



## Universidad Politécnica de Cartagena

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de  
Ingeniería de Minas

*Grado en Ingeniería Civil*

### **Gestión de activos. Sistema de gestión integral para empresas de abastecimiento de agua.**

#### **Trabajo Fin de Grado**

AUTOR:

Pablo Espín Leal

DIRECTOR:

D. Manuel Alcaraz Aparicio

---

Cartagena, Octubre de 2014





## RESUMEN

Los sistemas de abastecimiento de agua pueden interpretarse como los responsables de garantizar el transporte y distribución de agua desde los puntos de captación y producción hasta los diferentes lugares de consumo. Dichos sistemas están basados en una extensa y compleja infraestructura que se expande y desarrolla progresivamente en el tiempo, a la vez que se encuentra expuesta a un proceso de deterioro continuo.

La necesidad de hacer eficientes y económicamente viables las grandes inversiones requeridas para la construcción, operación y mantenimiento de estas infraestructuras requiere mejorar el desempeño de los abastecimientos, lo que implica a los responsables el deber de convertirse en gestores de un servicio transparente, sostenible y eficaz.

En este contexto, la gestión de activos puede convertirse en una solución práctica a dicha problemática. Este modelo de gestión incluye todas las actividades necesarias para que una organización maneje de manera óptima sus activos físicos, las funciones de los mismos y el gasto asociado a sus ciclos de vida. Para ello, resulta fundamental poseer información de diversos aspectos del sistema con el propósito de servir de soporte a la toma de decisiones.

Una de las cuestiones clave para la implementación de este modelo de gestión es establecer el conjunto de herramientas tecnológicas (tanto hardware como software) necesarias para satisfacer las necesidades de recopilación, almacenamiento y procesamiento de la información requerida, así como para integrar dichos sistemas con el fin de apoyar la interoperabilidad y el intercambio eficaz de dicha información.

Este trabajo puede resultar de gran interés para aquellas entidades operadoras y gestoras de sistemas de abastecimiento que se encuentren interesadas en establecer un sistema de gestión de activos para atender las necesidades de la red. Los objetivos generales son, por un lado, proponer una metodología de planificación orientada a la gestión de activos y, por otro lado, realizar un repaso detallado de las herramientas y conexiones necesarias para establecer dicho modelo de gestión.



# ÍNDICE DE CONTENIDOS

---

▪ OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DEL TRABAJO .....	12
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>15</b>
1.1 GESTIÓN DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA .....	15
1.2 COMPLEJIDAD DEL SECTOR .....	17
1.3 EVOLUCIÓN DE LA GESTIÓN DEL AGUA .....	19
1.3.1 EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN EL PASADO .....	20
1.3.2 ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL.....	21
1.3.3 EL FUTURO DE LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO .....	27
<b>CAPÍTULO 2. GESTIÓN DE ACTIVOS.....</b>	<b>32</b>
2.1 LA GESTIÓN DE ACTIVOS: “ASSET MANAGEMENT” .....	32
2.1.1 LOS TRES PILARES DE LA GESTIÓN DE ACTIVOS.....	33
2.1.2 FASES EN EL PROCESO DE GESTIÓN DE ACTIVOS .....	34
2.1.3 GESTIÓN DE ACTIVOS APLICADA A SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO .....	39
2.2 CONSIDERACIONES ECONÓMICAS.....	40
2.3 SOSTENIBILIDAD .....	42
2.3.1 CONCEPTO DE SOSTENIBILIDAD .....	42
2.3.2 APLICACIÓN A LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO .....	43
2.4 HERRAMIENTAS INVOLUCRADAS EN LA GESTIÓN DE ACTIVOS .....	46
<b>CAPÍTULO 3. SUPERVISIÓN, CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS. SCADA..</b> .....	<b>51</b>
3.1 ESTRUCTURA DE UN SISTEMA SCADA .....	51
3.2 INSTRUMENTACIÓN, SENSORES Y COMUNICACIÓN EN CAMPO .....	53
3.2.1 SENSORES .....	53
3.2.2 INSTRUMENTACIÓN DE REGISTRO Y PROCESAMIENTO .....	59
3.2.3 SISTEMAS DE COMUNICACIÓN .....	62

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

3.2.4	UNIDAD TERMINAL MAESTRA .....	65
3.2.5	INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA .....	67
<b>3.3</b>	<b>NIVELES DE SUPERVISIÓN Y CONTROL .....</b>	<b>70</b>
<b>3.4</b>	<b>EJEMPLOS DE PAQUETES SCADA .....</b>	<b>71</b>
<b>CAPÍTULO 4. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA .....</b>		<b>73</b>
<b>4.1</b>	<b>ANTECEDENTES HISTÓRICOS .....</b>	<b>73</b>
<b>4.2</b>	<b>DEFINICIÓN DE SIG .....</b>	<b>75</b>
<b>4.3</b>	<b>COMPARACIÓN CON OTROS SISTEMAS.....</b>	<b>77</b>
4.3.1	DIFERENCIA CON LOS SISTEMAS CAD .....	78
4.3.2	DIFERENCIA CON CARTOGRAFÍA AUTOMÁTICA .....	78
4.3.3	DIFERENCIA CON SISTEMAS DE BASES DE DATOS.....	78
<b>4.4</b>	<b>MODELOS DE DATOS .....</b>	<b>79</b>
4.4.1	DATOS VECTORIALES.....	79
4.4.2	DATOS RASTER .....	81
<b>4.5</b>	<b>FUNCIONES DE UN SIG .....</b>	<b>82</b>
4.5.1	APLICACIÓN EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO .....	82
<b>CAPÍTULO 5. MODELOS MATEMÁTICOS .....</b>		<b>91</b>
<b>5.1</b>	<b>NECESIDAD DE MODELOS HIDRÁULICOS.....</b>	<b>91</b>
<b>5.2</b>	<b>EVOLUCIÓN DE LA MODELIZACIÓN HIDRÁULICA.....</b>	<b>92</b>
<b>5.3</b>	<b>TIPOS DE MODELOS.....</b>	<b>95</b>
<b>5.4</b>	<b>EMPLEO DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS .....</b>	<b>98</b>
<b>5.5</b>	<b>PASOS PARA LA CONFECCIÓN DE UN MODELO.....</b>	<b>99</b>
5.5.1	RECOPIACIÓN DE DATOS .....	99
5.5.2	ESQUELETIZACIÓN DE LA RED .....	101
5.5.3	MEDIDAS DE CAMPO .....	102
5.5.4	ESTUDIO DE DEMANDA Y ASIGNACIÓN DE CONSUMOS.....	103
5.5.5	CALIBRACIÓN DEL MODELO .....	105
<b>5.6</b>	<b>PAQUETES DE SOFTWARE.....</b>	<b>106</b>
5.6.1	EPANET.....	109

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CAPÍTULO 6. GESTIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA .....</b>	<b>118</b>
<b>6.1 GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO .....</b>	<b>118</b>
6.1.1 OBJETIVOS DEL MANTENIMIENTO .....	118
6.1.2 TIPOS DE MANTENIMIENTO .....	120
6.1.3 FACTORES QUE DETERMINAN EL TIPO DE MANTENIMIENTO.....	122
<b>6.2 CICLO DEL MANTENIMIENTO.....</b>	<b>123</b>
6.2.1. PRIORIZACIÓN DE COMPONENTES PARA EL ANÁLISIS .....	124
6.2.2. INSPECCIÓN Y RECOLECCIÓN DE DATOS .....	125
6.2.3. VALORACIÓN DE CONDICIONES. MECANISMOS DE FALLO .....	125
6.2.4. ANÁLISIS DE FALLOS.....	130
6.2.5. TOMA DE DECISIONES.....	131
6.2.6. REPARACIÓN O REEMPLAZO .....	133
<b>6.3 MODELOS DE SOPORTE A LA TOMA DE DECISIONES.....</b>	<b>135</b>
<b>6.4 LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO ASISTIDO POR ORDENADOR.....</b>	<b>138</b>
6.4.1. REQUISITOS FUNCIONALES DE LOS GMAO .....	139
6.4.2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS .....	140
6.4.3. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE SU EMPLEO.....	142
6.4.4. MÓDULOS PRINCIPALES .....	143
6.4.5. ETAPAS EN LA IMPLANTACIÓN .....	145
6.4.6. CONEXIONES DEL SISTEMA GMAO. TRATAMIENTO DE ÓRDENES DE TRABAJO .....	148
<b>CAPÍTULO 7. SISTEMA INTEGRADO .....</b>	<b>153</b>
<b>7.1. NECESIDAD DE INTEGRACIÓN.....</b>	<b>153</b>
<b>7.2. LA IMPORTANCIA DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....</b>	<b>155</b>
<b>7.3. CONEXIONES NECESARIAS .....</b>	<b>158</b>
7.3.1. BLOQUE OFICINA.....	158
7.3.2. BLOQUE CAMPO.....	159
7.3.3. BLOQUE USUARIOS.....	160
<b>CAPÍTULO 8. USUARIOS DE LA RED.....</b>	<b>162</b>
<b>8.1. INFORMACIÓN PÚBLICA Y TRANSPARENCIA.....</b>	<b>162</b>
<b>8.2. OBLIGACIONES Y DERECHOS DE LAS PARTES IMPLICADAS.....</b>	<b>163</b>
8.2.1. OBLIGACIONES DE LA ENTIDAD SUMINISTRADORA .....	163



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

8.2.2.	DERECHOS DE LOS ABONADOS .....	164
<b>CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES.....</b>		<b>167</b>
9.1.	SOBRE LA GESTIÓN DE ACTIVOS COMO FORMA DE ORGANIZACIÓN.....	167
9.2.	SOBRE LAS NECESIDADES TECNOLÓGICAS EN LOS ABASTECIMIENTOS .....	168
9.3.	SOBRE LA IMPORTANCIA DE LOS SIG .....	169
9.4.	DESARROLLOS FUTUROS.....	171
9.5.	CONCLUSIONES GENERALES .....	173
▪	BIBLIOGRAFÍA .....	175

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Régimen de gestión del agua urbana (Fuente: AEAS).....	17
Figura 2. Singularidades de los distintos servicios urbanos (Fuente: Cabrera Rochera, Enrique).....	19
Figura 3. Evolución del coeficiente de agua no registrada (Fuente: AEAS).....	24
Figura 4. Nivel de tecnificación de las infraestructuras de suministro de agua (Fuente: AEAS, 2010).....	26
Figura 5. Esquema del proceso de gestión de activos (Fuente: Adaptación EPA).....	35
Figura 6. Tipos de Inversión (Fuente: Alonso, 2010).....	41
Figura 7. Componentes del desarrollo sostenible (Fuente: Dréo, J).....	43
Figura 8. Elementos para diagnosticar la sostenibilidad en abastecimientos (Fuente: Benavides, 2010).....	44
Figura 9. Arquitectura de un sistema SCADA. (Fuente: Internet Security Auditors).....	52
Figura 10. Caudalímetro mecánico de molino o turbina (Fuente: Hoffer Flow Controls, INC).....	54
Figura 11. Principio de funcionamiento y ejemplo caudalímetro electromagnético (Fuente: Emerson Process Management).....	55
Figura 12. Principio de funcionamiento de caudalímetros basados en el tiempo de tránsito (Fuente: FLEXIM).....	55
Figura 13. Sensor de presión capacitivo (Fuente: VEGA Instrumentos S.A).....	56
Figura 14. Instrumentación para la medición y el control del nivel en depósitos (Fuente: ANTECH).....	58
Figura 15. Controlador Lógico Programable (PLC) (Fuente: Siemens).....	59
Figura 16. Data Logger NEMOS LP (Fuente: MICROCOM).....	61
Figura 17. Inputs y Outputs de una Unidad Terminal Maestra (Fuente: adaptación de Ezell, B).....	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 18. Elementos comunes en las interfaces de un sistema SCADA (Fuente: Damas, 2000) .....	67
Figura 19. Válvula junto a depósito en el Barrio de la Concepción (Fuente: Aquagest Cartagena).....	68
Figura 20. Consumos de sector hidráulico (Fuente: Aquagest Cartagena).....	68
Figura 21. Puesto central SCADA de la MCT en Cartagena.....	69
Figura 22. Vista del SCADA del Puesto de Control de EMASESA (Empresa Metropolitana de Abastecimiento y Saneamiento de Aguas de Sevilla S.A).....	69
Figura 23. Áreas de aplicación de los SIG (elaboración propia) .....	74
Figura 24. Componentes de un SIG (Fuente: <a href="http://www.ciencias.unal.edu.com">www.ciencias.unal.edu.com</a> ) .....	75
Figura 25. Diferencias formato Vectorial y Raster (Fuente: Juan Peña Llopis) .....	79
Figura 26. Modelo de datos vectoriales (Fuente: <a href="http://www.lemonprogis.com">www.lemonprogis.com</a> ).....	80
Figura 27. Codificación de una variable en formato Raster (Fuente: SIGMUR) .....	81
Figura 28. Simulación de presiones distribuidas por parcela (Fuente: Bartolín, 2013).....	86
Figura 29. Estructura de intercambio de datos entre SIG y SCADA (Fuente: Martínez Solano, 2002) .....	86
Figura 30. Análisis de polígonos de corte (Fuente: GeoSAS, Tracasa).....	87
Figura 31. Tipos de modelos matemáticos aplicados a redes de distribución (Fuente: elaboración propia) .....	95
Figura 32. Componentes físicos representados por EPANET (Fuente: Manual del Usuario de EPANET 2).....	112
Figura 33. Interfaz básica de EPANET 2.0 (Fuente: Manual de usuario EPANET 2.0).....	114
Figura 34. Costes en función del mantenimiento (Fuente: Balsa, José) .....	119
Figura 35. Ciclo de mantenimiento (Fuente: adaptación de Makar y Kleiner, 2000) .....	124
Figura 36. Decisión para renovar según coste de fallo (Fuente: Makar y Kleiner, 2000).....	132
Figura 37. Fases en el proceso de implementación de un GMAO (Fuente: elaboración propia) .....	145

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 38. Tratamiento de los avisos y órdenes de trabajo mediante un GMAO (Fuente: elaboración propia) .....	149
Figura 39. SIG como interfaz de la información (Fuente: adaptado de Halfawy <i>et al</i> , 2002) .....	156
Figura 40. Niveles que intervienen en la gestión de activos (Fuente: elaboración propia) ...	157
Figura 41. Análisis espacial de la frecuencia de fugas en Malmö, Suecia (Fuente: EPA, 2002) .....	170

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Instituciones en la gestión del ciclo de agua (Fuente: elaboración propia) .....	16
Tabla 2. Coeficiente de agua no registrada. Media Ponderada (Fuente: AEAS).....	23
Tabla 3. Etapas a seguir en el proceso de instauración de un sistema de gestión de activos en empresa de abastecimiento de agua (Fuente: elaboración propia).....	39
Tabla 4. Ejemplos de indicadores de gestión relacionados con la sostenibilidad de un abastecimiento (Benavides, 2010) .....	45
Tabla 5. Herramientas involucradas en la gestión de activos de un sistema de abastecimiento (Fuente: adaptado de McKibben & Davis, 2002) .....	47
Tabla 6. Principales diferencias entre los medios de radio. (Fuente: adaptado de Synchrony Inc.).....	64
Tabla 7. Principales casas comerciales de sistemas SCADA .....	71
Tabla 8. Principales software SIG .....	76
Tabla 9. Criterios para el número de medidores a instalar según el WRC (Fuente: Water Research Centre).....	103
Tabla 10. Clasificación de software de modelización de agua urbana (Fuente: adaptado de Bach <i>et al.</i> ).....	108
Tabla 11. Valores típicos de fallos y tiempos de reparación de componentes de un sistema de distribución de agua (Fuente: Curso de análisis, diseño y mantenimiento de redes a presión, 1997) .....	130



## ▪ **OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DEL TRABAJO**

El presente trabajo permite dar una visión de las herramientas e interconexiones necesarias para seguir un modelo de gestión del servicio de abastecimiento orientado a la gestión de activos.

El objetivo general es, por tanto, proponer un sistema integral que permita a los organismos gestores controlar, actuar y planificar todas las actividades relacionadas con la explotación y mantenimiento de redes de agua potable. Para ello, se han seguido una serie de objetivos específicos:

- Realizar un análisis de la evolución de la gestión de los abastecimientos de agua en España, haciendo hincapié en la problemática actual y en las necesidades futuras de los mismos.
- Presentar la gestión de activos como el modelo de organización a seguir por las entidades de aguas para satisfacer los requisitos del servicio, no sólo desde el punto de vista de la operación y mantenimiento, sino también para fomentar la sostenibilidad y la transparencia hacia los usuarios.
- Estructurar el conjunto de herramientas que toda organización interesada en este modelo de gestión debe de tener implementadas en la red, así como los requisitos de integración entre las mismas.

El trabajo se ha dividido en un conjunto de 8 capítulos y un último apartado de conclusiones.

El capítulo 1 sirve como cuadro general para enmarcar el propósito del trabajo. En este se realiza una revisión de la gestión urbana del abastecimiento del agua, las singularidades que presenta este servicio, y la evolución sufrida a lo largo de los años.

El capítulo 2 pretende introducir el concepto de gestión de activos. A lo largo del mismo se desarrollan los principios de este modelo de planificación y operación, las fases en la instauración de este y su aplicación a los sistemas de abastecimiento de agua.

En el capítulo 3 se comienza el análisis de las distintas herramientas involucradas en la gestión. El primero de estos eslabones y por el cual se inicia el estudio es el sistema SCADA de una empresa de agua. Posteriormente, en el capítulo 4 se recopila toda la información

necesaria para conocer los sistemas de información geográfica y su aplicación a redes de agua potable.

El capítulo 5 contiene una revisión de los modelos matemáticos aplicados a la simulación hidráulica: necesidades de estas herramientas, pasos para su configuración y ejemplos de paquetes software, haciendo énfasis en el programa EPANET.

El capítulo 6 es en sí un compendio de todo el proceso de mantenimiento y toma de decisiones en materia de rehabilitación y renovación. A lo largo de este capítulo se describen los diferentes tipos de mantenimiento, las etapas a seguir para su correcta realización y una pequeña introducción de los modelos de soporte a la decisión. Por último, se analizan los sistemas de gestión de mantenimiento asistido por ordenador.

A lo largo del capítulo 7 se presentan el conjunto de interconexiones que hacen posible el intercambio de información entre todas las herramientas y que posibilitan el establecimiento del sistema integrado. Asimismo, se resalta la importancia que tienen los SIG en este sistema.

Los usuarios de la red juegan un papel fundamental en la gestión de activos. El capítulo 8 tiene como objetivo destacar los beneficios que un modelo de gestión que facilite el intercambio de información y la participación de los usuarios puede presentar desde la óptica de estos últimos.

Finalmente, en el capítulo 9 se exponen las conclusiones del trabajo y el planteamiento de posibles desarrollos futuros.





# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 GESTIÓN DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA

El agua es un derecho fundamental de los seres humanos, por lo que desde la época de los romanos se ha considerado **un bien público**. Este hecho obliga a las administraciones públicas a gestionar eficientemente dicho recurso con el objeto de garantizar el suministro en cantidad y en calidad.

El ciclo integral del agua urbana se puede dividir en tres fases bien diferenciadas: **Abastecimiento, Saneamiento y Reutilización**.

En primer lugar, el **abastecimiento** engloba el conjunto de procesos desde la captación del agua (tanto superficial como subterránea) hasta la llegada del recurso al punto de consumo de los usuarios. Dentro del abastecimiento urbano, podemos diferenciar dos categorías:

- a. *Abastecimiento en alta*, también llamado aducción. Engloba las siguientes acciones:
  - Captación del recurso hídrico. Incluye la captación de aguas superficiales, la extracción de recursos subterráneos así como las fuentes no convencionales (desalinización).
  - Transporte por conducciones principales.
  - Almacenamiento en depósitos reguladores.
- b. *Abastecimiento en baja*, que comprende el almacenamiento intermedio, la distribución y el suministro hasta los puntos de consumo de los usuarios de la red.

Por otro lado, el **saneamiento** es la fase del ciclo del agua urbana que se encarga de recoger y transportar el agua residual, entiendo como agua residual aquella que ya ha sido utilizada (aguas pluviales, aguas de uso doméstico, industrial, etc.). Esta etapa también incluye el tratamiento, tanto del agua como de los subproductos derivados del propio proceso de

saneamiento, con el objetivo de reducir al mínimo posible el impacto al medio generado por los vertidos. Además de ser un proceso fundamental para la sostenibilidad medioambiental, esta etapa es imprescindible en zonas áridas o semiáridas por la escasez de recursos hídricos.

La última etapa de este ciclo integral es la **reutilización** del agua proveniente de la depuración, aprovechando el recurso ya utilizado para distintos usos, excluyendo el consumo humano. Con ello se consigue priorizar los recursos convencionales para usos preferentes que precisan de calidades más elevadas.

Entre los usos que se le pueden dar a las aguas reutilizadas destacan:

- *Riego*: Jardines y parques, campos de golf...
- *Usos que no requieran potabilización*: incendios, refrigeración industrial, aire acondicionado, riego de calles, etc.

La gestión del agua, a lo largo de todas las fases del ciclo urbano, puede estar a cargo de empresas públicas, privadas o mixtas, aunque el regulador sea siempre la Administración Pública. El siguiente cuadro resume las instituciones gestoras y reguladoras que intervienen en el ciclo.

		REGULADOR	GESTOR
Abastecimiento	En alta	Demarcaciones Hidrográficas	Demarcaciones Hidrográficas o empresas públicas
	<i>Ejemplos</i>	<i>Confederación Hidrográfica del Segura</i>	<i>Mancomunidad de los Canales del Taibilla</i>
	En baja	Ayuntamientos o corporaciones locales	Ayuntamientos o empresas concesionarias
	<i>Ejemplos</i>	<i>Ayuntamiento de Cartagena</i>	<i>Hidrogea</i>
Saneamiento	Alcantarillado	Ayuntamientos locales	Servicios municipales o empresas
	<i>Ejemplos</i>	<i>Ayuntamiento de Cartagena</i>	<i>Hidrogea</i>
	Depuración	Administración Pública	Instituciones autonómicas/locales o empresas contratadas
	<i>Ejemplos</i>	<i>Conserjería de Agricultura y Agua</i>	<i>ESAMUR</i>

**Tabla 1.** Instituciones en la gestión del ciclo de agua (Fuente: elaboración propia)

Según la encuesta de suministro de agua realizada por la Asociación Española de Abastecimiento de agua y Saneamiento (AEAS) en 2010 y que representa a 28,2 millones de habitantes, el 50% está gestionado por entidades locales y empresas públicas y la otra mitad por empresas privadas y mixtas, cifras que quedan representadas en el siguiente gráfico.



**Figura 1.** Régimen de gestión del agua urbana (Fuente: AEAS)

## 1.2 COMPLEJIDAD DEL SECTOR

El suministro y tratamiento de agua es un servicio público singular, tanto por la importancia del recurso que se manipula como por la complejidad de su gestión.

En general se puede definir el concepto Servicio Público (o conocido también como su término anglosajón *Utility*) como todas aquellas actividades desarrolladas o controladas por las Administraciones Públicas que se llevan a cabo con el objetivo de satisfacer las necesidades colectivas. En el contexto de esta definición, el abastecimiento de agua podría incluirse dentro de las llamadas **actividades de interés general** del Estado junto, por ejemplo, el suministro de energía.

En cuanto al régimen de explotación de los servicios de agua, la Constitución Española permite las siguientes posibilidades de configuración (Ruiz de Pablo, 2006):

- En primer lugar, el Estado puede limitar su intervención a la regulación y control de la actividad, permaneciendo en este caso en manos de la iniciativa privada.

- En segundo lugar, las Administraciones Públicas pueden llevar a cabo la actividad pero sin necesidad de reservarse la exclusividad de su realización (régimen tradicional de los servicios de sanidad en España).
- En tercer lugar, la titularidad de las actividades se puede reservar al Estado, Comunidades Autónomas o entidades locales, siendo este el modelo que tradicionalmente se ha venido prestando en los servicios de suministro de agua.

Una vez que queda reservada la titularidad a favor del Estado o resto de organizaciones públicas, la prestación puede realizarse de forma directa por parte de la Administración o puede llevarse a cabo por medio de concesiones, dentro de las posibilidades que la Ley de Contratos de las Administraciones Públicas permite.

Además de esta complejidad en el ámbito de la gestión, la trascendencia del recurso a suministrar hace del abastecimiento de agua un servicio aún más singular.

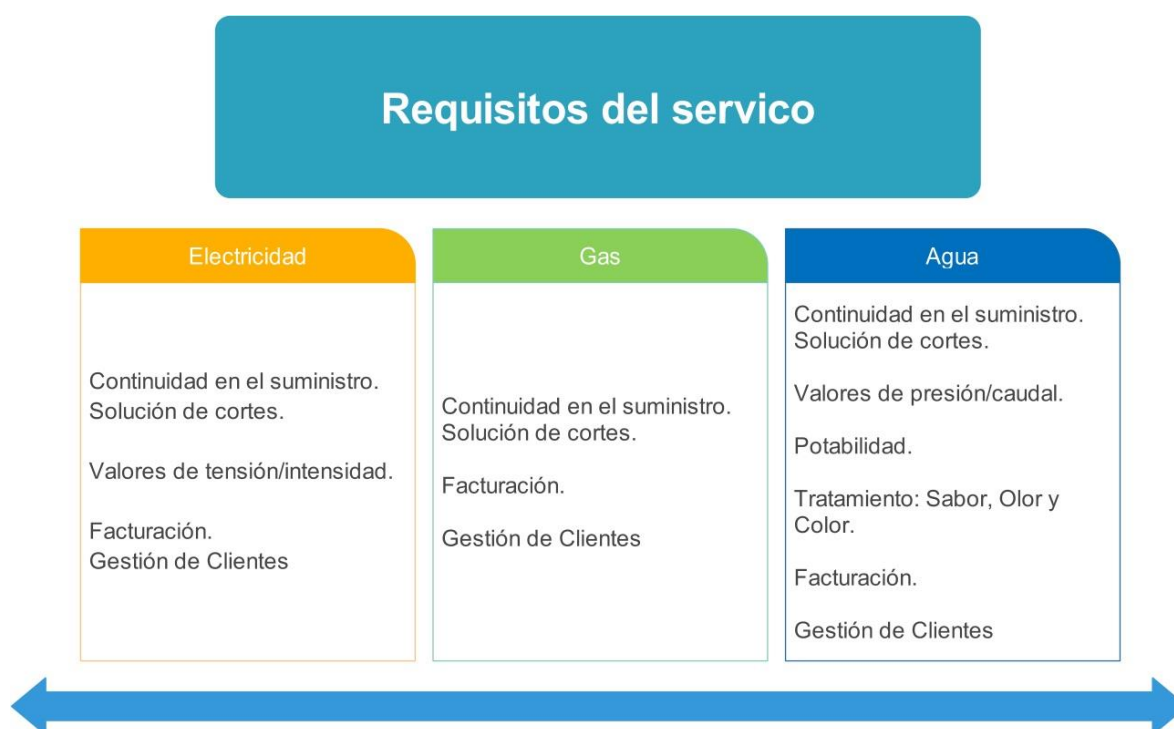
Por un lado, el agua es un bien natural puesto que es un elemento fundamental para la vida y existe en la naturaleza. Existen grandes diferencias tanto en disponibilidad del recurso como en los usos lo que incentiva la necesidad de aumentar el control y supervisión de todo el ciclo integral del agua. Claro ejemplo de dichas desigualdades se encuentra en España en donde la parte norte de la península posee un régimen de aportaciones naturales mucho mayor que en el sur, a pesar de que el mayor desarrollo de actividades agrícolas (principales consumidores de agua) se produce en esta última zona.

Por otro lado, el agua para el abastecimiento de la población también constituye un bien económico, en cuanto a que se adquiere en el mercado pagando por ella un precio que varía en función de distintos factores. Además de satisfacer necesidades humanas de carácter básico, como la bebida o la higiene, constituye un factor de producción fundamental en numerosas actividades económicas: input en la cadena de producción de las industrias alimentarias, elemento principal en los sistemas de refrigeración de máquinas, etc.

Volviendo al concepto de servicio público, una de las principales singularidades que el sector del abastecimiento y tratamiento de agua presenta respecto al resto de *utilities* es el **transporte y almacenamiento** del recurso. Aunque parezca una idea simple, el agua pesa y, en este sentido, en una proporción mucho mayor a la de otros recursos básicos como la electricidad o el gas natural. Esto, unido a otras características propias del recurso como la

localidad (al tratarse de un bien natural, no es susceptible de producción propia) y los requerimientos de calidad hacen del servicio de agua una actividad compleja.

La Figura 2 representa las principales diferencias entre requisitos a satisfacer mediante los distintos servicios básicos de la población desde el punto de vista de sus características y exigencias.



**Figura 2.** Singularidades de los distintos servicios urbanos (Fuente: Cabrera Rochera, Enrique)

### 1.3 EVOLUCIÓN DE LA GESTIÓN DEL AGUA

Los abastecimientos de agua modernos son sistemas complejos en los que se interrelacionan presiones, caudales, pérdidas y consumos. El camino hasta llegar a las soluciones actuales ha sido el fruto de un constante esfuerzo para resolver los procesos de captación, almacenamiento y transporte hasta los núcleos de población.

La evolución de los abastecimientos ha estado marcada por las necesidades que el gestor debe de satisfacer. En una primera etapa, el gestor solo debe de preocuparse de mantener los volúmenes necesarios para satisfacer las demandas de los usuarios del sistema, lo que se

conoce como **fase de cantidad**. En España, los requisitos de esta etapa fueron superados hace tiempo en prácticamente la totalidad del país, por lo que la mayoría de nuestros abastecimientos se encuentran en **fase de calidad**, en la que además de la cantidad hay que tener en cuenta condicionantes psicológicos, culturales y estéticos. Tan solo los grandes abastecimientos han alcanzado la **fase de excelencia**, donde se tienen en cuenta aspectos de sostenibilidad económica, social y medioambiental.

### 1.3.1 EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN EL PASADO

Uno de los primeros recursos para solventar el abastecimiento de agua fueron los sistemas de almacenamiento familiar que consistían en pequeños depósitos destinados al aprovisionamiento del agua procedente de la lluvia. De estas soluciones se evolucionó hacia los sistemas que, además del almacenamiento, realizaban las tareas de transporte de agua en los que sin duda el Imperio Romano destacó. En este periodo, el desarrollo y la mejora de los sistemas de abastecimiento no solo surgían como una necesidad, sino como un signo de poder y progreso.

Las dificultades técnicas que suponía el transporte de agua a presión eran evidentes. Tanto los materiales de los que se disponían como las técnicas de fabricación de tuberías y demás elementos no permitían el correcto control y funcionamiento de las redes. Es por esta razón que durante este periodo, la ingeniería civil fue enfocada a la construcción de grandes obras para la conducción en lámina libre, entre las que destacan los acueductos y presas.

El enfoque hacia el control de las corrientes en lámina libre, unido al tardío progreso de los conocimientos de la hidráulica dilató el desarrollo de los sistemas de abastecimiento en presión. En este sentido, la publicación de la obra de Bernoulli *Hydrodynamica* en 1738 supuso un importante avance en la ciencia de la mecánica de fluidos, explicando la naturaleza de la presión dinámica y descubriendo el papel de las pérdidas de carga en el flujo, lo que estableció las bases de lo que más tarde sería conocido como el principio de Bernoulli.

Estos avances permitieron en 1754 la implantación del primer abastecimiento de agua a presión en las ciudades, siendo la primera de estas Betlehem, en el estado de Pennsylvania.

En el ámbito nacional el desarrollo del abastecimiento ha sido más lento. Hasta finales del siglo XIX, las ciudades eran abastecidas en su mayoría por sistemas más tradicionales compuestos por acueductos y canales para el transporte y fuentes públicas para el

almacenamiento. La distribución a la población era llevada a cabo en su mayor parte por aguadores o por los propios usuarios.

El notable aumento de la población añadido al incremento de la demanda industrial provocó la necesidad de desarrollar tareas de gestión del recurso. En muchos casos, esta gestión se materializó en la explotación privada de caudales, como por ejemplo el cobro por el llenado de cántaros de agua desde fuentes. Sin embargo, el aumento de las demandas agrícola, industrial y de consumo humano promovió la intervención de la Administración Pública en el abastecimiento de agua potable.

### **1.3.2 ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL**

El abastecimiento de agua es un servicio básico para la sociedad por lo tanto, el objetivo principal de una compañía distribuidora es satisfacer las exigencias de los abonados a la red, que exigirán un suministro de la máxima calidad posible siempre que se mantenga un precio razonable.

En este sentido, los organismos encargados del abastecimiento tienen que asegurar un funcionamiento adecuado de todo el sistema tanto a medio como a largo plazo con el propósito de garantizar los estándares demandados por los consumidores.

