado adicionales, que en definitiva son caudales, sí que intervienen en los balances en los nodos, adoptando sus derivadas parciales valores:
 - 1 (flujo de salida del nodo) o
 - 1 (flujo de entrada al nodo) en este último bloque según la expresión (13).

$$\mathbf{J}_t = \begin{bmatrix} \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial h_n} & \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial Q_{V_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial Q_{V_{n_v}}} & \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial Q_{B_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial Q_{B_{n_b}}} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial \tilde{h}_n}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_n}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_n}{\partial h_n} & \frac{\partial \tilde{h}_n}{\partial Q_{V_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_n}{\partial Q_{V_{n_v}}} & \frac{\partial \tilde{h}_n}{\partial Q_{B_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_n}{\partial Q_{B_{n_b}}} \\ \frac{\partial \tilde{Q}_1}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_1}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_1}{\partial h_n} & \frac{\partial \tilde{Q}_1}{\partial Q_{V_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_1}{\partial Q_{V_{n_v}}} & \frac{\partial \tilde{Q}_1}{\partial Q_{B_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_1}{\partial Q_{B_{n_b}}} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial \tilde{Q}_{n_p}}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_p}}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_p}}{\partial h_n} & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_p}}{\partial Q_{V_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_p}}{\partial Q_{V_{n_v}}} & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_p}}{\partial Q_{B_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_p}}{\partial Q_{B_{n_b}}} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial \tilde{Q}_{n_q}}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_q}}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_q}}{\partial h_n} & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_q}}{\partial Q_{V_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_q}}{\partial Q_{V_{n_v}}} & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_q}}{\partial Q_{B_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_q}}{\partial Q_{B_{n_b}}} \\ \frac{\partial \tilde{q}_1}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_1}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_1}{\partial h_n} & \frac{\partial \tilde{q}_1}{\partial Q_{V_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_1}{\partial Q_{V_{n_v}}} & \frac{\partial \tilde{q}_1}{\partial Q_{B_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_1}{\partial Q_{B_{n_b}}} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial \tilde{q}_{n_q}}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_{n_q}}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_{n_q}}{\partial h_n} & \frac{\partial \tilde{q}_{n_q}}{\partial Q_{V_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_{n_q}}{\partial Q_{V_{n_v}}} & \frac{\partial \tilde{q}_{n_q}}{\partial Q_{B_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_{n_q}}{\partial Q_{B_{n_b}}} \\ \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial h_n} & \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial Q_{V_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial Q_{V_{n_v}}} & \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial Q_{B_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial Q_{B_{n_b}}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

VÁLVULAS
BOMBAS

Si se dispone de información sobre la curva característica del elemento singular, es posible incluir una fila adicional relativa al caudal circulante que establezca la relación entre niveles piezométricos en ambos extremos del elemento singular (ver expresión (15)). Típicamente, esta relación viene determinada por una ecuación cuadrática o parabólica, ya sea para recoger el aporte de energía al sistema por parte de la bomba o las pérdidas que se producen a través de una cierta válvula.

Esta variedad de posibilidades hace que sea necesario incorporar filas o columnas dependiendo de la información disponible y el tipo de cada bomba y válvula particular, lo cual exige versatilidad y consistencia al proceso de construcción de la matriz jacobiana.

5.3.3. Inclusión de sectores

Para reproducir la realidad de la red gestionada por Canal de Isabel II ilustrada en la Figura 1, se ha planteado, de forma adicional, la inclusión de los sectores y las válvulas divisorias o conexiones entre sectores en el modelo hidráulico y el posterior análisis de observabilidad.

Como se ha comentado, la filosofía de la sectorización consiste básicamente en disponer de una red principal de transporte (en este caso la red estratégica) que suministra agua a sectores o DMA independientes, los cuales disponen de puntos de entrada y salida limitados y controlados para un mejor conocimiento de los flujos en la red.

La incorporación de estos elementos permite reproducir el comportamiento completo de la red objeto de estudio, y viene motivada por el hecho de que la entrada de caudal medida en cada sector no se corresponde necesariamente con el consumo real de la red, que por otro lado puede ser estimado (pseudomedido) mediante CHYPRE en prácticamente cualquier instante de tiempo.

$$J_t = \begin{bmatrix} \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial h_n} & \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial Q_{V_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial Q_{V_{n_v}}} & \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial Q_{B_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial Q_{B_{n_b}}} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial \tilde{h}_n}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_n}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_n}{\partial h_n} & \frac{\partial \tilde{h}_n}{\partial Q_{V_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_n}{\partial Q_{V_{n_v}}} & \frac{\partial \tilde{h}_n}{\partial Q_{B_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_n}{\partial Q_{B_{n_b}}} \\ \frac{\partial \tilde{Q}_1}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_1}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_1}{\partial h_n} & \frac{\partial \tilde{Q}_1}{\partial Q_{V_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_1}{\partial Q_{V_{n_v}}} & \frac{\partial \tilde{Q}_1}{\partial Q_{B_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_1}{\partial Q_{B_{n_b}}} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial \tilde{Q}_{n_p}}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_p}}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_p}}{\partial h_n} & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_p}}{\partial Q_{V_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_p}}{\partial Q_{V_{n_v}}} & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_p}}{\partial Q_{B_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_p}}{\partial Q_{B_{n_b}}} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial \tilde{Q}_{n_p}}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_p}}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_p}}{\partial h_n} & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_p}}{\partial Q_{V_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_p}}{\partial Q_{V_{n_v}}} & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_p}}{\partial Q_{B_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{n_p}}{\partial Q_{B_{n_b}}} \\ \frac{\partial \tilde{Q}_{V_1}}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{V_1}}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{V_1}}{\partial h_n} & \frac{\partial \tilde{Q}_{V_1}}{\partial Q_{V_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{V_1}}{\partial Q_{V_{n_v}}} & \frac{\partial \tilde{Q}_{V_1}}{\partial Q_{B_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{V_1}}{\partial Q_{B_{n_b}}} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial \tilde{Q}_{V_{n_v}}}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{V_{n_v}}}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{V_{n_v}}}{\partial h_n} & \frac{\partial \tilde{Q}_{V_{n_v}}}{\partial Q_{V_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{V_{n_v}}}{\partial Q_{V_{n_v}}} & \frac{\partial \tilde{Q}_{V_{n_v}}}{\partial Q_{B_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{V_{n_v}}}{\partial Q_{B_{n_b}}} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial \tilde{Q}_{B_1}}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{B_1}}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{B_1}}{\partial h_n} & \frac{\partial \tilde{Q}_{B_1}}{\partial Q_{V_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{B_1}}{\partial Q_{V_{n_v}}} & \frac{\partial \tilde{Q}_{B_1}}{\partial Q_{B_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{B_1}}{\partial Q_{B_{n_b}}} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial \tilde{Q}_{B_{n_b}}}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{B_{n_b}}}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{B_{n_b}}}{\partial h_n} & \frac{\partial \tilde{Q}_{B_{n_b}}}{\partial Q_{V_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{B_{n_b}}}{\partial Q_{V_{n_v}}} & \frac{\partial \tilde{Q}_{B_{n_b}}}{\partial Q_{B_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{B_{n_b}}}{\partial Q_{B_{n_b}}} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial \tilde{Q}_{B_{n_b}}}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{B_{n_b}}}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{B_{n_b}}}{\partial h_n} & \frac{\partial \tilde{Q}_{B_{n_b}}}{\partial Q_{V_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{B_{n_b}}}{\partial Q_{V_{n_v}}} & \frac{\partial \tilde{Q}_{B_{n_b}}}{\partial Q_{B_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{B_{n_b}}}{\partial Q_{B_{n_b}}} \\ \frac{\partial \tilde{q}_1}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_1}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_1}{\partial h_n} & \frac{\partial \tilde{q}_1}{\partial Q_{V_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_1}{\partial Q_{V_{n_v}}} & \frac{\partial \tilde{q}_1}{\partial Q_{B_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_1}{\partial Q_{B_{n_b}}} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial \tilde{q}_{n_q}}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_{n_q}}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_{n_q}}{\partial h_n} & \frac{\partial \tilde{q}_{n_q}}{\partial Q_{V_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_{n_q}}{\partial Q_{V_{n_v}}} & \frac{\partial \tilde{q}_{n_q}}{\partial Q_{B_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_{n_q}}{\partial Q_{B_{n_b}}} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial \tilde{q}_{n_q}}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_{n_q}}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_{n_q}}{\partial h_n} & \frac{\partial \tilde{q}_{n_q}}{\partial Q_{V_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_{n_q}}{\partial Q_{V_{n_v}}} & \frac{\partial \tilde{q}_{n_q}}{\partial Q_{B_1}} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_{n_q}}{\partial Q_{B_{n_b}}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

VÁLVULAS
BOMBAS

Por este motivo, resulta interesante identificar las variables observables y la incertidumbre asociada a los flujos en las conexiones existentes entre sectores, ya que si estos flujos fuesen observables, se podrían conocer las entradas y salidas a los distintos sectores en el posterior proceso de estimación de estado.

La inclusión de los sectores y conexiones entre sectores en el modelo hidráulico y el posterior análisis requiere tener en cuenta las particularidades del flujo que se desarrolla en estas zonas. Los sectores son en realidad una forma artificial de representar toda una zona del sistema, por lo que estos puntos representan valores agregados de demanda a los que no se puede atribuir nivel piezométrico. Por tanto, solamente operan las ecuaciones de continuidad o conservación de masa en los nodos considerados sectores. De esta forma, es necesario separar el funcionamiento de la red estratégica, que se ve gobernada por las ecuaciones de balance en nodos y de pérdida de energía en tubos, y la parte correspondiente a los sectores, donde sólo aplican las ecuaciones de continuidad. Esto permite integrar la información en la matriz jacobiana, donde se definen tantas variables de estado adicionales como número de conexiones existen entre sectores, aunque las medidas correspondientes a las pseudomedidas de consumo en los sectores y el conocimiento del flujo entre ellos compensan en parte la información adicional necesaria para caracterizar el flujo en esta zona.

6. Identificación de regiones observables en la red estratégica



En este capítulo se presenta en primer lugar el planteamiento matemático de las metodologías adaptadas para la identificación de regiones observables en sistemas de abastecimiento de agua, evaluándose luego éstas para finalmente seleccionar la metodología más adecuada con vistas a su implementación en la red estratégica gestionada por Canal de Isabel II. Una vez seleccionado el método más adecuado, se procede a la identificación de regiones observables en la red en condiciones normales de explotación. Por último, se realizan análisis específicos que permiten identificar las bombas, válvulas (incluidas las de derivación) y roturas que resultan observables bajo estas condiciones.

6.1. ADAPTACIÓN DE LA METODOLOGÍA A LA RED ESTRATÉGICA

En el sector eléctrico, todo un referente en cuestiones de observabilidad y estimación de estado en redes, se han desarrollado muy diversas metodologías para la identificación de regiones observables. Sin embargo, debido a la escasa realización de estudios de observabilidad en redes de agua, son pocas las metodologías adaptadas a sistemas de abastecimiento. A continuación se presentan las metodologías que se han contemplado a escala de prototipo en esta investigación para su posible utilización en la identificación de variables observables de la red estratégica.

6.1.1. Metodologías adaptadas

Las metodologías adaptadas e implementadas para la identificación de regiones observables en sistemas de abastecimiento de agua están orientadas a analizar el rango de la matriz jacobiana de medidas del sistema, que deberá permitir identificar las variables observables para una configuración de medidas dada. El fundamento matemático de cada uno de los cinco métodos considerados se resume a continuación.

1) Método del null space o del espacio nulo

En general, el espacio nulo o *null space* N_A de una matriz A de dimensiones $m \times n$ se denota:

$$N_A = \{x \in \mathbb{R}^n : Ax = 0\} \quad (16)$$

De esta forma, la dimensión del espacio nulo permite determinar si la matriz A forma un sistema compatible determinado (el espacio nulo es un conjunto vacío) o si por el contrario presenta una cierta dimensión, lo cual indica que una o varias filas de la matriz son linealmente dependientes.

Puesto que la condición necesaria para que una red de distribución de agua sea observable es que la matriz jacobiana asociada al subconjunto de medidas disponibles sea de rango completo, esta técnica permite evaluar la observabilidad de forma sencilla. Para ello, es necesario extraer la matriz jacobiana asociada al conjunto de medidas disponibles J_a , dada por la expresión siguiente:

$$\mathbf{J}_a = \begin{bmatrix} \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_1}{\partial h_n} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial \tilde{h}_j}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_j}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{h}_j}{\partial h_n} \\ \frac{\partial \tilde{Q}_1}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_1}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_1}{\partial h_n} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial \tilde{Q}_{ij}}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{ij}}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{Q}_{ij}}{\partial h_n} \\ \frac{\partial \tilde{q}_1}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_1}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_1}{\partial h_n} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial \tilde{q}_j}{\partial h_1} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_j}{\partial h_i} & \dots & \frac{\partial \tilde{q}_j}{\partial h_n} \end{bmatrix}; \quad \begin{matrix} \forall j \in \Omega_h \\ \forall ij \in \Omega_Q \\ \forall j \in \Omega_q \end{matrix} \quad (17)$$

Donde:

- Ω_h es el conjunto de medidas de altura piezométrica
- Ω_Q es el conjunto de medidas de flujo
- Ω_q es el conjunto de medidas de demanda o consumos (incluyendo nodos de tránsito)

De esta forma, basta con calcular el espacio nulo asociado a $\mathbf{J}_a$ para saber si el sistema es observable (espacio nulo es conjunto vacío) o no (espacio nulo de cierta dimensión). Además, el espacio nulo N_A proporciona información sobre qué variables de estado son observables y cuáles no para un escenario no observable dado (Castillo et al., 2005). Esto permite detectar de forma puntual los niveles piezométricos que resultan observables, pero no las regiones formadas por variables observables en general, ya que no permite evaluar la observabilidad de las demandas ni los flujos circulantes (variables que no son de estado).