Cabrera y García-Serra (1997) reúnen los principales problemas que tienen en común los sistemas de suministro de agua españoles en la actualidad:

- **Falta de control por parte de las administraciones**

La gestión de los abastecimiento españoles se lleva a cabo mediante un entramado de competencias repartidas entre diversas instituciones: Ministerios (Fomento, Industria, Medio Ambiente y Sanidad), Confederaciones Hidrográficas, Consejerías (Agricultura y Agua, Obras Públicas, Sanidad e Industria), Diputaciones Provinciales y, en última fase, Ayuntamientos.

Este fraccionamiento propicia una falta de responsabilidad de los distintos organismos, puesto que muchos de ellos tienen la potestad de opinar, incluso de decidir, pero ninguno de los mismos se responsabiliza totalmente de nada. Por otra parte, esta fragmentación también



ralentiza la búsqueda de soluciones y la toma de decisiones en la mayoría de casos al verse aumentado el número de instituciones que participan en las mismas.

- **Precio del agua**

Al tratarse de un recurso limitado, la escasez de agua en la mayor parte del territorio peninsular ha de tenerse en cuenta y cuantificarse de manera adecuada. Por lo tanto, es necesario establecer una política tarifaria en la que además de los costos de funcionamiento y explotación, adquieran verdadera importancia los costos que tiene el recurso como materia prima.

Partiendo de esta idea, es incomprensible que España tenga una de las facturas de agua más baratas de toda Europa siendo uno de los países en los que los recursos hídricos soportan una mayor presión. Según los datos de la “Encuesta de Suministro de Agua Potable y Saneamiento en España” elaborada por la AEAS en 2010, el precio para un consumo doméstico anual de 200 m<sup>3</sup> en Valencia es del 1,8 €/m<sup>3</sup>, mientras que en otra ciudad donde el agua no es tan escasa, como Copenhague, el precio es de 6,4 €/m<sup>3</sup>.

Otro problema relacionado con el precio del agua es el empleo de una política de gestión basada en la utilización de los ingresos procedentes de la tarifa del agua en la financiación de obras o servicios de otra índole, lo que conlleva a un progresivo desgaste del sistema al no reinvertir en él los beneficios que se obtienen con la prestación del servicio.

- **Rendimiento e insuficiencia de la red**

Desde el punto de vista técnico, los principales problemas que aparecen en las redes de distribución de agua son los siguientes:

- a. *Capacidad de la red:* Capacidad de transporte del sistema en función de las demandas que debe de satisfacer.

El aumento del consumo urbano, el envejecimiento de las conducciones (con la consiguiente reducción del diámetro) y un incremento de las pérdidas son algunas de las causas que pueden provocar que tanto los diámetros de las conducciones como los volúmenes de los depósitos queden obsoletos.

b. *Pérdidas*: Las pérdidas se pueden dividir a su vez en reales y aparentes.

Se denomina pérdidas reales, también llamadas físicas o fugas, a los volúmenes de agua que escapan del sistema a través de los defectos o imperfecciones de las conducciones y resto de instalaciones.

Las pérdidas aparentes son las generadas por los consumos no contabilizados. Los errores en la medición y el agua consumida de manera ilegal son las principales causas de este tipo de pérdidas.

c. *Roturas*: La frecuencia con la que se producen las roturas determina la integridad de la red. Los volúmenes perdidos en estos defectos pueden llegar a ser importantes y difícilmente detectables.

El Rendimiento Volumétrico ( $\eta$ ) de una red viene determinado como el cociente entre el volumen de agua registrado y el volumen de agua inyectado.

$$\text{Rendimiento Vol. } \eta (\%) = \frac{\text{Volumen registrado}}{\text{Volumen inyectado}} \times 100$$

Hay que tener en cuenta que el rendimiento de una red nunca puede alcanzar el 100% ya que existen factores que generan una diferencia entre lo contabilizado y lo realmente inyectado (pérdidas, roturas, tomas ilegales, etc.).

La siguiente tabla muestra los datos de la encuesta realizada por la AEAS en 2008 en la que se realiza un desglose de los distintos valores de agua no registrada.

	De 20.001 a 50.000 hab.	De 50.001 a 100.000 hab.	Superior a 100.000 hab	Áreas Metropolitanas	TOTALES
Cuestionarios	31	17	30	6	84
Población	890.229	1.211.654	7.233.290	12.450.809	21.785.982
Municipios	32	26	166	242	466
<b>Agua no registrada</b>	<b>36,45%</b>	<b>18,77%</b>	<b>21,06%</b>	<b>19,54%</b>	<b>20,85%</b>

**Tabla 2.** Coeficiente de agua no registrada. Media Ponderada (Fuente: AEAS)

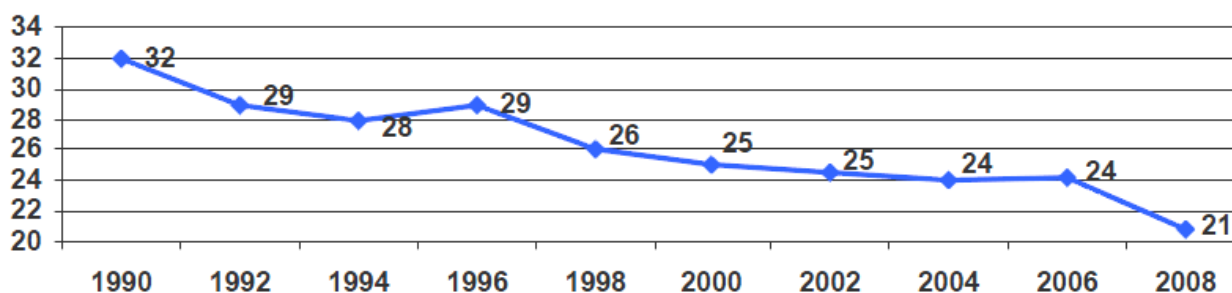


Figura 3. Evolución del coeficiente de agua no registrada (Fuente: AEAS)

Como se observa en la figura, la tendencia de los años 90 es a una progresiva reducción de la cantidad de agua no registrada debido a una mejora de las redes de abastecimiento así como de sus sistemas de control.

#### ○ Control de la calidad del agua

La cantidad, la continuidad y el precio razonable no son los únicos requisitos a satisfacer en un sistema de distribución de agua potable, la calidad también se ha convertido en otro requerimiento fundamental. Las “Guías para la calidad del agua potable” de la Organización Mundial de la Salud (OMS) definen el concepto de agua potable como “aquella adecuada para consumo humano y para todo uso doméstico habitual”. Siguiendo esta definición, resulta evidente la necesidad de asegurar una adecuada calidad del agua, tanto desde el punto de vista organoléptico como del daño a la salud.

El reconocimiento del agua como vehículo de transporte de enfermedades está documentado desde hace mucho tiempo. Bacterias, virus o protozoos pueden ser transportados por el agua teniendo consecuencias graves para la salud, pues pueden ser causantes de enfermedades que van desde ligeras gastroenteritis hasta enfermedades graves de carácter epidémico. Además de las características relacionadas con las afecciones a la salud, también es necesario analizar aquellas propiedades relativas a la aceptabilidad del agua por parte del consumidor. Entre dichas características predominan el color y el sabor que pueden hacer que un agua sin peligro para la salud sea inaceptable por los abonados.

En un sistema de distribución de agua, la contaminación se puede producir en numerosos puntos: conexiones, tuberías rotas, reparaciones con pocas medidas de seguridad, etc. Aunque la principal causa de los deterioros físicos y químicos es la manipulación y almacenamiento inadecuados.

Dentro de este contexto cobra vital importancia el control sobre la calidad del agua. Este requisito puede ser supervisado mediante una combinación de operaciones de protección de las fuentes de agua, control del tratamiento, gestión y manipulación del recurso.

En España la normativa a aplicar en temas de calidad de agua es el Real Decreto 140/2003 por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. Esta normativa es la principal a cumplir en cuanto a la calidad del agua a suministrar y su objetivo principal es

*“establecer los criterios sanitarios que deben de cumplir las aguas de consumo humano y las instalaciones que permiten su suministro desde la captación hasta el grifo del consumidor y el control de éstas, garantizando su salubridad, calidad y limpieza, con el fin de proteger la salud de las personas de los efectos adversos derivados de cualquier tipo de contaminación de aguas”*

Entre las aguas a las que aplicar esta normativa se incluyen las aguas domésticas (bebida, cocina, preparación de alimentos, higiene personal, etc.), las aguas suministradas en actividades comerciales o públicas y las aguas de la industria alimentaria. Por otra parte se excluyen las aguas envasadas, aguas para medicamentos y aguas mineromedicinales de balnearios.

Siguiendo con la normativa, otro Real Decreto a tener en cuenta es el R. D 865/2003 por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis. En la Región de Murcia este Real Decreto tomó más importancia en 2001 cuando se produjeron numerosos casos de contagio de dicha enfermedad.

Un factor a tener en cuenta en la gestión de los temas relacionados con la calidad del agua es la información transmitida a los usuarios. En España, el Sistema de Información Nacional de Agua de Consumo (o SINAC) es el sistema de información sanitario que recoge datos sobre las características de los abastecimientos y la calidad del agua de consumo humano que se suministra a la población española. Está sustentado por una aplicación informática a través de Internet y entre sus objetivos destacan la detección y prevención de riesgo derivados de la contaminación del agua, la identificación de la calidad del agua para consumo, la aportación de información tanto a los usuarios como a las autoridades competentes y la elaboración de informes periódicos sobre las características de las infraestructuras y la calidad del agua.

A pesar de todo el esfuerzo que tanto las administraciones como los gestores han realizado en materia de normativa y sistemas de información de la calidad, es necesario continuar

mejorando las herramientas de información a los usuarios con el objetivo de concienciar a la población de la calidad del agua y de la buena condición de las redes de suministro para “evitar que España se convierta en el paraíso de los embotelladores de agua” (Cabrera, 1998).

○ **Desconocimiento del sistema**

Para llevar a cabo una correcta gestión de la red es esencial tener un conocimiento completo del sistema. Los datos del estado de la red y la modelización hidráulica aportan información que es imprescindible a la hora de la toma de decisiones, tanto a largo plazo (planificación de inversiones, etc.) como en las labores cotidianas de explotación.

En muchas ocasiones el conocimiento de los sistemas por parte de sus gestores es escaso, sobre todo cuando se trata de redes pequeñas. Este desconocimiento se traduce en la falta de cartografía actualizada, falta de información sobre el estado de conservación y de funcionamiento hidráulico de la red, entre muchas otras.

La Figura 4 muestra los datos en cuanto al nivel de tecnificación de las infraestructuras recopilados por la XII edición de la “Encuesta de Suministro de Agua Potable y Saneamiento en España” realizada en 2010 por la Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento (AEAS), que recoge información de 969 municipios.

**Tecnificación de la gestión de las infraestructuras**

(% de los municipios)

- **Redes de abastecimiento**
  - Cartografía: Informática GIS, 77%
  - Telemando: 78% de los municipios
  - Modelo matemático de la red: 70%
  - Detección sistemática de fugas: 81%
  - Renovación de red: 67%
  - Renovación de contadores: 79%
- **Redes de saneamiento**
  - Cartografía: Informática GIS, 48%
  - Modelo matemático de la red: 40% de los municipios
  - Campañas de limpieza preventiva: 89%
  - Plan Director del alcantarillado: 74% en vigor o elaboración

**Figura 4.** Nivel de tecnificación de las infraestructuras de suministro de agua (Fuente: AEAS, 2010)

A pesar de que cada vez el nivel de modernización es mayor, es necesario continuar con el esfuerzo tanto en implementación como en investigación de tecnologías que ayuden a mejorar la gestión de los sistemas de abastecimiento de agua.

### **1.3.3 EL FUTURO DE LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO**

La situación actual de los abastecimientos promueve la necesidad de avanzar hacia una mejor gestión del recurso y una actualización profunda del sistema. El primer paso hacia la modernización y mejora debe ser un análisis profundo del estado actual con el propósito de obtener un diagnóstico que permita el establecimiento de un plan de actuación capaz de subsanar las carencias del sistema.

En la actualidad, la complejidad de las redes de distribución de agua fomenta la aplicación de herramientas informáticas integradas que faciliten y resulten de apoyo para llevar a cabo las tareas de control, explotación y gestión. Es por ello necesario estar al día en la tecnología con el objetivo de mejorar la eficacia y la productividad.

A continuación se detallan buena parte de las tendencias seguidas por los abastecimientos urbanos más interesados en modernizar su funcionamiento en orden a mejorar su eficacia y rendimiento.

- **Mejora del conocimiento del sistema**

Para llevar a cabo la modernización del abastecimiento resulta imprescindible que el gestor posea información en cantidad y de calidad suficiente para abordar de manera correcta y eficiente la toma de decisiones. Hoy en día dicha información es insuficiente tanto en cantidad como en fiabilidad, por lo que una de las principales líneas de actuación debe ser la mejora en la captación, almacenamiento y tratamiento de los datos de la red.

- *Sensores y Sistemas SCADA*: El primer paso debe de ser la captación de datos de las variables hidráulicas que condicionan la explotación: presión, caudal, consumo, parámetros de calidad, etc. El empleo de medidores de campo junto con paquetes informáticos SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition System) posibilita la monitorización en tiempo real de los parámetros mencionados anteriormente permitiendo

tanto la actuación sobre ellos como el almacenamiento y posterior tratamiento de la información.

- *SIG*: Los softwares SIG (Sistemas de Información Geográfica) facilitan la obtención, análisis, representación y salida de aquellos datos que presentan una importante componente espacial. Los SIG pueden constituir el núcleo de una estructura de bases de datos relacionadas en la que la información se mantenga actualizada lo que permite obtener un “plano inteligente” en el que se puede conocer al instante datos relativos a la red y, mediante el análisis de la información periódica, ser una herramienta para los responsables de la toma de decisiones en las empresas que gestionan el abastecimiento.

- o **Mejora del funcionamiento del sistema**

Es necesario que los sistemas de abastecimiento posean herramientas que faciliten a los operarios las tareas de explotación de la red. Hay que tender hacia un funcionamiento del sistema que busque el óptimo, garantizando una buena calidad del servicio con unos costes de explotación mínimos, así como progresar hacia la automatización de las operaciones, evitando en la mayor medida posible los errores humanos.

- *Telecontrol y teled medida*: El término telecontrol hace referencia al mando de un aparato o máquina a distancia a través del envío de órdenes. Por otro lado, la teled medida se lleva a cabo cuando se pretende únicamente recopilar y centralizar la información de los parámetros de funcionamiento de la red. Estos procesos permiten detectar un posible mal funcionamiento del sistema de forma inmediata y actuar en consecuencia de la manera más adecuada y rápida posible.

Entre los principales objetivos que busca el control en tiempo real de la red de abastecimiento destacan la garantía del suministro a los consumidores, la reducción y localización de fugas y el mantenimiento y valoración de activos que componen la red.

- *Modelos matemáticos*: Los modelos matemáticos son herramientas de apoyo que permiten tanto la representación del sistema de forma continua como la representación de escenarios o eventos posibles y situaciones futuras.

- **Establecimiento de planes de mantenimiento y renovación**

Con la finalidad de conseguir minimizar los problemas descritos anteriormente, las empresas de abastecimiento deben de contar con una adecuada gestión técnica, así como planes de mantenimiento, renovación y rehabilitación para conseguir un apropiado funcionamiento de la red a medio y largo plazo.

Es importante distinguir entre los conceptos de renovación y rehabilitación. El primero de ellos hace referencia a la acción de sustituir un elemento, mientras que el término rehabilitar hace referencia a la acción de restituir el elemento a su antiguo estado, habilitándolo de nuevo para realizar su función.

Un sistema debe de mantener su estado dentro de unos límites aceptables con el objetivo de evitar recuperaciones difíciles y costosas. Un cambio total, aparte de ser inviable económicamente, resultará difícil de realizar en un periodo de tiempo breve. Por lo tanto, el gestor debe de optar por una estrategia global en la que se coordinen todas las decisiones referentes a la explotación para lograr un adecuado mantenimiento del conjunto y facilitar las labores de restitución, asegurando que estas se realizan de forma rápida y económicamente justificable.

- **Mejora de la formación del personal**

Para lograr la consecución de los objetivos propuestos por cualquier gestor es fundamental el capital humano. Una adecuada formación y motivación de los operadores puede resultar vital en el desarrollo de la actividad.

Durante muchos años, los empleados de los sistemas de abastecimiento han adquirido conocimientos muy profundos sobre el manejo de las redes de distribución. Teniendo en cuenta la relativa modernidad de estas infraestructuras, se debería de haber profundizado con mayor intensidad en la educación y aprendizaje de los nuevos operadores, pues la gran experiencia adquirida por el personal de mayor edad se va a perder en gran parte.

La implantación de las tecnologías anteriormente citadas, cuyo objetivo es automatizar las operaciones, puede ser una solución a dicho problema. En el caso de tomar esta medida, se deberán de fomentar programas y cursos para que el personal actual aprenda el manejo del conjunto de herramientas que se vayan a implementar y adapten su filosofía de trabajo a las



nuevas metodologías. Por esta razón, es necesario cuidar la formación de los trabajadores no sólo dejando esta en manos de la experiencia acumulada en muchos años de trabajo, sino fomentando la formación continua y el conocimiento de las nuevas tecnologías aplicables al sistema.

- **Mejora de la interrelación gestor-usuario**

El responsable del abastecimiento también debe de promover la transparencia en su gestión y fomentar campañas de ahorro al igual que hábitos de consumo racionales con el objetivo de apoyar la formación de los usuarios.



# CAPÍTULO 2. GESTIÓN DE ACTIVOS

## 2.1 LA GESTIÓN DE ACTIVOS: “ASSET MANAGEMENT”

Los gestores de servicios públicos se encuentran continuamente presionados para justificar y argumentar las propuestas de tarifas e inversiones. Como consecuencia, se ven obligados a buscar datos y cifras significativas que ayuden a argumentar sus decisiones. La solución a estos requerimientos es la gestión de activos.

Siguiendo el “Diccionario de Contabilidad, Auditoría y Control de Gestión” se puede definir el término **activo** como aquel “*recurso económico controlado por la empresa del que se espera obtener beneficios o rendimientos económicos*”. En consecuencia, se pueden incluir como activos a tener en cuenta en una red de distribución de agua las tuberías, bombas, válvulas, depósitos y demás componentes críticos que facilitan el suministro de agua potable a las poblaciones.

La gestión de activos, o “*Asset Management*” es una técnica de planificación orientada a minimizar los costos de los activos durante toda su vida útil, asegurando un correcto servicio a la población, de manera que se consigue aumentar la disponibilidad y la fiabilidad del servicio, maximizando ingresos y minimizando el coste al reducir el número de averías.

Los planes de gestión de activos deben desarrollarse mediante la combinación de labores de gestión multidisciplinar y actividades de gestión del ciclo de vida del activo con el propósito de obtener la máxima rentabilidad del servicio definido. Por lo tanto, el proceso de gestión del servicio debe estar compuesto por un conjunto de instrumentos financieros, técnicos y de análisis capaces de establecer la relación coste/beneficio, así como de analizar el riesgo que tiene el sistema desde el punto de vista financiero y operacional.

La gestión de activos es imprescindible para llevar a cabo una correcta planificación del mantenimiento, ya que nos permite determinar a largo plazo el costo de sustituir o rehabilitar

una determinada instalación. Es aplicable a cualquier empresa (pública o privada) o servicio municipal que busque minimizar los costes de operación, de mantenimiento y de renovación de sus infraestructuras a los largo de su vida útil. Esto concierne a actividades como redes subterráneas (redes de abastecimiento de agua, redes de saneamiento, gas, telefonía, etc.), infraestructuras viales (autopistas, obras de paso, etc.) y equipos e instalaciones industriales.

### 2.1.1 LOS TRES PILARES DE LA GESTIÓN DE ACTIVOS

En su trabajo “Use and Collection of data in Asset Management” publicado en 2010, Holte establece los tres pilares fundamentales sobre los que se apoya la gestión de activos:

- ❖ **Rendimiento de los activos:** El conocimiento y la comprensión del estado de los activos es un requisito fundamental para la correcta toma de decisiones en materia de sustitución. Cuanto mayor sea la calidad de esta información, mayor será la facilidad para mantener el máximo rendimiento de los componentes y asegurar el mínimo gasto en mantenimiento. El año de puesta de servicio, el historial de intervenciones o el historial de fallos son algunos de los datos que es necesario mantener con el propósito de conseguir que los futuros análisis sean más fiables y de facilitar la localización de los activos críticos.
- ❖ **Evaluación del riesgo:** La predicción del momento en el que el fallo se va a producir y las consecuencias del mismo es esencial en la gestión de activos. El riesgo de fallo se define como la combinación entre la probabilidad de fallo de un elemento y las consecuencias que dicho fallo ocasionan. Los modelos hidráulicos adquieren gran importancia en este aspecto dadas sus capacidades de simulación. Gracias a estas herramientas se pueden realizar simulaciones que pueden ayudar a evitar fallos de carácter hidráulico (motivadas por valores anormales de caudal o presión) o fallos relacionados con la calidad del agua.
- ❖ **Coste:** Para avanzar hacia la sostenibilidad, mantener un sistema rentable y optimizar los costes de operación y mantenimiento, la organización debe de orientarse hacia una política proactiva y abandonar las políticas reactivas. Para cambiar esta forma de actuar es necesario recabar toda la información relacionada con los costes a lo largo de todo el ciclo de vida y conocer los beneficios e inconvenientes de la rehabilitación

frente a la renovación. En definitiva, se trata de controlar el mayor volumen de información que ayude a decidir y justificar las inversiones a realizar

En este contexto, la tecnología ha ayudado a mejorar el proceso de operación de los sistemas de abastecimiento, mejorando la eficiencia y ahorrando costes a la vez que reduce los fallos derivados de los errores humanos.

Por un lado, los **sistemas de supervisión, control y adquisición de datos** (usualmente conocidos como sistemas SCADA) permiten la monitorización de las señales procedentes de los sensores de campo posibilitando la actuación en tiempo real sobre los elementos de la red así como el almacenamiento de históricos para su posterior análisis.

La **modelización matemática** también es importante desde el punto de vista de la gestión de activos pues permite la comprobación de la fiabilidad del suministro al igual que la detección de posibles roturas u otras disfunciones del sistema.

Esta informatización del sistema genera la necesidad de gestionar grandes volúmenes de información (georreferenciada en su mayor parte), por lo que los **Sistemas de Información Geográfica** adquieren gran importancia. Gracias a su capacidad de análisis, las herramientas SIG no solo facilitan la consulta cartográfica, sino que constituyen potentes herramientas capaces de tratar grandes volúmenes de información permitiendo la elaboración de informes sobre consumos, costes de mantenimiento de tuberías, roturas, etc.

Por último, será necesario establecer un sistema de **gestión documental** para la información técnica necesaria referente a los equipos e instalaciones, al histórico de intervenciones, inventario de materiales, órdenes de trabajo, etc. Toda esta información deberá de ser gestionada empleando las herramientas informáticas apropiadas y, en especial, los sistemas **GMAO** (Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador).

### 2.1.2 FASES EN EL PROCESO DE GESTIÓN DE ACTIVOS

Al tratarse de un proceso de planificación y, por lo tanto, de una técnica de toma de decisión basada en un plan, la gestión de activos necesita de una serie de fundamentos para asegurar su correcta aplicación.

Con anterioridad a realizar la gestión, es necesario conocer cuáles son los activos que se tienen y en que condición se encuentran, así como la información relativa al funcionamiento

del sistema con el propósito de identificar las futuras necesidades o deficiencias y programar las rehabilitaciones y sustituciones necesarias para mantener la explotación en su correspondiente nivel de calidad. Por lo tanto, es necesario realizar el **inventario** del sistema y poseer **herramientas** de explotación y control de la red.

Como ya se ha comentado con anterioridad, el aspecto presupuestario es uno de los aspectos más importantes que lleva a la necesidad de establecer un plan de gestión de activos. Por lo tanto, el gestor debe de dar prioridad a sus activos dentro del presupuesto para asegurar la asignación de **fondos necesarios** para llevar a cabo la rehabilitación o reemplazo de los componentes del sistema.

Una vez que se tiene pleno conocimiento del sistema y se conocen los recursos disponibles, se procede al desarrollo, implementación y revisión del **plan de gestión de activos**.

En la siguiente figura se agrupan las etapas principales que debe de integrar cualquier proceso de gestión de activos aplicado a una infraestructura.

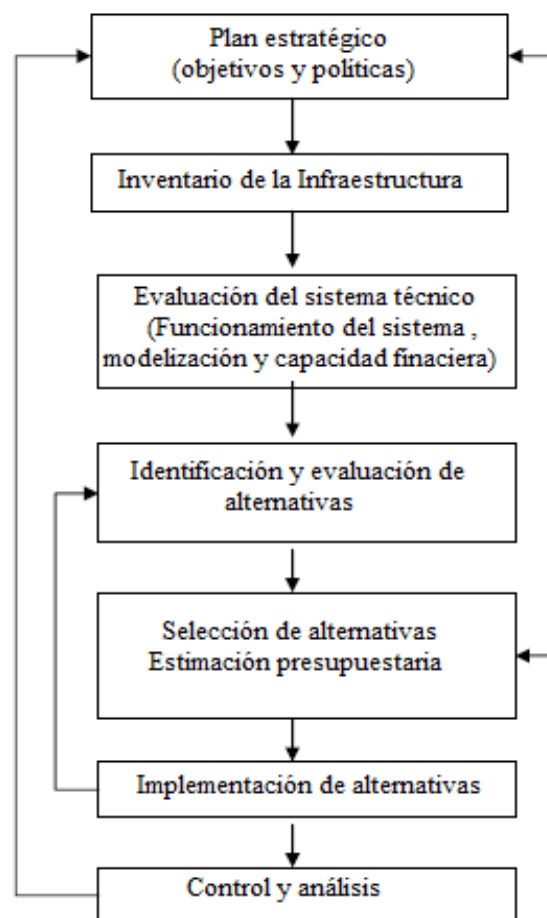


Figura 5. Esquema del proceso de gestión de activos (Fuente: Adaptación EPA)

---

### **Fase I. Plan estratégico**

El primer paso para desarrollar un plan estratégico eficaz consiste en la definición de los objetivos, metas y nivel de funcionamiento que se desea alcanzar. En esta fase es conveniente definir los ideales (cómo debe ser el sistema), los objetivos (de operación y administración) y aspiraciones para el sistema en el futuro.

### **Fase II. Inventario**

El inventario de una infraestructura trata de identificar el conjunto de activos de los que dispone la organización para llevar a cabo sus actividades. Uno de los principales objetivos es conocer el estado en el que se encuentra la red, por lo que se debe de recopilar información acerca de:

- La localización e identificación de los elementos.
- Edad de los componentes.
- Historial de servicio. Actividades de mantenimiento, reparaciones y rehabilitaciones.
- Estimación de la vida útil, considerando la condición actual y su historial de servicio.

El inventario de una red de abastecimiento puede resultar laborioso debido al elevado número de elementos y la gran extensión que se ocupa. El empleo de Sistemas de Información Geográfica permite la elaboración de “mapas inteligentes” en los que se combina la posibilidad de georreferenciar los elementos con la asignación de tablas de atributos, lo que hace de estos programas herramientas muy útiles para constituir el núcleo de la información del sistema.

### **Fase III. Funcionamiento del sistema**

Una parte del proceso de gestión de activos implica la evaluación de las capacidades del sistema en cuestión, lo que permite identificar las deficiencias de la infraestructura, así como las variables y parámetros asociados a su funcionamiento. La evaluación de estas aptitudes incluye:

- Capacidad técnica: Análisis de la infraestructura física y de las capacidades operacionales, que incluye desde las decisiones sobre las modificaciones en el proceso de explotación hasta los conocimientos y cualificación de los operadores del sistema.

- Capacidad de gestión: Evaluación de las capacidades institucionales y administrativas de la organización, lo que permite el análisis de la eficiencia del servicio y del nivel de cumplimiento de las expectativas del cliente.
- Capacidad financiera: Estudio de la capacidad para adquirir y gestionar los recursos financieros de los que la empresa debe disponer para afrontar la explotación del sistema, las reparaciones y mantenimiento de los componentes y las actualizaciones necesarias.

En esta etapa es de vital importancia la modelización, pues permite comprender el funcionamiento de la infraestructura mediante la simulación de su comportamiento, permitiendo identificar las deficiencias y jerarquizar los diversos elementos del sistema con el objetivo de establecer prioridades de actuación.

#### **Fase IV. Evaluación de alternativas**

Una vez que se conocen los objetivos y el funcionamiento del sistema se procede a la evaluación del conjunto de alternativas que conducirán a la organización al cumplimiento de sus propósitos.

La planificación estratégica debe plantear alternativas tanto a largo plazo, como a medio y corto plazo. Esto implica el estudio de opciones que se puedan implementar dentro de la estructura actual del sistema, al igual que alternativas que puedan suponer grandes cambios en la organización.

#### **Fase V. Selección de alternativas**

La selección de alternativas debe de ir precedida de una evaluación a fondo de todas las opciones teniendo en cuenta los impactos económicos, regulatorios y de ejecución a corto, medio y largo plazo.

Las alternativas pueden afectar a ciertos aspectos tecnológicos del sistema (mejora de las herramientas software, inversión en componentes de captura de datos, etc.) o bien, influir en aspectos de la organización. Por lo tanto, puede haber opciones fácilmente implementables mediante modificaciones del entorno de trabajo o modificaciones que supongan una profunda reorganización.



La alternativa óptima será aquella que permita lograr los objetivos propuestos por la organización al menor coste posible.

### **Fase VI. Implementación de alternativas**

El proceso de elaboración de un plan de gestión de activos requiere tiempo y esfuerzo, por lo que con anterioridad a la puesta en ejecución se debe de asegurar el compromiso de todos los involucrados en la ejecución de las opciones (gestores, operadores, etc.) y de todos los afectados por los cambios (clientes, reguladores, etc.).

La implementación de la alternativa seleccionada supone el desarrollo de un plan de actuación que tenga en cuenta:

- Aspectos técnicos: Cambios y formación especial para el personal encargado del sistema.
- Aspectos legales: Obtener los permisos y certificaciones de las autoridades competentes e informar a todas las partes implicadas de los cambios (reguladores, consumidores, administradores, etc.).
- Aspectos financieros: Análisis de los mecanismos de recaudación de fondos y búsqueda de fuentes públicas o privadas para financiar los cambios.

### **Fase VII. Evaluación y control del plan de gestión**

En la implementación del plan de gestión de activos puede haber elementos que no funcionen de la forma esperada o problemas que sugieran acciones adicionales para su solución. También se puede dar el caso en el que se desee realizar cambios en la planificación si los resultados no son los esperados.

En esta etapa son muy importantes las herramientas que nos permitan conocer y evaluar si el sistema está funcionando de la manera que se desea.

### 2.1.3 GESTIÓN DE ACTIVOS APLICADA A SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO

En los siguientes puntos se realiza una adaptación del proceso de gestión de activos enumerando algunas de las posibles actuaciones a realizar en cada una de las etapas:

Fases	Actuaciones
<b>Fase 1:</b> <b>Plan estratégico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Recurso: Asegurar la alimentación de la red en cantidad y calidad suficiente.</li> <li>▪ Operación: Aumentar la fiabilidad de la red con el objetivo de reducir los fallos en la explotación y reducir su impacto en los abonados. Garantizar la calidad del servicio (presión suficiente un puntos de consumo, control de los parámetros que determinan la calidad del agua, etc.).</li> <li>▪ Mantenimiento: Reducir los costes de mantenimiento y reemplazo de los componentes del sistema.</li> </ul>
<b>Fase 2:</b> <b>Inventario</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Identificación de los componentes: Localización de tuberías, depósitos, válvulas, etc. Y recolección de todos los datos correspondientes a su naturaleza (diámetros, materiales, longitud, etc.).</li> <li>▪ Mediciones: Evaluación de los niveles de presión, demanda y parámetros de calidad del agua.</li> </ul>
<b>Fase 3:</b> <b>Funcionamiento del sistema</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Revisión del historial de fallos y fugas.</li> <li>▪ Comprobación de las capacidades de los operadores.</li> <li>▪ Análisis de las quejas de los abonados: Deficiencias en presión y en calidad.</li> <li>▪ Modelización de la red.</li> </ul>
<b>Fase 4 y 5:</b> <b>Evaluación y selección de alternativas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Identificación de aquellos elementos de la red que necesiten tareas de mantenimiento o renovación.</li> <li>▪ Jerarquización de las necesidades de actuación. Mantenimiento correctivo y preventivo.</li> <li>▪ Propuesta de plan de actuación a implementar.</li> </ul>
<b>Fase 6 y 7:</b> <b>Implementación, control y revisión de la propuesta</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Descripción de las etapas en el proceso de implantación del plan de actuaciones donde se incluyan reuniones y trabajos a realizar.</li> <li>▪ Previsión y propuesta de ideas para solventar los problemas potenciales que pueden aparecer durante la implementación del plan.</li> <li>▪ Control de la puesta en ejecución y planificación de las acciones correctivas para solucionar las deficiencias.</li> </ul>

**Tabla 3.** Etapas a seguir en el proceso de instauración de un sistema de gestión de activos en empresa de abastecimiento de agua (Fuente: elaboración propia)

## 2.2 CONSIDERACIONES ECONÓMICAS

El tema económico es uno de los principales avales de un plan de gestión de activos y, por lo tanto, no es menos importante que aquellos aspectos de carácter técnico. Se hace entonces necesario realizar algunas anotaciones someras sobre los aspectos económicos que deben de tenerse en cuenta para llevar a cabo un plan básico de actuación.