2) Método de optimización

Este planteamiento, presentado para redes eléctricas por Habiballah and Irving (2001), se fundamenta en establecer una serie de condiciones que se corresponden con las medidas de los niveles piezométricos, los caudales (ecuaciones de pérdidas) y las demandas (ecuaciones de continuidad) disponibles en el sistema. Este conjunto de expresiones son restricciones del problema de optimización y reproducen las ecuaciones de gobierno del sistema y por tanto la estructura de la matriz jacobiana de medidas disponibles ($\mathbf{J}_a$). Además, añade dos restricciones adicionales que permiten resolver el sistema de ecuaciones de la red minimizando el sumatorio de dos variables adicionales p_{ij} y $h_{i,max}$, que se introducen en el sistema de modo que los valores solución se mantengan lo más acotados posible.

La expresión (18) recoge el problema de programación lineal a resolver para analizar la observabilidad de una red de distribución de agua:

$$\begin{aligned}
 & \min \sum_{ij=1}^{n_p} p_{ij} + \sum_{j=1}^n h_{i,aux} \\
 & \text{con las siguientes restricciones:} \\
 & \quad h_i - 1 = 0 \quad ; \forall i \in \Omega_h \\
 & \quad h_i - h_j = 0 \quad ; \forall ij \in \Omega_Q \\
 & \quad card_i \cdot h_i - \sum_{j=1}^{card_i} h_j = 0 \quad ; \forall i \in \Omega_q \\
 & \quad h_i - h_j + p_{ij} \cdot k = k \quad ; \forall ij \in L \\
 & \quad p_{ij} \geq 0 \quad ; \forall ij \in L \\
 & \quad h_{i,aux} \geq 0 \quad ; \forall i \in \Omega_h \\
 & \quad h_{i,aux} \geq h_i \quad ; \forall i \in \Omega_h
 \end{aligned} \tag{18}$$

Donde $card_i$ se refiere al número de tubos que entran y salen del nodo i , y k es un vector que recorre el número de tubos que existe en el sistema ($k = 1, 2, \dots, n_p$).

Resolviendo este problema de programación lineal, se obtiene el valor que adopta en el óptimo. Como se puede deducir de la formulación dada por la expresión (18), estas variables toman valor 1 cuando son observables y valor **distinto** de 1 cuando no es así. De esta forma, al igual que con el método anterior, esta propuesta basada en la optimización permite identificar las variables de estado que son observables, pero no las regiones observables como tal (no permite evaluar la observabilidad de flujos y consumos).

3) Método algebraico

Este método fue presentado por Pruneda et al. (2010) para redes eléctricas y adaptado por Díaz et al. (2015) a redes de abastecimiento de agua. A grandes rasgos, esta metodología plantea la aplicación de una técnica de eliminación basada en el método de Gauss a la matriz jacobiana reordenada de la red, que contiene en primer lugar las medidas disponibles del sistema (J_a , de dimensión $m_a \times n$) y en segundo lugar el resto de variables que, aunque no estén disponibles, son medidas candidatas que podrían estarlo a un cierto coste (J_c , de dimensión $m_c \times n$). De esta forma, la matriz transformada resultante al finalizar el algoritmo, cuya explicación detallada se encuentra disponible en Díaz et al. (2015), contiene toda la información sobre la observabilidad del sistema, y mantiene actualizadas las relaciones entre todas las variables hidráulicas de la red. Esto permite identificar medidas (ya sean disponibles o candidatas) redundantes entre sí, que permitirían garantizar el mismo nivel de observabilidad en caso de fallo de alguna de ellas. Además, la matriz transformada permite identificar medidas críticas, entendiéndose como medida crítica aquella que resulta imprescindible para la observabilidad del sistema, así como detectar medidas candidatas que podrían reemplazarlas en caso de fallo del sensor, fallo en el sistema de telemetría, etc.

No obstante, el aspecto más destacable de esta propuesta es que permite evaluar la observabilidad de todas las variables de la red, por lo que se puede llevar a cabo la identificación de regiones observables cuando el sistema en su conjunto resulta no observable, ya que a diferencia de los anteriores, no se limita exclusivamente a evaluar la observabilidad de las variables de estado.

4) Método binario

Este método es presentado en detalle en redes eléctricas por Solares et al. (2009) con el objeto de minimizar los errores de redondeo o inestabilidades numéricas que pudieran surgir aplicando técnicas algebraicas como las utilizadas en el método anterior, las cuales trabajan con una cierta tolerancia para identificar los elementos nulos. De esta forma, la única diferencia con respecto al método algebraico consiste en modificar la matriz jacobiana reordenada de partida, asignando valor 1 a los elementos distintos de cero, y 0 al resto. Posteriormente, se transforma esta matriz mediante una regla de operación binaria que es equivalente a la técnica de eliminación utilizada en el método anterior.

La implementación de la versión binaria presenta potencial debido a que agiliza el proceso de transformación de la matriz. Sin embargo, la necesidad de reemplazar los elementos no nulos por un valor único 1 en la matriz jacobiana de partida conlleva una pérdida significativa de información. Esto hace que cuando exista una gran cantidad de elementos no nulos, las reglas de operación binarias no puedan realizar la transformación completa, resultando valores desconocidos que nublan las relaciones entre medidas y variables de estado. Esta situación se resuelve implementando el método algebraico en ciertas submatrices de la matriz jacobiana original, pero la necesidad de un complemento algebraico demora significativamente la metodología.

Esto puede resultar especialmente problemático cuando se trabaja con valores de consumo conocidos (sean medidos o pseudomedidos), ya que las filas de la matriz jacobiana correspondientes a medidas de demanda están asociadas a una gran cantidad de elementos no nulos como resultado de establecer relaciones con los niveles piezométricos de todos los nodos extremos que condicionan el balance en un nodo dado (ver ecuación (13)). La presencia de múltiples elementos no nulos en la matriz favorece la propagación de los mencionados valores desconocidos, haciendo necesaria la aplicación del complemento algebraico en un gran número de situaciones y para matrices de tamaño similar a la original. La aparición de estos valores desconocidos hace que aunque el método esté pensado para, como el algebraico, evaluar la observabilidad de todas las variables hidráulicas, en la práctica en muchas ocasiones sólo se pueda analizar con certeza la observabilidad de las variables de estado. Además, esta pérdida de información limita la posibilidad de identificar regiones observables.

5) Método estocástico

Este método se encuentra descrito en detalle en Díaz et al. (2016 b). Presenta un planteamiento diferente a los anteriores, puesto que emplea las ecuaciones de gobierno del sistema (ecuaciones de balance y pérdidas) para relacionar la incertidumbre asociada a las diferentes variables en vez de a las variables en sí mismas. El método se fundamenta en que para poder resolver la incertidumbre de cualquier red de flujo es necesario complementar las n_n ecuaciones de balance en los nodos que no son depósitos ($\forall i \notin V^D$) y las n_p ecuaciones de pérdida de energía que aplican a cada una de las conducciones ($\forall ij \notin L$) con $n_n + n_d$ condiciones adicionales que permitan igualar el número de ecuaciones ($n_n + n_p$) al número de variables o incógnitas ($2 \cdot n_n + n_d + n_p$), que resultan de considerar los niveles piezométricos en los nodos ($h_i; \forall i \in V$), los consumos en los nodos que no son depósitos ($q_i; \forall i \in (V^Q \cup V^T)$) y los flujos en los tubos ($Q_{ij}; \forall ij \in L$).

Este planteamiento es análogo al que se hace para la resolución de la red de flujo convencional, donde basta con conocer los consumos en los nodos (n_n) y los niveles en los depósitos (n_d) para poder resolver el flujo, o lo que es lo mismo, para que la red sea observable.

De esta forma, las incertidumbres de las diferentes variables de la red, que se reflejan con un apóstrofe (') junto a la variable en cuestión, pueden obtenerse imponiendo $n_n + n_d$ condiciones adicionales. En este caso, se asumen conocidas las distribuciones de incertidumbre de los consumos en los nodos que no son depósitos $q_i' \in N(0, \sigma_i)$ y los niveles piezométricos en los depósitos $h_{d_j}' \in N(0, \sigma_j)$, que son consideradas gaussianas de media cero. Sobre estas asunciones, la incertidumbre de las variables conocidas se puede propagar al resto, obteniéndose una primera estimación de la incertidumbre de las variables de estado mediante la suma de los elementos de la diagonal de la matriz de varianza-covarianza resultante para los niveles piezométricos ($\sum \sigma_{h_0}^2$).

Es cierto que este valor inicial por sí sólo no aporta información determinante, pero si se compara con el valor que adquiere este mismo sumatorio para una configuración de medidas dada, puede proporcionar información relevante en términos de observabilidad, permitiendo analizar cómo ésta mejora al añadir medidas al sistema.

En esta línea, el método considera que si se mide alguna variable con un instrumento su valor es exacto, o al menos un orden de magnitud inferior a la incertidumbre asumida para los niveles en los depósitos y los consumos en los nodos, pudiéndola suponer despreciable a efectos de observabilidad determinística. Esto hace que, si se asume un vector $\mathbf{X}$ de medidas y un vector $\mathbf{Y}$ de no medidas (el resto), se puedan utilizar las propiedades de una distribución multivariada normal condicionada para obtener la matriz de varianza-covarianza de todas las variables del sistema condicionada a la existencia de esas medidas $\mathbf{R}_{Y|X}$:

$$\mu_{Y|X} = \mu_Y + R_{Y \cdot X} \cdot R_{X \cdot X}^{-1} \cdot (X - \mu_X) \quad (19)$$

$$R_{Y|X} = R_Y - R_{Y \cdot X} \cdot R_X^{-1} R_{X \cdot Y} \quad (20)$$

Nótese que la diagonal de la matriz varianza-covarianza proporciona la varianza de todas las variables del sistema para la configuración de medidas analizada, por lo que este planteamiento también permite la identificación de regiones observables. Además, el ratio de la varianza condicionada entre la varianza inicial de cada variable proporciona una idea del nivel de observabilidad de la variable, lo cual permite añadir matices más allá de la observabilidad/no observabilidad de la variable en cuestión.

En esta misma línea, sobre $\mathbf{R}_{Y|X}$ se puede calcular de nuevo la suma de las varianzas de los niveles piezométricos ($\sum \sigma_{h_c}^2$) para compararla con el valor base anteriormente obtenido ($\sum \sigma_{h_0}^2$).

Así, definiendo el *Índice de Observabilidad Estocástico referido a niveles piezométricos* (SOI_h ⁹) sobre el cociente entre ambos sumatorios:

$$SOI_h = \left(1 - \frac{\sum \sigma_{h_c}^2}{\sum \sigma_{h_0}^2}\right) \cdot 100 \quad (21)$$

Se obtiene una medida de la observabilidad para una cierta configuración de medidas, alcanzando este índice el valor 100% cuando el sistema es observable.

De igual forma, se podría calcular el *Índice de Observabilidad Estocástico referido a caudales* (SOI_Q) como:

$$SOI_Q = \left(1 - \frac{\sum \sigma_{Q_c}^2}{\sum \sigma_{Q_0}^2}\right) \cdot 100 \quad (22)$$

Aún más, se podría evaluar la observabilidad del sistema ponderando las incertidumbres por los flujos que circulan por cada tubo. De esta forma, se podría asignar un peso mayor a los flujos principales de la red.

El *Índice de Observabilidad Estocástico Ponderado referido a caudales* ($SOWI_Q$ ¹⁰), quedaría entonces como:

$$SOWI_Q = \left(1 - \frac{\sum Q \cdot \sigma_{Q_c}^2}{\sum Q \cdot \sigma_{Q_0}^2}\right) \cdot 100 \quad (23)$$

Debe resaltarse que con este procedimiento de observabilidad estocástica no se pueden tener en cuenta situaciones de redundancia en las medidas, ya que la matriz de covarianza R_X resultaría no invertible en estos casos. Esto hace que la comparación del índice sea interesante para escenarios no observables en los que se van añadiendo medidas sucesivas para ver el efecto que cada medida tiene en la observabilidad general de la red, pero no permite cuantificar la mejora que se consigue al añadir medidas adicionales sobre un escenario observable.

⁹ SOI: del inglés Stochastic Observability Index

¹⁰ SOWI: del inglés Stochastic Observability Weighted Index

6.1.2. Selección de la metodología óptima

Una vez presentados los cinco métodos implementados para la identificación de variables observables, se ha realizado una evaluación objetiva de cada una de ellas para identificar la técnica más adecuada para su implementación en la red gestionada por Canal de Isabel II.

En este análisis se ha considerado el grado de adecuación de las distintas metodologías conforme a los siguientes criterios:

a. Tipo de información de salida

Las cinco metodologías propuestas para el análisis de observabilidad pueden clasificarse en dos grupos atendiendo al tipo de información de salida que proporcionan. Por un lado, están las técnicas que permiten evaluar la observabilidad del sistema e identificar las variables de estado que se encuentran dentro y fuera de regiones observables cuando no se alcanza que la red completa sea una región observable. En este grupo se incluyen los métodos del *null space*, de optimización y binario. Se incluye el binario porque aunque éste presenta potencial para evaluar la observabilidad de todas las variables, la aparición de valores desconocidos limita la utilidad práctica del método, quedando especialmente restringida cuando se trabaja con consumos como medidas disponibles, como es el caso de la red gestionada por Canal de Isabel II. Por otro lado, están las técnicas que permiten evaluar la observabilidad del sistema e identificar las variables observables y no observables cuando no se alcanza que la red completa esté dentro de una región observable, ya sean variables de estado (niveles piezométricos), flujos o demandas. Así pues, las técnicas que se incluyen en este segundo grupo, que incluye al método algebraico y al estocástico, son la mejor opción desde el punto de vista de la utilidad de la información de salida.

b. Posibilidad de detección de regiones observables

La detección de regiones observables sólo es posible con aquellas técnicas que permiten evaluar la observabilidad de todas las variables de la red, ya que si sólo proporcionan información sobre las variables de estado, la información de salida no deja de ser información aislada. Por este motivo, y conforme al criterio anterior, los métodos algebraico, y estocástico resultan la mejor opción en este sentido.

c. Tipo de información resultante a los efectos de análisis de clasificación de información crítica y redundante

Conocer las medidas críticas y redundantes desde el punto de vista de la observabilidad resulta de interés, ya que puede determinar cómo reaccionar ante la posible pérdida de una medida. En este sentido, el método del *null space* y el de optimización no permiten identificar las medidas críticas y redundantes, mientras que los algebraicos sí, con el matiz de que en el binario la aparición de valores desconocidos limita la extracción de información. Por su parte, el método estocástico presenta una fuerte limitación en este sentido, ya que no permite trabajar con medidas redundantes. Por este motivo, desde el punto de vista de la extracción de información crítica y redundante, el método algebraico resulta la mejor opción.

d. Potencial para la selección y priorización del emplazamiento de nuevos dispositivos de medida

En este respecto, se considera que todos los métodos se comportan del mismo modo, ya que la ubicación óptima de dispositivos no se plantea en este estudio en términos de mejora de la observabilidad de la red (extensión de las regiones observables del sistema), sino en términos de reducción de la incertidumbre de la observación (ver epígrafe “Ubicación estratégica de equipos de medida adicionales”), que es una aproximación más real para el grado de instrumentación y el sistema de telemetría existente en la red gestionada por Canal de Isabel II.

e. Coste computacional

El coste computacional es un aspecto clave para la implementación del análisis de observabilidad en la red estratégica gestionada por Canal de Isabel II, ya que condiciona la viabilidad de conocer las regiones observables de la red ante cualquier circunstancia de cara al posterior empleo de técnicas de estimación de estado.