Antes de abordar el tema de la inversión es conveniente considerar algunos aspectos relacionados con los costes de los servicios urbanos de agua. Desde el punto de vista económico, el servicio de abastecimiento y saneamiento es un monopolio natural, constituye un bien de primera necesidad y afecta a la gestión de un recurso natural esencial (Ortí *et al*, 2008). Dichas propiedades hacen de este un sector tradicionalmente sometido a una intensa intervención pública y, como consecuencia, al establecimiento y control de las tarifas asociadas al servicio.

En este contexto resulta evidente conocer adecuadamente, antes de afrontar el tema de la inversión, los costes del servicio y la estructura de los mismos para saber las necesidades de financiación del sistema. En su trabajo “Los costes de los servicios urbanos del agua. Un análisis para el establecimiento y control de tarifas”, Ortí *et al* (2008) proponen la siguiente clasificación de costes:

- *Costes de operación y mantenimiento*: Son aquellos costes requeridos para que el servicio sea prestado de forma continuada y en la calidad que el usuario demanda. Entre estos se incluyen el coste de los materiales, personal, reparaciones, mantenimiento, energía, costes administrativos, etc.
- *Coste del capital*. Es aquel generado por la amortización donde se incluyen todos los costes asociados a las inversiones realizadas para la prestación del servicio.
- *Coste ambiental*. Son los costes derivados de los efectos que los usos del agua tienen en el estado de los ecosistemas y se traducen en consecuencias adversas sobre el funcionamiento de los hábitats y en daños ocasionados al recurso. Su determinación se basa en el coste de las medidas necesarias para prevenir, evitar, mitigar o reparar los daños al medio ambiente.

Una vez establecidos los costes, es conveniente realizar un análisis de las inversiones necesarias para asegurar el funcionamiento y calidad del sistema.

El primer paso para entender la importancia de la inversión es definir su concepto. Desde el punto de vista de un economista, el término inversión hace referencia a la aplicación de recursos financieros destinados a la creación, renovación, ampliación o mejora de una empresa (Sabaté, 1986). Por lo tanto, el concepto de inversión se puede asociar a un proceso mediante el cual se aplican ciertos recursos a cambio de expectativas de obtener un beneficio a lo largo de un plazo determinado de tiempo. Ajustándose a la definición desarrollada por Sabaté, las inversiones se pueden clasificar según el esquema representado en la siguiente figura.



**Figura 6.** Tipos de Inversión (Fuente: Alonso, 2010)

De entre la clasificación descrita en la figura, las inversiones con mayor importancia en el ámbito de la gestión de activos son las inversiones productivas y, dentro de estas, las orientadas a la modernización. No hay que olvidar que los planes de gestión de activos buscan mantener en la medida de lo posible el valor de la infraestructura y la calidad del servicio, por lo que las inversiones principales se realizarán en materia de renovación, mantenimiento y modernización del sistema de captación y análisis de información para la toma de decisiones.

El carácter multidisciplinar de la gestión de la infraestructura hace necesaria una labor de cooperación entre diversos departamentos de la organización. Aunque generalmente existe un departamento de contabilidad encargado de los temas económicos, es en última instancia el departamento técnico el que se encarga de fijar las intervenciones. Es por esta razón que debe de existir una fluida comunicación entre todas las secciones de la organización embarcadas

en la operación. Del mismo modo, los gestores técnicos deben de tener conocimiento de los mecanismos y aspectos de la financiación para facilitar la adecuación de los planes de actuación a los recursos disponibles.

## **2.3 SOSTENIBILIDAD**

La aplicación de un modelo de gestión de activos exige un planeamiento adecuado y sostenible. En el ámbito de los abastecimientos de agua, este aspecto adquiere gran importancia dada la repercusión del recurso con el que se trabaja: intereses sociales, impactos medioambientales, aspectos económicos, etc. Por esta razón, el establecimiento de un plan estratégico orientado hacia el desarrollo sostenible resulta fundamental para asegurar el correcto funcionamiento actual y proporcionar una visión futura del sistema.

### **2.3.1 CONCEPTO DE SOSTENIBILIDAD**

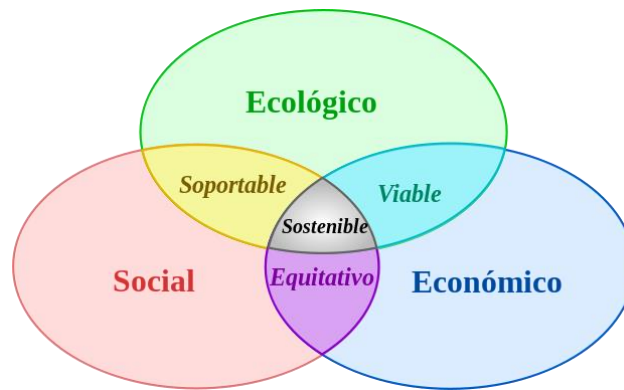
El diccionario de la Real Academia Española define el adjetivo sostenible de la siguiente manera: *“Dicho de un proceso: Que puede mantenerse por sí mismo”*. Para entender la importancia que tiene este término en los sistemas de abastecimiento es conveniente profundizar más en la definición ya que dicho concepto engloba en sí mismo múltiples disciplinas y técnicas que son necesarias para poder llevar esta idea a la práctica pues se encuentra fuertemente relacionada con el avance y el desarrollo futuro.

En el informe *“Nuestro Futuro Común”*, (*Our Common Future*) elaborado por la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y Desarrollo en 1987 se comenzó a plantear la aplicación del concepto sostenible a las políticas de crecimiento como alternativa viable y positiva para el planeta. En este contexto aparece el concepto de desarrollo sostenible como el instrumento a servir de base para asegurar la sostenibilidad y se define como *“aquél desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”*.

En 2002, el Banco Mundial aportó también una definición más práctica del desarrollo sostenible definiéndolo como *“un proceso de administración de una cartera de activos que permita preservar y mejorar las oportunidades que tiene la población. El desarrollo*

*sostenible comprende la viabilidad económica, ambiental y social que se puede alcanzar administrando racionalmente el capital físico, natural y humano”.*

Siguiendo esta última definición pueden establecerse los tres pilares básicos que componen el desarrollo sostenible: El desarrollo económico, el desarrollo social y la protección del medio ambiente.



**Figura 7.** Componentes del desarrollo sostenible (Fuente: Dréo, J)

El **desarrollo económico** implica la formalización de un sistema que satisfaga las necesidades económicas de la población a través del fomento de la inversión, la productividad limpia, la generación de empleo y la distribución equitativa de la riqueza.

El **desarrollo social** hace referencia al desarrollo del capital humano y social. Tiene como objetivo la mejora de la calidad de vida mediante la evolución de las relaciones entre individuos, grupos e instituciones. Para alcanzar este propósito, el desarrollo social debe de buscar la equidad y asegurar el acceso a los servicios básicos (saneamiento, abastecimiento, vivienda, etc.), la justicia social y la información.

La **protección ambiental** viene definida por el conjunto de acciones comprometidas con el medio ambiente y que persiguen el uso racional de los recursos naturales y el respeto al medio ambiente. Entre estas actividades destacan la gestión efectiva de los residuos, la eficiencia energética, la disminución de contaminantes y, en general, aquellas cuyos objetivos son garantizar la persistencia de las especies y mejorar la calidad de vida de las poblaciones.

### 2.3.2 APLICACIÓN A LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO

La sostenibilidad de un abastecimiento de agua se entiende como *“el conjunto metodológico de acciones y normas que conducen a un adecuado manejo técnico, administrativo y legal”*

(Benavides, 2010). Las actuaciones englobadas en este concepto conducen a la correcta toma de decisiones orientadas a mejorar el aprovechamiento del agua y a alcanzar el bienestar económico, social y ambiental, sin lograr comprometer la calidad del ecosistema y cumpliendo en todo momento los requerimientos del usuario.

Por lo tanto, el término sostenibilidad requiere el control adecuado de la fuente de suministro y la búsqueda de una relación ingresos/costes positiva para permitir el mantenimiento e incluso el crecimiento de la organización. Dichos aspectos vienen recogidos en los siguientes puntos (Dourojeanni *et al.* 2002):

- Gestión del recurso a nivel de cuenca y a nivel urbano.
- Gestión de la recuperación de costos.
- Gestión de la oferta y la demanda.
- Gestión de la eficiencia del servicio.



**Figura 8.** Elementos para diagnosticar la sostenibilidad en abastecimientos (Fuente: Benavides, 2010)

Para cada uno de los anteriores criterios de sostenibilidad se pueden encontrar diversos indicadores de gestión. La tabla 4 muestra algunos ejemplos de los mismos.

Sostenibilidad Económica				
Recuperación de costes	Operación y Mantenimiento	Índices financieros	Infraestructura	Equipamiento y personal
<ul style="list-style-type: none"> <li>• % de recuperación de costes               <ul style="list-style-type: none"> <li>· Ingresos por facturación</li> <li>· Costes totales</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Índice de fugas</li> <li>• Número de roturas por longitud de tubería</li> <li>• Número de inspecciones por año</li> <li>• % de información disponible en la base de información-SIG</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• % de liquidez               <ul style="list-style-type: none"> <li>· Ingresos corrientes</li> <li>· Gastos corrientes</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• % de contadores funcionando</li> <li>• % de tuberías renovadas por año</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• % de maquinaria y equipos financiados</li> <li>• Número de empleados por cada X número de abonados</li> </ul>
Sostenibilidad Social				
Cantidad	Calidad	Cobertura	Capacitación	Atención al cliente
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempo acumulado en interrupciones</li> <li>• % de acometidas con presión de servicio inferior al rango normal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nº de muestras para análisis por mes</li> <li>• % de conexiones con cantidad de cloro diferente al rango normal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nº de abonados con conexión al sistema</li> <li>• % de abonados con buen servicio en horas pico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nº de horas de capacitación invertidas en técnicos y administradores.</li> <li>• Nº de horas de campaña de concienciación del consumo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempo que tarda la empresa en responder quejas de abonados</li> <li>• Infraestructura de atención al cliente</li> </ul>
Sostenibilidad Ambiental				
Extracción	Consumos	Contaminación	Cuenca fuente	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• % agua captada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Promedios de consumo por conexión y mes</li> <li>• Aprovechamiento del recurso               <ul style="list-style-type: none"> <li>· Volumen perdido</li> <li>· Volumen extraído</li> </ul> </li> <li>• Consumo energético del abastecimiento por mes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• % de lodos y desechos generados por el sistema de potabilización que se vierten sin depuración por mes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• % de industrias que funcionan dentro de la cuenca tributaria que depuran sus vertidos</li> <li>• % del ingreso recaudado por venta de agua destinado a adquisición y conservación de cuencas tributarias</li> </ul>	

**Tabla 4.** Ejemplos de indicadores de gestión relacionados con la sostenibilidad de un abastecimiento (Benavides, 2010)



---

## 2.4 HERRAMIENTAS INVOLUCRADAS EN LA GESTIÓN DE ACTIVOS

El objetivo de un sistema de gestión de activos es reducir al mínimo el coste de poseer, operar, mantener y sustituir el activo al mismo tiempo que se garantiza la entrega del recurso de forma fiable y sin interrupciones.

Para lograr estos fines, un sistema orientado a la gestión de activos debe de satisfacer las siguientes necesidades:

- **Monitoreo y predicción de la condición de los activos.** Las condiciones actuales de los activos físicos, junto con las tendencias de las condiciones de deterioro son medidas importantes que se emplean para planificar las tareas de rehabilitación y renovación. Dentro de este contexto, los sistemas de supervisión y adquisición de datos (SCADA) y los modelos de simulación hidráulica resultan de gran utilidad para satisfacer estos requisitos de información.
- **Gestión eficaz del mantenimiento.** Se debe de garantizar el correcto mantenimiento de todos los elementos del sistema intentando reducir al mínimo el gasto. El paso de una política reactiva a una activa resulta muy importante para lograr este propósito. Dentro de la gestión del mantenimiento también se incluyen las operaciones de rehabilitación o renovación de los activos encaminados a extender la vida útil de los mismos.
- **Planificación financiera efectiva.** Un sistema de gestión de activos debe de controlar todos los recursos financieros orientados al mantenimiento, rehabilitación o reemplazo de los componentes de la red.

En resumen, la gestión de activos es un proceso técnico y económico en el que se requiere información de numerosas partes de la organización. La Tabla 5 muestra las principales funciones de las herramientas que forman el sistema de gestión de activos orientado a una empresa de abastecimiento de agua.

Herramienta	Funciones
<b>Sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Registro y monitorización del estado de los componentes.</li> <li>• Posibilidad de actuación sobre los elementos en tiempo real.</li> <li>• Almacenamiento de las señales registradas.</li> </ul>
<b>Sistema de Información Geográfica (SIG)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proporcionar la ubicación de los activos.</li> <li>• Consulta de las características de los elementos y del resto de información asociada al SIG y elaboración de informes.</li> <li>• Comprobación de polígonos de corte y posibilidades de suministro alternativo ante una avería.</li> <li>• Apoyo en la elaboración de modelos de simulación hidráulica.</li> </ul>
<b>Modelo de Simulación Hidráulica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realizar estimaciones de la capacidad de los sistemas con valores de consumo reales o previstos.</li> <li>• Comprobación de la fiabilidad y calidad del suministro.</li> <li>• Detección de anomalías, roturas y resto de disfunciones.</li> <li>• Entrenamiento de operadores ante situaciones de alerta.</li> </ul>
<b>Modelos de ayuda a la decisión</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluación de la red según diferentes criterios: funcionamiento de la red, deterioro de los elementos, etc.</li> </ul>
<b>Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador (GMAO)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proporcionar información sobre el coste de mantenimiento de los activos.</li> <li>• Proporcionar el historial de mantenimiento de cada elemento.</li> <li>• Gestionar las órdenes de trabajo.</li> </ul>
<b>Sistema de Información Financiera (SIF)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proporcionar el coste de la gestión de activos (incluidos el trabajo, los gastos de funcionamiento, etc.).</li> <li>• Proporcionar información sobre el coste de los proyectos.</li> </ul>
<b>Sistemas de Gestión de Bases de Datos (SGBD)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mantener y dar acceso a los datos históricos.</li> <li>• Proporcionar herramientas y capacidades de análisis.</li> <li>• Proporcionar información para apoyar las decisiones.</li> </ul>

**Tabla 5.** Herramientas involucradas en la gestión de activos de un sistema de abastecimiento (Fuente: adaptado de McKibben & Davis, 2002)

Dichas tecnologías servirán de soporte en cada una de las fases del proceso de gestión de activos, sobre todo en las etapas de inventario, análisis del funcionamiento del sistema y evaluación y selección de alternativas.

- ❖ **SCADA:** Facilitará las mediciones a realizar en la fase de inventario así como el análisis del funcionamiento del sistema (registro de fallos, comprobación de los indicadores de operación, etc.). Gracias a sus capacidades de monitorización y actuación en tiempo real también permitirá el proceso de identificación de los elementos que requieran intervención.
  
- ❖ **Sistema de Información Geográfica:** Una de las funciones más fácilmente atribuibles a los SIG es su empleo en la elaboración del inventario de la red y su posterior representación gráfica. Sin embargo, resultaría erróneo pensar que sus capacidades se limitan a estas acciones. Gracias a su poder de análisis y su capacidad de integración con el resto de herramientas, los SIG pueden emplearse tanto en la fase de análisis del funcionamiento del sistema (elaboración de informes, confección de polígonos de corte, etc.) como en la evaluación y selección de alternativas, pues permiten el almacenamiento y conversión de toda la información referente a los distintos activos para su posterior consulta, lo que facilita el establecimiento de las actuaciones a realizar.
  
- ❖ **Modelos matemáticos:** La función principal de estas herramientas es el análisis del funcionamiento del sistema, tanto en la situación actual como en previsiones futuras, pues permite la simulación con valores reales así como con valores previstos. Dicha capacidad de simulación también facilita la evaluación y selección de alternativas pues permite analizar los efectos de las actuaciones planificadas en los principales indicadores de operación.
  
- ❖ **Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador:** Cumplen una función fundamental en las fases de evaluación y selección de alternativas así como en la fase de implementación del plan de actuación, pues dichas herramientas se encargan de gestionar todos los aspectos relativos al mantenimiento de los activos (organización del mantenimiento preventivo, gestión de órdenes de trabajo, elaboración del historial de intervenciones, etc.).

Además de esta introducción a las funciones de cada una de las herramientas, a lo largo de todo el trabajo se profundizará en las características y funciones que cada una aporta en la gestión del servicio de abastecimiento.



# CAPÍTULO 3. SUPERVISIÓN, CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS. SCADA

## 3.1 ESTRUCTURA DE UN SISTEMA SCADA

En la actualidad, resulta imposible garantizar el suministro de agua sin pensar en equipos que proporcionen información en tiempo real de las instalaciones del sistema.

Usualmente, la operación de los sistemas de distribución se fundamenta en una serie de índices entre los que se pueden destacar la presión, el caudal y nivel de agua, o una combinación de los mismos. De acuerdo con ello, para garantizar que la red actúa de forma adecuada es imprescindible disponer de herramientas que permitan medir, registrar y almacenar en todo momento la información relativa a los parámetros que sirven de base de operaciones.

Los servicios de distribución de agua utilizan normalmente operadores humanos para monitorizar el estado del sistema. Para saber si la red se encuentra operando de forma aceptable, los operadores deben de tener información en tiempo real sobre los principales índices o parámetros de operación. En la mayor parte de instalaciones, esta información es suministrada por los sistemas SCADA.

El término SCADA es el acrónimo inglés de *Supervisory Control And Data Acquisition* (Supervisión, control y adquisición de datos). Básicamente, un SCADA es un conjunto de herramientas que permite monitorizar y controlar el comportamiento del sistema desde un lugar remoto, logrando la conexión entre los dispositivos de campo y una estación central.

A continuación, se enumeran los principales componentes de un sistema de Supervisión, Control y Adquisición de datos:

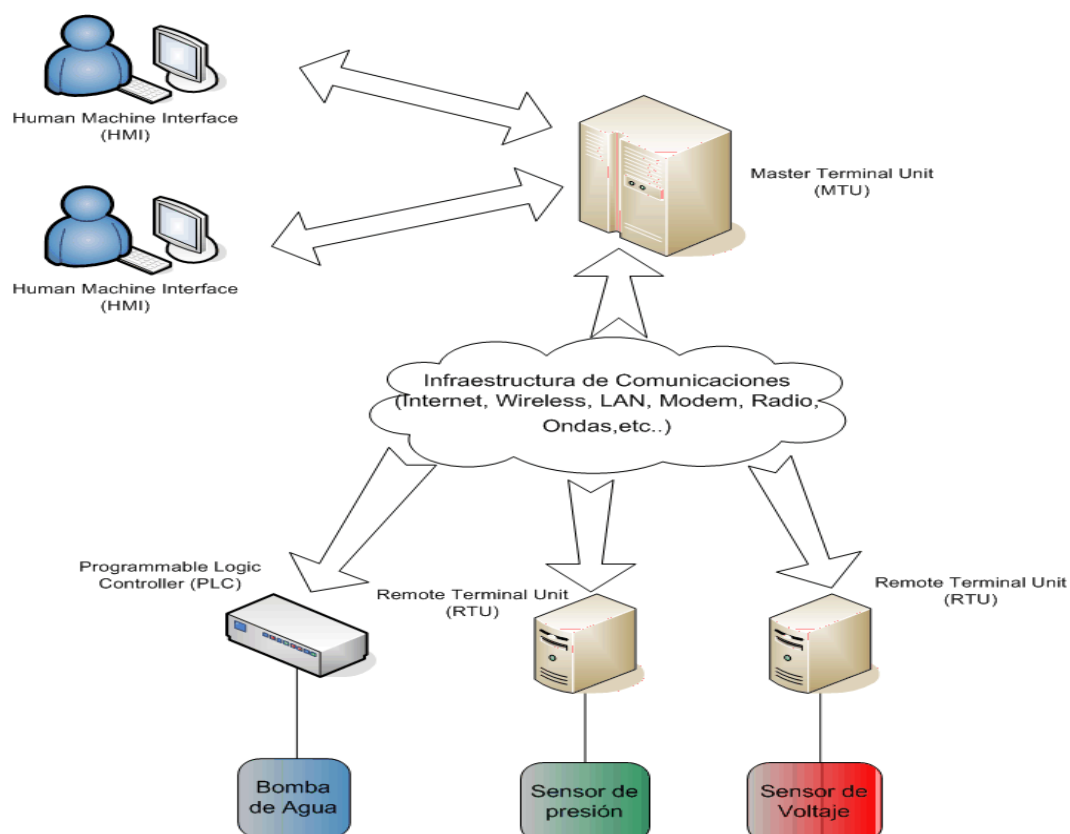
- Instrumentación de campo. Incluye los sensores y los dispositivos de registro y procesamiento de datos.

- Sistemas de comunicación para establecer los enlaces entre los instrumentos de campo y el puesto de control central.
- Sistemas software y hardware que posibilita a los operadores la monitorización y control remoto del sistema.

Siguiendo la clasificación de componentes anterior se pueden diferenciar claramente los tres bloques fundamentales que conforman un sistema SCADA:

- I. El sistema de detección de variables y acción de comando.
- II. El sistema de transmisión de señales.
- III. El sistema de control y automatización

La Figura 9 presenta un esquema general de los elementos individuales hallados en un sistema SCADA típico usado en un servicio de distribución de agua.



**Figura 9.** Arquitectura de un sistema SCADA. (Fuente: Internet Security Auditors)

Gracias a la conexión e interoperabilidad de este conjunto de herramientas, un sistema SCADA de una red de distribución de agua permite, entre otras cosas (Font, 1997):

- Determinación de consumos por zonas.
- Información en tiempo real del estado del sistema.
- Actuaciones automáticas.
- Detección rápida de averías.
- Historial de funcionamiento de la red.
- Posibilidad de supervisión y mejora del funcionamiento del sistema.
- Posibilidad de controlar la red de modo optimizado.

En los siguientes apartados se describen cada uno de los eslabones que forman la cadena de monitorización y control del sistema en tiempo real.

## **3.2 INSTRUMENTACIÓN,                      SENSORES                      Y COMUNICACIÓN EN CAMPO**

### **3.2.1            SENSORES**

El objetivo de los sensores es recaudar información sobre el estado del sistema mediante la medida de los principales parámetros que intervienen en el funcionamiento. Aunque las variables hidráulicas por excelencia son el caudal y la presión, un sistema de control de una red de distribución debe captar información de otras variables no relacionadas directamente con la mecánica del fluido como por ejemplo la turbidez, concentración de cloro, consumo eléctrico, etc.

Una clasificación adecuada consiste en discriminar los instrumentos en función del parámetro sobre el que realizan la medida. Siguiendo este criterio se pueden diferenciar los siguientes grupos de sensores:

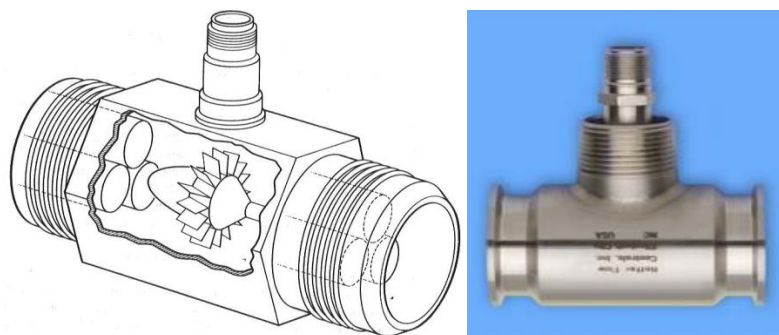


## ○ CAUDAL

El caudal es uno de los principales índices de operación en los sistemas de abastecimiento. Entre los sensores para la medición de este índice se pueden diferenciar:

- *Caudalímetros mecánicos*: La medida del caudal se basa en la transformación del flujo de agua en movimiento de un eje.

Un ejemplo de esta tipología son los caudalímetros mecánicos de molino. Están provistos de un molino cuyas aspas se encuentran en una posición transversal respecto a la circulación del fluido. El flujo hace girar el molino cuyo eje mueve un contador que acumula lecturas.

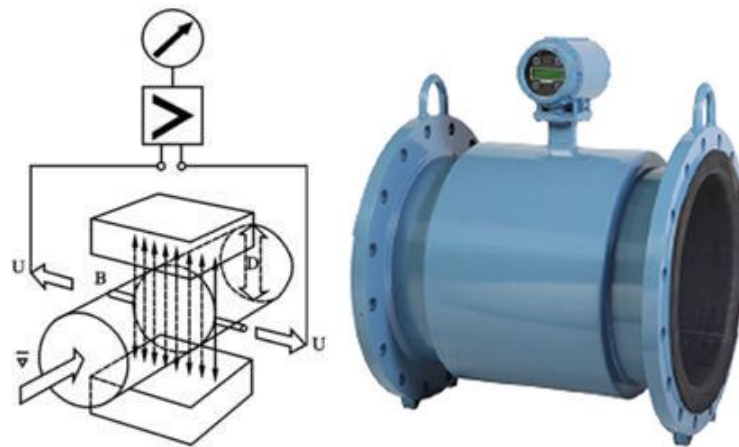


**Figura 10.** Caudalímetro mecánico de molino o turbina (Fuente: Hoffer Flow Controls, INC)

- *Caudalímetros electromagnéticos*: Este tipo de sensores están basados en la Ley de Faraday. El componente principal es el carrete, a través del cual se hace pasar una corriente eléctrica, que junto al flujo del agua, induce la formación de un campo magnético. El caudal se obtiene mediante la transformación de la corriente inducida en el carrete y el flujo de agua a través del mismo.

Cuando el fluido pasa a través del campo magnético de forma perpendicular a la dirección del flujo, los conductores eléctricos generarán voltaje en proporción a la velocidad media del agua. Dichas señales son detectadas inicialmente por dos postes, y transmitidas a un amplificador a través de un cable donde finalmente se convierte en una señal unificada de salida.

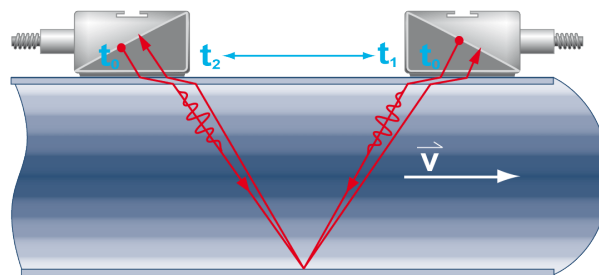
Este tipo de medidores son muy precisos, especialmente para diámetros de conducción pequeños. Sin embargo, para diámetros mayores presentan el inconveniente de requerir carretes de características especiales.



**Figura 11.** Principio de funcionamiento y ejemplo caudalímetro electromagnético (Fuente: Emerson Process Management)

- *Caudalímetros ultrasónicos:* Su principio de funcionamiento se basa en la velocidad de propagación a través de un fluido en movimiento. Existen principalmente dos tecnologías de medición:

Por un lado se encuentran los caudalímetros basados en el *tiempo de tránsito*, que miden la diferencia de tiempo entre la recepción del pulso a favor del flujo y el dirigido en dirección opuesta. En estos equipos es muy importante determinar la sección de la tubería y la estimación de la velocidad de propagación, puesto que la diferencia de tiempo se ve influida por dichos factores.



**Figura 12.** Principio de funcionamiento de caudalímetros basados en el tiempo de tránsito (Fuente: FLEXIM)

Los caudalímetros basados en la *diferencia de frecuencias* realizan la medición basándose en la diferencia de frecuencias del pulso, presentando la ventaja de no verse influidos por la velocidad del sonido en el seno del fluido.

Además de las dos principales técnicas, existen otros tipos de caudalímetros ultrasónicos basados en la desviación del haz de sonido, o en el efecto Doppler.

## ○ PRESIÓN

Los sensores de presión, también llamados transductores de presión, son instrumentos que transforman la magnitud física de presión en otra magnitud eléctrica (midiendo la variación en la resistencia eléctrica) o capacitiva (variación de la capacidad). Entre los medidores de presión más comunes se encuentran:

- Los *transductores capacitivos* están basados en la deformación que la presión del fluido provoca en un elemento elástico (diafragma) que se encuentra acoplado a las placas de un condensador. El movimiento del diafragma altera la separación de dichas placas induciendo una variación de su capacidad, de modo que al aplicar una corriente alterna, la intensidad que recorre el condensador será proporcional a la capacidad de este.



**Figura 13.** Sensor de presión capacitivo (Fuente: VEGA Instrumentos S. A)

- Los *transductores de galgas extensiométricas* se basan en la deformación de un hilo conductor que al variar sus dimensiones modifica su resistencia eléctrica, asociando la intensidad de la corriente a la presión.
- Los *transductores piezoeléctricos* utilizan cristales piezoeléctricos capaces de generar una señal eléctrica cuando se les aplica una presión.

Uno de los apartados más importantes es la señal de salida del transductor. Se utilizan generalmente tres tipos de señal: en milivoltios, voltios u miliamperios. Dicha señal es recogida por amplificadores que ajustaran sus características dependiendo de los requerimientos de la aplicación, la distancia de transmisión y de la precisión.

○ **NIVEL**

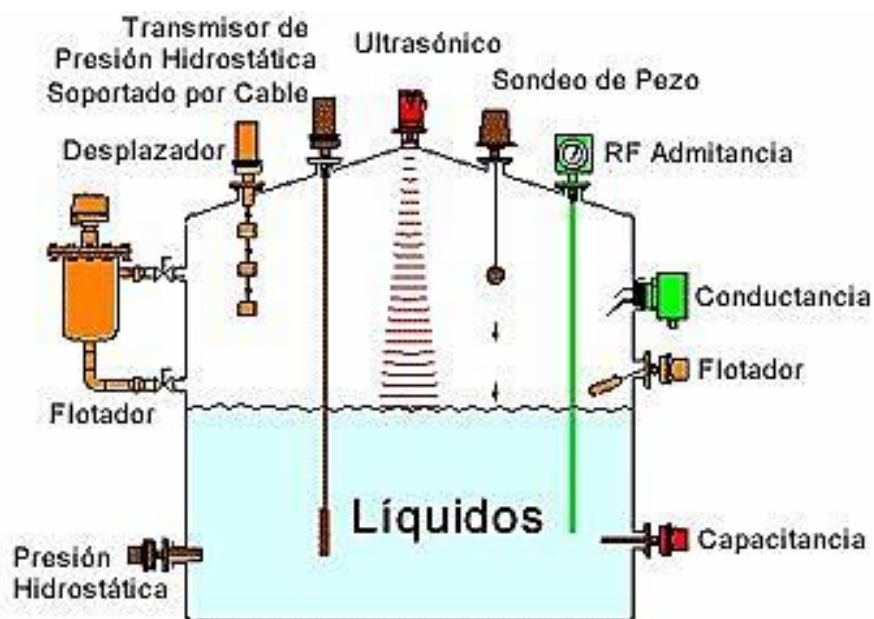
Este tipo de sensores se emplean fundamentalmente en depósitos y cántaras de bombeo. En cuanto a su tipología destacan:

- Sensores de *medida directa*, compuestos principalmente por boyas o flotadores que transmiten directamente el nivel, ya sea a un elemento correctamente graduado o transformando la posición del elemento flotante en una señal eléctrica a través de un potenciómetro.

Este tipo de medidores de nivel puede verse influenciado por las oscilaciones en el elemento de almacenamiento, aunque presenta la ventaja de ser invulnerable por las perturbaciones radioeléctricas.

- Sensores de *medida de la presión estática*, compuestos por sensores de presión instalados en un determinado nivel del depósito, que se elige como referencia. Este tipo de sensores se basan en el principio de que la presión en un punto debido a una columna de líquido es proporcional a la densidad del fluido y a su altura, de modo que conociendo la presión mediante un manómetro, se puede conocer la altura en el depósito.
- Sensores de *medida por ultrasonidos*, que basan su funcionamiento en la reflexión de un impulso ultrasónico en una superficie reflectante, midiendo el retardo entre la emisión y recepción del eco.

En la Figura 14 se presentan los principales métodos de medición del nivel en depósitos.



**Figura 14.** Instrumentación para la medición y el control del nivel en depósitos (Fuente: ANTECH)

#### ○ OTROS EQUIPOS

- *Sensores complementarios en bombas:* Medidores de temperatura y detectores de vibraciones para controlar el funcionamiento de estos equipos.
- *Características fisicoquímicas del agua:* Existen una gran cantidad de sensores para medir tanto las propiedades físicas (turbidez, conductividad, etc.) como las propiedades químicas (pH, etc.) del agua en puntos estratégicos de la red.
- *Sensores de cloro:* Mediante estos equipos se deben de controlar las concentraciones de cloro en depósitos y en puntos estratégicos de la red. La presencia de este elemento en el agua es muy importante dada su aptitud de actuación como agente desinfectante y oxidante, así como su capacidad de persistencia como bactericida de amplio espectro (presenta una acción desinfectante frente a muchos tipos de bacterias y microorganismos). Es por esta razón que resulta fundamental asegurar el control de sus concentraciones a lo largo de la red.

### 3.2.2 INSTRUMENTACIÓN DE REGISTRO Y PROCESAMIENTO

El propósito de estas herramientas es recoger información sobre el estado de la red con el objetivo de transmitir los datos a un puesto de control centralizado. Tal instrumentación puede incluir:

- **Controladores Lógicos Programables**

Más conocidos por sus siglas en inglés PLC (*Programmable Logic Controller*). Se trata de un equipo electrónico instalado para automatizar ciertos procesos. Incluye un software específico que contiene la secuencia de operaciones a realizar, de modo que su funcionamiento es de tipo secuencial y cíclico, es decir, las actuaciones se realizan una tras otra y se van repitiendo continuamente.

Entre sus principales funciones destacan el control de secuencias lógicas, funciones de temporización y medición, control analógico, realización de operaciones aritméticas y manejo de la información. Además, sirven de interfaz de datos entre los sensores de campo y el sistema de supervisión.

A continuación se especifican algunas de sus principales ventajas:

- Modularidad, que permite su ampliación según aumentan las necesidades.
- Resistencia para garantizar el funcionamiento en condiciones adversas.
- Capacidad para implementar secuencias de automatización.
- Amplia gama de modelos, lo que permite un alto grado de adaptación a los objetivos propuestos.



**Figura 15.** Controlador Lógico Programable (PLC) (Fuente: Siemens)

---

- **Unidades Terminales Remotas**

También conocidas como Estaciones Remotas (ER) o por sus siglas en inglés (RTU, *Remote Terminal Units*) son equipos que se encargan de recibir y tratar las señales procedentes de los distintos dispositivos de medida, así como de enviar estas señales al Puesto de Control. Su principal función es hacer de interfaz entre el sistema de adquisición de datos y el puesto de supervisión.

Estos equipos se encuentran instalados en localidades remotas con la función de realizar la recopilación de datos y permitir la codificación de estos en formatos que le permita transmitirlos hacia una estación central (*Master Terminal Unit*, MTU) u otra RTU. Una RTU también recibe información desde la estación central, decodifica los datos enviados y posibilita la ejecución de órdenes enviadas desde la misma.

Con el propósito de realizar dichas funciones, estos dispositivos están equipados con canales de entrada para detección o medición de las variables de un proceso, canales de salida para control o activación de actuadores y alarmas, y un puerto de comunicaciones.

Por lo tanto, una unidad terminal remota tiene la capacidad de monitorear un número de entradas y salidas relacionadas con un proceso, analizar y mantener datos en tiempo real, ejecutar algoritmos de control programados por el usuario y comunicarse con la estación de control.

Al tratarse de pequeños computadores, los principales componentes del hardware de una RTU son:

- CPU y memoria volátil (RAM).
- Memoria no volátil para grabar programas y datos (ROM).
- Capacidad de comunicaciones a través de puertos seriales o, a veces, con módem incorporado.
- Fuente de alimentación segura (con salvaguardia de batería).
- Protección eléctrica contra fluctuaciones en la tensión.

En el pasado, las RTU se empleaban generalmente para recolectar datos de campo y enviarlos a un ordenador central ya que sus capacidades de control en tiempo real eran limitadas,

mientras que los PLC se utilizaban para realizar controles localizados (sus capacidades de recolección y almacenamiento de datos eran reducidas).

Actualmente, las capacidades de ambos dispositivos están convergiendo de modo que proporcionan una función similar. Adicionalmente, un PLC puede ser conectado a un RTU a través de cableado de señales analógicas y digitales desde el sistema de control o a través de un puerto de transmisión de datos.

- **Data-Loggers**

Equipos que incorporan un microprocesador con una cierta capacidad de memoria para el almacenamiento de una variable. La evolución de estos dispositivos ha incorporado dentro del diseño del microprocesador un convertidor Analógico/Digital, por lo que pueden almacenar tanto variables analógicas como digitales.

Estos dispositivos registran uno o varios parámetros de interés en un intervalo de tiempo predeterminado, del orden de minutos. Conforme la información es almacenada, generan un fichero de datos que se transmite periódicamente a la estación central.

En la mayoría de los casos se alimentan con grupos de pilas alcalinas garantizando una autonomía que puede llegar a los 5 años, lo que permite el registro de datos incluso en lugares de acceso complicado en los que no se dispone de red eléctrica.



**Figura 16.** Data Logger NEMOS LP (Fuente: MICROCOM)



### 3.2.3 SISTEMAS DE COMUNICACIÓN

El siguiente eslabón de la cadena es transmitir la información recopilada por los instrumentos de campo a un ordenador central. Este paso es una parte fundamental en todo proyecto de control de una red puesto que la ubicación de los dispositivos de medida y registro de los parámetros hidráulicos se encuentra a grandes distancias del puesto central de control, siendo necesarios sistemas de comunicaciones para establecer las conexiones necesarias.

A continuación se describen ciertos conceptos relacionados con los sistemas de comunicación.

#### 3.2.3.1. MODOS DE COMUNICACIÓN

Un apartado importante en el proceso de comunicación entre la estación remota y el puesto central es el momento en el que esta se produce. Dicho instante dependerá principalmente de las características de la información que se comunique así como de la prioridad de esta.

Ante esta cuestión se presentan diversas formas para solucionar el establecimiento de la conexión (Font, 1997):

- **Comunicación continua.** Es aquella que tiene lugar en tiempo real y sin interrupciones mediante la actualización de manera continuada. Su principal inconveniente es la gran cantidad de información a transmitir por lo que usualmente se emplea en distancias medias y cortas.
- **Comunicación por evento.** Es aquella que se produce cuando se dan un conjunto de circunstancias que obligan a conectar de manera inmediata a las estaciones y al puesto de control. Suele ocasionarse ante situaciones anómalas o alarmas con el objetivo de corregir el problema y evitar daños o deterioros en la red.
- **Comunicación periódica.** Aquella que se establece en intervalos de tiempo preestablecidos.
- **Comunicación por muestreo.** Es el modo de comunicación más habitual. Se produce cuando el puesto central establece la conexión con cada una de las estaciones remotas por turnos o periódicamente. Aunque la periodicidad en la obtención de los datos la hace similar al modo de comunicación periódica, la principal diferencia entre ambas tipologías radica en la posibilidad que la comunicación por muestreo presenta para

alterar el periodo de comunicaciones, de modo que desde el puesto de mando se puede modificar el turno de conexión para establecer contacto con cualquiera de las unidades remotas.

Como se puede observar, cada una de las formas de establecer la comunicación es idónea para la recolección de algún tipo información, por lo que cada una de ellas presenta una serie de ventajas y características que facilitan el control en determinadas circunstancias. Como consecuencia, lo ideal será disponer de una combinación de los distintos tipos en función de los requerimientos que el sistema presente.

### 3.2.3.2. MEDIOS DE COMUNICACIÓN

Puesto que las distancias entre el conjunto de componentes que forman la red son importantes, las comunicaciones suelen presentar serios problemas cuya solución no es del todo fácil. Estas distancias pueden variar entre algunos cientos de metros y decenas de kilómetros (como en el caso de las instalaciones de producción).

Ante dicha problemática, los sistemas SCADA incorporan una gran variedad de posibles medios de comunicación (entendiendo este concepto como el soporte físico de la comunicación de datos), entre los que destacan:

- **Comunicaciones cableadas**

Se incluyen en este grupo tanto las conexiones por cable eléctrico como la fibra óptica.

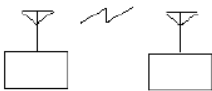
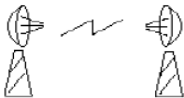

En el caso del cable eléctrico, el medio físico empleado está compuesto por un conjunto de hilos conductores dispuestos en diferentes configuraciones en función de la aplicación (trenzado, coaxial, apantallado, etc.), mientras que en caso de la fibra óptica se utiliza un núcleo de material transparente (cristal o plástico) empleado para guiar señales luminosas a través de su interior.

El principal inconveniente de este tipo de medio de comunicación es la necesidad de realizar el tendido de los cables, a lo que hay que sumar las labores de mantenimiento derivadas de su instalación. Por este motivo, su uso es poco habitual en sistemas de redes de abastecimiento de agua.

○ **Comunicaciones por radio-frecuencia**

Constituye una de las soluciones más comúnmente empleadas para solucionar las comunicaciones y se caracteriza por establecer las conexiones a través de señales de radio en sus múltiples frecuencias. Entre los soportes más empleados dentro de esta tipología se encuentran:

- *UHF/VHF*. La comunicación se establece mediante la transmisión de ondas electromagnéticas de alta frecuencia gracias a un conjunto de transmisores y antenas especiales.
- *Microondas*. Emplea señales de radio con frecuencias superiores al Gigahercio. Presenta una serie de diferencias respecto a las ondas de radio tradicionales entre las que destacan el uso de antenas de tipo parabólico, la necesidad de enlaces a la vista (supone la instalación de repetidores para salvar obstáculos) y la sensibilidad ante los agentes atmosféricos.
- *Satélite*. Emplea señales de alta frecuencia. El satélite se encarga de la recepción, acondicionamiento y reenvío de la información. Constituye un sistema de comunicación de alta calidad y destaca por presentar unos niveles de seguridad muy elevados.

	 <p>VHF/UHF</p>	 <p>Microondas</p>	 <p>Satélite</p>
<b>Ventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zonas no accesibles por vía telefónica</li> <li>• Tiempos de retraso mínimos</li> <li>• Gasto inicial menor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conexiones de larga distancia.</li> <li>• No hay retrasos apreciables.</li> <li>• Posibilidad de alquilar canales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enlace a casi cualquier lugar de la Tierra.</li> <li>• Alta fiabilidad y seguridad.</li> </ul>
<b>Desventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necesidad de repetidores</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enlaces a la vista.</li> <li>• Susceptible a los agentes atmosféricos.</li> <li>• Gasto inicial grande.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Retrasos en las transmisiones.</li> <li>• Elevado coste inicial.</li> </ul>
<b>Equipo necesario</b>	Transmisores, receptores, antenas y repetidores.	Transmisores, receptores, antenas parabólicas y repetidores.	Canal de acceso al satélite, transmisores y antenas parabólicas

**Tabla 6.** Principales diferencias entre los medios de radio. (Fuente: adaptado de Synchrony Inc.)

○ **Líneas telefónicas**

Una tercera posibilidad es el empleo de la red de telefonía en sus dos posibles variantes: la línea telefónica (dedicada o no) o la telefonía móvil.

En el caso de la línea telefónica conmutada la red de acceso es proporcionada por una compañía telefónica. Esta opción resulta viable económicamente cuando el número de conexiones es pequeño por lo que su empleo se reserva en general para la instalación de sistemas redundantes orientados a solucionar fallos de comunicación.

Una variante de la comunicación por vía telefónica es el uso de líneas de telefonía privadas y dedicadas (también conocidas por sus siglas en inglés PLL, *Private Leased Line*). En este tipo de sistemas la comunicación entre los componentes es permanente y se encuentra disponible las 24 horas del día. Su coste inicial es elevado pero el coste de operación es el menor de todos pues presenta una comisión nula.

Un inconveniente para emplear esta tecnología sería la inexistencia de servicio telefónico justo en el sitio donde están ubicados los componentes. Este problema se soluciona si la zona está dentro de la cobertura de una de las redes de telefonía móvil. De ser así se recurre entonces a éstas en sus distintas variantes: GPRS, UMTS, etc.

### **3.2.4 UNIDAD TERMINAL MAESTRA**

La Unidad Terminal Maestra, también conocida como MTU (*Master Terminal Unit*), es el elemento central de un sistema de control y adquisición de datos. Generalmente se compone de un computador de altas prestaciones que contiene programas específicos para llevar a cabo cada una de las tareas necesarias.

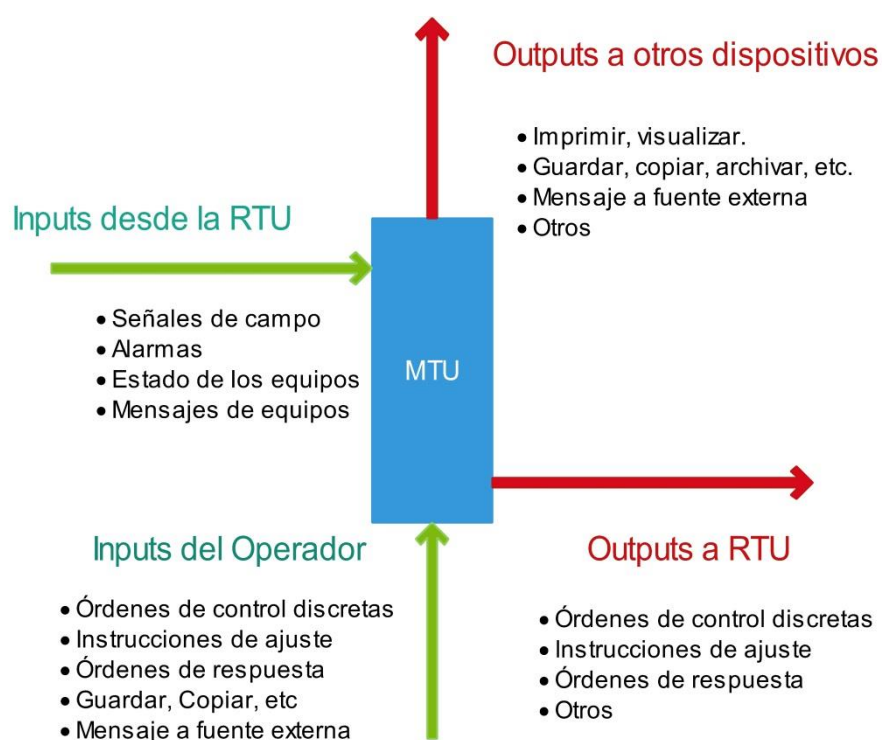
Se encarga de supervisar y recaudar la información de la instrumentación de campo así como del almacenamiento y procesamiento de los datos recogidos de forma que otra aplicación pueda acceder a dicha información.

Entre sus principales funciones destacan:

- Realiza la recolección de datos procedentes de las unidades remotas.
- Interroga periódicamente a las RTU y les transfiere los comandos a implementar bajo un esquema maestro-esclavo en el que la transferencia de datos se inicia por la MTU.

Se encarga de la transferencia de datos hacia y desde otros sistemas corporativos para, por ejemplo, el procesamiento de órdenes de actuación, almacenamiento, actualización de bases de datos, etc.

- Analiza los datos recogidos de las RTU para ver si han ocurrido condiciones anormales y alertar a personal de operaciones sobre las mismas.
- Desempeña labores de seguridad, como el control de acceso a los distintos componentes del sistema.
- Agrega nuevas estaciones, puntos, gráficos, puntos de cambio de alarmas, y en general, reconfigura el sistema.



**Figura 17.** Inputs y Outputs de una Unidad Terminal Maestra (Fuente: adaptación de Ezell, B)

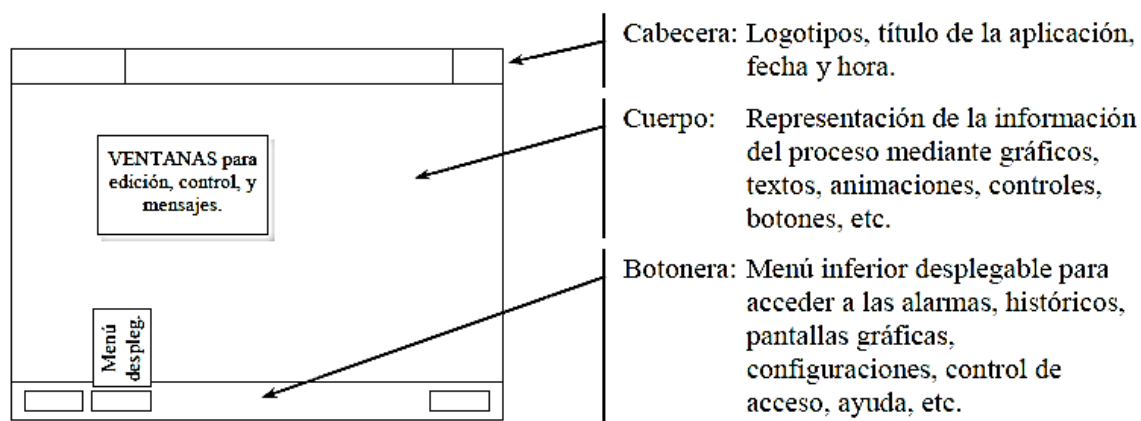
### 3.2.5 INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA

En cualquier sistema SCADA de un abastecimiento de agua es necesario monitorizar la información procedente de los sensores de campo para llevar a cabo un correcto control sobre la red. Como su propia definición indica, una interfaz es la “*zona de comunicación o acción de un sistema sobre otro*”, por lo que aplicando esta descripción al sistema de operación en tiempo real, se puede entender el término Interfaz Hombre-Máquina como el punto de acción en el que el operador entra en contacto con el sistema permitiendo la monitorización visual de este.

La información se facilita a través de paneles de control, campos de visualización o por medio de software con el objetivo de permitir a los operadores del puesto central recopilar datos de la red y controlar las principales unidades de campo.

En general, las pantallas de sinópticos están constituidas por un fondo fijo y varias zonas activas que cambian dinámicamente según los valores representados o en respuesta a las acciones del operador.

Toda interfaz presenta una serie de elementos comunes cuya configuración general se presenta en la siguiente figura.



**Figura 18.** Elementos comunes en las interfaces de un sistema SCADA (Fuente: Damas, 2000)

Tanto la cabecera como la posible botonera inferior permanecerán visibles y disponibles en cualquier momento y situación, pues a través de ella se permite acceder a las funciones más

relevantes del sistema. La parte central de la pantalla se emplea para la representación de la información monitorizada mediante gráficos, textos o animaciones.

A continuación se muestran diversas imágenes de ejemplos de Interfaz Hombre-Máquina empleados por empresas de distribución de agua.

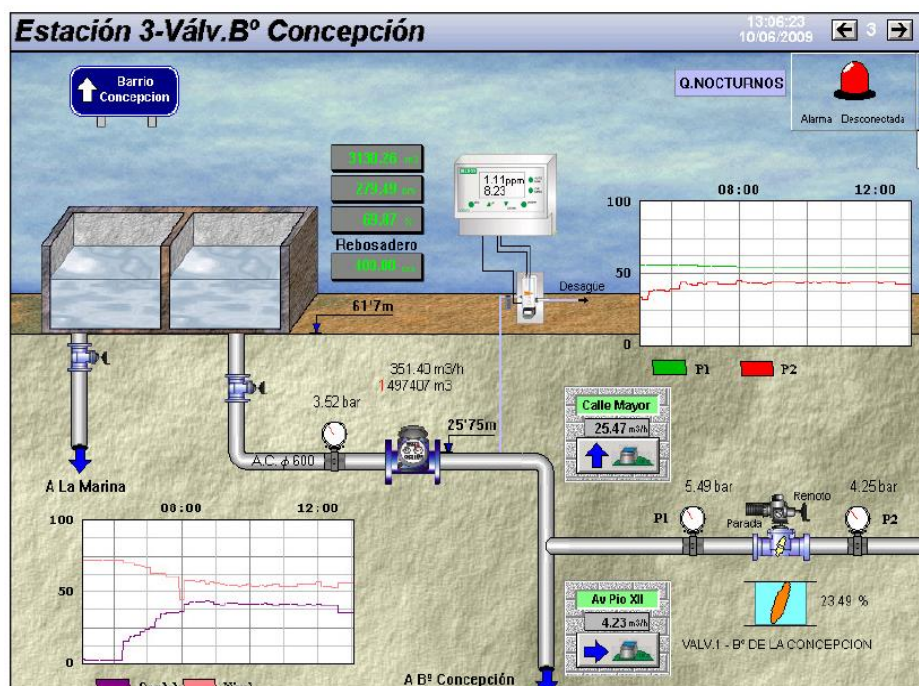


Figura 19. Válvula junto a depósito en el Barrio de la Concepción (Fuente: Aquagest Cartagena)



Figura 20. Consumos de sector hidráulico (Fuente: Aquagest Cartagena)



**Figura 21.** Puesto central SCADA de la MCT en Cartagena



**Figura 22.** Vista del SCADA del Puesto de Control de EMASESA (Empresa Metropolitana de Abastecimiento y Saneamiento de Aguas de Sevilla S.A)



### 3.3 NIVELES DE SUPERVISIÓN Y CONTROL

Cuando se procede a instalar un sistema de supervisión, control y adquisición de datos es importante fijar los objetivos a cumplir ya que de ellos dependerá el nivel de automatización requerido por el sistema. Dentro de estos niveles se pueden diferenciar: **telemedida**, **telemando** y **telecontrol**.

Al primer nivel se encuentra la **telemedida**, o también llamada medición a distancia, cuya única finalidad es recopilar en el puesto central de control los datos procedentes de los sensores para obtener información de los parámetros de funcionamiento de la red. Dentro de la telemedida se pueden diferenciar dos grupos: telemedida instantánea o telemedida registrada y transmitida tras un intervalo de tiempo. Es conveniente precisar que un sistema en el que únicamente se realiza la medición a distancia de los parámetros hidráulicos no puede considerarse como un una estructura de control, aunque la telemedida sea el primer peldaño en la automatización.

En un segundo nivel está el **telemando**, que además de permitir realizar la telemedida de los índices de operación, incluye la posibilidad de actuar en tiempo real sobre los elementos que permiten el control de la red. Por consiguiente, existe un intercambio de información bidireccional en el puesto de control, que permite consultar el estado de la red y enviar consignas a los elementos de control utilizando los diferentes sistemas de comunicación.

Además de las posibilidades de los niveles definidos anteriormente, el **telecontrol** permite actuar manualmente sobre los elementos o bien disponer de un ordenador central programado para llevar a cabo el control y la planificación de forma automática.

En función del nivel de decisión que se le conceda al ordenador se pueden diferenciar dos subniveles dentro del telecontrol:

- *Control centralizado automático*: Las actuaciones se pueden programar con el objetivo de mantener las variables a controlar dentro de unos límites determinados. Un ejemplo típico de esta metodología es un sistema de control de arranque y parada de un bombeo para mantener los niveles de un depósito.
- *Control centralizado óptimo*: Se trabaja buscando la optimización de la explotación. Para ello, en lugar actuar sobre el sistema en función de unos valores límite se realiza un análisis mediante una función objetivo. A este nivel también se le suele llamar

telegestión. Como ejemplo se podría citar un sistema de control de llenado de un depósito en el que, además de controlar el arranque y la parada del bombeo, se calculen los niveles que permiten optimizar la explotación.

### 3.4 EJEMPLOS DE PAQUETES SCADA

Dado el interés general de este trabajo de dar una vista general de todas las herramientas involucradas en la gestión de una red de agua, resulta necesario especificar las principales casas comerciales y los paquetes SCADA que estas ofrecen. Tal información se suministra en la siguiente tabla.

Fabricante	Producto	Enlace web
<b>Wonderware</b>	InTouch	<a href="http://www.wonderware.es">http://www.wonderware.es</a>
<b>Siemens</b>	WinCC	<a href="http://w3.siemens.com/mcms/human-machine-interface/en/visualization-software/scada/pages/default.aspx">http://w3.siemens.com/mcms/human-machine-interface/en/visualization-software/scada/pages/default.aspx</a>
<b>iFIX</b>	GE Intelligent Platforms	<a href="http://www.ge-ip.com/products/proficiency-hmi-scada-ifix/p3311">http://www.ge-ip.com/products/proficiency-hmi-scada-ifix/p3311</a>
<b>Vijeo Citect</b>	Schneider Electric	<a href="http://www.schneider-electric.com/products/es/es/5100-software/5135-software-de-supervision-y-configuracion-scada/1500-vijeo-citect/">http://www.schneider-electric.com/products/es/es/5100-software/5135-software-de-supervision-y-configuracion-scada/1500-vijeo-citect/</a>

**Tabla 7.** Principales casas comerciales de sistemas SCADA



# CAPÍTULO 4. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

## 4.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Históricamente, los datos espaciales han sido recopilados por las distintas civilizaciones (ya sea por navegantes, geógrafos, incluso fuerzas militares) para ser almacenados en forma de mapas o códigos por los cartógrafos.

Los Sistemas de información Geográfica, conocidos con las siglas SIG, han sido desarrollados paralelamente a las técnicas de cartografiado y análisis espacial y, puesto que se trata de una tecnología informatizada, al desarrollo de los computadores. Es por esta razón por la que los SIG, tal y como los conocemos hoy en día, son consecuencia de la mecanización de labores de producción cartográfica combinada desde un principio con los sistemas informáticos.

El primer Sistema de Información que estableció las bases de los SIG actuales fue el *Canadian Geographical Information System*, iniciado en 1964 y activo desde 1967. Fue creado por Roger Tomlinson, considerado como “el Padre de los SIG” y se orientó al inventario y planificación de ocupación del suelo en grandes zonas. Este sistema supuso un gran avance respecto a las tecnologías cartográficas anteriores puesto que permitía realizar desde mediciones hasta escaneos y digitalizaciones.

En el periodo comprendido entre 1960 y 1970 se realizaron avances significativos en el campo de la cartografía informatizada. A finales de la década de 1960 se desarrolló en la Universidad de Harvard el SYMAP (Vectorial), programa de cartografía asistida por ordenador y junto a este se implementó el sistema GRID (Raster). Estos sistemas constituyeron inicialmente programas sencillos aplicables únicamente a espacios compartimentados.

En estos años comienzan a desarrollarse los primeros proyectos comerciales. En 1969 fueron creadas dos de las empresas desarrolladoras de software más importantes: el *Environmental Systems Research Institute*, conocido comúnmente como ESRI, e *Integrgraph*.

Debido a la conexión existente entre los SIG y la Informática, la evolución de estas herramientas una vez instauradas sus bases ha seguido las fases típicas de esta tecnología.

Existe una primera fase, conocida como el periodo de conceptualización, que abarca desde 1975 a 1985. En esta etapa el principal objetivo era determinar la metodología para la creación de mapas mediante herramientas digitales.

Entre 1985 y 1995 se produce el periodo de implementación, en el que destaca la creación por parte de ESRI de su sistema más conocido, ARC/Info. Este paquete de software permitió a la compañía colocarse a la cabeza del sector.

A partir de mediados de la década de los 90 se origina un periodo de apertura y maduración en el que se crean más aplicaciones y se realizan mejoras del software. Los SIG alcanzan en esta etapa una gran apertura y expansión gracias a la elaboración de sistemas abiertos y a las capacidades de conexión facilitadas por Internet.

En la actualidad, los Sistemas de Información Geográfica se han convertido en una herramienta indispensable en todas aquellas áreas que requieran el tratamiento y análisis de información espacial.

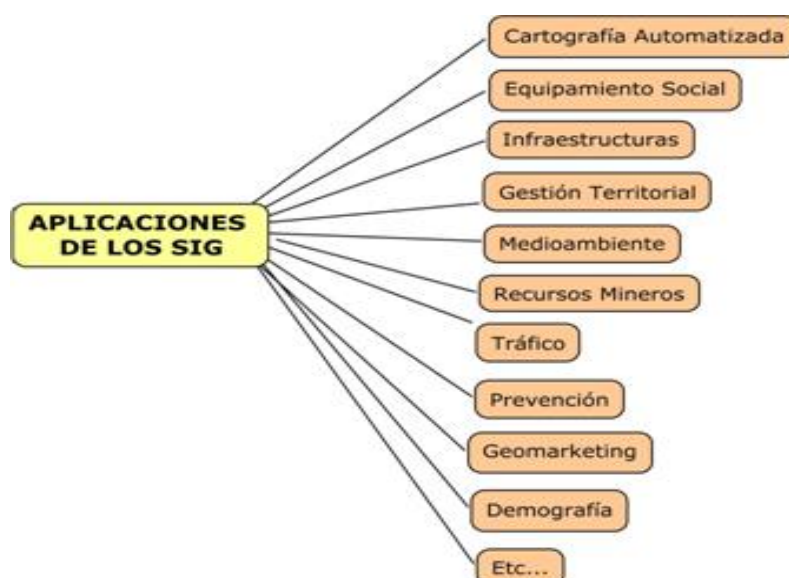


Figura 23. Áreas de aplicación de los SIG (elaboración propia)

## 4.2 DEFINICIÓN DE SIG

Un Sistema de Información Geográfica es una tecnología particularmente horizontal, por lo que es complicado acuñar una definición simplista. A lo largo de los últimos se han publicado infinidad de definiciones acerca de estas herramientas en las que se recoge como tópico general la polivalencia y numerosas posibilidades de estos sistemas.

Un Sistema de Información Geográfica se puede definir como un “*Sistema de herramientas para reunir, introducir, almacenar, recuperar, transformar y cartografiar datos espaciales sobre el mundo real con el fin de satisfacer múltiples propósitos*” (Burrough y McDonell, 1988) o también como un “*Sistema computarizado que permite la entrada, uso, manipulación, análisis y salida de datos*” (Aronoff, 1991). Como se puede observar, estas definiciones hacen referencia a los SIG como software.

Por otro lado, ciertas definiciones establecen los SIG como una base de datos, entendiendo esta herramienta como “*una especialización de un sistema de bases de datos caracterizado por su capacidad de manejar datos geográficos, que están georreferenciados y los cuales pueden ser visualizados como mapas*” (Bracken y Webster, 1992).

Resumiendo, un Sistema de Información Geográfica es una herramienta de análisis de la información aplicada a la resolución de problemas espaciales.

Hay que tener en cuenta que un SIG realista es un sistema complejo de partes interrelacionadas, en cuyo centro se encuentra una persona que entiende la totalidad del sistema. Por lo tanto, podemos entender un SIG como una integración de hardware, software, datos geográficos, personal y procedimientos.



**Figura 24.** Componentes de un SIG (Fuente: [www.ciencias.unal.edu.com](http://www.ciencias.unal.edu.com))

- **Hardware:**

Está compuesto por las computadoras empleadas para desarrollar los trabajos, los servidores donde se almacenan los datos y los periféricos, tanto de entrada (scanner, dispositivos de digitalización, etc.) como de salida (monitores, impresoras, plotter, etc.). Es importante tener en cuenta que los Sistemas de Información Geográfica son exigentes en cuando a hardware, ya que la capacidad de los componentes que constituyen el soporte físico influye en la velocidad de procesamiento y en la facilidad de uso.

- **Software:**

Constituye el soporte lógico del sistema y proporciona las funciones necesarias para realizar análisis y crear los productos informativos necesarios.

En la actualidad pueden encontrarse, en cuanto a software SIG, un gran número de productos de diferentes casas comerciales: ArcGIS, Geomedia, etc. También existe software libre, como GRASS.

<b>SOFTWARE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA</b>	
<i><b>LIBRE</b></i>	<i><b>COMERCIAL</b></i>
GRASS	ArcGIS
JUMP	Geomedia
KOSMO	MapInfo
Ilwis	Manifold
gvSIG, etc.	Autodesk Map, etc.

**Tabla 8.** Principales software SIG

- **Procedimientos:**

Definen qué tareas serán llevadas a cabo por el sistema. Para realizar un correcto análisis es necesario concretar una metodología apropiada que determine la manera de trabajar y los cambios que tendrá que adoptar el personal para trabajar con el sistema SIG.

- **Datos:**

Los datos son un componente esencial en el SIG. Representan el espacio geográfico sobre el cual el usuario realiza las actuaciones y queda representado físicamente por una base de datos. Desde el punto de vista del usuario SIG, la base de datos es visualizada como distintas capas de información temática del espacio de análisis.

- **Recursos Humanos:**

Al igual que en otras herramientas computacionales, el personal es el componente más importante de los Sistemas de Información Geográfica, ya que la tecnología de los SIG está muy limitada si no se cuenta con personas que operen, desarrollen y administren el sistema.

## 4.3 COMPARACIÓN CON OTROS SISTEMAS

El objetivo de este apartado es explicar las principales diferencias existentes entre los Sistemas de Información Geográfica y otras herramientas informáticas que guardan cierta afinidad, como los sistemas CAD (del inglés *computer-aided design*, o diseño asistido por ordenador), los sistemas de gestión de bases de datos (SGBD) o la cartografía automática.