La respuesta de cada método en términos de tiempo de cálculo se ha evaluado mediante su implementación a redes malladas de diferentes tamaños, que permiten analizar la tendencia del coste computacional de cada método. Se trata de redes que presentan siempre la misma estructura (dos depósitos, dos nodos de demanda y el resto nodos de tránsito) y tamaños sucesivos de 6, 12, 50, 100, 500 y 1000 nodos. El coste computacional asociado a cada uno de estos ejemplos para una configuración aleatoria de medidas no redundantes aparece recogido en la Tabla 4.

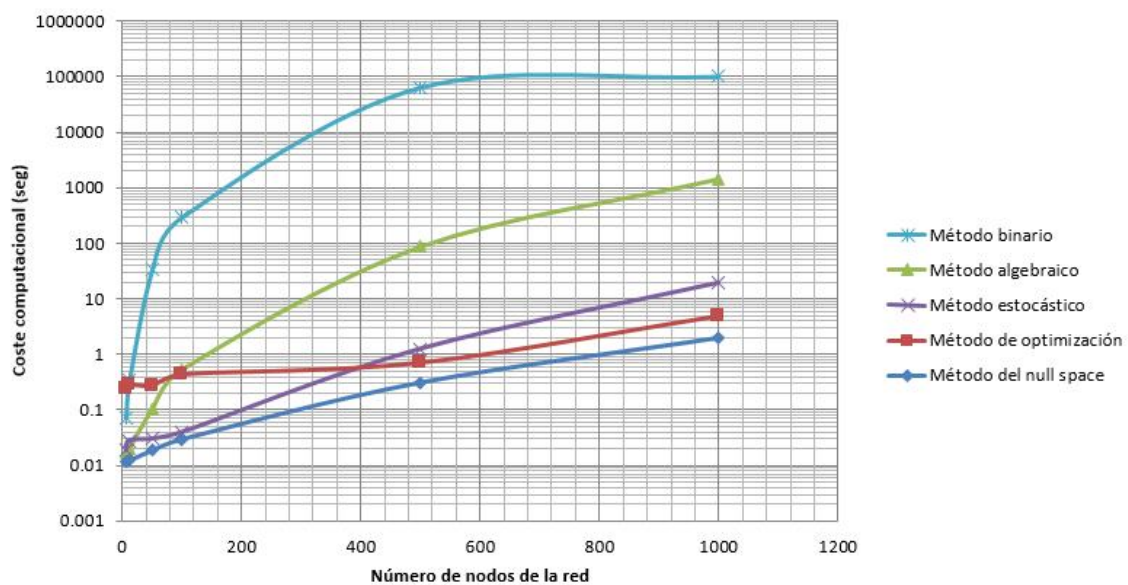
TABLA 4. COSTE COMPUTACIONAL DE IMPLEMENTACIÓN EN REDES MALLADAS DE TAMAÑO SUCESIVO

<i>Actividad</i>	<i>Coste computacional total (segundos)</i>					
	<i>6 nodos</i>	<i>12 nodos</i>	<i>50 nodos</i>	<i>100 nodos</i>	<i>500 nodos</i>	<i>1000 nodos</i>
Resolución red flujo	0,2476	0,2476	0,2526	0,2739	9,5273	41,031
Generación de la matriz jacobiana	0,0077	0,0081	0,0132	0,0220	0,1793	0,6076
Método del <i>null space</i> *	0,0040	0,0042	0,0054	0,0076	0,1277	1,3376
Método de optimización	0,2382	0,2839	0,2744	0,4355	0,7081	4,9521
Método algebraico*	0,0088	0,0124	0,0891	0,5063	86,861	1.449,7
Método binario*	0,0638	0,3402	32,705	292,26	63.628	>100.000
Método estocástico	0,0187	0,0281	0,0301	0,0394	1,2504	19,319

*Metodologías que requieren la generación previa de la matriz jacobiana

Estos resultados permiten identificar el método binario como poco eficiente, ya que la necesidad de realizar el pivotaje binario para luego tener que implementar el método algebraico no hace más que ralentizar el proceso, aumentando el coste computacional considerablemente a medida que aumenta el tamaño de la red. Sin embargo, los tiempos recogidos en la Tabla 4 también ponen de manifiesto la eficiencia computacional del resto de métodos, cuyo coste se mantiene más o menos estable pese al aumento progresivo del tamaño de la red. Tal y como muestra la Figura 2, que refleja la variación del coste computacional total del método (incluida la generación de la matriz jacobiana cuando sea necesaria) en función del número de nodos de la red, la adecuación de estas metodologías en lo que respecta al coste computacional es, por orden descendente: método del *null space*, método de optimización, método estocástico y método algebraico, quedando el binario descartado.

FIGURA 2. EVOLUCIÓN DEL COSTE COMPUTACIONAL CON EL NÚMERO DE NODOS



f. Agilidad para su combinación con técnicas de estimación de estado

El potencial para la aplicación de técnicas de observabilidad como paso previo complementario a las técnicas de estimación de estado viene en gran medida determinado por la agilidad del método para contemplar cada situación, altamente dependiente del coste computacional que requiere su implementación. En este respecto, y a la vista de los resultados anteriores, el método binario presenta limitaciones en este sentido, mientras que el resto de métodos son adecuados. Es interesante mencionar el hecho de que los métodos de *null space*, optimización y estocástico, presentan una elevada eficiencia, con tiempos del orden de segundos o decenas de segundo en redes de 1.000 nodos. Especial atención merece el método algebraico puesto que, aunque presente una eficiencia peor, esta propuesta requiere sólo de alguna iteración para actualizar la matriz transformada una vez que ésta haya sido obtenida en un primer momento, no siendo necesario afrontar el coste computacional total cada vez. Este hecho hace al método algebraico especialmente atractivo desde el punto de vista de su implementación, ya que al albergar toda la información y relaciones entre las variables de la red, permite actualizar progresivamente las regiones observables en el sistema para ir siguiendo su evolución.

A la vista de este análisis, el método algebraico se presenta como la metodología óptima para identificar las regiones observables en la red gestionada por Canal de Isabel II, ya que no sólo es eficiente en términos de coste computacional (lo cual la hace viable para su aplicación conjunta con técnicas de estimación de estado), sino que además permite evaluar la observabilidad de todas las variables (no sólo de las de estado) y proporciona información de salida muy completa, posibilitando la clasificación de las medidas como redundantes o críticas para un determinado estado de flujo en la red. Por este motivo, el método algebraico es el seleccionado para su implementación en la red estratégica en los epígrafes siguientes.

Únicamente se debe hacer un comentario negativo en lo que respecta a este método, y es que como se ha comentado anteriormente, requiere de la definición de un criterio de elemento nulo o tolerancia, que deberá ser definido de forma consistente para evitar la falsa identificación de ciertas variables como observables cuando en realidad no lo son. Este es un riesgo especialmente importante en grandes redes, donde la acumulación de error puede llevar a discrepancias en los resultados. Por este motivo, la implementación del método en la red estratégica ha requerido un análisis de sensibilidad en este parámetro (que en estos ejemplos en el estadio de prototipo ha sido considerado de 10^{-6}), viable gracias a la posibilidad de comparación de los resultados del algebraico con el resto de métodos, que presentan un bajo coste computacional.

Por último, debe destacarse el potencial del método estocástico como complemento a los resultados del método algebraico en escenarios no observables, ya que permite cuantificar el nivel de observabilidad de cada una de las variables involucradas más allá de dar una respuesta de “sí/no”. No obstante, en este trabajo se opta por cuantificar la incertidumbre de la observación en cualquier escenario, incluso aunque resulte redundante, ya que la reducción de esta incertidumbre es el criterio seleccionado para la ubicación de aparatos de medida adicionales en el capítulo 8 “Ubicación estratégica de equipos de medida adicionales”.

6.2. IDENTIFICACIÓN DE REGIONES OBSERVABLES EN CONDICIONES NORMALES DE EXPLOTACIÓN

El método algebraico para la identificación de regiones observables permite evaluar si existen relaciones algebraicas suficientes para calcular una determinada variable hidráulica, a partir del conjunto de medidas disponibles. Por ello, en primer lugar se aplica esta técnica sobre la zona abierta de la red conforme a la configuración o topología de la red en condiciones normales de explotación. Esto permite evaluar la observabilidad/no observabilidad de las variables de la red con las válvulas y bombas en la posición asociada a la operación habitual del sistema, que resulta conocida por Canal de Isabel II.

Para este análisis se consideran conocidas las pseudomedidas de consumo en los sectores, ya que la información proporcionada por el sistema CHYPRE aporta redundancia a ciertos equipos de medida y es clave para caracterizar el flujo entre sectores.

Bajo estas hipótesis, la red estratégica resulta en su conjunto una región **observable**. Esto se explica porque se conocen las demandas que movilizan el agua en la red, en su mayoría medidas en las salidas a sectores y *pseudomedidas* en aquellos sectores que aún no disponen de caudalímetro a su entrada, y se asumen conocidos los parámetros de la red vinculados a modelización de las pérdidas hidráulicas, el estado de las válvulas y las curvas características de las bombas del sistema y por último se aceptan como correctos los valores calculados por el modelo hidráulico. De esta forma, se puede proceder al cálculo de la incertidumbre de la observación en este escenario (ver el capítulo “Cuantificación de la incertidumbre de la observación en la red estratégica”) y se podría estimar el estado de la red al completo.

No obstante, es poco probable que en todo momento se mantengan las condiciones normales de explotación. Por tanto, la identificación de elementos observables cobra importancia para caracterizar escenarios en los que se produzcan desviaciones con respecto a las condiciones teóricas asumidas. Concretamente, en esta investigación se opta por evaluar cómo se vería afectada la observabilidad del sistema en las siguientes situaciones:

- 1) Que cambie el funcionamiento o deje de ser adecuada la curva característica asumida para las bombas y válvulas de regulación del sistema,
- 2) Que se produzca la apertura de las válvulas de derivación, que en condiciones normales se encontraban cerradas, impidiendo el flujo hacia otras zonas de la red,
- 3) Que se pretendan detectar roturas en el sistema¹¹.

Para afrontar estos tres supuestos se lleva a cabo el análisis individual del “fallo” o desconocimiento de cada uno de los elementos involucrados en los tres casos anteriores, que serán cada una de las bombas y válvulas de la red, la demanda de los nodos de cierre o nodos limítrofes que se encuentran inmediatamente antes de las válvulas de derivación cerradas, y los nodos de tránsito en la red estratégica, respectivamente. En todos estos supuestos se llevan a cabo variaciones individuales de los elementos en cuestión y se asume el estado del resto del sistema conforme a las condiciones normales de explotación.

Es importante resaltar que los análisis que se presentan a continuación pretenden evaluar la observabilidad de los distintos elementos de la red en caso de producirse variaciones individuales de la topología. Es cierto que pueden producirse situaciones en las que haya más de una diferencia al mismo tiempo con respecto al escenario teórico esperado, pero barajar toda esa posible combinatoria resultaría inmanejable y es además poco práctico, puesto que nunca se podrá medir todo. La simulación de la pérdida individual de ciertos elementos da no obstante una idea de la robustez del sistema en términos de observabilidad.

¹¹ Las conexiones entre sectores son siempre observables algebraicamente por contarse con las *pseudomedidas*. Se debe determinar, sin embargo, si en la práctica son observables atendiendo a las incertidumbres.

De esta forma, si en la práctica se produjera más de una diferencia con respecto al escenario teórico que corresponde al estado de bombas y válvulas propio de las condiciones normales de operación, sería posible detectar al menos la existencia de una anomalía en la zona, si bien es cierto que quizás no se podría llegar a determinar en qué elemento se produce.

6.3. IDENTIFICACIÓN DE BOMBAS Y VÁLVULAS OBSERVABLES

En este escenario se evalúa el efecto de asumir conocido o desconocido el estado de las válvulas y bombas del sistema. Para ello, se estudia si dudando del estado de las bombas y válvulas estos elementos se encuentran en una región observable o no, haciendo un análisis en el que se supone desconocido el estado de cada bomba y válvula de forma individual (análisis uno a uno), puesto que en el escenario habitual se asumen todos conocidos conforme a la operación habitual de la red. De esta forma, se pretende probar si desconociendo el estado de una determinada bomba o válvula se puede llegar a observar su estado a partir del resto de medidas disponibles en la red. Para ello, se asume el estado del resto de bombas y válvulas conforme a las condiciones de operación normales en la red estratégica y se consideran conocidas las pseudomedidas. El resumen de los resultados queda recogido en la Tabla 5.