El primer paso para realizar la comparación entre las diferentes tecnologías es identificar los objetivos a alcanzar con su utilización. Por un lado, los sistemas CAD y la cartografía automática tienen como principal finalidad la representación gráfica, ya sea de un diseño o de un mapa. Por otro lado, los sistemas de gestión de bases de datos buscan el tratamiento de la información, sin incorporar ningún tipo de herramienta gráfica.

Dentro de este contexto, los Sistemas de Información Geográfica integran utilidades de cada una de las tecnologías mencionadas con el propósito de realizar un análisis espacial de la



información, principal valor diferencial de esta herramienta. Se alimentan de los sistemas CAD y de la tecnología cartográfica para la elaboración de mapas, así como de las bases de datos para incorporar información alfanumérica a sus capas.

A pesar de las analogías citadas, existen funciones y características diferenciales que hacen de los Sistemas de Información Geográfica la principal herramienta para el tratamiento de la información espacial.

#### **4.3.1 DIFERENCIA CON LOS SISTEMAS CAD**

El software de estos sistemas está dirigido casi exclusivamente a la representación gráfica de objetos. Entre sus principales ventajas se encuentra la capacidad para estructurar el diseño en capas, facilitando el proceso de elaboración y control sobre el plano.

Sin embargo, la principal diferencia entre los programas de dibujo asistido por ordenador y los SIG radica en el volumen de información y en la diversidad de datos a tratar, así como en las capacidades analíticas del sistema. En estos aspectos, las posibilidades y aptitudes de los SIG son muy superiores.

#### **4.3.2 DIFERENCIA CON CARTOGRAFÍA AUTOMÁTICA**

Los sistemas de cartografía automática están caracterizados por la posibilidad de vincular bases de datos con sistemas CAD, presentando su principal punto de interés en la elaboración de mapas. Sin embargo, la principal diferencia con los Sistemas de Información Geográfica radica en la capacidad de análisis espacial. Un sistema de confección de mapas informatizado es de interés a la hora de realizar mapas de alta calidad permitiendo no sólo incluir datos geográficos, sino también descripciones de éstos mediante su conexión a una base de datos. No obstante, el análisis espacial de estos sistemas es muy limitado.

#### **4.3.3 DIFERENCIA CON SISTEMAS DE BASES DE DATOS**

Los Sistemas de Gestión de Bases de Datos (SGBD) están compuestos por un conjunto de datos interrelacionados y una serie de programas para acceder a dichos datos. Por lo tanto, son sistemas desarrollados para compilar y tratar información alfanumérica.

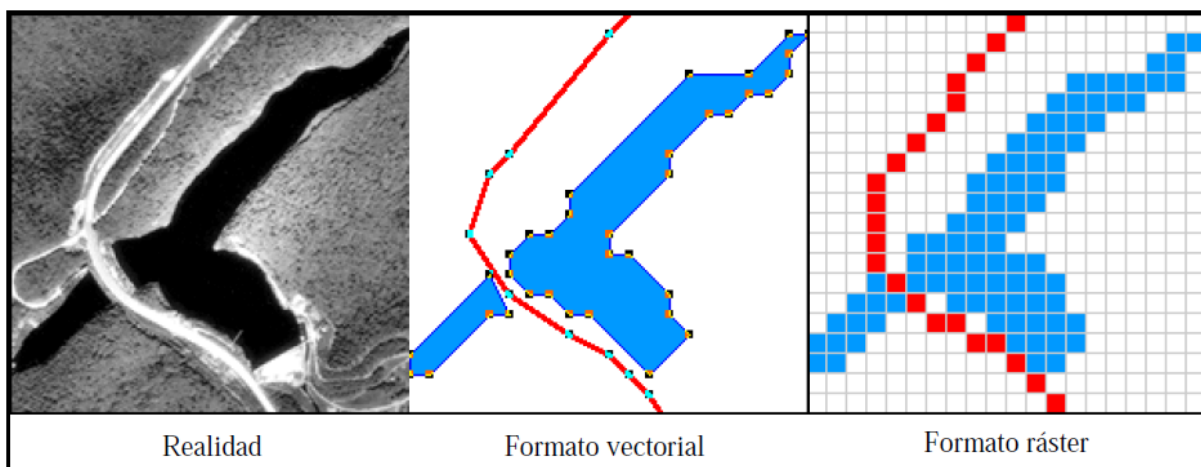
La principal y evidente diferencia entre estos sistemas y los SIG reside en las funcionalidades gráficas. Los SGBD permiten el almacenamiento, manipulación y consulta de bases de datos, pero no admiten la representación gráfica de los mismos.

Es importante señalar que estos sistemas constituyen una componente esencial en los Sistema de Información Geográfica, ya que forman el núcleo de su estructura.

## 4.4 MODELOS DE DATOS

La estructura de datos empleada para la representación de la realidad es un parte fundamental en todo proyecto SIG, pues de ella depende la metodología de trabajo que se debe de llevar a cabo con posterioridad.

El proceso de elaboración de una base de datos espacial requiere una simplificación de la realidad para lograr una adaptación correcta de la información. Para realizar dicha síntesis se emplean dos tipos básicos de modelos de datos: **Modelos Vectoriales** y **Modelos “Raster”**.



**Figura 25.** Diferencias formato Vectorial y Raster (Fuente: Juan Peña Llopis)

### 4.4.1 DATOS VECTORIALES

Esta estructura de datos emplea puntos, líneas y polígonos para representar la información geográfica.

Los **puntos** son la estructura vectorial más simple, pues para su localización solo es necesaria la posición de estos en el plano (coordenadas X e Y). Por otro lado, las **líneas** están

compuestas por un conjunto de puntos y los **polígonos** pueden considerarse formados a su vez por una agrupación de líneas. A estas entidades se les puede asignar una serie de atributos que contengan información descriptiva como puede ser la cota o el diámetro (en el caso de una conducción), siendo esta información almacenada en una base de datos alfanumérica.

En este modelo de datos se logra una codificación muy eficiente de la **topología**, entendiendo este término como la forma de relación de los distintos elementos espaciales. Por esta razón esta estructura es de gran interés en aquellos casos en los que se requiere un análisis de redes (modelos de distribución de agua, análisis de redes de carreteras, etc.)

La topología más extendida en los modelos de datos vectoriales es la denominada **arco-nodo**. En esta, se entiende como arco a aquel elemento lineal empleado para representar elementos curvos o rectilíneos y que está compuesto por un punto inicial, una serie de puntos intermedios y un punto final, denominándose a los puntos extremos nudos.

Además del análisis de redes, otra de las principales ventajas del modelo de datos vectorial es la salida gráfica de los datos, pues permite obtener resultados de alta calidad y elevada precisión en la medida de áreas y distancias.

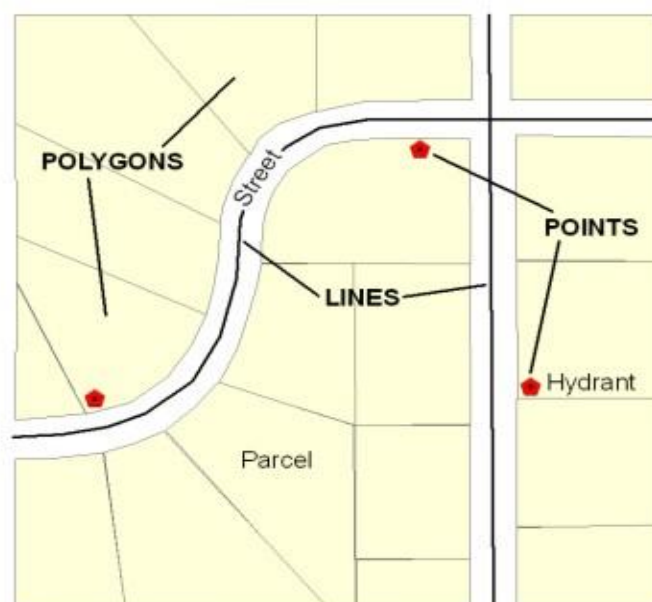


Figura 26. Modelo de datos vectoriales (Fuente: [www.lemonprogis.com](http://www.lemonprogis.com))

#### 4.4.2 DATOS RASTER

En este tipo de modelo de datos la información espacial se representa mediante un conjunto de **celdas** o **píxeles** que se agrupan formando una rejilla o mosaico, conocida como estructura Raster.

Cada uno de los píxeles posee su propio atributo que representa la información alfanumérica y se asocia con el resto para formar la rejilla, de modo que cada celda tiene la misma forma y tamaño pudiendo adoptar las siguientes formas geométricas: cuadrado, rectángulo, triángulo regular o hexágono.

En resumen, los mapas Raster representan una región del espacio mediante una rejilla de unidades regulares que contienen un cierto valor numérico asociado a una característica del terreno.

La precisión a la hora de realizar la representación digital del mapa depende del tamaño elegido para los píxeles, ya que cuanto más pequeño sean, mayor exactitud tendrá el modelo Raster. Por lo tanto, las dimensiones de los píxeles determinan la escala del mapa elaborado.

Como principales ventajas de este modelo destacan la simplicidad de su estructura y la facilidad y rapidez para realizar la superposición. Como inconvenientes predominan la dificultad de establecer ciertas relaciones topológicas y la peor calidad de la salida gráfica. Esta última desventaja se puede solucionar aumentando la resolución de los píxeles, lo que conlleva a su vez un aumento considerable del tamaño del fichero.

Estas características hacen de los mapas Raster la estructura de datos adecuada en la elaboración de modelos distribuidos de alta variabilidad donde la precisión en las dimensiones no es tan importante, como por ejemplo en los modelos hidrológicos.

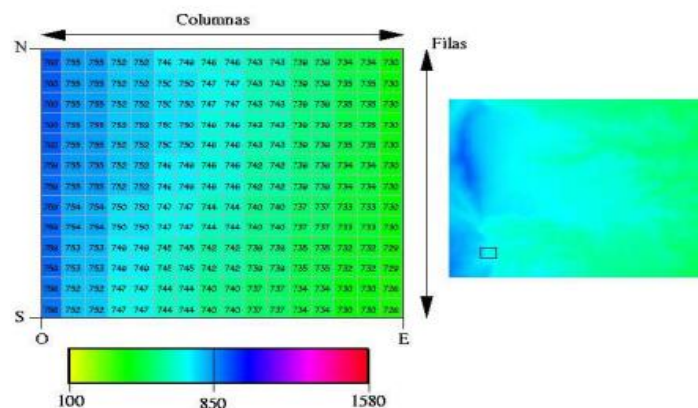


Figura 27. Codificación de una variable en formato Raster (Fuente: SIGMUR)

## 4.5 FUNCIONES DE UN SIG

Hoy en día, los Sistemas de Información Geográfica se están convirtiendo en una valiosa herramienta en aquellas actividades que contienen una componente espacial. La versatilidad de esta tecnología hace que su campo de aplicación sea muy amplio (abarcando desde la gestión de recursos hasta el análisis de distintas alternativas) por lo que los SIG son comúnmente empleados por las oficinas del catastro, gestión del transporte público, compañías de servicios y transporte, agricultura y, en lo que a este proyecto concierne, organismos de abastecimiento de agua.

Entre las principales funciones de los SIG se pueden destacar:

- Capacidades de **integración y almacenamiento** de la información, permitiendo la conversión de información de distintos orígenes a un mismo formato para su posterior análisis y procesamiento, así como la consulta a bases de datos.
- **Georreferenciación y Geocodificación** de los datos almacenados.
- **Representación gráfica y cartográfica de la información**, que permite la visualización de los datos almacenados en función de los criterios establecidos, posibilitando la creación de mapas temáticos, gráficos, tablas de atributos, etc. Además, permite la salida a impresoras, plotters, etc.
- **Análisis espacial**, que atribuye a los datos geográficos verdadero valor.

Entre estas funciones destacan:

- Medición de distancias, longitudes, perímetros, superficies, proximidad, etc.
- Análisis de redes: distancias y recorridos mínimos, rutas y trayectos, accesibilidad, etc.
- Superposición de capas de información.

### 4.5.1 APLICACIÓN EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO

La extensión y evolución de los Sistemas de Información Geográfica ha supuesto un importante avance en aquellos procesos que requieren un tratamiento masivo de la

información así como un análisis espacial de la misma. Es por esta razón que en los últimos años un gran número de sistemas de información corporativos han incorporado este tipo de herramientas con la finalidad de agilizar sus tareas cotidianas.

Convencionalmente, el control sobre la red se llevaba a cabo mediante pequeñas bases de datos y fichas, croquis y planos cartográficos, lo cual suponía un problema a la hora de realizar el almacenamiento y supervisión del volumen de información. Esta filosofía de trabajo acarrea problemas a la hora de realizar labores frecuentes como la consulta de datos de elementos, la actualización de la información y el análisis espacial de dicha información.

En un sistema de distribución de agua, la mayor parte de las labores de gestión contienen una importante componente geográfica (localización de anomalías, indicadores de operación, mantenimiento y rehabilitación de los elementos de la red, etc.), por lo que la capacidad de los SIG para combinar información geográfica y alfanumérica hace de este tipo de plataformas la herramienta idónea para constituir el núcleo de toda la información relacionada con el sistema de suministro.

Si se examina con detalle la estructura de un sistema de abastecimiento, se puede verificar que existe una significativa dependencia entre la información disponible del sistema, y las herramientas necesarias para la gestión. Sin embargo, a pesar de esta vinculación, la conexión entre ambos componentes es compleja y, en ocasiones, insuficiente.

La capacidad de integración de información georreferenciada de distintos orígenes hace de los SIG la herramienta adecuada para constituir el centro de toda la información, ya que permite incorporar en un mismo núcleo sistemas que hasta entonces se encontraban desconectados, facilitando concentrar el control y organización de información tan heterogénea como la cartografía, base de datos de abonados, etc.

Es por esta razón por la cual los SIG deben de sobrepasar la mera función de herramienta para la recopilación de datos dirigida a la creación de planos y revisión de inventario. Mediante su integración con otras utilidades del sistema de gestión, como el SCADA y el modelo matemático, se puede ir más allá del análisis cartográfico y espacial, pasando a incorporar al SIG información referente al funcionamiento de la red. Este hecho permite ampliar la capacidad del Sistema de Información Geográfica como herramienta para el soporte a la toma de decisiones.

A pesar de que en el apartado anterior ya se han mencionado funciones de los SIG, es importante mencionar aplicaciones específicas que estas herramientas pueden facilitar en la

---

gestión diaria de redes de distribución de agua. Martínez Solano (2002) clasifica estas aplicaciones en cuatro grupos:

#### ❖ **Apoyo en el proceso de creación de nuevas infraestructuras**

La primera de las fases en la creación de una infraestructura es la **planificación**. En el caso de redes de abastecimiento, el siguiente paso a realizar tras el análisis de las necesidades a satisfacer es la definición del trazado de las nuevas conducciones. En este sentido, el SIG puede servir de gran ayuda. Gracias a su capacidad de análisis espacial, estas herramientas facilitan el cálculo del trazado óptimo que garantice el suministro demandado teniendo en cuenta los costes de construcción.

Una vez identificado el trazado se procede al **dimensionamiento** de los elementos. Dentro de esta etapa resulta fundamental el modelo de predicción de la demanda, pues el valor de esta variable es esencial para el cálculo de la red. Su estimación puede obtenerse mediante dos técnicas principalmente: por extrapolación de tendencias pasadas o mediante modelos económicos y demográficos. En el segundo caso, el empleo de los SIG puede ser crucial. Estas herramientas permiten distinguir áreas con diferentes características económicas y demográficas, lo que facilita tanto el uso de modelos demográficos como la distinción del tipo de demanda (doméstica, industrial, agrícola o recreativa).

Tras la determinación del trazado y las dimensiones del componente, se procede a la redacción del **proyecto**. Durante esta fase, el SIG puede emplearse para recopilar información cartográfica y localizar posibles interacciones con otras infraestructuras o servicios, así como ayudar en la gestión de las expropiaciones.

En cuanto a este último aspecto, el SIG puede servir de ayuda para calcular la superficie de expropiación. Con esta herramienta se pueden elaborar archivos en los que se identifiquen las diferentes parcelas afectadas por las obras y se les asocie a las mismas una base de datos de los diferentes afectados en la que se incluya cualquier información relevante para realizar el expediente de expropiaciones (número de referencia catastral, nombre y apellidos del propietario, tipo de terreno, etc.).

#### ❖ **Contribución en la creación de modelos matemáticos**

En este aspecto, los SIG sirven de soporte tanto en el proceso de **elaboración** del modelo como en el **mantenimiento** del mismo.

En la fase de creación, el SIG puede facilitar (Martínez, 2002):

- La obtención de los datos topológicos de los elementos y de los abonados.
- El proceso de simplificación de la red así como la realización de la asignación de cargas.
- La ejecución de simulaciones gracias a su capacidad de almacenamiento de datos históricos.

Hay que tener en cuenta que el modelo representa a la red en un momento determinado. Dada la naturaleza cambiante del sistema de abastecimiento, en el tiempo se sucederán incorporaciones de componentes nuevos y sustituciones de elementos obsoletos, por lo que se hace necesario un mantenimiento continuo que incluya la puesta al día del modelo y la recalibración del mismo. En este sentido, el SIG tiene la capacidad de tratar bases de datos georreferenciadas para poder actualizar en tiempo real los datos de los elementos de la red, lo que resulta fundamental en este proceso.

Esta conexión SIG-Modelo matemático está siendo objetivo de numerosas aplicaciones. Un ejemplo de ello es el desarrollo de la herramienta *GISRed* por el grupo REDHISP de la Universidad Politécnica de Valencia. Esta aplicación es una extensión de ArcView orientada a la modelación y calibración de modelos de red de agua a presión desde un Sistema de Información Geográfica. Entre sus funciones principales se encuentran (Bartolín, 2013):

- La captura de datos geográficos y alfanuméricos de diversas fuentes para la generación de la topología de la red.
- La asignación de demandas y la interpolación de cotas en nudos.
- La calibración mediante algoritmos genéticos<sup>1</sup>.
- La simulación del modelo y la posterior recuperación de los datos de dicha simulación en el SIG.

---

<sup>1</sup> Algoritmos matemáticos que transforman un conjunto de objetos matemáticos individuales con respecto al tiempo usando operaciones modeladas de acuerdo al principio Darwiniano de reproducción y supervivencia del más apto. (Koza, 1992).



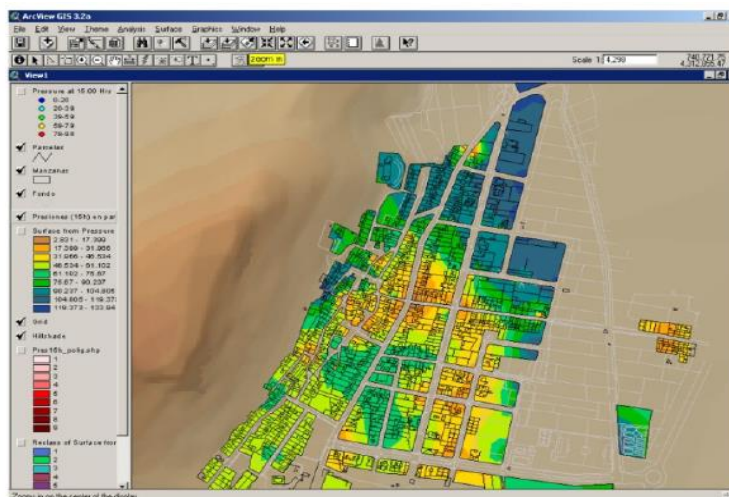


Figura 28. Simulación de presiones distribuidas por parcela (Fuente: Bartolín, 2013)

### ❖ Soporte en la operación y control de la red

Debido a su capacidad de análisis de la información, el SIG puede servir de soporte a todas aquellas actividades dirigidas a mejorar la eficiencia y eficacia del servicio.

En primer lugar, los SIG pueden servir de ayuda en el **control de la red**. Tradicionalmente, este control se ha realizado sin el soporte de estas herramientas empleando para ello los sistemas SCADA. Sin embargo, la integración de ambas herramientas puede significar un paso muy importante en la mejora del control. Mediante esta conexión, además de obtener un mapa que represente en cada momento las variables controladas, las consignas y el estado de los actuadores, se puede mejorar el proceso de generación de informes y presentación gráfica de resultados. La siguiente figura representa el esquema básico del intercambio de información SIG-SCADA.

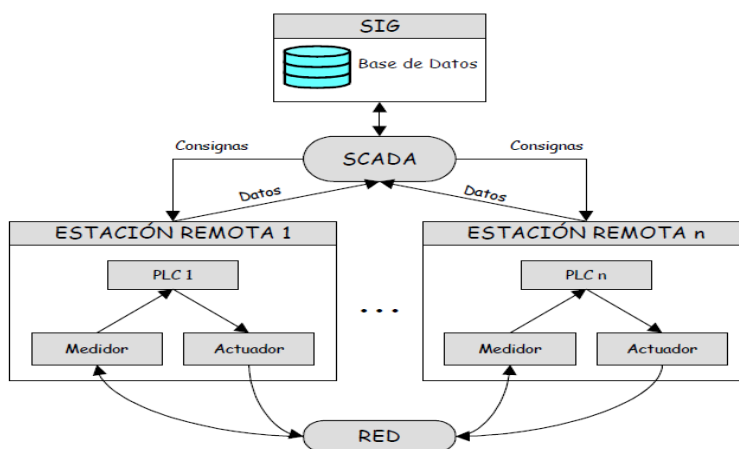
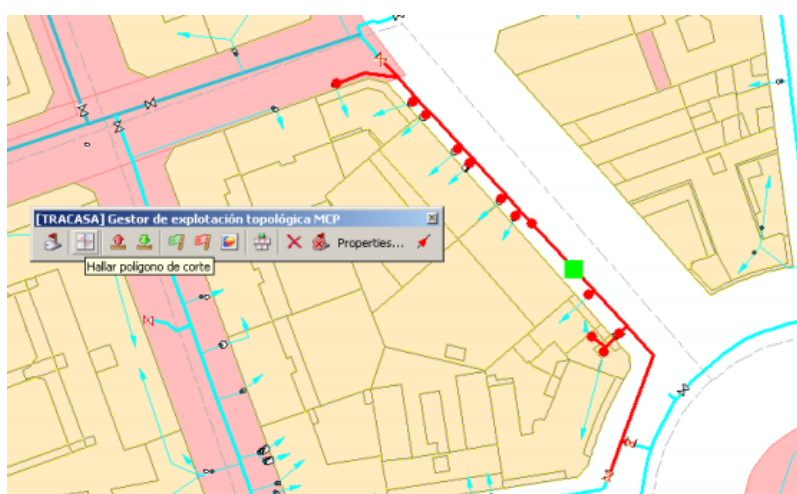


Figura 29. Estructura de intercambio de datos entre SIG y SCADA (Fuente: Martínez Solano, 2002)

En segundo lugar, otra de las funciones de los SIG en el proceso de operación y control es la **gestión de las maniobras de cierre**, entendido como el proceso de análisis de aquellas operaciones que surgen como respuesta a un aviso, ya sea programado (tareas de mantenimiento) o el resultado de una emergencia en la red. Dentro de este aspecto adquiere gran importancia el estudio de los *polígonos de corte*, mediante los cuales se permite dar un conjunto de soluciones posibles para dejar aislado un punto de la red mediante la manipulación de válvulas dispuestas a tal fin. Gracias a las herramientas de conectividad y su aplicación a las redes de agua, el SIG puede colaborar en la definición de dichos polígonos.



**Figura 30.** Análisis de polígonos de corte (Fuente: GeoSAS, Tracasa)

Además de la definición de los polígonos de corte, el SIG puede ayudar en las demás actividades a seguir en el protocolo de la maniobra, como son la generación del informe de cerrada (que incluye las maniobras a realizar, el plano de la zona afectada, los elementos perjudicados por el cierre así como la estrategia alternativa en caso de fallo en las válvulas) y la información a los implicados (generación automática de mensajes a las entidades y usuarios afectados).

En tercer lugar, el SIG permite la elaboración de los **indicadores de gestión**. Dichos indicadores se emplean para evaluar el comportamiento del abastecimiento en cuanto a aspectos de gestión, por lo que se requiere información de todo tipo (desde datos de los abonados hasta especificaciones técnicas de la red). Debido a sus posibilidades de análisis espacial, el SIG no permitirá sólo el cálculo de los indicadores, sino que facilitará su

obtención en distintas zonas, sectores e incluso calles, lo que ayuda, por ejemplo, a la hora de establecer los programas de rehabilitación.

En cuarto lugar, el SIG puede aportar una serie de beneficios en el proceso de **sectorización**, entiendo por este a la subdivisión de la red en diversas subredes homogéneas de menor tamaño con el objetivo de ayudar a regular eficazmente la misma. La aportación del SIG en este procedimiento resulta evidente dada la gran cantidad de datos a manejar (caracterización de elementos, mediciones) y su importante componente espacial.

Por último, si la sectorización es fiable y se combina con el SIG, puede constituir un sistema de **detección temprana de fugas** a través del método de los caudales mínimos nocturnos. Para ello, será necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se requiere tener un registro continuo del caudal inyectado en la red y un adecuado archivo de los datos del mismo en el SIG.
- Para la estimación de los caudales mínimos nocturnos se necesita información de los abonados de cada sector y su tendencia de consumo (análisis de la demanda).
- Mediante la comparación de ambos datos, el SIG tendrá la capacidad de generar alarmas de fuga en el momento en el que el caudal registrado sea superior al mínimo nocturno dentro de unos márgenes de diferencia.

#### ❖ **Aplicación en la gestión de la Infraestructura**

Un sistema de gestión de la infraestructura debe de ser capaz de controlar en todo momento el estado de la red y las operaciones a realizar para asegurar el servicio. En este contexto los elementos que conformen la red han de ser modificados a lo largo del tiempo para adaptar sus parámetros físicos a las distintas situaciones que se pueden presentar. Por lo tanto, necesitan tanto tareas de mantenimiento preventivo como correctivo, e incluso pueden llegar a necesitar operaciones de rehabilitación o sustitución.

En cuanto a la gestión de la infraestructura, un SIG puede aportar las siguientes funciones:

- **Gestión del inventario:** Dada la capacidad del SIG para actuar como una base de datos georreferenciada y con posibilidad de permanente actualización, resulta de gran interés para la elaboración del inventario de la infraestructura:
  - Fondo cartográfico urbano (callejeros, direcciones postales, infraestructuras urbanas, etc.).

- Descripción de los elementos (tanto permanentes como provisionales) de la red en la que se incluyan su descripción física y su localización geográfica, entre otros datos.
  - Mediciones y telecontrol de la red: mediciones, maniobras realizadas, consignas, etc.
  - Mantenimiento: incidencias, actuaciones realizadas, previsión de nuevas actuaciones, costes de cada intervención, fotografías, etc.
- **Programación del mantenimiento:** A partir de los datos del apartado anterior, el SIG tiene que ser capaz de procesar todo el volumen de información para determinar la estrategia óptima de mantenimiento para cada elemento. Gracias a sus posibilidades de análisis espacial y aglutinamiento de información, el SIG puede contribuir a un importante ahorro de tiempo en las tareas de mantenimiento (elaboración de rutas óptimas de trabajo, localización exacta de la avería, consulta de polígonos de corte) al mismo tiempo que facilita el registro y actualización de los cambios realizados en la red.



# CAPÍTULO 5. MODELOS MATEMÁTICOS

## 5.1 NECESIDAD DE MODELOS HIDRÁULICOS

Entre los principales propósitos a alcanzar en cualquier red de abastecimiento de agua destacan mantener la calidad del servicio, así como la eficiencia y garantía en el suministro. En este aspecto, los modelos de redes se convierten en un aspecto fundamental para asistir en la gestión del sistema.

Los problemas clásicos que suelen plantearse en las redes de distribución están ligados a los principales índices de operación, más detalladamente al caudal circulante, la presión y parámetros relacionados con la calidad. Para garantizar un servicio adecuado, el ente gestor debe de llevar a cabo un correcto control de estos parámetros que se presentan como incógnitas.

Dichas incógnitas constituyen sistemas de ecuaciones no lineales que pueden resolverse únicamente mediante métodos iterativos. En este punto es en el que asume la mayor importancia el poder computacional de los modelos matemáticos.

Actualmente, las redes de distribución forman sistemas complejos en los que se ven implicados factores de diversa naturaleza: sociales, económicos, técnicos, medioambientales, etc. Por esta razón, el uso de la modelización se encuentra generalizado permitiendo, por un lado, la representación del estado del sistema de forma continua y, por otro lado, la representación de escenarios o eventos posibles y situaciones futuras.

En lo que concierne a simulación y predicción, es de suma importancia la correcta calibración del modelo, ya que de ello dependerá la fiabilidad de las simulaciones realizadas. Un modelo matemático sin calibrar constituye una herramienta de gestión inútil.

---

## 5.2 EVOLUCIÓN DE LA MODELIZACIÓN HIDRÁULICA

Los modelos hidráulicos han sido herramientas de gran interés para aquellas organizaciones involucradas en el diseño, construcción y mantenimiento de sistemas de distribución de agua.

Con anterioridad al empleo de ordenadores en el análisis se requerían largos y complejos cálculos manuales para determinar las distribuciones de presión y caudal en toda la red. Los primeros pasos hacia la modelización por ordenador se basaron en analogías con circuitos eléctricos (muestra de ello es la aplicación de las leyes de Kirchoff).

Siguiendo el trabajo “The History of Water Distribution Network Analysis: The Computer Age”, elaborado por Lindell E.Ormsbee, el desarrollo de los modelos computacionales para el cálculo de redes de agua se puede dividir en cinco periodos principales.

### ❖ Desarrollo de los fundamentos teóricos

Durante el siglo XVIII se dieron los primeros pasos hacia el desarrollo de la mecánica de fluidos. De este periodo cabe mencionar el trabajo realizado por Bernoulli, quien introdujo los principios de conservación de la energía (1738). De este mismo siglo destacan los aportes realizados por Antoine Chezy que establecieron las bases de las ecuaciones de pérdidas por fricción que se desarrollaron con posterioridad, como por ejemplo la ecuación de Darcy-Weisbach.

En el siglo XIX destacan los estudios realizados por Reynolds que permitieron establecer una clara distinción entre los flujos laminar y turbulento. Durante este periodo resultan fundamentales los estudios acerca de las pérdidas en conducciones con los estudios de Hazen y Poiseulle, Von Karman, Nikuradse, Hazen y Williams, entre otros.

### ❖ Era Pre-Informática

Un ingeniero estructural de la universidad de Illinois, Hardy Cross, desarrolló en 1936 un método matemático para determinar la distribución de momentos para estructuras estáticamente determinadas.

El propio Cross se percató de que esta metodología podría ser empleada también para resolver la distribución de caudales y presiones en redes malladas de distribución de agua. Por ello publicó un artículo en el que presentaba este innovador método que serviría de base para futuros desarrollos. El método presentado en dicha publicación tuvo la aceptación de la comunidad de ingeniería hidráulica y rápidamente fue denominado como el “Método de Hardy Cross”. Aunque en primera instancia este método fue concebido para su resolución manual, su estructura lo hacía claramente candidato para su implementación computacional.

### ❖ **Inicio de la Era Computacional**

Con el desarrollo de los primeros equipos de cálculo, los investigadores comenzaron la búsqueda de la implementación de las metodologías conocidas para el análisis hidráulico.

El primer ejemplo de esta línea de investigación se produjo en 1957 cuando los investigadores Hoag y Weinberg adaptaron el método de Hardy Cross en la ciudad de Palo Alto, en California, con el objetivo de facilitar la resolución de redes malladas con el empleo de computadoras digitales.

Con el creciente desarrollo y avance de los computadores a mediados de los años 60, los investigadores comenzaron a cuestionar el uso del método de Cross debido a las limitaciones que este presentaba, por lo que los trabajos se reorientaron hacia la búsqueda de nuevas metodologías de análisis.

### ❖ **Desarrollo de métodos de análisis avanzados**

En respuesta a las limitaciones del método de Cross, los investigadores centraron sus estudios en el desarrollo de nuevas metodologías y formulaciones que permitieran aprovechar al máximo las nuevas posibilidades de cálculo de computadores cada vez más sofisticados.

Entre los métodos de cálculo desarrollados destacan:

- *Método del Nodo Simultáneo*, resultante de la aplicación del método iterativo de Newton Raphson a redes de distribución.
- *Método del Circuito Simultáneo*.



- *Método de la Teoría Lineal*, que permite resolver simultáneamente las ecuaciones de conservación de masa en nodos y conservación de energía en circuitos.
- *Método del Gradiente Hidráulico*, que posibilita el manejo matricial de las ecuaciones de energía y conservación de masa.

### ❖ **Desarrollo de Software comercial**

El desarrollo e investigación de la resolución de redes de agua fue notable durante las décadas de los años sesenta y setenta, de modo que los principales investigadores y universidades expusieron sus trabajos con las consecuentes ventajas de implementación y velocidad de cálculo que supusieron un importante avance en el estudio.