TABLA 5. BOMBAS Y VÁLVULAS OBSERVABLES DUDANDO DE SU FUNCIONAMIENTO A NIVEL INDIVIDUAL

<i>Variables</i>	<i>Nº elementos totales</i>	<i>Nº elementos observables</i>	<i>% elementos observables</i>
Flujo válvulas de corte	6.514	3.431	53
Flujo válvulas de regulación	507	351	69
Flujo bombas	123	100	81

Según estos resultados, el estado (abierto/cerrado), y por consiguiente el flujo, a través de las válvulas de corte en la zona abierta de la red podría llegar a observarse en un porcentaje próximo al 50%, siempre que se dude de su estado de modo individual. En el caso de las válvulas de regulación, su flujo es algebraicamente observable en un 69%, y en las bombas asciende al 81%. Estos resultados ponen de manifiesto que en buena parte de los casos en los que se dude del estado de una válvula o bomba sería posible determinar el estado del elemento singular. Debe mencionarse que esto es una condición necesaria, dado que el elemento mantiene relaciones suficientes para ser determinado su estado. Una segunda condición posterior a cumplir, para unas condiciones de funcionamiento concreta, es la incertidumbre que presenta la estimación del funcionamiento que puede realizarse. No obstante, esta primera condición se cumple en un número de casos muy elevado, lo que pone de manifiesto el potencial que el sistema de medidas proporciona para conocer el estado de la red.

Nótese que evaluar esta realidad es posible gracias al concepto de observabilidad topológica presentado en este trabajo, que permite evaluar no sólo si las variables son o no observables sino también si sería posible determinar el estado de las bombas y válvulas a partir de las medidas disponibles. Así, este análisis permite identificar las bombas y válvulas en las que se podrían detectar maniobras no notificadas en un posterior proceso de estimación de estado. Es cierto que estos resultados se ciñen a variaciones individuales con respecto a las condiciones normales de operación, pero teniendo en cuenta que la estimación de estado es un proceso concebido para su implementación en tiempo real, no es esperable que se produzcan alteraciones excesivas entre un paso temporal y su siguiente. En cualquier caso, si se producen maniobras simultáneas, posiblemente no se podría identificar de modo correcto la válvula o bomba cuyo estado es distinto incluso aunque los elementos hayan resultado observables en este análisis uno a uno. No obstante, se podría detectar que la topología de la red en la zona no es la esperada.

6.4. IDENTIFICACIÓN DE VÁLVULAS DE DERIVACIÓN OBSERVABLES

Este análisis pretende evaluar el efecto que tiene el cambio de operación o maniobra de las válvulas y bombas que regulan las derivaciones, es decir, de aquellos elementos a partir de los cuales se detecta una zona cerrada de la red, no pudiendo acceder el flujo a ella debido a que la válvula o bomba se encuentra cerrada o apagada, respectivamente. Para ello, se realiza un análisis individual de la demanda en los denominados nodos de cierre o nodos limítrofes, que son aquellos que se encuentran inmediatamente antes de la bomba o válvula que cierra la derivación.

Así, se evalúa la observabilidad/no observabilidad de estos nodos de cierre haciendo un análisis en el que se supone desconocida su demanda de forma individual (análisis uno a uno). De esta forma, se puede evaluar si el caudal que entraría en esa región sería observable en caso de que se abriese o pudiese en funcionamiento la válvula o bomba en cuestión, es decir, si se abriese la derivación. Para ello, se asume el estado del resto de bombas y válvulas conforme a las condiciones de operación normales en la red estratégica y se consideran conocidas las pseudomedidas.

Los resultados de este análisis se recogen en la Tabla 6, donde se puede apreciar que el 42% de estos nodos limítrofes serían observables. Esto quiere decir que en caso de producirse una derivación de flujo a través de estos nodos (siempre de forma aislada, uno a uno), ésta podría observarse desde el punto de vista algebraico en un 42% de los casos. Un aspecto distinto es la precisión con la que se observaría, que puede hacer que los flujos pequeños no sean en realidad observables cuando se estime la incertidumbre de la observación.

TABLA 6. VÁLVULAS DE DERIVACIÓN OBSERVABLES DUDANDO DE SU APERTURA A NIVEL INDIVIDUAL

<i>Variables</i>	<i>Nº elementos totales</i>	<i>Nº elementos observables</i>	<i>% elementos observables</i>
Demanda nodos de cierre	2.380	1.003	42

6.5. IDENTIFICACIÓN DE ROTURAS OBSERVABLES

En este escenario se evalúa la observabilidad/no observabilidad de los nodos de tránsito de la red que no son de cierre (contemplados en el apartado anterior) haciendo un análisis en el que se duda de que la demanda en esos nodos sea cero de forma individual (análisis uno a uno). De esta forma, se puede evaluar si sería posible detectar que se está produciendo una demanda distinta de cero en ese nodo basado en las medidas disponibles, lo cual permitiría la detección de roturas. Para ello, se asume el estado del resto de bombas y válvulas conforme a las condiciones de operación normales en la red estratégica y se consideran conocidas las pseudomedidas.

El resumen de los elementos observables identificados en este supuesto aparece recogido en la Tabla 7, donde se puede ver que sólo el 9% de los nodos de tránsito serían observables desde el punto de vista algebraico en este caso. Más aún, hay que tener en cuenta que de los que resultan observables, la precisión con la que se estima su valor puede hacer que de modo operativo no resulte observable una rotura determinada a causa de la incertidumbre asociada.

TABLA 7. ROTURAS OBSERVABLES DUDANDO DE LA DEMANDA DE LOS NODOS DE TRÁNSITO A NIVEL INDIVIDUAL

<i>Variables</i>	<i>Nº elementos totales</i>	<i>Nº elementos observables</i>	<i>% elementos observables</i>
Demanda nodos de tránsito	13.702	1.210	9

Estos resultados reflejan que la capacidad para la detección de roturas es limitada, puesto que dudar sobre la posibilidad de que se produzca una derivación de caudal desconocida en los nodos de tránsito, que constituyen una parte importante de la red estratégica gestionada por Canal de Isabel II, supone una pérdida de información significativa. A tal efecto, debería desarrollarse un estudio específico sobre la capacidad de detección de roturas y/o fugas.

7. Cuantificación de la incertidumbre de la observación en la red estratégica



La cuantificación de la incertidumbre es la segunda etapa del estudio de observabilidad desarrollado en esta investigación. Esta fase permite cuantificar la incertidumbre de la observación de las variables hidráulicas observables existentes en la red para un cierto escenario. Concretamente, se ha trabajado con los escenarios de flujo considerados en las simulaciones hidráulicas de las que dispone Canal de Isabel II para demandas máximas, medias y mínimas, asumiéndose además conocidas las pseudomedidas para complementar las medidas disponibles en la red y garantizar así la observabilidad del sistema.

Las desviaciones típicas consideradas para los equipos de medida dependen de la precisión de los mismos, recogida en la Tabla 3. Por su parte, la implementación en tiempo real del análisis de observabilidad permitiría contar con las estimaciones de consumo o pseudomedidas de CHYPRE, aplicación informática de estimación de demandas en sectores, disponible en Canal de Isabel II. No obstante, para reproducir la elevada incertidumbre asociada a estimaciones de este tipo, en esta investigación se considera un 20% de desviación estándar sobre el valor medio del consumo en cuestión, lo cual supone una desviación significativamente superior a la propia de equipos de medida, como es el 2% ó 5% asumido para la medida de flujo en conducciones mediante caudalímetro.

A continuación, se muestra en detalle la metodología adaptada a la red estratégica para la cuantificación de la incertidumbre, así como el resumen de los resultados obtenidos para los escenarios de demandas máximas, medias y mínimas.

7.1. ADAPTACIÓN DE LA METODOLOGÍA A LA RED ESTRATÉGICA

La metodología adoptada tradicionalmente para la cuantificación de la incertidumbre de la observación se recoge en el epígrafe titulado “Cuantificación de la incertidumbre de la observación”, basada en la estimación de la incertidumbre de la estimación de estado entendida como un problema de mínimos cuadrados. No obstante, esta propuesta implica resolver un problema de mínimos cuadrados en el que se asignan pesos muy diferentes a las distintas medidas disponibles. Por ejemplo, la medida correspondiente al consumo en los nodos de tránsito está asociada a una desviación muy próxima a cero, ya que se conoce con certeza que la demanda es nula, mientras que las pseudomedidas de consumo en los sectores están asociadas a grandes incertidumbres. Estas diferencias en orden de magnitud en R_z pueden originar la aparición de importantes errores numéricos en la resolución de la inversa en (6), especialmente cuando se trabaja con una red de las dimensiones de la red estratégica gestionada por Canal de Isabel II, donde estas diferencias de magnitud en los pesos se suman a las diferencias ya de por sí existentes en las condiciones de flujo.

Por este motivo, y con la idea de minimizar los errores numéricos asociados a la precisión de las medidas, se ha optado por cuantificar la incertidumbre de la observación transformando el problema de estimación de estado sin restricciones original en un problema con restricciones de tipo hidráulico (ver Díaz et al., 2016 a). De esta forma, aquellas medidas que no presenten incertidumbre por ser conocidas en el sistema (como puede ser la asociada a la demanda en un nodo de tránsito, que es nula) se introducirán en el problema como una restricción o ecuación más a satisfacer, evitándose así la necesidad de asignar una desviación prácticamente nula que pueda motivar la aparición de los mencionados errores numéricos. Además, este planteamiento permite introducir límites inferiores y superiores a las variables, lo cual resulta interesante, por ejemplo, para acotar los niveles piezométricos en los depósitos.

El planteamiento de la estimación de estado entendido como un problema de optimización con restricciones resulta entonces:

$$\underset{x}{\text{Min}} F(x) = \varepsilon^T R_z^{-1} \varepsilon = [z - g(x)]^T R_z^{-1} [z - g(x)] \quad (24)$$

Con:

$$f(x) = 0, \quad (25)$$

$$g(x) \leq 0. \quad (26)$$

Donde (25) reproduce las restricciones hidráulicas de igualdad o medidas no sometidas a error, y (26) las restricciones de desigualdad que representan los límites inferiores y superiores para las variables. Este planteamiento para la estimación del estado hidráulico podría resolverse utilizando técnicas de programación matemática, pero el interés se encuentra en este caso en utilizar este concepto para la cuantificación de la incertidumbre de la estimación de estado y no para su resolución en sí.

La cuantificación de incertidumbre es un análisis local de la solución óptima $\hat{x}$, por lo que una vez que se conoce el óptimo de la estimación de estado, las restricciones de desigualdad activas se consideran como restricciones de igualdad y las inactivas se descartan. De esta forma, el vector $f(x)$ contiene p restricciones de igualdad y q_Λ restricciones de desigualdad, donde Λ es el conjunto de restricciones de desigualdad activas.

Por tanto, las condiciones de optimalidad de primer orden del problema (24) - (26) en el óptimo $\hat{x}$ se corresponden con:

$$\sum_{i=1}^m \nabla_x [\omega_i (z_i - g_i(\hat{x}))^2] + \sum_{i=1}^p \lambda_i \nabla_x f_i(\hat{x}) = 0 \quad (27)$$

$$f_i(\hat{x}) = 0, i = 1, \dots, p + q_\Lambda$$

Donde $W = R_z^{-1}$ es una matriz diagonal de dimensión $m \times m$ que contiene los pesos de las medidas ω_i , $F = \nabla_x f(\hat{x})$ es la matriz jacobiana de las restricciones de igualdad (de dimensión $(p + q_\Lambda) \times n$) y λ_i es el vector de multiplicadores de Lagrange asociado con las restricciones de igualdad derivadas de (25) - (26), de dimensión $(p + q_\Lambda) \times 1$.

Aunque se esté asumiendo que la solución óptima es conocida en todo este proceso de cuantificación de la incertidumbre de la estimación de estado (puede asumirse directamente el resultado de resolver la red de flujo), la resolución del problema de estimación de estado (24) - (26), también podría realizarse aplicando el método de Newton sobre (27), resolviendo de forma iterativa el siguiente sistema de ecuaciones lineales:

$$\begin{bmatrix} J^T R_z^{-1} J & F^T \\ F & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \hat{x}_{(v+1)} \\ -\lambda_{(v+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J^T R_z^{-1} \Delta \hat{z}_{(v)} \\ -f(\hat{x}_{(v)}) \end{bmatrix} \quad (28)$$

Donde $\Delta \hat{\mathbf{z}}_{(v)} = \mathbf{z} - \mathbf{g}(\hat{\mathbf{x}}_{(v)})$, que permite obtener un óptimo tal que $\Delta \hat{\mathbf{x}}_{(v+1)} = \mathbf{0}$ y $\mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{(v)}) = \mathbf{0}$. Nótese que la matriz de coeficientes del sistema pasará a denominarse $\mathbf{U}$ de ahora en adelante.

En lo que respecta a la cuantificación de la incertidumbre, es necesario destacar que cuando existen restricciones de igualdad o desigualdad, éstas forman parte de $\mathbf{F}$, por lo que no queda garantizado que $[\mathbf{J}^T \mathbf{R}_z^{-1} \mathbf{J}]$ sea una matriz invertible aunque el sistema sea observable.

Por este motivo, este planteamiento con restricciones requiere calcular la inversa de la matriz $\mathbf{U}$ para luego seleccionar la parte que establece una relación lineal entre $\Delta \hat{\mathbf{x}}_{(v+1)}$ y $\Delta \hat{\mathbf{z}}_{(v)}$, en este caso el cuadrante superior izquierdo $\mathbf{E}_1$:

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{\mathbf{x}}_{(v+1)} \\ -\lambda_{(v+1)} \end{bmatrix} = \mathbf{U}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{J}^T \mathbf{R}_z^{-1} \Delta \hat{\mathbf{z}}_{(v)} \\ -\mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{(v)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_1 & \mathbf{E}_2^T \\ \mathbf{E}_2 & \mathbf{E}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{J}^T \mathbf{R}_z^{-1} \Delta \hat{\mathbf{z}}_{(v)} \\ -\mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{(v)}) \end{bmatrix} \quad (29)$$

De esta forma, la ecuación alternativa a (5) con este planteamiento resulta ser:

$$\Delta \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{E}_1 \mathbf{J}^T \mathbf{R}_z^{-1} \Delta \hat{\mathbf{z}} = \mathbf{S}_{xz} \Delta \hat{\mathbf{z}}, \quad (30)$$

Donde $\mathbf{S}_{xz}$ representa la matriz de sensibilidad de las variables de estado $\mathbf{x}$ con respecto a las medidas $\mathbf{z}$. Así, la expresión que permite calcular la matriz de varianza-covarianza de las variables de estado $\mathbf{R}_x$ en este caso es:

$$\mathbf{R}_x = \mathbf{S}_{xz} \mathbf{R}_z \mathbf{S}_{xz}^T. \quad (31)$$

Una vez conocida la matriz de varianza-covarianza de las variables de estado, la incertidumbre del resto de variables se puede obtener por medio de la Ecuación (7).