Este hecho, junto con la aparición del computador personal (PC) de la mano del IBM PC (1981) hizo posible el desarrollo de aplicaciones perfectamente ejecutables desde equipos de escritorio.

Muchos de los trabajos de investigación académica fueron paulatinamente convertidos en aplicaciones comerciales que se promocionaron y comercializaron a través de las propias universidades, empresas medianas e incluso grandes corporaciones.

En 1993 se lanzó la primera versión de EPANET, desarrollado por un grupo de trabajo de la U.S EPA liderado por Lewis Rossman. Este software introdujo importantes avances, proporcionando a los usuarios un modelo de distribución de la arquitectura de redes de agua libre y abierto que ha sido posteriormente utilizado y adaptado tanto por investigadores como por empresas del sector.

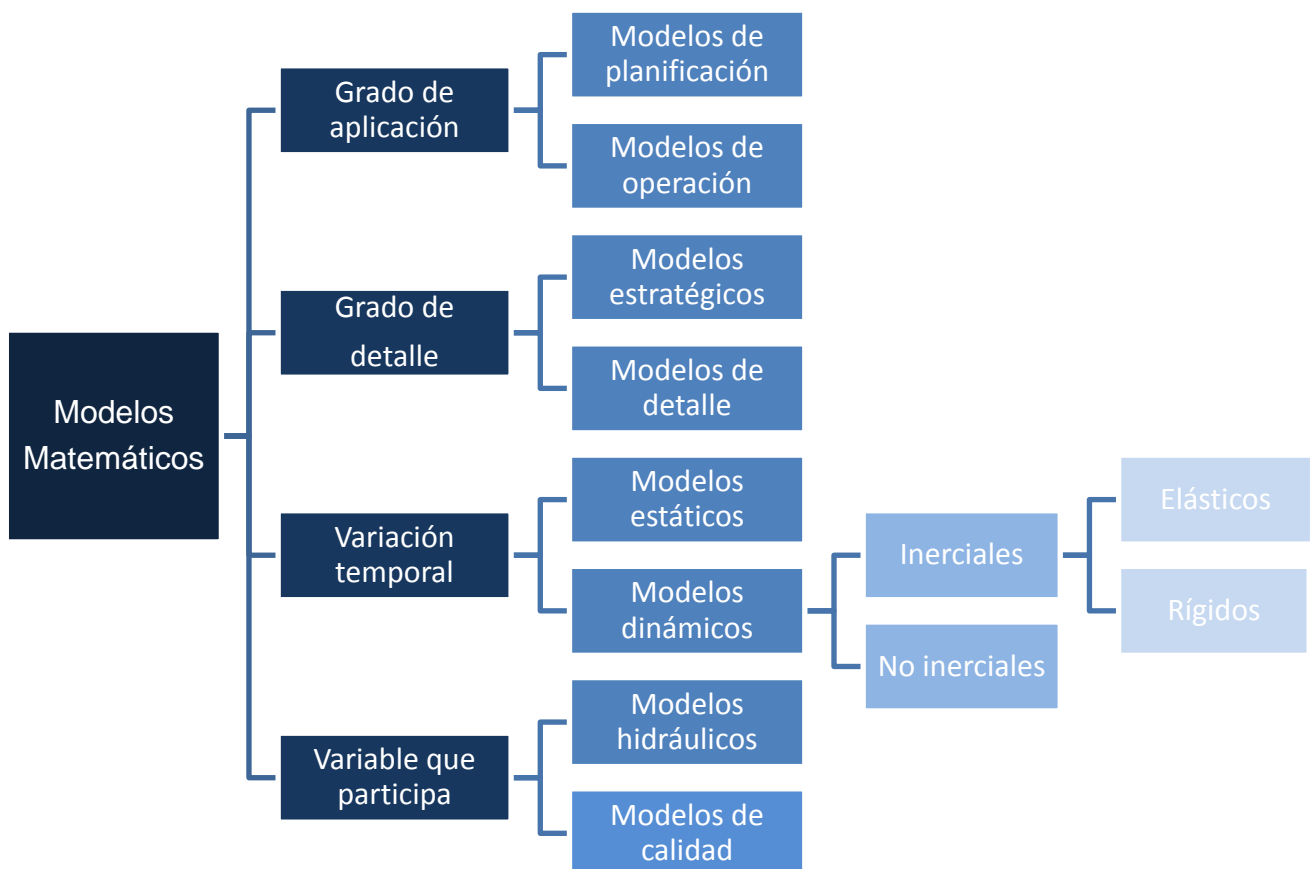
En la última década la industria del software aplicado a redes de distribución ha sufrido grandes desarrollos y avances unidos siempre a la mejora en los computadores. Hoy en día la mayoría de aplicaciones comparten la misma base del algoritmo de cálculo (Gradiente hidráulico), aunque presentan diferencias en conceptos como las operaciones de análisis espacial, la integración con otros sistemas (SIG, SCADA, etc.), las facilidades de uso, etc.

Las principales líneas de investigación que se están siguiendo en la actualidad vienen resumidas en los siguientes puntos:

- Integración para asegurar el intercambio de datos con otros sistemas de información, dispositivos electrónicos y, en general, otros programas de gestión.
- Conexión con SCADA para mejorar el funcionamiento del modelo.
- Mejora en la modelización de la calidad.

### 5.3 TIPOS DE MODELOS

Teniendo en cuenta el avance y desarrollo que han experimentado en los últimos años los modelos de simulación hidráulica, es posible realizar una clasificación de los mismos de acuerdo a diferentes criterios u objetivos. La Figura 31 presenta un esquema que sintetiza estas diferentes organizaciones.



**Figura 31.** Tipos de modelos matemáticos aplicados a redes de distribución (Fuente: elaboración propia)

---

En lo que concierne al **grado de aplicación**, los modelos se pueden clasificar en dos grupos:

- Modelos de planificación: Empleados generalmente para evaluar rendimientos de la red, comportamiento de distintos elementos, aspectos económicos, etc.
- Modelos operacionales: El objetivo de este tipo de modelos es tener un mejor soporte para la toma de decisiones. Para ello, se encargan de reproducir y predecir el comportamiento hidráulico del sistema basándose en los principales índices de operación: presión, caudal y parámetros de calidad. Dentro de este grupo se incluyen los modelos de simulación en tiempo real, los cuales requieren, por un lado, las variables de control seleccionadas por el operador de la red y, por otro lado, la información de campo transmitida por los PLC y demás instrumentos, que es incorporada automáticamente sin actuación del personal.

En cuanto al **grado de detalle**, un modelo de una red de distribución de agua se puede clasificar en:

- Modelos estratégicos: También conocidos como modelos arteriales. Este grupo de modelos solo incluye aquellos elementos fundamentales de la red, tales como conducciones primarias o elementos de almacenamiento.  
De forma general, estos modelos se emplean como instrumentos de planeamiento y diseño de redes, siendo útiles para la comprensión general del sistema, pero sin llegar a alcanzar la función operacional.
- Modelos de detalle: En ocasiones se requiere un nivel de detalle mayor para llegar a obtener el máximo aprovechamiento de los modelos de sistemas de distribución y permitir llevar a cabo actuaciones de regulación y control de la red. Para este propósito se desarrollan los modelos hidráulicos de detalle. Este tipo de modelos requieren un trabajo importante de registro de datos de la instalación ya que deben de lograr un grado elevado de representación. Este factor conlleva un aumento considerable en los costes de realización del modelo.

Desde el punto de vista de la **variable tiempo**, se pueden distinguir dos tipos de modelos: modelos estáticos y modelos dinámicos.

- Modelos estáticos: También llamados de flujo permanente. Este tipo de modelos consideran que las variables hidráulicas del sistema permanecen constantes en el tiempo. Se emplean frecuentemente con fines estratégicos y de planificación con el propósito de analizar el comportamiento de la red en situaciones singulares, como determinados estados de carga límites, interrupciones del suministro por roturas o averías, etc.
- Modelos dinámicos: Son aquellos modelos que simulan el comportamiento de la red a lo largo del tiempo. También son conocidos como modelos de flujo no permanente. A su vez, los modelos dinámicos pueden subdividirse en inerciales y no inerciales.
  - Como su propio nombre indica, los modelos inerciales son aquellos que tienen en cuenta la inercia del fluido en movimiento. Se aplican en aquellos casos que implican cambios bruscos de velocidad, como puede ser la rotura de una conducción. Dentro de los modelos inerciales se encuentran:
    - Modelos rígidos, aplicados en aquellos casos en los que las variaciones no son tan bruscas. En este tipo de modelos es suficiente considerar la tubería indeformable y el agua incompresible.
    - Modelos elásticos o golpe de ariete, en los que debe de tenerse en cuenta los efectos elásticos, tanto en la tubería como en el agua.
  - Modelos no inerciales, también conocidos como modelos cuasi-estáticos o en periodo extendido (EPS, *extended period simulation*). Para llevar a cabo la representación del comportamiento de la red, estos modelos realizan la simulación de una serie de estados estáticos y permanentes a lo largo del tiempo. Para ello, plantean el problema como si se tratara de un estado de flujo permanente, buscando soluciones consecutivas para cada intervalo temporal. Tienen en cuenta las variaciones en los consumos, así como las variaciones de posición en los elementos de regulación.

En función del **objetivo del modelo** y de las **variables** que participan en el mismo, los modelos matemáticos pueden dividirse en: modelos hidráulicos y modelos de calidad del agua.

- ❖ Se consideran modelos hidráulicos a aquellos encargados de determinar los caudales y presiones dentro de la red de distribución, variables consideradas como los principales índices de operación.
- ❖ Los modelos de calidad del agua se aplican en el estudio de la variación temporal y espacial de ciertos parámetros físico-químicos del agua, así como del transporte y reacción de sustancias contaminantes o desinfectantes. Este tipo de modelos precisan a su vez de un modelo hidráulico para determinar los caudales y presiones dentro de la red, ya que requieren de información sobre las variables hidráulicas relacionadas con los parámetros de calidad. Para lograr la integración de ambos modelos pueden desarrollarse conjuntamente, o bien implementar en primer lugar el modelo hidráulico y utilizar posteriormente los datos de este para desarrollar el modelo de calidad del agua.

## 5.4 EMPLEO DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS

En la actualidad, el importante desarrollo tecnológico junto con el diseño de sistemas de distribución cada vez más extensos y complejos está haciendo del uso de modelos hidráulicos en la operación de redes un paso esencial para asegurar una correcta gestión. Su empleo es realmente amplio, abarcando desde el control de bombas y depósitos hasta estudios de vulnerabilidad del sistema.

A continuación se enumeran algunas de las aplicaciones más usuales de la modelización hidráulica en sistemas de abastecimiento.

- Evaluación de las **presiones** de servicio en nudos y de los **caudales** en línea, permitiendo el conocimiento de estas variables en situaciones excepcionales (roturas, consumos en horas punta, etc.).
- Análisis del **efecto** en los índices de operación ocasionado por aumentos futuros de la demanda, así como el estudio de **planes de inversión y actuación** para satisfacer dicha demanda.
- **Planes de intervención** ante averías y roturas en puntos de la red. Los modelos de simulación facilitan el entrenamiento de los operadores de la red, lo que permite un

mejor conocimiento de las actuaciones que se deben de llevar a cabo en caso de fallo en el sistema.

- **Simulación y control en tiempo real** con el objetivo de garantizar un correcto suministro en todo momento.
- Análisis de cuestiones relacionadas con la **calidad del agua**. Los modelos de calidad son capaces de reproducir el comportamiento del agua a través de la red permitiendo conocer información como la edad del agua en el sistema, la concentración de ciertos compuestos o la vulnerabilidad de la red a incidentes de contaminación externa.

En definitiva, los modelos matemáticos son una herramienta muy útil como soporte en la operación de sistemas de agua. Es importante añadir que para que un modelo sea eficiente, es necesario que se encuentre correctamente **calibrado**, siendo este uno de los principales pasos en la implementación del modelo.

## 5.5 PASOS PARA LA CONFECCIÓN DE UN MODELO

Un modelo matemático es básicamente una abstracción matemática desarrollada para reproducir el comportamiento de un sistema bajo unas condiciones determinadas. En el caso de las redes de distribución de agua, el proceso de construcción de un modelo requiere el tratamiento de una gran cantidad de información (datos descriptivos de la red, datos de consumo, datos de mediciones y actuaciones, etc.), por lo que se hace necesario definir una metodología adecuada compuesta en general por las siguientes etapas.

### 5.5.1 RECOPIACIÓN DE DATOS

El primer paso para la elaboración de un modelo hidráulico consiste en recopilar toda la información necesaria relacionada con los elementos que van a ser representados. Esta información debe de ser correcta y precisa, puesto que va a ser la base sobre la que se cimiente el modelo.

En este paso habrá que tener en cuenta el nivel de esquematización del sistema real, pues de ello dependerá el volumen de datos a recolectar.

Los principales elementos del sistema de distribución que se tienen en cuenta para la construcción del modelo son:

- **Conducciones:**

Los datos más importantes a considerar son:

- Diámetro interno, longitud y coeficiente de rugosidad, fundamentales para el cálculo de pérdidas de carga. También se debe de conocer el material, la edad de la instalación y su estado de conservación
- Conectividad. Los modelos hidráulicos representan el sistema como una serie de nodos conectados conjuntamente en sus puntos finales. Por lo tanto resulta esencial conocer los nodos iniciales y finales de cada línea, así como la conexión entre ambos extremos.

- **Nodos:**

La información requerida acerca de estos elementos está relacionada con su ubicación (especialmente con su cota) y con su modelo de demanda (variación diaria de la demanda).

- **Bombas y estaciones de bombeo:**

Es necesario conocer la ubicación de los bombeos dentro de la red, así como su curva característica, potencia y rendimiento. Además, será conveniente conocer el régimen de operación de los equipos (horas de funcionamiento, modo de operación, etc.).

- **Válvulas:**

La principal información a recopilar es su ubicación, tipología de válvula (reguladora, reductora, etc.), así como su estado y material de fabricación. También es conveniente conocer su modo de operación.

- **Elementos de almacenamiento y regulación:**

Se requiere información relacionada con su ubicación, geometría y capacidad, elevación de sus niveles máximo y mínimo, curva de nivel, tipología, etc.

- **Puntos de inyección al sistema y consumos facturados:**

Los puntos de inyección son aquellos en los que se introduce agua en la red de distribución a modelizar. La información relevante a recopilar incluye la cota del nodo de inyección, la evolución diaria y estacional de los caudales inyectados desde cada uno de los puntos y la concentración de reactivos (en el caso de simular un modelo de calidad).

Otro de los puntos principales concierne a los consumos facturados. Es necesario detallar la ubicación y cota de los nodos de consumo, el tipo de consumo asociado al mismo (doméstico, industrial, etc.) y los usuarios o número de viviendas que se abastecen de este.

Como se puede comprobar, la mayoría de la información requerida para la elaboración de modelos hidráulicos contiene una importante componente espacial. Este es uno de los principales puntos a favor de la integración de los Sistemas de Información Geográfica y los modelos hidráulicos. Además de permitir la geolocalización de cada uno de los elementos, si el SIG tiene integrado el simulador hidráulico permitirá analizar y gestionar de forma inmediata los elevados volúmenes de información proporcionados por el modelo, tanto si se trata de información espacial como alfanumérica.

### **5.5.2 ESQUELETIZACIÓN DE LA RED**

La esqueletización consiste en una simplificación de la red de distribución y una esquematización de los restantes elementos que conforman dicha red. Este proceso es necesario para lograr un esquema tratable por el modelo puesto que un nivel de detalle excesivo puede acarrear problemas en el tratamiento de la información procedente del programa.

De forma general, la metodología más extendida para realizar modelos simplificados incluye:



- **Unificación de nodos próximos.** Combinación de aquellos nudos donde, debido a la corta distancia entre ellos, se tendrán mismos valores de los principales índices hidráulicos.
- **Asociación de conducciones.** Tanto en serie como en paralelo.
- **Eliminación de ramificaciones.** Sustituyendo estas por consumos en los puntos de conexión de la red.
- **Eliminación de tuberías** de pequeño diámetro.

Una de las decisiones más importantes a la hora de la elaboración del modelo es la definición de los elementos a incluir en el mismo. La selección de los componentes que constituyen el modelo dependerá en gran parte del uso final que se le vaya a dar a este. Cuando se trata de modelos de análisis y diseño no es necesario la modelización de todos los nodos, pues habrá puntos en los que no sea necesario conocer el caudal o la presión. Es por esta razón por la que se debe de fijar un límite de diámetro a partir del cual se eliminen las conducciones de dimensiones inferiores.

Con este paso el modelo ganará rapidez y comodidad tanto en el procesamiento como en el manejo y análisis de los datos de simulación.

### 5.5.3 MEDIDAS DE CAMPO

El objetivo de las mediciones de campo es demostrar la similitud entre el comportamiento del modelo y la red que este representa.

Para llevar a cabo la comparación entre los resultados del modelo y la realidad es necesario obtener información relacionada con una serie de parámetros entre los que se encuentran esencialmente la presión, el caudal y la calidad del agua. Por lo tanto, en la mayoría de los casos interesa disponer de las siguientes medidas:

- Mediciones de presión y/o caudal en puntos estratégicos. Hay que tener en cuenta que las medidas de caudal resultan más difíciles y costosas que las de presión, por lo que la mayoría de los modelos se ajustan casi exclusivamente con datos de presión.
- Aportaciones a la red desde depósitos y estaciones de bombeo.
- Medida de los niveles en depósitos y presión a la salida de las estaciones de bombeo.

- Medidas del consumo mediante contadores.

Uno de los aspectos más importantes en el proceso de toma de medidas es la elección del número y la ubicación de los puntos de muestreo.

En cuanto al **número** de medidas, además de los puntos de localización fija en los que se tienen instalados sensores para el control y operación de la red (medidores del sistema SCADA), pueden ser necesarios otros puntos de localización móvil que permitan obtener datos de los principales índices de operación mediante campañas de muestro en aquellos puntos en los que no hay telemetría instalada.

Existen diferentes recomendaciones sobre el número de medidores a instalar dependiendo del país o la compañía encargada del suministro. En la siguiente tabla se pueden observar los criterios seguidos por el *Water Research Centre* en el Reino Unido que definen el número de dispositivos en función de la población abastecida por el sistema de distribución.

Nº de habitantes	Nº de Medidores de Presión	Nº de Medidores de Caudal	Transductores de Nivel
Menos de 30.000 hab	De 20 a 40	De 2 a 6	De 2 a 4
Alrededor de 300.000 hab	De 40 a 80	De 5 a 15	De 4 a 8
Alrededor de 1.000.000 hab	De 60 a 120	De 15 a 30	De 10 a 20

**Tabla 9.** Criterios para el número de medidores a instalar según el WRC (Fuente: Water Research Centre)

Para seleccionar la **ubicación** de los puntos de muestreo no sólo hay que tener en cuenta la importancia estratégica de la zona, sino también otros aspectos como la facilidad de instalación de los dispositivos, la antigüedad de la conducción y los problemas en el suministros, entre otros.

#### 5.5.4 ESTUDIO DE DEMANDA Y ASIGNACIÓN DE CONSUMOS

Uno de los parámetros con mayor influencia en la bondad de un modelo de simulación hidráulica es la estimación de la demanda en los nodos de la red.

Para realizar dicha estimación se emplean diversas fuentes de información entre las que destacan los registros del propio abastecimiento (producción de agua en fuentes, volumen de agua bombeado, variación del nivel en depósitos, etc.) y las lecturas del consumo de los usuarios.

Por lo tanto, para realizar la estimación de la demanda y la posterior asignación de consumos es necesario obtener datos relativos a:

- ❖ **Lectura de contadores:** Es lo que se conoce como consumos contabilizados, es decir, aquellos que son controlados tanto en valor como en ubicación. Normalmente los gestores de los sistemas de abastecimiento disponen de una base de datos de abonados que permite recaudar toda la información referente al volumen consumido por cada uno de los usuarios en un periodo de tiempo determinado, lo que permite relacionar a cada consumidor con una conducción y esta a su vez a uno de los nodos del modelo de red.

Los errores en la medida de los contadores al igual que las fugas de agua son frecuentes, por lo que hay que tener en cuenta que la suma de agua contabilizada deberá de ser siempre inferior al volumen de agua inyectada en el mismo periodo de tiempo.

- ❖ **Consumos incontrolados y fugas:** Conocidos también como agua no contabilizada, son aquellos volúmenes que quedan fuera de control del operador y entre ellos se incluyen los errores de lectura, las fugas en la red, los errores de los equipos de medición de caudal, las tomas clandestinas, etc.

De forma general, la diferencia entre el volumen de agua inyectado en el sistema y el volumen registrado define el volumen no contabilizado, de modo que el cociente entre el agua registrada y el agua inyectada recibe el nombre de rendimiento global de la red.

- ❖ **Evolución temporal de la demanda:** Definida generalmente por el tipo de consumidor (doméstico, industrial, etc.), el nivel socioeconómico del usuario, la estacionalidad, el tipo de instalación y el nivel de presión de la red.

Una vez se ha realizado la estimación de la demanda se procede a la asignación de los consumos. Existen diferentes métodos de realizar dicha asignación y entre ellos destacan:

- *Asignación por nodos.* En aquellos casos en los que se relaciona a cada usuario con un nodo del modelo, de modo que se le asigna su consumo a dicho nodo.
- *Asignación por sectores.* Consiste en sumar el consumo de todos los usuarios que quedan dentro de un determinado sector y asignar ese volumen a un nodo. Para delimitar dichos sectores se hacen coincidir estos con la planimetría o malla del modelo.
- *Asignación mediante consumos unitarios en calles.* Conociendo los metros lineales de cada conducción y los datos de facturación de los usuarios es posible determinar el consumo unitario por calle.

### 5.5.5 CALIBRACIÓN DEL MODELO

Se puede definir la calibración de un modelo de una red de distribución de agua como el proceso por el cual se determinan los valores de un conjunto de parámetros característicos del sistema con el objetivo de que los resultados del modelo se ajusten a unos datos que se consideran como referencia. Por lo tanto, el calibrado consiste en realizar una serie de modificaciones en las entradas al modelo de modo que la salida reproduzca las medidas observadas con un grado razonable de precisión.

Entre las entradas susceptibles de ajuste se incluyen coeficientes de rugosidad en tuberías, la distribución de las demandas nodales y las variaciones operacionales en impulsiones. Por otra parte, las salidas observadas por el modelo son las presiones en los nudos de consumo, los caudales circulantes, los niveles en las unidades de almacenamiento y las predicciones de los parámetros de calidad del agua.

La calibración es una garantía para la aplicabilidad del modelo, de modo que su importancia queda reflejada en varios aspectos. En primer lugar, un modelo correctamente calibrado asegura la veracidad de los datos de salida, demostrando que este tiene la capacidad de reproducir las condiciones existentes y la fiabilidad para resolver situaciones futuras. Por otra parte, el proceso de calibración otorga al ingeniero una noción del comportamiento de la red que contribuye a mejorar el conocimiento y comprensión de la misma. En último lugar, un modelo correctamente calibrado da la posibilidad de reconstruir información perdida, no registrada o errónea lo que permite la detección de erratas en la información de partida generadas, por ejemplo, por averías o errores en la telemetría.

El proceso de calibración puede resultar una tarea laboriosa debido a la complejidad de los modelos y a los volúmenes de información que se requieren, por lo que se hace necesario definir una sistemática en la estrategia para abordar el problema de la calibración. Son muchos los procedimientos y técnicas que se han desarrollado a lo largo de las últimas décadas y entre estos destacan:

- **Calibración mediante métodos iterativos.** Basados en procedimientos de prueba y error. Consiste en suponer determinados escenarios de funcionamiento de modo que en cada iteración se intenten ajustar los parámetros de calibración comparando los valores de salida del modelo con los valores reales de la red.
- **Calibración mediante métodos de optimización.** Esta metodología busca los parámetros deseados mediante la optimización de una función objetivo. Para ello formulan la calibración como un problema de optimización no lineal consistente en una función objetivo generalmente compuesta en base a los datos de salida del modelo y a los datos registrados de la red.

Realizada la calibración, el modelo hidráulico puede ser ya utilizado como instrumento de análisis y consulta bajo diferentes condiciones de trabajo. Con el propósito de mantener la precisión, el modelo deberá de actualizarse periódicamente para mostrar los cambios significativos en la red. A su vez, dicha modificación en el esquema puede conllevar la necesidad de recalibración. Así por ejemplo, el *Water Research Centre* del Reino Unido (WRC, 1989) establece periodos entre cada recalibración de 2 años (en el caso de zonas en expansión) y de 5 años (para zonas ya implantadas sin una progresión destacable).

## 5.6 PAQUETES DE SOFTWARE

En la actualidad existe una gran cantidad de software de modelización. Algunos son gratuitos y se pueden obtener directamente por descarga en la página web del desarrollador (como por ejemplo EPANET), mientras que otros requieren de licencia para su utilización. Los costes de dicha licencia dependen en la mayoría de casos de las características y capacidades de la versión del software que se vaya a emplear. Entre las distintas fuentes desarrolladoras de modelos por ordenador destacan las firmas de consultoría, compañías comerciales de software, universidades y organismos oficiales.

Para realizar la clasificación de las distintas tipologías de paquetes software existentes se ha seguido el trabajo realizado por Bach *et al.* (2014), según el cual los distintos programas para la confección de modelos de agua urbana se puede organizar en los siguientes grupos:

- ❖ Modelos integrados basados en componentes. También conocidos por sus siglas en inglés ICBMs (*Integrated Component-Based Models*). Representan el nivel más bajo de integración dentro del subsistema de agua local. Los ICBMs permiten la modelización e integración de plantas de tratamiento, redes de tuberías, fuentes de agua, etc.
- ❖ Modelos integrados de drenaje urbano (IUDMs, *Integrated Urban Drainage Models*) y modelos integrados de abastecimiento de agua (IWSMs, *Integrated Water Supply Models*). Estas herramientas permiten la integración de subsistemas tanto de drenaje (ya sea de aguas pluviales y/o residuales) como de flujos de agua para abastecimiento. Los IUDMs posibilitan además la modelización de la escorrentía y ciertos procesos de contaminación, mientras que los IWSMs se centran en los subsistemas de abastecimiento de agua (fuentes de agua, patrones de demanda, comportamiento en el almacenamiento, etc.).
- ❖ Modelos integrados del ciclo urbano del agua (IUWCMs, *Integrated Urban Water Cycle Models*). Estos modelos unen las posibilidades de las dos tipologías anteriores en un marco común. Se centran en la fusión de las corrientes orientadas al abastecimiento y saneamiento para dar lugar a herramientas dirigidas a la evaluación de estrategias de reciclaje y a la gestión del ciclo integral del agua urbana.
- ❖ Modelos integrados de sistemas de agua urbana (IUWSMs, *Integrated Urban Water Systems Models*). Representan el nivel más alto de integración pues combinan el tratamiento de aspectos sociales, ambientales y económicos con un enfoque orientado a temas relacionados con el agua.

La Tabla 10 muestra un resumen de los diferentes productos comentados así como de las posibilidades de análisis que estos presentan.

Software	Tipo	Hidrología	Hidráulica	Contaminación	Tratamiento	Impacto aguas abajo	Almacenamiento	Consumo	Inundaciones	Red de Transporte	Plantas de Tratamiento	Operación y Control	Economía	Diseño
Software	Tipo	Procesos							Componentes			Aplicaciones		
BSM2	ICBM				X		X				X	X	X	X
EPANET		X	X				X	X		X		X		X
Stimela					X						X	X	X	X
InfoWorks	IUDM	X	X	X	X				X	X	X	X		X
SIMBA		X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X
SWMM		X	X	X					X	X		X		X
WEST		X		X	X	X	X		X	X	X	X	X	X
CALVIN	IWSM	X	X			X	X	X		X		X	X	
CityDrain 3	IUWCM	x		x	X	x	x				x	x		x
Aquacycle		x					x	x						
MUSIC		X		X	X	X	X	X					x	x
MIKE URBAN		X	x			X	X	X	X	X		X		x
UVQ		X		X	X	X	X	X						
Urban Cycle		X					X	X						
UrbanDeveloper		X					x	x	x					
DAnCE4 Water	IUSM	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	
ReVisions		x					x	x					X	
ViBe		X	X				x	x		x		x		

Tabla 10. Clasificación de software de modelización de agua urbana (Fuente: adaptado de Bach *et al.*)

Dentro de este amplio campo de paquetes software orientados a la modelización de temas relacionados con el agua y más exactamente, centrados en la simulación hidráulica empleada en la explotación de sistemas de abastecimiento de agua potable destaca por sus capacidades y reconocimiento a nivel mundial el software EPANET. Por esta razón, en el siguiente apartado se ampliarán los aspectos principales de este software desarrollado por la *Environmental Protection Agency* de los Estados Unidos.

### **5.6.1. EPANET**

#### 5.6.1.1. INTRODUCCIÓN

Un simulador hidráulico es toda aquella aplicación que permite reproducir el comportamiento real de un sistema con la mayor exactitud posible empleando con este objetivo un modelo matemático que posibilite la simulación sin necesidad de actuar directamente sobre la red.

Dentro de este contexto, EPANET es un programa de simulación aplicado al cálculo de redes hidráulicas capaz de realizar simulaciones tanto del comportamiento hidráulico como de la calidad del agua. La versión original fue desarrollada por la EPA (*Environmental Protection Agency*) de Estados Unidos en 1993. En España y demás países de habla hispana la versión más difundida es la realizada por la Universidad Politécnica de Valencia.

Su sencillez, capacidades de análisis y su libre acceso han hecho de EPANET una de las herramientas más populares para mejorar el conocimiento de las redes de distribución. Entre sus principales aplicaciones destacan la posibilidad de realizar análisis hidráulicos de redes a partir de la definición de las características de tuberías y nodos y la capacidad para realizar análisis de la calidad del agua mediante el estudio del tiempo de viaje del fluido a través de las conducciones y fuentes del recurso.

Debido a su gran extensión y por el reconocimiento a nivel mundial se ha elegido EPANET como software de ejemplo en el caso de modelos de simulación hidráulica. En los siguientes apartados se realizará una revisión de las principales características y elementos que constituyen el programa así como de las limitaciones fundamentales que presenta su utilización.



---

### 5.6.1.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES

EPANET permite la realización de simulaciones en periodo extendido del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de suministro a presión. Proporciona una herramienta capaz representar los componentes que forman el sistema a estudiar, modificar los datos de entrada y analizar los resultados en una amplia gama de formatos, como mapas con códigos de colores, tablas numéricas y curvas de evolución, entre otros.

Gracias a sus aptitudes de simulación, este software es capaz de realizar un seguimiento del caudal en conducciones y de la presión en nudos así como de estudiar la evolución del nivel en depósitos y de la concentración de las especies químicas que transporta el agua. Estas capacidades permiten hacer pruebas para conocer el comportamiento que el sistema de distribución tendría ante diferentes situaciones sin necesidad de hacer grandes esfuerzos económicos y sin emplear mucho tiempo.

Para realizar dichas funciones, EPANET presenta un **simulador hidráulico** con las siguientes características:

- No existe límite en cuanto a tamaño de la red que es capaz de representar y procesar.
- Presenta distintas posibilidades para el cálculo de las pérdidas de carga. Se pueden emplear las fórmulas de *Hazen-Williams*, de *Darcy-Weisbach* o de *Chezy-Manning*.
- Tiene en cuenta las pérdidas secundarias o menores en codos, accesorios, etc.
- Permite la incorporación de bombas de velocidad fija o variable.
- Determina el consumo energético y los costes asociados al mismo.
- Permite modelar distintos tipos de válvulas (de corte, de retención y reguladoras) y depósitos de geometría variable (en los que el diámetro es variable con el nivel).
- Puede considerar distintos tipos de demanda en los nudos, cada uno con su propia curva de modulación y permite la modelización de salidas de agua cuyo caudal dependa de la presión.

Como ya se ha mencionado con anterioridad, además de las posibilidades de simulación hidráulica, EPANET ofrece las siguientes prestaciones para la creación de **modelos de calidad**:

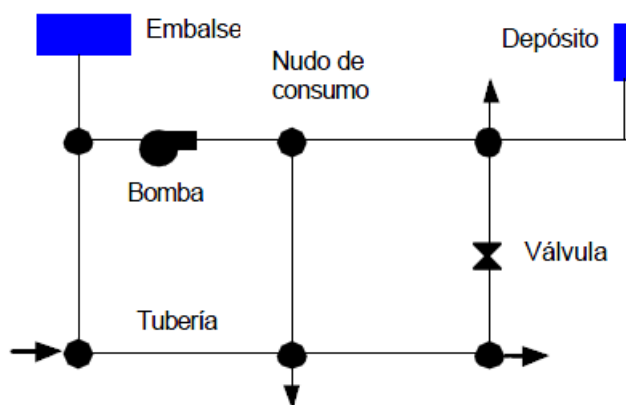
- Modelación del desplazamiento de trazadores no reactivos a lo largo de la red.
- Modelación del comportamiento de sustancias reactivas cuya concentración varía a lo largo del tiempo.
- Modelación del tiempo de permanencia del agua mientras circula por la red. También conocida como “edad del agua”.
- Seguimiento de la procedencia del agua, es decir, de la fracción de agua que llega a un nudo procedente de un nudo determinado.
- Modelación de reacciones que tienen lugar tanto en el seno del agua como en las paredes de las tuberías.

Todas estas prestaciones permiten el estudio y análisis de los fenómenos de mezclado de agua de diferentes fuentes, envejecimiento del agua mientras discurre por la red, disminución de la concentración de cloro residual, crecimiento de los productos de desinfección y el seguimiento del avance del contaminante tras su intrusión en la red.

Las capacidades de EPANET como simulador hidráulico y de calidad del agua permiten abordar estudios sobre el comportamiento de la red desde puntos de vista muy distintos lo que facilita la resolución de casi cualquier cuestión que se desarrolle en el proceso de análisis de un sistema de distribución a presión.

#### 5.6.1.3. ELEMENTOS DE LA RED REPRESENTADOS

EPANET modela una red de distribución como un conjunto de componentes conectados entre sí. Para ello emplea seis tipos fundamentales de componentes físicos que permiten representar y desarrollar todas las relaciones para simular el comportamiento del sistema.



**Figura 32.** Componentes físicos representados por EPANET (Fuente: Manual del Usuario de EPANET 2)

### ❖ Nudos de consumo

También denominados nodos. Representan los puntos de la red donde entra o sale agua de la misma, aunque también pueden constituir simples puntos de paso.

Los datos asignados a cada nudo son la cota respecto al nivel de referencia, la demanda de agua (positiva si es salida de agua o negativa en caso de entrada) y la calidad inicial del agua.

### ❖ Embalses

Los embalses representan nudos en los que se encuentra una fuente externa de capacidad ilimitada o un sumidero natural. Se emplean para modelizar lagos, acuíferos subterráneos, captaciones de ríos o entradas a otros sistemas. Los datos a incorporar son la altura piezométrica y la calidad del agua.

### ❖ Depósitos

Son elementos que presentan un límite en su capacidad de almacenamiento del recurso. Sus datos básicos son la cota de la solera (que indica el nivel nulo), el diámetro (o su geometría en el caso de no ser cilíndrico) y el nivel de agua inicial, mínimo y máximo.

### ❖ **Tuberías**

Representan objetos lineales que conectan objetos puntuales del sistema. EPANET asume que las tuberías se encuentran llenas puesto que se trata de un modelo hidráulico a presión. Los datos a incorporar incluyen los nudos inicial y final que definen la tubería, el diámetro, la longitud, el coeficiente de rugosidad (y el de reacción en la pared y en el medio en el caso del modelo de calidad) y su estado (abierta, cerrada o con válvula de retención).

### ❖ **Bombas**

Son elementos que impulsan el agua comunicando energía al fluido. Los principales datos a incorporar al modelo son los nudos de aspiración e impulsión y la curva característica.

### ❖ **Válvulas**

Las válvulas limitan la presión y el caudal en un punto determinado de la red. EPANET permite la representación de:

- Válvulas Reductoras de Presión (VRP), que permiten limitar la presión en los nudos aguas abajo.
- Válvulas Sostenedoras de Presión (VSP) para mantener la presión aguas arriba.
- Válvulas de Rotura de Carga (VRC) que fuerzan la caída de presión al paso de las mismas.
- Válvulas de Control de Caudal (VCQ) que limitan el caudal a su paso.
- Válvulas de Regulación (VRG) que simulan una válvula parcialmente cerrada.
- Válvulas de Propósito General (VPG) que pueden emplearse para simular una turbina o un descenso dinámico en un pozo.

Los datos de entrada son los nudos aguas arriba y aguas abajo, el diámetro, la consigna y su estado.

5.6.1.4. INTERFAZ DE USUARIO

EPANET presenta una completa interfaz gráfica que permite la construcción de la representación gráfica de la red, la edición de las propiedades de todos los elementos representados, la elección de las opciones de simulación y la ejecución de las mismas, así como el acceso a los resultados obtenidos.

Puesto que se trata de la última versión, la siguiente figura representa las partes principales de **EPANET 2.0**, entre las que destacan la barra de menús, la barra de herramientas, la barra de estado y las ventanas de mapa de red, visor de datos y editor de propiedades.

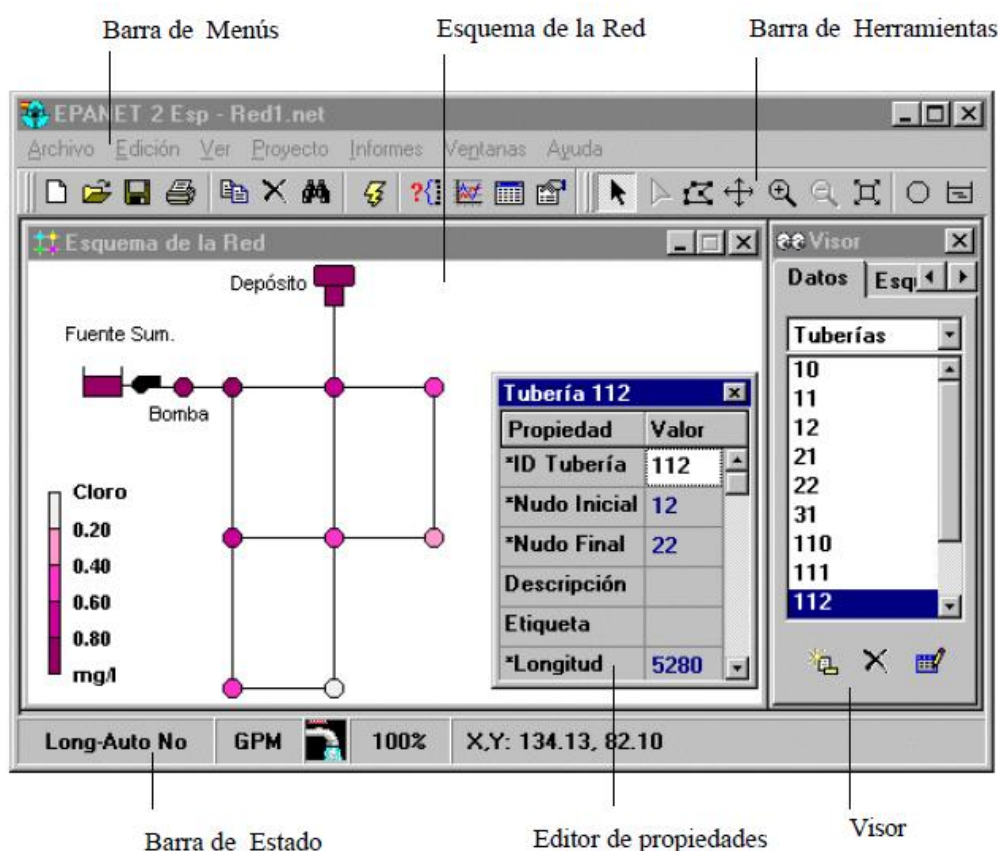


Figura 33. Interfaz básica de EPANET 2.0 (Fuente: Manual de usuario EPANET 2.0)

La **barra de menús** presenta la típica apariencia del entorno Windows y ofrece las posibilidades relativas al manejo de ficheros, la edición mediante las herramientas del sistema o la propia ayuda de la aplicación. Además de estas funciones clásicas, esta barra también incluye menús específicos como los de Proyecto e Informe, los cuales permiten generar y analizar los resultados de la simulación.

La **barra de herramientas** permite al usuario la edición del modelo de red mediante la incorporación o eliminación de los componentes de la red de manera visual con el puntero del ratón. También se incluyen las opciones relativas a la generación de informes, gráficos y tablas de los resultados obtenidos en la simulación.

La **barra de estado** situada en la parte inferior incluye información sobre el estado de ejecución de la simulación, la posición del cursor, el sistema de unidades, y demás datos que facilitan el manejo y entendimiento del programa.

El **mapa de red** proporciona una representación esquemática del sistema de distribución que permite obtener al usuario una visión de la ubicación de los componentes, su conexión y las propiedades de los mismos.

El **visor de datos** permite recorrer uno por uno los elementos de la red permitiendo su eliminación o la edición de sus propiedades.

En último lugar, el **editor de propiedades** permite la modificación de las propiedades (características físico-químicas y ubicación) del ítem seleccionado sobre el mapa de red.

#### 5.6.1.5. LIMITACIONES DE EPANET

El software EPANET ofrece numerosas ventajas en cuanto a la confección de modelos de red, ejecución de simulaciones y análisis y visualización de los resultados obtenidos en dichas simulaciones. Sin embargo, presenta una serie de limitaciones que hacen de este programa una herramienta con margen de mejora, sobre todo cuando es comparado con un entorno SIG en el que se ha integrado la capacidad de simulación de EPANET.

Siguiendo el trabajo de H.Bartolín (2013), "Confección de modelos de redes de distribución de agua desde un SIG y desarrollo de herramientas de apoyo a la toma de decisiones", los principales inconvenientes de trabajar directamente sobre EPANET en lugar de hacerlo sobre un entorno SIG con capacidad de simulación son:

- No permite trabajar con capas simultáneamente ni con ficheros CAD y no ofrece demasiadas facilidades a nivel de edición de elementos de la red.
- No garantiza la conectividad de toda la red pues no dispone de herramientas de chequeo y comprobación de dicha conectividad. Por lo tanto la detección de partes desconectadas de la red debe de hacerse manualmente.

- No permite la interpolación automática de cotas a partir de datos de campo (como por ejemplo puntos de cota, curvas de nivel o modelos digitales del terreno).
- La asignación de consumos es manual y se realiza nudo por nudo, por lo que se convierte en un proceso tedioso.
- El principal inconveniente de su interfaz es que no es multiproyecto.
- No ofrece herramientas para seleccionar uno o varios escenarios y no permite la comparación entre los mismos.





# **CAPÍTULO 6. GESTIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA**

## **6.1 GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO**

El mantenimiento se ha convertido en un componente fundamental en los múltiples sectores de la ingeniería, llegando a ser un aspecto clave para la toma de decisiones en el ámbito del diseño y ejecución de todo tipo de proyectos.

Como se ha comentado en apartados anteriores, determinados responsables de ciertos servicios públicos han pasado a convertirse en gestores, por lo que deben de basarse en criterios de eficiencia y rentabilidad a la hora de llevar a cabo la toma de decisiones. Este hecho obliga a estos organismos a contar con sistemas de explotación que permitan incorporar modelos de optimización de gastos a lo largo de la vida útil de toda la infraestructura.

### **6.1.1 OBJETIVOS DEL MANTENIMIENTO**

El término mantenimiento se refiere al conjunto de acciones destinadas a mejorar ciertos aspectos operativos de la instalación, entre los que se incluye restablecer un determinado elemento a un estado específico con el objetivo de mantener la funcionalidad, seguridad y productividad del mismo.

Atendiendo a esta definición se pueden enumerar las principales objetivos de todo modelo de mantenimiento:

- **Gestión del fallo**

Evitar, reducir y reparar los posibles fallos en el sistema con el objetivo de aumentar el control sobre la explotación, de modo que se disminuya la gravedad de las fallas y su posibilidad de ocurrencia en la fase de servicio.

- **Vida útil**

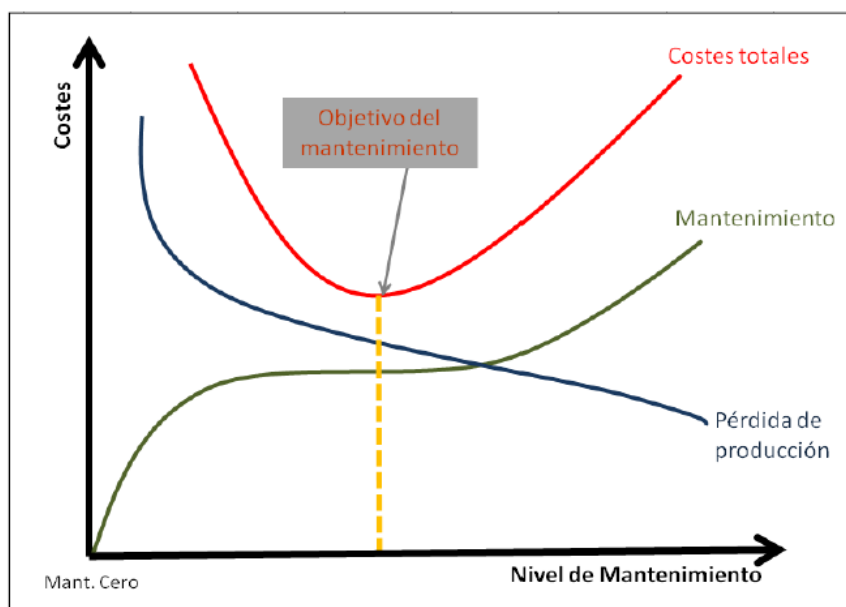
Alcanzar y prolongar la vida útil de los elementos de la infraestructura.

- **Gestión económica**

Reducir al máximo los costes relacionados a las reparaciones y paradas por averías que conlleven pérdidas en la producción e interrupción del servicio.

Desde el punto de vista económico, el principal objetivo del mantenimiento es reducir al valor mínimo el ratio entre gastos y beneficios:

$$RATIO = \frac{\text{GASTOS (adquisición, mantenimiento, parada)}}{\text{Beneficios por servicio prestado}}$$



**Figura 34.** Costes en función del mantenimiento (Fuente: Balsa, José)

---

## 6.1.2 TIPOS DE MANTENIMIENTO

Tradicionalmente se han distinguido **4 tipos** de mantenimiento en función del carácter de las tareas que llevan a cabo: **mantenimiento correctivo, preventivo, predictivo y modificativo.**

### 1. Mantenimiento Correctivo

Se entiende como mantenimiento correctivo al conjunto de tareas destinadas a la reparación una vez que se ha producido el fallo.

La adopción de este tipo de mantenimiento está justificada en aquellos casos en los que la intervención ante el fallo de la instalación es rápida y los costes y riesgos derivados de la avería son mínimos, de manera que se asegure en todo momento las condiciones de seguridad en el servicio. Además, se debe de confirmar que el paro eventual debido a la falla no es crítico para todo el sistema de explotación.

Por otra parte, esta metodología presenta una serie de desventajas importantes entre las que destacan:

- Paradas y daños imprevisibles que afectan al control de la planificación de la explotación.
- Interrupción del servicio y la consecuente afección al cliente.
- Pérdidas de producción.

### 2. Mantenimiento Preventivo

Esta táctica de mantenimiento se basa en la ejecución planificada de un sistema de actuaciones programadas antes de que se produzca la avería con el objetivo de reducir al mínimo valor la probabilidad de fallo o evitar la degradación de las instalaciones. Por lo tanto, se puede definir como una metodología de mantenimiento prevista, preparada y programada antes de la fecha probable de fallo.

Dentro de esta tipología se puede diferenciar dos tipos de actuaciones a llevar a cabo:

- **Intervenciones** destinadas a la sustitución o mejora de los componentes.
- **Inspecciones** para comprobar el funcionamiento de las instalaciones.

Como toda metodología, el mantenimiento preventivo presenta una serie de ventajas e inconvenientes.

Por un lado, supone una reducción del porcentaje de fallos que requieren intervenciones correctivas, lo que conlleva a su vez un aumento de la disponibilidad. En aquellos casos en los que sea necesaria la interrupción del servicio, la flexibilidad a la hora de realizar las actuaciones permite ejecutar las mismas en el momento más adecuado.

En cuanto a las desventajas destacan la necesidad de planes programados de mantenimiento y los aumentos de los costos en los casos en los que no se realiza un correcto análisis del nivel de mantenimiento preventivo. Asimismo, presenta la desventaja de plantear la sustitución o reparación de los componentes antes del final de su vida útil, lo que implica cierta pérdida económica.

### **3. Mantenimiento Predictivo**

Este tipo de mantenimiento puede considerarse como una variante del mantenimiento preventivo basado en el estado de los elementos.

Busca conocer e informar permanentemente de las condiciones y operatividad de la explotación sin necesidad de realizar paradas ni interrupciones. Para lograr este control se realizan una serie de mediciones con el objetivo de tener conocimiento de los valores de determinadas variables representativas de las condiciones de los componentes del sistema.

Es el tipo de mantenimiento con mayor grado de tecnología aplicada, pues requiere medios técnicos avanzados e incluso conocimientos matemáticos y físicos relacionados con el sistema de explotación. Es por ello que su principal desventaja radica en los elevados costes de los equipos necesarios y en la alta cualificación técnica necesaria para el personal.

En cuanto a sus ventajas destaca la posibilidad de ajustar con una elevada precisión el ciclo de vida de los componentes con la finalidad de conocer el momento adecuado de renovación o recambio.

### **4. Mantenimiento Modificativo**

Reúne todas las acciones complementarias al mantenimiento tradicional, tanto aquellas realizadas para modificar las características de la instalación como las ejecutadas para lograr una mayor fiabilidad de las mismas, todo ello encaminado a evitar posibles fallos.

---

### 6.1.3 FACTORES QUE DETERMINAN EL TIPO DE MANTENIMIENTO

A lo largo de su vida útil, la mayoría de los componentes de una red de distribución van a ser objeto de diferentes tipos de actividades de mantenimiento de manera que no se puede pensar en aplicar una sola tipología a cada elemento en particular. Un claro ejemplo de esta combinación de operaciones se encuentra en el mantenimiento de una impulsión de una red de agua. A lo largo del periodo de trabajo de la bomba se deberán de realizar inspecciones visuales en busca de fugas al igual que sustituciones periódicas de los elementos de sellado con el objetivo de evitar pérdidas (mantenimiento preventivo). De igual modo, se deberán de llevar a cabo mediciones de sus indicadores principales de estado como por ejemplo las vibraciones o la temperatura (mantenimiento predictivo) con el propósito de determinar las posibles necesidades de reparación (mantenimiento correctivo).

La combinación más idónea de todos estos tipos de actividades de mantenimiento vendrá determinada por razones de diferente índole: coste derivado de las pérdidas de producción, coste de reparación, seguridad del sistema, consecuencias del fallo, etc. Según *Balsa Barreiro et al.* (2011), la información necesaria para la elaboración de un correcto plan de mantenimiento está constituida por:

- Características del deterioro de los elementos:
  - Tiempo medio entre fallos.
  - Modos de fallo.
  - Aparición del fallo (instantánea o progresiva).
  - Tiempo de reparación.
  - Naturaleza del parámetro de fallo y su potencial utilización como medio de diagnóstico.
- Factores económicos:
  - Coste del material.
  - Coste de la mano de obra.
  - Coste de parada.
  - Valor residual por reemplazo antes de fallo.
  - Coste del monitorizado.

- Factores de seguridad:
  - Usuario.
  - Manipulador.
  - Clientes.
  - Deterioro medioambiental.
  - Disposiciones legales.

## **6.2 CICLO DEL MANTENIMIENTO**

Las redes de abastecimiento son sistemas complejos cuya gestión y manejo implican un profundo conocimiento de los procesos físicos, económicos y sociales involucrados en el sistema.

Al ser las conducciones los elementos esenciales de una red de abastecimiento, en el pasado las principales herramientas para la gestión y prevención de errores se basaban en simples aproximaciones estadísticas que tenían en cuenta principalmente el número de roturas por kilómetro. El desarrollo de nuevas tecnologías junto con el avance en el conocimiento del sistema hace posible el avance de enfoques más eficaces y precisos para mantener los componentes de la red.

Uno de los principios del mantenimiento integral es la anticipación al fallo, por lo que serán de gran importancia aquellas tecnologías que permitan detectar los fallos antes de que estos ocurran. Dentro de estas herramientas se pueden incluir los componentes que monitorizan y prevén el comportamiento del sistema (SCADA, Modelos matemáticos, etc.), las técnicas de evaluación del estado de los elementos así como los modelos de soporte a la toma de decisiones.

La siguiente figura esquematiza el ciclo de gestión del mantenimiento según Kleiner y Makar (2000).

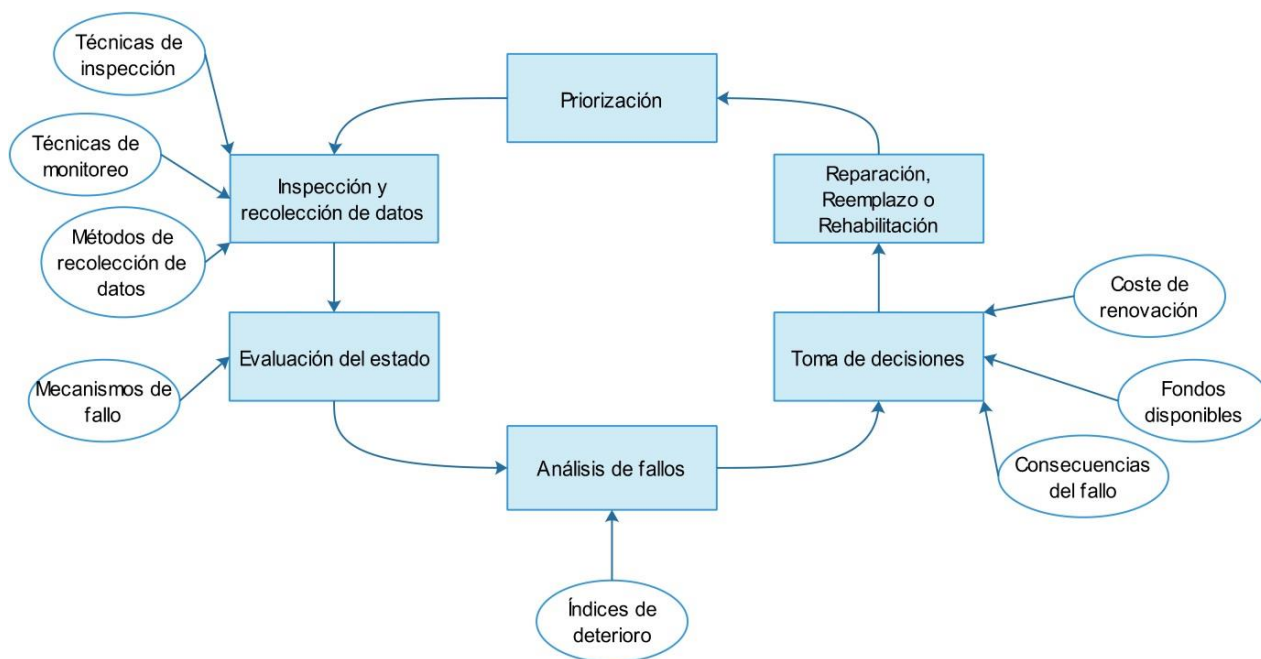


Figura 35. Ciclo de mantenimiento (Fuente: adaptación de Makar y Kleiner, 2000)

### 6.2.1. PRIORIZACIÓN DE COMPONENTES PARA EL ANÁLISIS

En la actualidad, la determinación de la prioridad de intervención es un objetivo principal de las empresas gestoras y conlleva diferentes tipos de tareas.

Las actuaciones en una red de abastecimiento se realizan cuando sus componentes han envejecido, no cumplen las condiciones de operación exigidas o, en general, no satisfacen las necesidades actuales. Estos asuntos, unidos a los aspectos de gestión (mejora de los niveles de servicio, reducción de los niveles de riesgo, disminución de los costes de operación y mantenimiento, etc.) constituyen las razones fundamentales que llevan a una organización encargada de un sistema de abastecimiento a plantearse una intervención en la red.

Todos estos temas, junto al coste de la puesta en práctica de las técnicas de inspección del estado determinan cuales deben ser los componentes seleccionados para el análisis.

El papel que el componente tenga en la red constituye un factor importante a la hora de dar prioridad a su análisis. Por ejemplo, cuando se trata de conducciones principales de aducción y transporte donde las consecuencias de fallo pueden ser graves, el análisis y estudio de su estado plantea pocas dudas puesto que el coste de inspección y caracterización es bajo en relación al riesgo fallo.

### 6.2.2. INSPECCIÓN Y RECOLECCIÓN DE DATOS

Fundamentalmente existen dos formas de recopilar información sobre los daños de una red de abastecimiento.

Por un lado, existen **técnicas de inspección directa** que permiten obtener información acerca de la condición de los componentes. Uno de los principales datos que representa el estado de la red es el número de fugas. Dichos problemas suelen presentar una serie de características que ayudan a detectar su presencia (aparición de humedades en el suelo, hundimientos del pavimento, quejas de los abonados, etc.) lo que facilita el empleo de sistemas directos de detección mediante técnicas de inspección no destructivas. Entre dichas técnicas destacan los registradores acústicos, las varillas de escucha, geófonos, geo-radares y resto de herramientas que facilitan la delimitación y localización de las fugas.

Por otro lado, la **monitorización** de los principales indicadores de operación (presión, caudal, parámetros de calidad, etc.) también puede ser utilizada para mejorar el conocimiento del estado del sistema. Gracias al sistema de teledatada y, en general, al sistema SCADA se hace posible visualizar los diferentes parámetros relativos a la explotación en tiempo real lo que permite analizar sus valores. En consecuencia, discontinuidades importantes en los regímenes de presiones pueden indicar la aparición de roturas al igual que valores anormales de caudal también puede estar asociados a fugas en la red.

### 6.2.3. VALORACIÓN DE CONDICIONES. MECANISMOS DE FALLO

El objetivo de valorar las condiciones de los activos es obtener información representativa del estado actual de los componentes. Tradicionalmente, la mayoría de las organizaciones se apoyaban en criterios basados en inspecciones visuales en unión con la opinión de expertos. Hoy en día, las avanzadas herramientas de diagnóstico, los métodos de ensayo no destructivos y las herramientas de soporte a la decisión han mejorado la fiabilidad y la precisión de los métodos de evaluación del estado.

Una manera efectiva de valorar la condición de los componentes es la aplicación de pesos (W) a cada uno de los defectos (ya sean estructurales u operacionales) para conseguir la estandarización en las medidas y así poder obtener un número o puntuación representativa del estado que permita realizar comparaciones.



Para la obtención de dichas puntuaciones se pueden seguir diferentes protocolos de asignación de pesos (como por ejemplo el empleado por el *National Research Council* de Canadá para el caso de tuberías de saneamiento) y diferentes métodos de valoración:

- Puntuación media:  $\frac{\sum_{i=1}^n W_{defecto\ i}}{Longitud\ del\ tramo}$
- Peso máximo:  $W_{máximo\ defecto}$
- Suma de pesos:  $\sum_{i=1}^n W_{defecto\ i}$

### 6.2.3.1 FACTORES DESENCADENANTES DEL FALLO

#### ○ **Desgaste**

El desgaste normal afecta principalmente a las piezas móviles de los elementos que componen la red, por lo que tanto las bombas como los elementos móviles de las válvulas suelen ser los instrumentos más propensos a este tipo de deterioro.

#### ○ **Corrosión**

Todas las aguas son agresivas en cierto grado, de modo que su tendencia corrosiva dependerá de sus características químicas y físicas.

Uno de los principales problemas que se presentan en las instalaciones hidráulicas es la corrosión de los materiales metálicos, que produce perforaciones y obstrucciones en las líneas de agua. La corrosión puede atacar desde tuberías y depósitos hasta elementos de hormigón armado, que son susceptibles de sufrir agresiones por mecanismos fisicoquímicos y biológicos.

Además de ser causa directa, la corrosión puede ser el factor desencadenante de otros problemas. Ejemplo de ello es la pérdida de metal en conducciones o la generación de subproductos del proceso corrosivo que contribuyen a la reducción de la capacidad de transporte y a la disminución de la calidad del agua.

○ **Factores hidráulicos**

Algunas instalaciones de suministro de agua fallan porque la carga sobre ellas excede la carga para la que fueron diseñadas. Un incremento imprevisto en la presión genera un empuje brusco en las paredes internas de la conducción y, en consecuencia, un posible desplazamiento, que se traduce en una rotura.

Dichos aumentos en la presión pueden ser el producto de la apertura y cierre de válvulas o bien pueden venir determinados por un aumento de la demanda cuando los componentes de la red (bombas, tuberías, etc.) se han quedado obsoletos.

Las principales causas de fallo asociadas a factores hidráulicos son:

- Golpe de ariete

Las tuberías pueden romper por golpe de ariete provocado por el arranque súbito del sistema de bombeo, la manipulación incorrecta de las válvulas o un proceso de vaciado/llenado brusco. Este fenómeno está caracterizado por la aparición de grandes fuerzas tensionales adicionales que pueden provocar la rotura del conducto.

- Cavitación

La cavitación es un efecto hidrodinámico que se produce cuando la presión del fluido cae por debajo de la presión de vapor del agua, lo que provoca la formación localizada de burbujas de vapor en el interior del fluido.

El principal efecto de la cavitación es la erosión de las paredes internas de la tubería, lo que conlleva un aumento de la probabilidad de fallo de la estructura, así como un aumento de los ruidos en el interior de las conducciones causados por las explosiones de burbujas de vapor.

○ **Defectos de fabricación y puesta en obra**

Partir de un elemento diseñado correctamente no garantiza la inexistencia de fallos en el proceso de fabricación e instalación.

La falta de protocolos para asegurar la calidad del producto finalizado es una de las principales causas de las imperfecciones en el proceso de fabricación. La falta de uniformidad

en el espesor de las conducciones junto con los errores en el proceso de extrusión en tuberías plásticas son las principales causas de la aparición de defectos.

Al igual que en el proceso de fabricación, en los procesos de instalación también es necesario seguir un protocolo para asegurar la calidad. Este procedimiento debe de incluir todas las indicaciones acerca de la calidad de la instalación: profundidad y disposición de la tubería, compactación y calidad del relleno, forma de unión, etc.

Las empresas que trabajan con suministradores y contratistas deben de tener preparados los documentos contractuales, así como las inspecciones de calidad con el objetivo de reducir el riesgo derivado de una mala instalación.

### 6.2.3.2 CONSECUENCIAS DEL FALLO

Al tratarse de un servicio primario para la población, la probabilidad de fallo (con la consiguiente interrupción del suministro) es uno de los factores más importantes que conducen a las empresas de abastecimiento a invertir tiempo y dinero en obtener información de la red.

Ante la aparición de un fallo, se originan una serie de consecuencias que se pueden traducir en un conjunto de costes de los que la empresa debe de hacerse cargo.

#### ○ **Costes directos**

Se definen los costes directos como aquellos que son directamente identificables y atribuibles a dicho objetivo de coste. Se trata pues de costes variables directamente proporcionales al volumen de producción o nivel de la actividad llevada a cabo.

En relación al fallo del sistema, se pueden asociar los siguientes costes directos:

- Coste de la reparación: Vienen determinados por el tipo de elemento a reparar, tamaño, tipo de rotura, material, localización del elemento, etc.
- Coste del recurso perdido: Cantidad de agua perdida durante el periodo de tiempo en el que la rotura estuvo presente en el sistema. Está afectado por la importancia que el elemento tiene en la red (diámetro, caudal, etc.) así como por la severidad del fallo.

- Coste del daño a bienes y responsabilidades: Los fallos en el sistema de abastecimiento pueden provocar inundaciones, derrumbamientos e incluso daños a las estructuras adyacentes, con el consiguiente perjuicio a la población (riesgo de muertes o lesiones).

- **Costes indirectos:**

Son aquellos que no pueden atribuirse de una manera directa a una operación o trabajo específico, por lo tanto, no se pueden asignar a una única unidad de referencia concreta.

En relación con un fallo, el principal coste indirecto es el producido por la falta del recurso para llevar a cabo una actividad de producción o la prestación de un servicio (pérdida de producción en una planta industrial, taller o propiedad comercial debida a la interrupción del suministro del agua). El proceso de reparación también puede acelerar el deterioro de los elementos cercanos al componente dañado, como caminos, alcantarillas o cables subterráneos (electricidad, telefonía, etc.).

- **Costes sociales:**

El coste social de un fallo en un sistema de abastecimiento está constituido por los beneficios que la sociedad pierde al verse interrumpido el servicio. Entre estos costes destacan:

- Pérdida de la calidad de vida y de la confianza pública: En la actualidad, los cortes de agua durante periodos de tiempo prolongados son inaceptables por parte de la población.
- Costes debidos a la interrupción de servicios especiales, como hospitales y escuelas.
- Pérdidas de la calidad del servicio, traducido en pérdidas de presión y en el descenso de la calidad del agua (intrusión de contaminantes procedentes del terreno circundante, etc.)

## 6.2.4. ANÁLISIS DE FALLOS

### 6.2.4.1. DISPONIBILIDAD Y FIABILIDAD

Aunque ambos términos están relacionados con los fallos en el sistema, sus conceptos son totalmente diferentes.

La **disponibilidad** de un equipo se define como el porcentaje de tiempo (en relación a un año generalmente) durante el cual el sistema se encuentra operativo. Evidentemente, la disponibilidad estará influenciada por los tiempos de parada ocasionados por los fallos y las operaciones de mantenimiento tanto correctivo como modificativo. En la siguiente tabla se proporcionan algunos datos informativos sobre la disponibilidad de los componentes de un sistema de distribución de agua.