Es importante destacar que si bien las expresiones anteriores proporcionan fórmulas exactas para el cálculo de la incertidumbre, su aplicación a grandes redes en las que conviven elementos de muy distinta magnitud, provoca que la matriz $\mathbf{U}$ a invertir esté en ocasiones mal condicionada. Esta dificultad se ha conseguido solventar dentro de este trabajo aplicando técnicas de descomposición por valores singulares (SVD, del inglés *Singular Value Decomposition*), que permiten detectar cuáles de las incertidumbres calculadas están exentas de ruido numérico y, por tanto, son fiables.

El porcentaje de validez del cálculo de incertidumbre en el caso de la red gestionada por Canal de Isabel II es elevado (ver Tabla 12), puesto que se mantiene siempre por encima del 75%, registrándose porcentajes de validez superiores al 95% en buena parte de las variables estudiadas.

7.2. INCERTIDUMBRE PARA DEMANDAS MÁXIMAS

El resumen de los resultados correspondientes a este escenario de demandas máximas se recoge en la Tabla 8. En ella, se muestran el número de elementos totales sometidos a análisis para las diferentes variables y las desviaciones típicas asociadas. Nótese que para los niveles piezométricos se evalúa la incertidumbre (σ_p) en metros, mientras que para los flujos y demandas en la red estratégica (σ_Q) se trabaja en porcentaje respecto al valor medio, es decir, en términos de coeficiente de variación. Con el fin de dar una idea de la importancia de la incertidumbre de los flujos en las conexiones (también σ_Q), la incertidumbre del caudal en las conexiones de los sectores con la red estratégica y entre los propios sectores se recoge en litros al segundo.

TABLA 8. INCERTIDUMBRE DE LA ESTIMACIÓN EN EL ESCENARIO DE DEMANDAS MÁXIMAS

<i>Variables</i>	<i>Nº elementos totales</i>			
Nivel piezométrico depósitos	272			

<i>Variables</i>	<i>Nº elementos totales</i>	$\sigma_p \leq 1 \text{ m}$	$1 \text{ m} < \sigma_p \leq 10 \text{ m}$	$\sigma_p > 10 \text{ m}$
Nivel piezométrico nodos	32.493	30.298	1.463	732

<i>Variables</i>	<i>Nº elementos totales</i>	$\sigma_Q \leq 2\%$	$2\% < \sigma_Q \leq 5\%$	$5\% < \sigma_Q \leq 10\%$	$\sigma_Q > 10\%$
Demanda nodos	720	368	251	29	72
Flujo conducciones	26.015	19.525	3.583	1.063	1.844
Estado válvulas de corte	7.871	5.877	1.080	334	580
Estado válvulas de regulación	300	250	20	12	18
Estado bombas	159	103	9	9	38
Demanda sectores	669	173	149	50	297

<i>Variables</i>	<i>Nº elementos totales</i>	$\sigma_Q \leq 1 \text{ l/s}$	$1 \text{ l/s} < \sigma_Q \leq 5 \text{ l/s}$	$5 \text{ l/s} < \sigma_Q \leq 10 \text{ l/s}$	$\sigma_Q > 10 \text{ l/s}$
Flujo sectores red estratégica	772	500	246	25	1
Flujo entre sectores	132	17	44	30	41

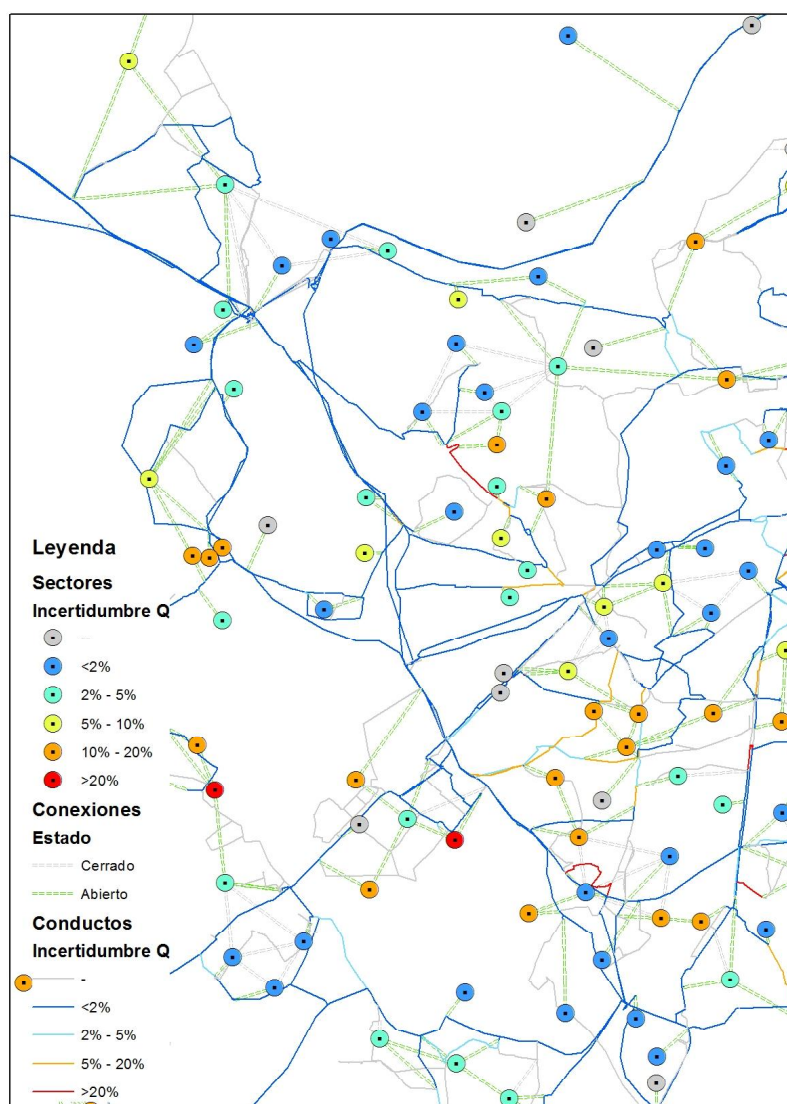
Como se aprecia en los resultados, las presiones son en un porcentaje elevado controlables con una precisión aceptable, si bien debe tenerse en cuenta que este resultado está supeditado a considerar correctas las ecuaciones que gobiernan el problema hidráulico, y especialmente, los parámetros que lo definen, los cuales no se ponen en cuestión en este trabajo. En términos de caudales en elementos de la red, una amplia mayoría se encuentra por debajo de una desviación estándar en el error de medida del 5% sobre el valor esperado, lo cual es razonable según las precisiones de las que disponen los caudalímetros existentes y las pseudomedidas asumidas para los consumos en los sectores.

Finalmente, en el caso de las conexiones, resultan de interés las conexiones entre sectores. En ellas la precisión de la estimación es muy dispar, lo cual limita la capacidad de identificar a partir de qué caudal se podrían detectar aperturas en las válvulas divisorias que separan los sectores. Esta incertidumbre podría permitir detectar la apertura de un sector siempre que se produzca un caudal en esa apertura, al menos, 2 veces superior a la desviación estándar de la estimación (con un nivel de significancia del 5%, o posibilidad de un falso positivo).

Así, considerar que el sistema de medidas actual podría detectar la apertura de un sector depende en gran medida de los caudales que físicamente se puedan derivar por cada conexión.

Además del resumen de los resultados recogidos en la Tabla 8, la implementación de la metodología para la cuantificación de la incertidumbre permite caracterizar la precisión con la que se observarían todas las variables observables de la red estratégica en este escenario. Como prueba de ello, la Figura 3 muestra un ejemplo de los resultados obtenidos en términos de incertidumbre en la red estratégica sectorizada para este escenario de demanda máxima. En ellos se puede ver cómo la incertidumbre de las demandas en los sectores es considerablemente superior a la propia del resto de la red, ya que los flujos a través de las conexiones viene determinada, en última instancia, por las estimaciones de consumo dadas por CHYPRE.

FIGURA 3. RESULTADOS DE EVALUACIÓN DE INCERTIDUMBRE EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN SECTORIZADA



Ejemplo de resultados de la evaluación de incertidumbre en la red de distribución sectorizada, sobre una escala de colores, donde los símbolos circulares representan sectores, y los elementos discontinuos entradas a los sectores de la red estratégica desde conducciones, que se representa como elementos continuos

7.3. INCERTIDUMBRE PARA DEMANDAS MEDIAS

Los resultados correspondientes a este escenario de demanda media se resumen en la Tabla 9, donde se puede apreciar un comportamiento muy similar al caso anterior, aumentando los errores relativos asociados al tratarse de caudales de circulación más bajos como resultado de la reducción de las demandas.

TABLA 9. INCERTIDUMBRE DE LA ESTIMACIÓN EN EL ESCENARIO DE DEMANDAS MEDIAS

<i>Variables</i>	<i>Nº elementos totales</i>
Nivel piezométrico depósitos	270

<i>Variables</i>	<i>Nº elementos totales</i>	<i>$\sigma p \leq 1\text{ m}$</i>	<i>$1\text{ m} < \sigma p \leq 10\text{ m}$</i>	<i>$\sigma p > 10\text{ m}$</i>
Nivel piezométrico nodos	31.354	27.953	2.150	1.251

<i>Variables</i>	<i>Nº elementos totales</i>	<i>$\sigma Q \leq 2\%$</i>	<i>$2\% < \sigma Q \leq 5\%$</i>	<i>$5\% < \sigma Q \leq 10\%$</i>	<i>$\sigma Q > 10\%$</i>
Demanda nodos	724	255	302	64	103
Flujo conducciones	25.668	16.659	4.473	1.925	2.611
Estado válvulas de corte	7.779	4.954	1.357	619	849
Estado válvulas de regulación	281	224	25	11	21
Estado bombas	159	68	24	14	53
Demanda sectores	653	157	105	60	331

<i>Variables</i>	<i>Nº elementos totales</i>	<i>$\sigma Q \leq 1\text{ l/s}$</i>	<i>$1\text{ l/s} < \sigma Q \leq 5\text{ l/s}$</i>	<i>$5\text{ l/s} < \sigma Q \leq 10\text{ l/s}$</i>	<i>$\sigma Q > 10\text{ l/s}$</i>
Flujo sectores red estratégica	769	600	163	6	0
Flujo entre sectores	132	44	41	22	25

7.4. INCERTIDUMBRE PARA DEMANDAS MÍNIMAS

Los resultados correspondientes a este escenario de demandas mínimas se resumen en la Tabla 10. En general, se mantiene la misma tendencia que en el caso anterior, aumentando las incertidumbres relativas, aunque disminuyendo las absolutas. Siguen manteniéndose niveles de precisión altos (desviaciones <5%) para alrededor del 70% de los elementos de la red. No ocurre lo mismo con los sectores, que son medidos con una precisión peor del 10%, en torno al 50% de los elementos. Esto indica que la medida, aunque existe, no aporta precisión suficiente, como ocurre en el caso de los sectores de transporte.

TABLA 10. INCERTIDUMBRE DE LA ESTIMACIÓN EN EL ESCENARIO DE DEMANDAS MÍNIMAS

<i>Variables</i>	<i>Nº elementos totales</i>
Nivel piezométrico depósitos	269

<i>Variables</i>	<i>Nº elementos totales</i>	$\sigma_p \leq 1\text{ m}$	$1\text{ m} < \sigma_p \leq 10\text{ m}$	$\sigma_p > 10\text{ m}$
Nivel piezométrico nodos	33.230	24.083	3.697	5.450

<i>Variables</i>	<i>Nº elementos totales</i>	$\sigma_Q \leq 2\%$	$2\% < \sigma_Q \leq 5\%$	$5\% < \sigma_Q \leq 10\%$	$\sigma_Q > 10\%$
Demanda nodos	724	253	229	72	170
Flujo conducciones	25.672	12.956	5.396	2.332	4.988
Estado válvulas de corte	7.785	3.828	1.620	762	1.575
Estado válvulas de regulación	281	224	25	11	21
Estado bombas	274	180	41	17	36
Demanda sectores	648	162	93	51	342

<i>Variables</i>	<i>Nº elementos totales</i>	$\sigma_Q \leq 1\text{ l/s}$	$1\text{ l/s} < \sigma_Q \leq 5\text{ l/s}$	$5\text{ l/s} < \sigma_Q \leq 10\text{ l/s}$	$\sigma_Q > 10\text{ l/s}$
Flujo sectores red estratégica	764	685	76	3	0
Flujo entre sectores	129	75	43	9	2

8. Ubicación estratégica de equipos de medida adicionales



En este capítulo se afronta la identificación de las ubicaciones más convenientes para la instalación de equipos de medida adicionales con vistas a mejorar el resultado de una posterior estimación de estado. Como se comentaba en el epígrafe “Ubicación estratégica de equipos de medida adicionales”, en este trabajo se ha optado por detectar las posiciones más interesantes con vistas a reducir la incertidumbre de la estimación de estado, ya que si bien la red tiene un buen nivel de instrumentación, que puede posibilitar la observación de bastantes condiciones topológicas en ella, la incertidumbre obtenida para los niveles de demanda considerados es mejorable.

Así pues, en este capítulo se presenta la metodología adoptada para proponer las ubicaciones más recomendables dado un cierto nivel de inversión y las posiciones obtenidas para el caso concreto de la red estratégica gestionada por Canal de Isabel II, así como un análisis de estos resultados.

8.1. ADAPTACIÓN DE LA METODOLOGÍA A LA RED ESTRATÉGICA

La metodología para la selección de las ubicaciones más convenientes para la instalación de equipos de medida adicionales se ha adaptado a la red gestionada por Canal de Isabel II, dividiéndose en dos grandes bloques:

1. Preselección de las ubicaciones de posibles dispositivos adicionales

Se ha realizado a partir de los resultados obtenidos en el análisis de la incertidumbre para el escenario medio (epígrafe “Incertidumbre para demandas medias”). Concretamente, se han considerado como posibles ubicaciones las tuberías (tubos distintos de bombas, válvulas y conexiones entre sectores) asociadas a los mayores coeficientes de variación de entre las que presentan mayores velocidades, asociadas a los flujos más importantes. Además, estos tubos deben disponer de una longitud mínima para garantizar la correcta medida del equipo.

Una vez seleccionados los flujos en tuberías susceptibles de medirse, de acuerdo a los criterios anteriores, se extienden las posibles ubicaciones de los equipos a otros nodos y tubos de la red con un criterio de vecindad y distancia. Así se podrán instalar dispositivos adicionales en tubos y nodos vecinos a los seleccionados que no estén excesivamente alejados. Esta estrategia permite que no necesariamente se seleccione la adición de dispositivos en aquellas ubicaciones inicialmente preseleccionadas, sino que se puedan disponer en las proximidades, de forma que la metodología aproveche al máximo las relaciones entre las variables.

Nótese que se parte de la base de que todas las salidas a sectores (demandas de la red estratégica) disponen de caudalímetro, ya que, aunque no todos se encontraban instalados en el momento de realización de este estudio, estos trabajos ya están programados y se están llevando a cabo por parte de Canal de Isabel II con la finalidad de culminar la sectorización de la red.

2. Identificación de las mejores ubicaciones

Una vez realizada la preselección de medidas candidatas, se prescinde del cálculo de la inversa de la matriz $\mathbf{U}$ (según ecuación (29)), planteándose en su lugar una reducción de la incertidumbre de forma implícita o indirecta aprovechando el hecho de que la suma de la diagonal de la matriz de varianzas-covarianzas de las variables de estado es igual a la suma de los autovalores de la matriz $\mathbf{U}$ y por tanto, es una medida de la incertidumbre global del sistema. Por lo tanto, en lugar de minimizar los autovalores de $\mathbf{U}^{-1}$ a través de su suma, se plantea maximizar la suma de la inversa de los autovalores a través de la traza de $\mathbf{J}^T \mathbf{R}_z^{-1} \mathbf{J}$.

Esta estrategia permite reducir la incertidumbre global del sistema de forma indirecta y plantear el problema resultante como lineal-entero-mixto, agilizando la resolución.

8.2. MEJORA DE LA INCERTIDUMBRE DE LA OBSERVABILIDAD PARA DIFERENTES ESCENARIOS DE INVERSIÓN

Como se ha argumentado previamente, la consideración de las pseudomedidas en consumos de sectores y niveles de depósitos produce que el conjunto de la red se encuentre dentro de una región observable. Ello proporciona un nivel de observabilidad inicial, cuantificado en términos de la incertidumbre vinculada a cada una de las variables del problema. La inclusión de equipos de medida, hasta el número de los dispuestos actualmente, supone un incremento de la redundancia, y una mejora de la precisión de la estimación de estado que puede producirse. Asintóticamente, al añadir mayor número de equipos puede reducirse progresivamente la incertidumbre, hasta el límite ideal de alcanzar una incertidumbre nula.

En este apartado se recogen los resultados de la aplicación de la estrategia anteriormente descrita para la ubicación de equipos de medida adicionales y se evalúa cómo diferentes inversiones influyen en la mejora de la precisión de la observación. Para ello, se consideran cuatro escalones de inversión independientes como variantes a la situación actual. Así, en este apartado se obtendrán las ubicaciones más recomendables para la instalación de dispositivos adicionales con cada nivel de inversión, teniendo en cuenta para ello los costes directos asociados (precio medio de los equipos a disponer) y los trabajos de instalación requeridos (obra civil, instalación y comunicaciones).

Para analizar el efecto de la colocación de dispositivos en las ubicaciones propuestas, se han utilizado una serie de parámetros agregados tanto para la situación actual (incertidumbre para el escenario de caudal medio), como para las configuraciones de medidas actualizadas para cada escalón de inversión. Concretamente, los resultados obtenidos para cada nivel de inversión se comparan mediante los siguientes parámetros representativos de la red estratégica, la mayor parte de los cuales se representan en términos de coeficiente de variación, que es el ratio de la desviación típica de la variable con respecto al valor medio:

- 💧 Valores medios de los coeficientes de variación asociados a las demandas.
- 💧 Valores medios de la incertidumbre (desviación típica) asociada a las alturas piezométricas de los nodos.
- 💧 Valores medios de los coeficientes de variación asociados a los flujos en tuberías.
- 💧 Valores medios de los coeficientes de variación asociados a los flujos en bombas.
- 💧 Valores medios de los coeficientes de variación asociados a los flujos en válvulas.
- 💧 Valores medios de los coeficientes de variación asociados a las demandas en los sectores.
- 💧 Valores medios de la incertidumbre (desviación típica) asociada a los flujos en conexiones entre sectores y de los sectores con la red estratégica.

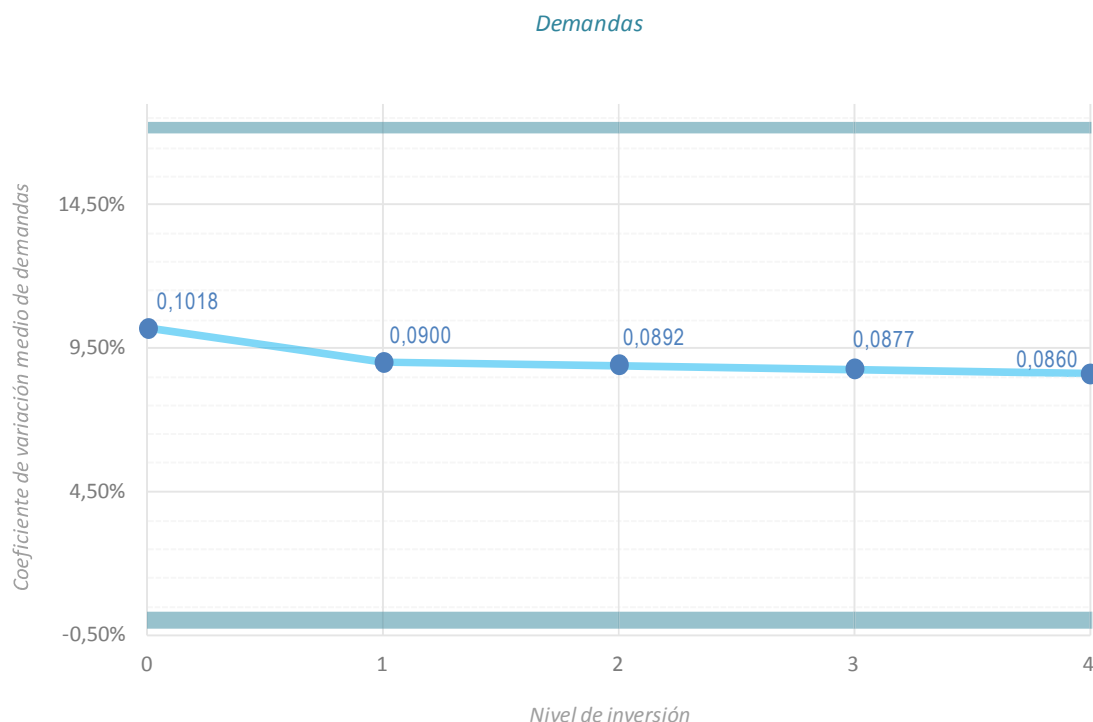
Los valores de estos parámetros se muestran en la Tabla 11, para cada uno de los escenarios considerados. Nótese que en esta tabla aparece además el valor que adquiriría el coeficiente de variación y/o la incertidumbre de las medidas en el denominado caso base, que se corresponde con la situación teórica en la que sólo se dispondría de pseudomedidas, las cuales se encuentran asociadas a una incertidumbre de 20% de coeficiente de variación en las demandas (tanto en la red estratégica como en los sectores a los que abastece) y una desviación en los niveles piezométricos de los depósitos de 1 m. Este caso base o de referencia permite establecer el escenario pésimo de incertidumbre, extremo opuesto al caso ideal, en el que los coeficientes de variación y/o incertidumbres de todas las variables resultarían iguales a cero como resultado de la existencia de medidas libres de error.

TABLA 11. RESULTADOS AGREGADOS DE INCERTIDUMBRE CON DISTINTOS NIVELES DE INVERSIÓN

<i>Resultados agregados</i>	<i>Nivel de inversión</i>					
	<i>Base (pseudomedidas)</i>	<i>Actual</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Coeficiente Variación demanda (%)	17,23	10,18	9,00	8,92	8,77	8,60
Incertidumbre altura piezométrica (m)	6,30	1,30	1,14	1,13	1,13	1,08
Coeficiente Variación flujo tuberías (%)	11,93	4,17	3,73	3,56	3,52	3,49
Coeficiente Variación flujo bombas (%)	10,31	3,32	3,04	3,04	3,04	2,92
Coeficiente Variación flujo válvulas (%)	18,79	1,92	1,72	1,67	1,64	1,66
Coeficiente Variación demanda sectores (%)	10,89	8,18	6,04	6,34	6,31	6,34
Incertidumbre flujo entre sectores (l/s)	3,21	2,28	1,02	1,16	1,16	1,16

Por su parte, la evolución de las incertidumbres agregadas de demandas, flujos en tuberías de la red estratégica y alturas piezométricas se muestran en las Figuras 4, 5 y 6, respectivamente, donde también se han representado los correspondientes límites superior (definido por el escenario base en el cual se considera la existencia única de pseudomedidas), e inferior (correspondiente al escenario ideal de incertidumbre nula). De estos resultados se debe resaltar que ya la incertidumbre, con la configuración actual de medidas, se encuentra muy por debajo del límite superior considerado. Por su parte, y a grandes rasgos, el efecto de la inversión es positivo, desde el punto de vista de la reducción de la incertidumbre.

Particularizando para el caso de las demandas, según se observa en la Figura 4 se produce en términos de coeficiente de variación un descenso pronunciado en el primer escalón de inversión, que se va reduciendo con las inversiones adicionales, es decir, que se va produciendo una saturación del sistema. Nótese que ese primer escalón incluye la colocación de los últimos caudalímetros de demanda en las salidas a sectores, por lo que la reducción en inversiones posteriores se produce sobre medidas indirectas y redundancia de equipos.

FIGURA 4. EVOLUCIÓN DE LA INCERTIDUMBRE AGREGADA EN DEMANDAS CON DISTINTOS NIVELES DE INVERSIÓN

Lo mismo ocurre con los flujos en tuberías, según se refleja en la Figura 5, ya que se produce de nuevo un descenso pronunciado en términos de coeficiente de variación en el primer escalón de inversión, que se va reduciendo con las inversiones adicionales.

Por su parte, en la incertidumbre de las alturas piezométricas también se detecta un primer efecto escalón, produciéndose luego una reducción muy leve de la incertidumbre con las inversiones adicionales, como se refleja en la Figura 6.

Para el resto de parámetros, correspondientes a elementos menos numerosos, se aprecia también una disminución de la incertidumbre promedio a medida que aumenta el nivel de inversión. No obstante, hay situaciones en las que la incertidumbre para inversiones mayores es menor que la obtenida con menores inversiones. Por ejemplo, el coeficiente de variación del flujo en las válvulas pasa del 1,64% en el tercer nivel de inversión, al 1,66% en el cuarto. Este comportamiento se explica porque el promedio se hace con un número diferente de elementos, ya que el porcentaje de elementos en el que el cálculo de la incertidumbre es válido y no se ve afectado por errores numéricos (ver epígrafe titulado “Adaptación de la metodología a la red estratégica”) es cambiante para los distintos niveles de inversión considerados, tal y como muestra la Tabla 12.

FIGURA 5. EVOLUCIÓN DE LA INCERTIDUMBRE AGREGADA EN FLUJOS EN TUBERÍAS CON DISTINTOS NIVELES DE INVERSIÓN

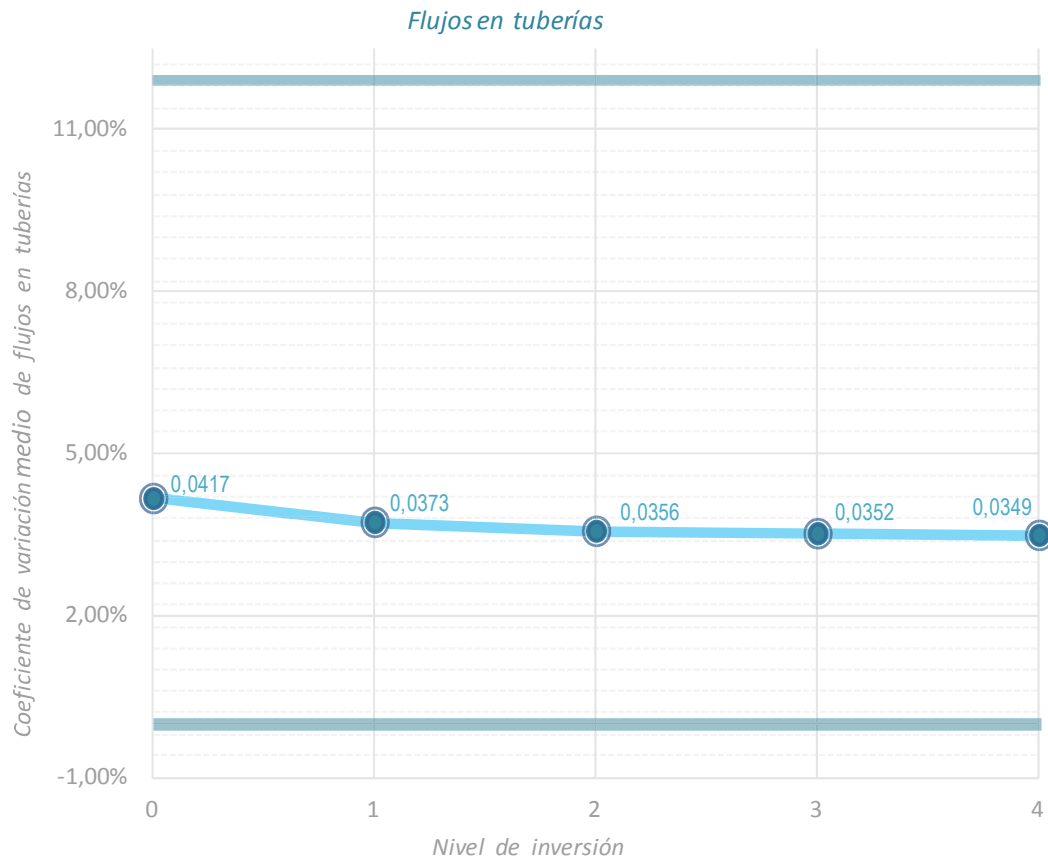


FIGURA 6. EVOLUCIÓN DE LA INCERTIDUMBRE AGREGADA EN FLUJOS EN ALTURAS PIEZOMÉTRICAS CON DISTINTOS NIVELES DE INVERSIÓN

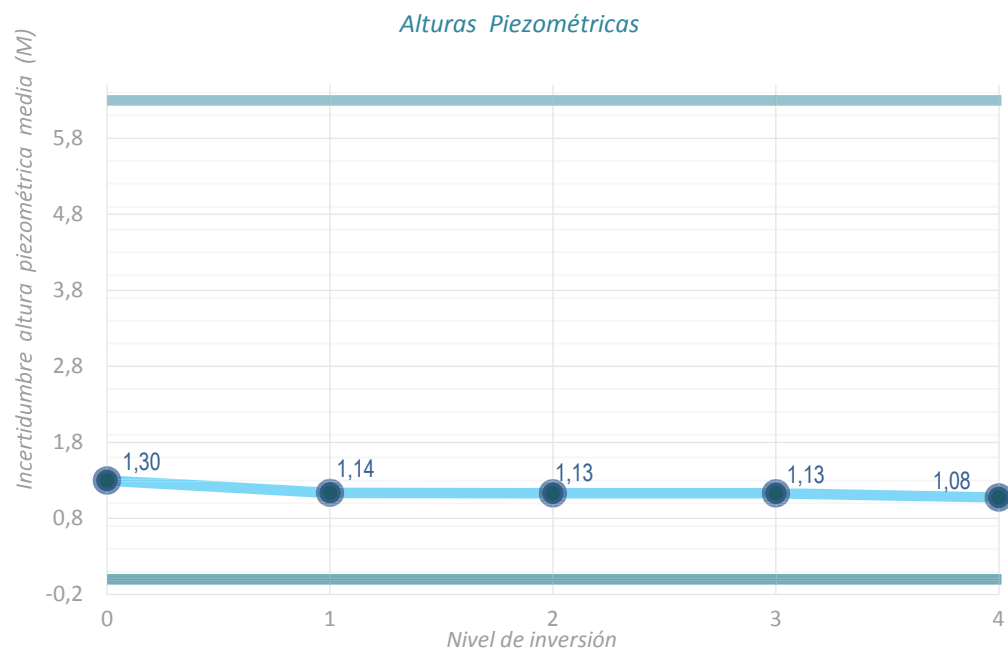


TABLA 12. PORCENTAJES DE VALIDEZ DEL CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE POR ERRORES NUMÉRICOS

<i>Resultados agregados</i>	<i>Nivel de inversión</i>				
	<i>Actual</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Coeficiente Variación demanda	98,82%	96,12%	97,05%	97,23%	96,91%
Incertidumbre altura piezométrica	99,21%	98,75%	98,93%	99,00%	98,84%
Coeficiente Variación flujo tuberías	99,36%	98,90%	99,08%	99,17%	99,02%
Coeficiente Variación flujo bombas	96,91%	95,88%	95,88%	95,88%	94,85%
Coeficiente Variación flujo válvulas	99,25%	99,25%	99,25%	98,50%	99,25%
Coeficiente Variación demanda sectores	96,33%	77,03%	78,79%	82,14%	81,98%
Incertidumbre flujo entre sectores	96,37%	78,66%	84,80%	84,99%	84,32%

Los resultados mostrados hasta el momento se corresponden con los valores absolutos obtenidos en términos de incertidumbre y/o coeficientes de variación de los parámetros agregados presentados al principio de este apartado. Sin embargo, son los resultados relativos, referidos a la precisión mínima y máxima que se podrían alcanzar en la red, los que aportan más información sobre lo que significa o aporta la inversión. En este sentido, la Tabla 13 recoge los ratios de los resultados agregados de incertidumbre, con distintos niveles de inversión respecto a la escala de referencia. Para ello, se han escalado los resultados de la Tabla 11 considerando que la máxima incertidumbre posible es la correspondiente al escenario base (en el que sólo existen pseudomedidas), al cual se asigna valor 0 por ser el caso pésimo, y que la situación ideal es la correspondiente a incertidumbres nulas, escenario teórico al que se asigna una puntuación de 10.

TABLA 13. RATIO DE LOS RESULTADOS AGREGADOS DE INCERTIDUMBRE CON DISTINTOS NIVELES DE INVERSIÓN RESPECTO A LA ESCALA DE REFERENCIA

<i>Resultados agregados (0 – 10)</i>	<i>Nivel de inversión</i>				
	<i>Actual</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Coeficiente Variación demanda	4,09	4,78	4,83	4,91	5,01
Incertidumbre altura piezométrica	7,93	8,19	8,20	8,20	8,29
Coeficiente Variación flujo tuberías	6,50	6,87	7,01	7,05	7,08
Coeficiente Variación flujo bombas	6,78	7,05	7,05	7,05	7,17
Coeficiente Variación flujo válvulas	8,98	9,09	9,11	9,13	9,12
Coeficiente Variación demanda sectores	2,48	4,45	4,18	4,20	4,18
Incertidumbre flujo entre sectores	2,90	6,83	6,38	6,38	6,39

0->Nivel de incertidumbre pésima asociada al caso base

10->Nivel de incertidumbre ideal (nula)

Estos resultados reflejan que la incertidumbre de ciertas variables es ya relativamente buena con la configuración actual de medidas, como es el caso de las alturas piezométricas en los nodos de la red estratégica y del flujo a través de las válvulas existentes en el sistema, que no mejoran de forma significativa al incrementarse la inversión. Por el contrario, la incertidumbre de flujo entre sectores comienza siendo pésima, pero la adición progresiva de equipos supone una mejora importante. En este respecto, la Tabla 14 recoge el número de equipos adicionales instalados con respecto a la configuración actual para los distintos niveles de inversión considerados. En ella se puede ver que el número de caudalímetros y medidores de presión aumenta progresivamente.

TABLA 14. NÚMERO Y TIPO DE EQUIPOS PROPUESTOS PARA CADA NIVEL DE INVERSIÓN

<i>Tipo de equipos</i>	<i>Nivel de inversión</i>				
	<i>Actual</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Caudalímetros	-	26	58	84	92
Medidores de Presión	-	17	25	42	72

Estos resultados pueden parecer a priori contradictorios, puesto que, como antes se comentaba, los niveles piezométricos están asociados ya en la situación de partida a incertidumbres relativamente bajas. No obstante, el hecho de que la estrategia para la proposición de mejoras de monitorización devuelva un número de sensores de presión mayor con cada inversión queda justificado por el bajo coste asociado a estos aparatos, y por el hecho de considerar que siempre que se instale un caudalímetro en una nueva ubicación, lo cual implica un coste adicional en obra civil para su instalación física, también se coloca un sensor de presión. Esta estrategia supone un coste sensiblemente menor al precio del caudalímetro electromagnético al uso y a la obra civil, consiguiéndose una mejora de la incertidumbre del sistema invirtiendo la menor cantidad de dinero posible.

Por último, debe destacarse que todos los caudalímetros colocados con el nivel de inversión 1 se colocan también con el nivel de inversión 2, incluyéndose además en este segundo nivel, 11 de los 17 sensores de presión instalados con el nivel de inversión 1. Esta tendencia se aprecia en todos los niveles, ya que, por ejemplo, 83 de los 84 caudalímetros seleccionados con el nivel 3 se colocan también en el nivel de inversión 4, y 31 de los 42 sensores de presión instalados en el nivel anterior se colocan también con la inversión máxima. Estos resultados reflejan que la función objetivo utilizada para plantear el problema de optimización que permite detectar las ubicaciones más convenientes para la colocación de aparatos de medida dado un cierto nivel de inversión, no sólo reduce la incertidumbre del sistema sino que tiende hacia la misma solución del problema, ya que las ubicaciones propuestas para cada paquete de inversión contienen la mayor parte de las ubicaciones obtenidas con paquetes de inversión más reducidos. Esto permitiría la utilización de la metodología de forma secuencial, de forma que no distaría en exceso del óptimo global que se podría alcanzar si la estrategia de inversión no fuera escalonada.

9. Conclusiones



En este capítulo se recogen las principales conclusiones extraídas en esta investigación en términos de identificación de regiones observables, cuantificación de la incertidumbre de la observación y ubicación de equipos de medida adicionales. Además, se cierra este apartado con una evaluación de la viabilidad para la implementación de técnicas de estimación de estado a grandes redes de abastecimiento, como es el caso de la gestionada por Canal de Isabel II.

9.1. IDENTIFICACIÓN DE REGIONES OBSERVABLES

La identificación de regiones observables es la primera fase del análisis de observabilidad que se presenta en este trabajo y permite identificar las zonas en las que se pueden obtener resultados fiables en un posterior proceso de estimación de estado, ya que al menos las relaciones algebraicas son suficientes para obtener un resultado. La selección de un método adecuado para implementar la identificación de regiones observables en la red estratégica se ha llevado a cabo mediante un análisis multicriterio en el que se han evaluado diferentes aspectos (información resultante, coste computacional, agilidad para su combinación con técnicas de estimación de estado, etc.) para diferentes métodos existentes en la literatura, adaptados a sistemas de distribución de agua. Así, tras evaluar los métodos del *null space*, de optimización, algebraico, binario y estocástico, el **método algebraico** ha resultado ser el más competitivo, ya que esta estrategia permite evaluar la observabilidad de todas las variables hidráulicas de la red, y por consiguiente la identificación de regiones observables, así como aquel que presenta capacidad de actualización en caso de alguna modificación puntual.

Gracias al sistema CHYPRE que dispone Canal de Isabel II para la estimación de consumos en sectores y al conocimiento de las condiciones normales de operación en la red, el sistema con estas pseudomedidas de consumos, y las relativas a niveles en depósitos, resulta en su totalidad dentro de una región observable. No obstante, el interés de la identificación de elementos observables reside especialmente en analizar si se podrían detectar modificaciones con respecto a este estado de referencia. En este respecto, se realizan análisis individuales para identificar las bombas y válvulas que se mantendrían dentro de una región observable si se pone en duda la curva característica con la que funciona el elemento, los caudales de derivación que se podrían ocasionar si se produjese la apertura de cada una de las válvulas inicialmente cerradas, y la capacidad para la detección de roturas. Los resultados obtenidos reflejan que entre un 53 y un 81% del estado o punto de funcionamiento de las bombas y válvulas se mantendrían dentro de una región observable en caso de producirse una variación puntual de la red, un 42% de los caudales derivados podrían mantenerse dentro de una región observable y sólo se podrían establecer relaciones algebraicas para detectar y cuantificar roturas en un 9% de los nodos de tránsito que constituyen la red estratégica.

Esto prueba que la red es relativamente resiliente en términos de observabilidad, es decir, que presenta capacidad para adaptarse a los cambios que se puedan producir sin una excesiva pérdida de información, al menos en términos de detección de cambios en la topología de la red, ya que la detección de roturas en el sistema requiere de un estudio específico. Esto justifica que la propuesta de ubicaciones de equipos para la mejora de la monitorización se realice en términos de reducción de incertidumbre, ya que el comportamiento del sistema en términos de permitir la identificación de cambios topológicos es bueno. Es cierto que el análisis realizado únicamente contempla que se produzcan variaciones individuales con respecto al estado de referencia, pero no es esperable que se produzcan grandes cambios de un instante a otro, si no que los cambios de operación en la red serían más progresivos. En este sentido, debe tenerse presente que el objetivo último de la estimación de estado es la monitorización en tiempo real del sistema, por lo que sólo debe tener en cuenta los cambios entre pasos temporales sucesivos.

9.2. CUANTIFICACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE LA OBSERVACIÓN

La cuantificación de la incertidumbre de la observación constituye una parte fundamental del estudio de observabilidad que se realiza en esta investigación, ya que permite identificar las zonas más o menos creíbles del sistema de distribución con vistas a la implementación de un posterior proceso de estimación de estado. Su implementación en grandes redes requiere cuantificar la incertidumbre propia de un problema de estimación de estado con restricciones, sobre el que se han adaptado métodos numéricos sofisticados para reducir las diferencias existentes en orden de magnitud y minimizar así los errores numéricos asociados.

Esta metodología ha permitido afrontar el cálculo de las incertidumbres correspondientes a escenarios de demanda máxima, media y mínima para el caso concreto de la red estratégica gestionada por Canal de Isabel II en condiciones normales de operación. El análisis realizado ha permitido detectar que las incertidumbres de la observación en términos de presión, caudal y consumos son razonables, si bien es cierto que éstas se ven algo mermadas en la zona de la red correspondiente a la distribución del flujo entre sectores, y tanto más cuanto menores son las demandas del sistema. Este hecho podría limitar la capacidad de detectar anomalías en un posterior proceso de estimación de estado, constituyéndose la cuantificación de la incertidumbre como una herramienta que permite conocer la certeza de la estimación.

No obstante, cabe destacar que al comparar la incertidumbre de las variables asociada a la configuración actual de medidas con el escenario pésimo correspondiente a la existencia única de pseudomedidas (de demanda y nivel en depósitos), que se corresponde con una puntuación 0, y el escenario ideal en el que las variables del sistema presentan incertidumbre nula, que se corresponde con una puntuación 10, se obtiene un ratio adimensional que oscila entre 2,48 (demanda en sectores) y 8,98 (flujo a través de válvulas). En este sentido, debe resaltarse que todas las variables de la red estratégica presentan una puntuación por encima de 5, mientras que las puntuaciones son algo peores en los sectores y conexiones entre sectores. Estos resultados muestran que en la actualidad ya existe un nivel de precisión aceptable, pero aun así se proponen ubicaciones estratégicas para la adición de equipos de medida.

9.3. UBICACIÓN ESTRATÉGICA DE EQUIPOS DE MEDIDA ADICIONALES

La ubicación de equipos de medida adicionales se ha realizado en este trabajo con el objeto de reducir la incertidumbre de la observación, ya que la observabilidad (o inclusión dentro de una región observable) ha probado ser alcanzable para el conjunto de la red y relativamente resiliente conforme a los resultados anteriores. La adaptación de esta metodología a una red del tamaño de la gestionada por Canal de Isabel II requiere llevar a cabo un proceso de optimización que considera una serie de ubicaciones preseleccionadas, entre las cuales se selecciona la configuración de dispositivos más recomendable.

Se ha propuesto la instalación de equipos de medida adicionales considerando cuatro paquetes de inversión independientes sucesivos. Esto da como resultado una progresiva mejora de la incertidumbre del sistema, alcanzándose puntuaciones promedio entre 0 y 10 (0 para el peor escenario asociado al caso base y 10 para el escenario ideal de incertidumbre nula) de 6,75 para el nivel de inversión 1 y de 7,04 para el nivel de inversión 4.

Estos resultados muestran una clara mejora respecto al estado actual de la red, si bien es cierto que los valores más bajos siguen registrándose en los sectores y las conexiones entre sectores. Además, reflejan que se tiende a producir una saturación del sistema, y es que a partir del segundo nivel de inversión no se aprecian mejoras significativas a nivel agregado con el aumento de la inversión.

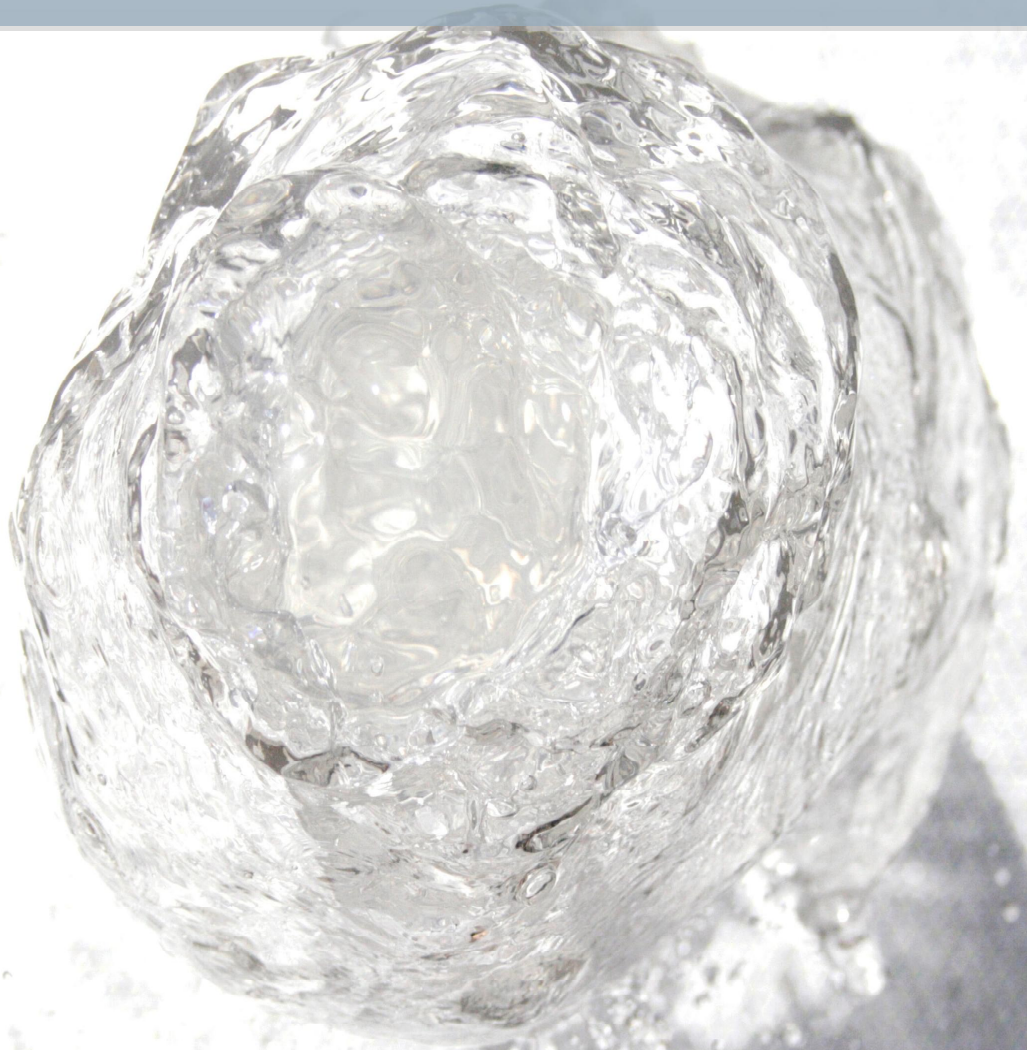
9.4. VIABILIDAD DE LA ESTIMACIÓN DE ESTADO

Una vez caracterizado el nivel de observabilidad propio de la red gestionada por Canal de Isabel II, es posible evaluar la viabilidad de la implementación de técnicas de estimación de estado al sistema. En este sentido, el buen nivel de observabilidad obtenido para las condiciones normales de operación garantiza que se podrá monitorizar el comportamiento de buena parte de la red en tiempo real, incluso ante un número de cambios en la topología de la red (maniobras no notificadas), si bien es cierto que la pérdida puntual de información del sistema (equipos de medida) puede reducir el número de tipos de maniobras no identificables, y disminuir la precisión de la estimación que determina la significancia estadística de la estimación. El nivel de precisión que alcanzaría la estimación del estado del sistema se mantiene en una gran parte de la red claramente superior a la que aporta la situación base que considera únicamente las pseudomedidas, lo que demuestra que la dependencia de las mismas en la estimación del estado se limita únicamente a determinadas zonas de sectores en construcción, aun no cerrados, y sobre todo a conexiones entre sectores donde no se dispone de caudalímetros. Así, el análisis de observabilidad realizado es una herramienta fundamental que se debe incorporar en el proceso de estimación de estado para su evaluación continuada, ya que permite identificar en qué zonas se están obteniendo resultados y hasta qué punto son fiables.

El estudio de observabilidad realizado sobre la red de Canal de Isabel II pone de manifiesto el alto potencial que ofrecen los sistemas de telemedida implantados en redes sectorizadas para conocer el estado del sistema en grandes redes de transporte, permitiendo extender la capacidad de observación e identificación de condiciones particulares de la red más allá de las variables directamente medidas. Se muestra por tanto que la estimación de estado hidráulico, como herramienta dinámica posterior, tiene una gran capacidad potencial para controlar el estado en el que se encuentra la red, detectando con anticipación incidencias significativas que han ocurrido y que no han sido notificadas, lo que permitirá ofrecer un servicio de alto valor para la toma de decisiones en la explotación.

Por otro lado, las metodologías desarrolladas e implementadas durante este proyecto, que han hecho posible el análisis de la incertidumbre en las posibles observaciones de un estimador de estado para una red del tamaño de la red gestionada por Canal de Isabel II, demuestran la viabilidad técnica de implementación de un estimador de estado.

ANEXOS



ANEXO 1. GLOSARIO DE TÉRMINOS

En este apartado se definen y explican algunos términos que se han empleado a lo largo del documento. En particular, se detalla el modo en que deben ser interpretados en el contexto de este trabajo.

Red estratégica

Se entiende como tal la red que aglutina las arterias principales de la red gestionada por Canal de Isabel II, la cual permite el transporte de agua a los sectores que conforman la red de abastecimiento de agua potable de la Comunidad de Madrid.

Estimación de estado

Procedimiento o técnica que permite inferir las condiciones de flujo de una red de distribución de agua mediante el ajuste por mínimos cuadrados del error entre las variables de estado del sistema y las medidas existentes. A lo largo del presente trabajo se habla, en todo momento, de estimación de estado pseudoestática, independiente del tiempo.

SCADA

Del inglés, *Supervisory Control and Data Acquisition*. Se trata de una plataforma que permite la recopilación de datos en tiempo real de los equipos de medida existentes en un sistema, en este caso, en una red de abastecimiento.

Observabilidad

Propiedad de las variables involucradas en un problema hidráulico. Se dice que una variable es observable cuando existen suficientes medidas disponibles como para establecer relaciones algebraicas que permitan inferir el valor de la variable. Se dice que una red es observable cuando todas sus variables lo son.

Región observable

Zona de una red de abastecimiento de agua potable donde las variables son observables. Permite identificar subzonas donde la estimación de estado proporcionaría resultados fiables sin que se llegue a alcanzar la observabilidad total de la red.

Incertidumbre de la observación

Es la desviación típica propia de la observación de las variables de la red, las cuales se pueden referir a flujos, consumos y niveles piezométricos. Puede estimarse sobre la base de las características de la red de flujo y las medidas disponibles, como una segunda fase del denominado análisis de observabilidad.

FOSM

Del inglés, *First Order Second Moment*. Es una técnica que permite propagar la incertidumbre de unas variables a otras utilizando para ello un desarrollo en serie de Taylor de primer orden.

SVD

Del inglés, *Singular Value Decomposition*. Es una técnica que permite factorizar matrices, facilitando su tratamiento.

DMA

Del inglés, *District Metered Area*. Se refiere a cada uno de los sectores definidos en una red de distribución de agua, que son aquellas zonas cuyas entradas y salidas son limitadas y se encuentran típicamente medidas.

TIC

Del inglés, *Information Communication Technology*. Se refiere al conjunto de tecnologías de la información que se implementan hoy día para mejorar la monitorización de diferentes procesos.

SIG

Del inglés, *Geographic Information System*. Se refiere al conjunto de herramientas que comprenden diferentes componentes para mejorar el almacenamiento, manipulación y análisis de grandes cantidades de información.

CHYPRE

Aplicación que permite estimar el consumo en los sectores y la incertidumbre asociada en la red gestionada por Canal de Isabel II. Se recomienda consultar Carrasco y García (2011) para más detalle.

SOI

Del inglés, *Stochastic Observability Index*. Índice que permite evaluar la observabilidad general de un sistema de distribución de agua en términos de niveles piezométricos o caudales.

SOWI

Del inglés, *Stochastic Observability Weighted Index*. Índice que permite evaluar la observabilidad general de un sistema de distribución de agua ponderando las incertidumbres propias de los flujos que circulan por cada tubo por el propio valor del flujo.

ANEXO 2. REFERENCIAS**Carrasco, A. y García, L. 2011**

Desarrollo de un Sistema de validación, estimación y predicción de consumos horarios por sectores para la red de distribución de Canal de Isabel II. Cuaderno de I+D+i nº13. Canal de Isabel II.

Castillo, E., Conejo, A.J., Pruneda, R.E. and Solares, C. 2005

State estimation observability based on the *null space* of the measurement Jacobian matrix. *IEEE Transactions Power Systems*, 20(3), 1656-1658.

Díaz, S., González, J. and Mínguez, R. 2015

Observability analysis in water transport networks: algebraic approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000621.

Díaz, S., González, J. and Mínguez, R. 2016 a

Uncertainty evaluation for constrained state estimation in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000718.

Díaz, S., Mínguez, R. y González, J. 2016 b

Aproximación estocástica al análisis de observabilidad en redes de abastecimiento de agua. *Revista Ingeniería del Agua*, 20(39), doi:10.4995/la.2016.4625.

Habiballah, I.O. and Irving, M.R. 2001

Observability analysis for state estimation using linear programming. *IEE Proc. – Gener. Transm. Distrib.*, 148(2), 142-145.

Pruneda, R.E., Solares, C., Conejo, A.J. and Castillo, E. 2010

An efficient algebraic approach to observability analysis in state estimation. *Electric Power Systems Research*, 80(3), 277-286.

Solares, C., Conejo, A.J., Castillo, E. and Pruneda, R.E. 2009

Binary-arithmetic approach to observability checking in state estimation. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 3(4), 336-345.

ANEXO 3. ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura</i>	<i>Título</i>	<i>Página</i>
1	Esquema genérico de funcionamiento de una red sectorizada	12
2	Evolución del coste computacional con el número de nodos	54
3	Resultados de la evaluación de incertidumbre en la red de distribución sectorizada	65
4	Evolución de la incertidumbre agregada en demandas con distintos niveles de inversión	72
5	Evolución de la incertidumbre agregada en flujos en tuberías con distintos niveles de inversión	73
6	Evolución de la incertidumbre agregada en alturas piezométricas con distintos niveles de inversión	73

ANEXO 4. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Título	Página
1	Elementos que componen la red estratégica	32
2	Caudalímetros y contadores en la red estratégica	33
3	Precisión de los equipos de medida	33
4	Coste computacional de implementación en redes malladas de tamaño sucesivo	53
5	Bombas y válvulas observables dudando de su funcionamiento a nivel individual	57
6	Válvulas de derivación observables dudando de su apertura a nivel individual	58
7	Roturas observables dudando de la demanda de los nodos de tránsito a nivel individual	59
8	Incertidumbre de la estimación en el escenario de demandas máximas	64
9	Incertidumbre de la estimación en el escenario de demandas medias	66
10	Incertidumbre de la estimación en el escenario de demandas mínimas	67
11	Resultados agregados de incertidumbre con distintos niveles de inversión	71
12	Porcentajes de validez del cálculo de la incertidumbre por errores numérico	74
13	Ratio de los resultados agregados de incertidumbre con distintos niveles de inversión respecto a la escala de referencia	74
14	Número y tipo de equipos propuestos para cada nivel de inversión	75



Santa Engracia, 125. 28003 Madrid
www.canaldeisabelsegunda.es