Subsistema	Tiempo medio entre fallos ( $\cdot 10^6$ h)	Tiempo medio de reparación (h)	Mantenimiento preventivo (horas/año)	Disponibilidad
Bombas	0.032066	9.6	2	0.99116
Transmisores potencia	0.035620	2.3	7	0.99898
Motores	0.066700	6.9	14	0.99816
Válvulas	0.014440	11.6	41	0.96446
Elementos de control	0.083580	3.7	9	0.9987

**Tabla 11.** Valores típicos de fallos y tiempos de reparación de componentes de un sistema de distribución de agua (Fuente: Curso de análisis, diseño y mantenimiento de redes a presión, 1997)

La **fiabilidad** de un componente se entiende como la probabilidad de que dicho elemento no experimente ningún fallo en un intervalo de tiempo  $[0, t]$ , partiendo del supuesto de que el equipo es nuevo o ha sido reparado en  $t=0$ . Matemáticamente, la fiabilidad puede expresarse de la siguiente forma:

$$F(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt$$

Donde  $f(t)$  es la función de densidad de probabilidad de tiempo de fallo cuyo concepto se desarrollará en el siguiente apartado.

#### 6.2.4.2. PROBABILIDAD DE FALLO

La probabilidad de fallo se puede determinar mediante enfoques **estadísticos** o **físicos** puesto que ambos permiten predecir el deterioro de los componentes de la red. Además de por el desgaste físico, el fallo de un sistema puede venir determinado por una insuficiencia de la capacidad hidráulica o una degradación de la calidad del agua.

En términos generales, los **modelos físicos** existentes se pueden clasificar en determinísticos y probabilísticos. Hay que tener en cuenta que este tipo de metodología no permite tratar simultáneamente todos los factores principales que determinan los mecanismos de fallo, que al tratarse de una conducción son:

- a. Propiedades del elemento: Propiedades estructurales, tipo de material, calidad de la instalación, etc.
- b. Cargas sobre el elemento: Cargas debidas a la presión operacional, sobrecarga de suelo, cargas de tráfico, etc.
- c. Propiedades físico-químicas: Deterioro del material ocasionado por los productos químicos externos e internos.

Los mecanismos físicos que conducen a la rotura son frecuentemente muy complejos de modo que su comprensión no es en absoluto sencilla. Además, usualmente no se dispone de la información suficiente para poder validar este tipo de modelos.

Por otro lado, los **modelos estadísticos** se pueden clasificar en deterministas y probabilísticos. Estos modelos enfocados a la predicción de roturas en la red emplean información histórica disponible sobre fallos en el pasado para poder determinar un patrón de rotura. Parten de la hipótesis de que dichos patrones se repetirán en el futuro al igual que lo han hecho en el pasado.

#### 6.2.5. TOMA DE DECISIONES

La consecuencia potencial de un fallo en una sección de tubería dada es el factor más importante en la determinación de las decisiones relativas al mantenimiento del sistema. Aunque en la situación actual el factor económico predomina en la mayoría de las decisiones que un gestor de una red de abastecimiento debe de llevar a cabo, es conveniente considerar

otros factores además de los costos, como las consecuencias derivadas de la interrupción del servicio, la capacidad hidráulica, la fiabilidad, la calidad del agua, el riesgo de daños a la propiedad, y los impactos ambientales. Todas estas consecuencias han sido explicadas anteriormente en el apartado 6.2.3.2.

A pesar de la reflexión anterior, la realidad suele demostrar que el principal criterio para la decisión es el económico. En este sentido, la siguiente figura representa los costes de reparación y remplazo de tuberías como una función del tiempo.

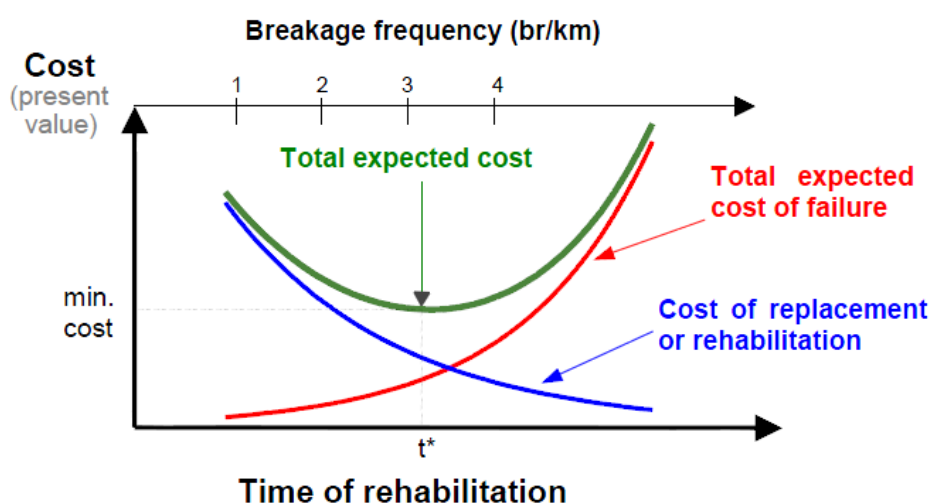


Figura 36. Decisión para renovar según coste de fallo (Fuente: Makar y Kleiner, 2000)

La curva roja representa el coste total esperado derivado del fallo. Este valor es calculado multiplicando el coste de un solo fallo (incluyendo los costes directos, indirectos y sociales) por la frecuencia o probabilidad de que dicho fallo se produzca.

Por otro lado, la curva azul representa el coste de remplazo o rehabilitación. La declinación de esta curva indica el hecho de que el valor presente del coste de remplazo o rehabilitación disminuye con el tiempo. Inversamente, la probabilidad de fallo aumentará con el paso del tiempo debido al envejecimiento y deterioro del elemento.

El coste total, representado en verde, será la suma de ambas curvas y su forma es normalmente convexa, presentando un mínimo que coincide con el tiempo óptimo de rehabilitación-renovación.

Es necesario tener en cuenta que el objetivo de la gestión de los elementos de la red es la prevención de fallos más que la gestión de los propios fallos.

En redes de abastecimiento reducidas el coste del fallo es relativamente pequeño en relación al coste de renovación de la tubería, por lo que en estos casos se recurre normalmente al mantenimiento correctivo. El tiempo óptimo de reemplazo vendrá determinado por el instante en la etapa de deterioro del elemento donde sea tolerable una frecuencia dada de roturas. En el caso de tuberías, se suele utilizar el número de roturas por kilómetro.

Cuando se trata de componentes de grandes redes, la sustitución completa no suele ser llevada a cabo excepto en casos extremos debido a los elevados costes implicados en el proceso. Por lo tanto, la intervención más usual consistirá en reparaciones de tipo localizado.

Como ya se ha mencionado, el coste asociado a un fallo es un factor fundamental a tener en cuenta a la hora de tomar las decisiones en temas de mantenimiento. Cuando el coste asociado al fallo es relativamente bajo y puede ser tolerada cierta frecuencia de roturas, es normalmente suficiente confiar en el índice histórico de roturas que permita obtener un modelo de deterioro de la tubería para predecir los índices de roturas futuras. Sin embargo, cuando el coste de fallo es alto es necesario adoptar un enfoque proactivo de anticipación al fallo.

## 6.2.6. REPARACIÓN O REEMPLAZO

### 6.2.6.1. CONCEPTOS PREVIOS

Aunque los conceptos de rehabilitación y de renovación son fácilmente comprensibles, surge con frecuencia cierta confusión con el significado de los mismos.

Se entiende por **renovación** la acción de reestablecer o reanudar un cierto elemento que ya ha servido por otro nuevo de la misma clase. Sustituir, cambiar o reponer son términos referidos al concepto de renovar.

Por otra parte, el término **rehabilitar** hace referencia a la acción de restituir un elemento a su antiguo estado. Términos como reparar, arreglar o restaurar hacen referencia al concepto de rehabilitación.

Dentro de este contexto se pueden diferenciar dos tipos de políticas: Políticas reactivas o políticas activas.

- Por un lado, una **política reactiva** es aquella en la que se busca la gestión de la crisis, es decir, se realizan las intervenciones sobre el elemento después del fallo o rotura en



el sistema. Se caracteriza por incluir actuaciones no programadas inicialmente que se realizan cuando se detecta el fallo (ya sea de manera natural o por medio de revisiones técnicas). Este tipo de política es el que viene aplicándose en la gestión técnica de sistemas de distribución de agua.

- Por otro lado, las **políticas activas** se basan en la gestión del riesgo, de modo que se realizan planes de seguimiento de los elementos con el objetivo de actuar previamente al fallo. Incluye actividades relacionadas con la conservación de la infraestructura, de manera que puede ser interpretado como una conservación programada.

Aunque resulta evidente que esta última es la manera de actuación deseable, su aplicación requiere de un amplio conocimiento y estudio de la red, así como de una base de datos importante, tanto en su magnitud como en la calidad de la información que contiene.

#### 6.2.6.2. CRITERIOS PARA RENOVAR O REHABILITAR

Como se describe anteriormente, el mantenimiento, rehabilitación y, en definitiva, la renovación de los elementos de la infraestructura del sistema de distribución es una de las principales preocupaciones de los gestores, sobre todo cuando se trata de elementos con muchos años de servicio.

Sin embargo, a la hora de llevar a cabo el plan de intervención no solo hay que tener en cuenta la edad del componente a intervenir, sino también otro tipo de factores entre los que destacan:

- *Deterioro estructural*

Con el objetivo de realizar comparaciones, la magnitud de las pérdidas se expresa con indicadores de gestión.

Cuando se trata de conducciones, uno de los principales parámetros que se emplean para determinar y comparar el estado relacionado con las fugas es el valor que representa el caudal perdido por unidad de longitud ( $\text{m}^3/\text{Km}$  y hora).

Alternativamente, se puede medir el comportamiento frente a las pérdidas mediante el número de roturas por unidad de longitud y año.

- *Deterioro hidráulico*

El aumento del número de abonados a la red, así como un aumento de las dotaciones provocan un incremento de los volúmenes demandados y, con el paso del tiempo, una instalación que años atrás era suficiente puede quedar obsoleta.

- *Deterioro de la calidad*

En los elementos e instalaciones de un sistema de distribución se producen reacciones químicas y biológicas incontroladas que pueden derivar en una pérdida de la calidad del agua. En el pasado, las redes se operaban y gestionaban en base a criterios hidráulicos y económicos, de modo que los factores de calidad solo eran revisados ante riesgos serios. Sin embargo, esta actitud está cambiando puesto que muchos gestores se han dado cuenta de la importancia que el paso del tiempo tiene en la calidad del suministro.

Los principales factores que contribuyen al deterioro de la calidad del agua son:

- Desarrollo de la población bacteriana y albergue de patógenos.
- Aumento de la turbidez debido a partículas en suspensión.
- Pérdida de desinfectante y formación de subproductos de desinfección.
- Corrosión y disolución de metales.

## **6.3 MODELOS DE SOPORTE A LA TOMA DE DECISIONES**

La evaluación de las necesidades de renovación es un aspecto muy importante dada la envergadura de las obras a realizar así como las consecuencias del fallo en el suministro. Por este motivo, varias universidades, centros de investigación y empresas privadas han desarrollado diversos modelos para evaluar las necesidades de rehabilitación o sustitución en infraestructuras de abastecimiento de agua. Estos modelos tienen el objetivo de ayudar a los administradores de manera proactiva a la hora de llevar a cabo la planificación de las actividades relacionadas con la toma de decisiones.

---

Aunque hay muchos enfoques diferentes para abordar esta cuestión, todos los modelos incorporan alguna de las siguientes técnicas de predicción y evaluación (EPA, 2002):

- Métodos probabilísticos o estadísticos que estiman la condición de las conducciones en función de la probabilidad de fallo asociada al análisis estadístico de datos históricos o de datos de tuberías en condiciones similares.
- Métodos deterministas que identifican la mejor solución basándose, en lugar de en la probabilidad, en las condiciones iniciales y en el análisis de la evolución del estado en función de cambios en las condiciones operativas o ambientales.
- Modelos heurísticos fundamentados en la opinión de expertos y basados en la aplicación de pesos a los diferentes criterios de evaluación.

Los modelos de ayuda a la decisión se desarrollan sobre distintos módulos mediante los cuales se procede a la evaluación de la red en base a diferentes criterios relacionados con el funcionamiento de la red, el deterioro estructural e hidráulico y la toma de decisiones sobre el conjunto de la red.

A continuación se mencionan diferentes ejemplos de modelos de soporte a la decisión citándose algunas de sus características principales:

- **ASSETMAP** (Francia, Malandain *et al.* 1998).

Desarrollado dentro de una tesis doctoral, este modelo experimental emplea la probabilidad y el análisis espacial para determinar las velocidades de rotura de las conducciones a analizar. Aunque no se trata de una aplicación software, el modelo se basa en el empleo conjunto de un SIG comercial y un software de análisis estadístico para determinar (EPA, 2002):

1. El pronóstico de la velocidad de rotura (bajo la hipótesis de ausencia de rehabilitación).
2. El análisis estadístico de la velocidad de rotura mediante la regresión de Poisson para cada grupo de tuberías.
3. Análisis espacial de velocidades de rotura mediante un SIG.
4. Análisis multi-criterio para priorizar tuberías críticas.
5. Previsión de la tasa de roturas simulando diferentes políticas de rehabilitación.

- **KANEW** (Alemania y EE.UU, Deb *et al*, 1998)

Se trata de un proyecto financiado por la *American Water Works Association Research Foundation* (AWWARF) con el objetivo de desarrollar una aplicación software capaz de predecir las necesidades de rehabilitación en infraestructuras de agua. Disponible en formato Microsoft Access, este software se apoya en varios módulos (inventario de tuberías, estimación de costes, criterios de renovación y valoración de alternativas) para predecir los requerimientos de rehabilitación en un plazo medio-largo.

- **UTILNETS** (Europa, Hadzilacos *et al*, 2000)

Utilnets es un sistema de soporte a la decisión para la planificación de la rehabilitación y optimización del mantenimiento de tuberías subterráneas de servicios públicos de agua. Desarrollado inicialmente para tuberías de fundición gris, este prototipo de modelo se desarrolla sobre un conjunto de módulos que tienen en cuenta los siguientes aspectos (Alonso, 2010):

- El deterioro estructural e hidráulico y la calidad del agua de la red de agua potable.
- La evaluación de los impactos cuantitativos y cualitativos de los fallos y de la asignación de trabajos de renovación.
- La elección de alternativas de renovación para las tuberías.
- La estimación de los montos presupuestarios.
- Evaluación de la fiabilidad de la red en términos de la satisfacción de la demanda.

- **CARE-W** (Europa, Torterot *et al*, 2003)

El modelo CARE-W (*Computer Aided Rehabilitation of Water Networks*) es el resultado de una iniciativa europea con el objetivo de desarrollar un instrumento de ayuda para la rehabilitación de redes de agua potable. Este software está construido alrededor de una estructura de bases de datos y de una interfaz, de modo que el análisis se realiza a través de los siguientes módulos (Alonso, 2010):

- *PI (Performance Indicators)*: Se encarga de la determinación de los indicadores de funcionamiento de la red.

- *LTP (Long Term Planning)*: Este módulo emplea el modelo KANEW para organizar la rehabilitación a largo plazo a través de la generación de escenarios de evaluación general.
- *ARP (Annual Rehabilitation Program)*: Módulo para la programación anual de los proyectos de rehabilitación en base a un análisis multi-criterio.
- *Fail*: Modelo estadístico de predicción de fallos.
- *REL*: Modelo de análisis de la fiabilidad hidráulica.

- **METRAWA** (España)

Metrawa es una aplicación de ayuda a la decisión para la renovación y rehabilitación en redes de distribución de agua. Se trata de una herramienta capaz de realizar un análisis multi-paramétrico en el que se incluyen aspectos relacionados con el análisis estructural (modelo de envejecimiento), análisis hidráulico, análisis económico (tiempo óptimo de renovación frente a costes de reparación) y análisis de riesgos. También permite su integración con Sistemas de Información Geográfica.

## 6.4 LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO ASISTIDO POR ORDENADOR

Un sistema de Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador (GMAO), también denominado en ocasiones como CMMS (*Computerized Maintenance Management System*) está constituido básicamente por un programa informático compuesto principalmente por una base de datos que contiene información sobre todos los elementos que intervienen en las operaciones de mantenimiento. Es por esta razón que el sistema debe de ser capaz de trabajar con datos compartidos e interrelacionados y de permitir el flujo de información entre las distintas secciones en tiempo real.

En los siguientes apartados se realizará una revisión de los principales aspectos a tener en cuenta para la implantación de un sistema GMAO en una organización.

### **6.4.1. REQUISITOS FUNCIONALES DE LOS GMAO**

El propósito fundamental de un sistema de Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador es facilitar el desarrollo y realización de planes de mantenimiento, asegurando el control durante todo el proceso y automatizando en la medida de lo posible cada una de las etapas involucradas. Por lo tanto, los requisitos funcionales de todo software GMAO deben ser los siguientes:

- **Gestión de los elementos del sistema:**

La gestión del mantenimiento incluye el control de todos los componentes del sistema, por lo que es necesario disponer de un inventario correcto y completo de todos los equipos e instalaciones que permita saber qué se tiene que gestionar.

Asimismo, es necesario disponer de herramientas complementarias al sistema GMAO que permitan obtener información sobre el estado de los componentes y facilitar su localización. Es en este punto donde se conectan las funciones de los sistemas de adquisición de datos (SCADA) y de los Sistemas de Información Geográfica con las del GMAO.

- **Gestión de los recursos, compras y costes:**

El sistema GMAO debe de gestionar todos los recursos que la organización destina al mantenimiento. Por lo tanto, debe de ser capaz de controlar tanto la asignación de personal (ya sea interno o externo), el nivel de existencias y recambios, los proveedores y los plazos de aprovisionamiento.

El tema económico resulta esencial en todo proceso de gestión, por lo que el GMAO también debe de realizar un control de los costes asociados al mantenimiento.

- **Gestión documental:**

El software debe de ser capaz de asegurar la entrada, seguridad y gestión de toda la información relacionada con el proceso de mantenimiento, de modo que dicha información pueda ser procesada y organizada para servir de base en la toma de decisiones.

---

Debido a la distinta naturaleza de los trabajos, el gestor de mantenimiento debe de permitir la incorporación de documentos, planos CAD, y archivos del resto de formatos asociados al sistema a gestionar.

- **Planificación de las intervenciones**

El sistema de gestión del mantenimiento debe de incluir las herramientas necesarias para planificar el lanzamiento de órdenes de trabajo, de modo que se pueda prever la asignación de recursos para las tareas y se controlen los plazos de ejecución de las mismas.

- **Reporte y análisis de las intervenciones**

Con el objetivo de realimentar todo el sistema de soporte a la decisión, el GMAO debe de permitir el análisis de las tareas realizadas y la creación de reportes personalizados de cada operación que posibiliten la actualización de la información referente al elemento sobre el que se ha actuado.

Las distintas aplicaciones de casas comerciales (como PRISMA, desarrollado por Sisteplant en España) garantizan en mayor o menor medida el cumplimiento de estos requisitos funcionales. Aunque se trata de productos genéricos, existen desarrollos específicos y módulos especiales que permiten adecuar estas herramientas a prácticamente cualquier actividad.

#### **6.4.2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

Al tratarse de una herramienta informática, la infraestructura necesaria para mantener un sistema GMAO está compuesta de tres elementos principales: hardware, software y comunicaciones.

El *Hardware* incluye todos aquellos componentes físicos que facilitan la visualización, edición e impresión de la información almacenada en el sistema. Incluye los ordenadores, monitores, impresoras, terminales móviles, etc.

La necesidad de conexión entre los distintos usuarios y fuentes de información define la necesidad de establecer las *Comunicaciones* necesarias entre cada uno de los elementos del sistema. La infraestructura de comunicación elegida dependerá de las características

organizativas y de gestión que tenga la empresa, así como de las funciones que el sistema GMAO vaya a desempeñar.

Ya se trate de un producto genérico de una casa comercial o de una aplicación desarrollada a medida para una empresa en especial, todo *Software* GMAO debe de cumplir los siguientes factores:

- **Compatibilidad:** El sistema de gestión del mantenimiento debe integrarse con los demás sistemas informáticos empleados por la organización (bases de datos, ERP, SCADA, etc.) y mostrar cierta capacidad de comunicación con los mismos.

Dentro de este punto, este tipo de software debe de mostrar las siguientes características:

- *Integración funcional* entre los distintos módulos y las posibles nuevas secciones que se puedan incorporar en un futuro.
  - *Integración con otros sistemas* que permita el flujo de información.
  - *Portabilidad*, definida como la capacidad que tiene que tener el sistema para poder funcionar con distintos usuarios y en distintos equipos informáticos.
- **Adaptabilidad:** El software debe de ser lo suficientemente flexible para adaptarse a las posibles particularidades de las operaciones a gestionar. Por esta razón, bien sea mediante la parametrización del mismo o mediante la posibilidad de modificación del código, el programa debe de mostrar capacidad de adaptación a las necesidades concretas con los mínimos cambios posibles.
- **Facilidad de uso:** Los conocimientos informáticos de muchos de los miembros del personal que utilicen el programa pueden ser bastante limitados, por lo que una de las características fundamentales a exigir es la fácil adaptación de los futuros usuarios al sistema. Para ello, se debe de garantizar la facilidad de uso del mismo mediante interfaces sencillas y amigables y la rapidez en su procesamiento para que no se entorpezcan las labores de los operarios.



### 6.4.3. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE SU EMPLEO

Los paquetes informáticos GMAO pueden ser implementados en cualquier tipo de organización que desee gestionar el mantenimiento de sus activos. Este software ofrece una gran variedad de funciones, existiendo en el mercado gran cantidad de casas comerciales dedicadas al desarrollo de esta herramienta.

Entre las principales ventajas de su implementación en cualquier tipo de empresa destacan:

- *Optimización de los recursos disponibles*, tanto laborales (mejora de la planificación, seguimiento y aplicación de los operarios) como materiales.
- Mejora en la *calidad* y en la *productividad*, lo que se traduce en una mayor fiabilidad y disponibilidad del sistema.
- *Mejora en los procesos de intervención*, permitiendo obtener información actualizada de todos los componentes y mejorando el control sobre las actividades de las contratas.
- *Control del gasto*, pues permite el conocimiento inmediato de los costes originados por cualquiera de los elementos seleccionados.
- *Mejora en el empleo de la información*. El software GMAO permitirá manejar gran cantidad de información de forma inmediata y allí donde se necesite. Los operarios podrán disponer de terminales (PDA, Tablet, móvil, etc.) con los que la introducción y consulta de datos sea más sencilla y rápida.
- La mejora en el tratamiento de la información relacionada con el mantenimiento permite a su vez un aumento en el *control de las tareas* y la posibilidad de disponer de un *histórico de averías y reparaciones*.

No hay que olvidar que un sistema de Gestión del Mantenimiento Asistido por Ordenador es tan solo una herramienta cuyo objetivo es exclusivamente tratar los datos que se introducen en el mismo para convertirlos en información útil para la toma de decisiones. Por lo tanto, como toda herramienta involucrada en la gestión, un GMAO puede presentar los siguientes inconvenientes:

- Elevada *inversión inicial* tanto en equipos y software como en personal para su implantación, lo que puede conllevar un aumento en el coste del sistema mucho mayor de lo esperado.
- Incremento del *personal indirecto* involucrado en la gestión encargado de tareas que pueden resultar improductivas (como por ejemplo la simple introducción de datos al sistema).
- Puede darse el caso de que el sistema proporcione simple datos, pero *no proporcione la información* necesaria para ayudar en la toma de decisiones. En muchas ocasiones el GMAO necesitará de otras herramientas para conseguir un sistema integral que facilite las tareas de mantenimiento.
- La falta de rigurosidad en la introducción de datos y los errores de los operarios pueden disminuir la *fiabilidad de la información*.

#### 6.4.4. MÓDULOS PRINCIPALES

Los programas GMAO suelen estar compuestos por un número de módulos o secciones que, permaneciendo interconectados, permiten dividir o esquematizar las distintas áreas e informaciones que componen los trabajos de mantenimiento.

Entre los módulos más destacados se encuentran:

- **Gestión de equipos e instalaciones:** En esta sección se definen las propiedades que componen los activos de la empresa. Puede incluir información acerca de las instalaciones, equipos, recambios, garantías, contratos en servicio y cualquier otro parámetro relacionado con la definición de los dispositivos.
- **Gestión del mantenimiento:** Ya sea preventivo, predictivo o correctivo.  
En el caso del mantenimiento preventivo cobra vital importancia la planificación. Los sistemas GMAO se suelen programar en base a cierta frecuencia (cada cierto número de días o de horas de funcionamiento), de modo que automáticamente se lancen todas las órdenes de trabajo de tipo preventivo. En esta tipología de trabajos es importante definir el concepto de *gama*, que hace referencia a los tipos de trabajo a realizar en las actuaciones programadas. Por lo tanto, en cada gama aparece definido y

organizado un conjunto de tareas a realizar con el objetivo de prevenir los defectos y averías que puedan aparecer.

En cuanto al mantenimiento predictivo, los programas de mantenimiento asistido son capaces de generar gamas asociadas a lecturas de las variables seleccionadas por el operador (como en el caso de los abastecimientos de agua puede ser la energía consumida por una bomba), de modo que se puedan almacenar los valores asociados en tablas con el propósito de controlar su evolución y sus variaciones y así poder tomar acciones correctivas en el momento en el que se superen unos valores límite establecidos.

- **Gestión de Recursos Humanos:** Dentro del módulo de Recursos Humanos se pueden encontrar los siguientes elementos.
  - *Mano de Obra*, constituida por los operarios. Puede tratarse tanto de mano de obra propia como de mano de obra externa (contratas). La principal función de esta sección es la de facilitar el control de todos los operarios que participan en las tareas de mantenimiento, permitiendo obtener fácilmente un listado de los mismos.  
Entre la información a incluir destaca aquella que permita identificar a cada uno de los responsables (número de operario, nombre, datos personales, currículum, etc.), así como información referente a los costes de su trabajo.
  - *Proveedores*. Dentro del módulo de RR.HH se deben de incluir los diferentes proveedores y fabricantes de los equipos del sistema, de modo que se gestione todo el proceso de suministro (generación de pedidos y tramitación automática de los mismos, generación de facturas, etc.).
- **Órdenes de Trabajo:** Las órdenes de trabajo (también denominadas *workorders* en inglés) son el documento propio que se genera para cada intervención en la red y en este se cargan los trabajos, conceptos y los gastos que se producen.  
Para recoger toda la información citada, en cada orden de trabajo generada debe de constar la mano de obra empleada, el trabajo realizado, las observaciones durante el trabajo y los cambios introducidos en la estructura en el formato adecuado para actualizar automáticamente el sistema integral de información.

Es importante conocer la importancia del módulo de órdenes de trabajo, pues estos documentos son el mecanismo necesario para recoger los datos y costes del

mantenimiento generados por cada instalación. Son la más completa fuente de información sobre el uso de mano de obra, materiales, repuestos, tipos y duración de averías, frecuencia de las mismas, etc. Por estas razones, las órdenes de trabajo son el principal origen de datos en el histórico de cada componente y de su buen uso depende la calidad de todo el sistema de información.

#### 6.4.5. ETAPAS EN LA IMPLANTACIÓN

Como todo software, la implantación de un sistema de Gestión del Mantenimiento Asistido por Ordenador conlleva una serie de etapas para garantizar su correcto funcionamiento. En la Figura 37 se muestran las fases de todo proceso de instauración de esta herramienta:



**Figura 37.** Fases en el proceso de implementación de un GMAO (Fuente: elaboración propia)

##### I. Análisis y diagnóstico del área

Una buena parte de la calidad de la herramienta final dependerá del correcto estudio de los requerimientos del sistema. En esta primera fase se deben de establecer los objetivos que se desean cumplir con la implementación del software GMAO. Para la definición de estos puntos resulta fundamental la recogida de toda aquella información básica relacionada con el

mantenimiento: procedimientos de trabajo en la empresa, inventario de todos los elementos, personal encargado del mantenimiento, alcance de las tareas de mantenimiento, etc.

## **II. Selección de software**

Una vez identificadas las necesidades que pretenden cubrirse con el GMAO es necesario seleccionar el sistema a instalar. En un principio pueden considerarse dos opciones distintas: la selección de un software desarrollado a medida o la instalación de un paquete comercial. En el primer caso, corresponderá al equipo informático encargado del sistema la responsabilidad de diseñar todos los aspectos del programa. En el segundo caso, el producto comercial posee una estructura de software cerrada aunque muchos de ellos incorporan la posibilidad de incorporar módulos para que el programa se ajuste mejor a la organización de la empresa.

En el caso del trabajo que nos concierne, la posibilidad de integración con otros programas es un factor clave a la hora de elegir entre las opciones a implementar.

## **III. Preparación para la puesta en marcha**

Antes de proceder a la instalación es necesario un trabajo de colaboración entre el equipo informático y los técnicos encargados del mantenimiento. Por un parte, los encargados de la informática deben de preparar los equipos y programas que formarán la aplicación. Por otra parte, el equipo de mantenimiento debe de encargarse de introducir las modificaciones necesarias en los procedimientos de trabajo, recopilar la información requerida por la aplicación y planificar el procedimiento a seguir una vez implementado el programa.

## **IV. Implementación y validación del sistema informático**

Uno de los principales pasos a llevar a cabo en esta etapa es la conversión de todos los datos recogidos en las fases anteriores. Esta carga de información puede realizarse mediante un proceso manual (empleando, por ejemplo, formularios de captura de datos) o a través de un proceso informatizado en el caso de que los datos se tengan en un soporte informático.

Otro paso previo a la explotación del sistema es el proceso de formación de los usuarios del mismo. Ello implica la definición de los distintos perfiles de acceso, la aportación de documentación y cursos para la formación, el empleo de manuales, etc.

Una vez realizada la carga de datos y la preparación de los usuarios, se procede a la implantación del sistema de Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador.

## V. Seguimiento y evaluación

La última etapa en la implantación es la fase de seguimiento y validación de los resultados del sistema e implica la asistencia y asesoramiento de profesionales del sector que controlen durante un periodo de tiempo al personal y certifiquen el rendimiento del programa.

### 6.4.5.1. PROBLEMAS EN LA IMPLEMENTACIÓN

El proyecto de implantación de un GMAO presenta una serie de factores críticos que determinan el éxito o el fracaso en la instalación de la herramienta en cuestión.

Dichos factores son independientes del sector en el que la actividad se enmarque y entre los principales destacan:

- **Fiabilidad en los datos de partida.** Uno de los aspectos más sensibles en la implementación de un GMAO es la depuración y corrección de los datos con los que el programa trabaja. Si esta información no es precisa, pueden darse problemas relacionados con una mala programación del mantenimiento, incorrectas fichas técnicas y, en general, una mala adecuación de los procesos de trabajo a las necesidades reales del sistema.
- **Recursos humanos.** La formación de las personas involucradas en el manejo del programa es un requisito fundamental para el éxito en la implantación de la herramienta. Este proceso requiere un cambio de visión en la gestión de las actividades y, en general, en la filosofía de trabajo. Los trabajadores deben concienciarse de la necesidad de garantizar un eficiente intercambio de información entre todas las áreas involucradas en el mantenimiento y evitar la toma de decisiones unilaterales.

Dentro de este factor cobra especial importancia el grado de involucración de la Dirección, la cual adquiere un papel esencial en la definición de la estrategia a seguir y en el compromiso del personal que trabaja con el sistema.

- **Problemas técnicos.** En este aspecto es importante la formación que los usuarios del programa deben recibir, lo cual supone un apoyo constante de los expertos en el sistema y la resolución de todas las dudas que puedan surgir en cuanto a la funcionalidad y a los procedimientos de trabajo.
- **Problemas relacionados con el hardware y el software.** El GMAO ha de ser diseñado desde un principio con el propósito de satisfacer las necesidades de la organización, lo que implica la obligación de tener en cuenta tanto las necesidades actuales como las necesidades futuras de las distintas áreas.

#### **6.4.6. CONEXIONES DEL SISTEMA GMAO. TRATAMIENTO DE ÓRDENES DE TRABAJO**

Como toda herramienta involucrada en la gestión, un sistema GMAO debe de aportar una serie de ventajas a la hora de organizar las labores de mantenimiento. Los objetivos principales que deben de buscarse con la implantación de un programa de esta índole son principalmente dos: la búsqueda del ahorro económico y la mejora en el manejo de la información involucrada en el mantenimiento (Garrido, 2003).

En cuanto al primero de estos objetivos, un software de mantenimiento debe de proporcionar un beneficio económico, pues favorece el ahorro en costes asociados al personal indirecto, el aumento de la disponibilidad de los equipos, una mayor agilidad en la tramitación de los órdenes de trabajo y, en general, una mayor automatización y control de todo el proceso a gestionar.

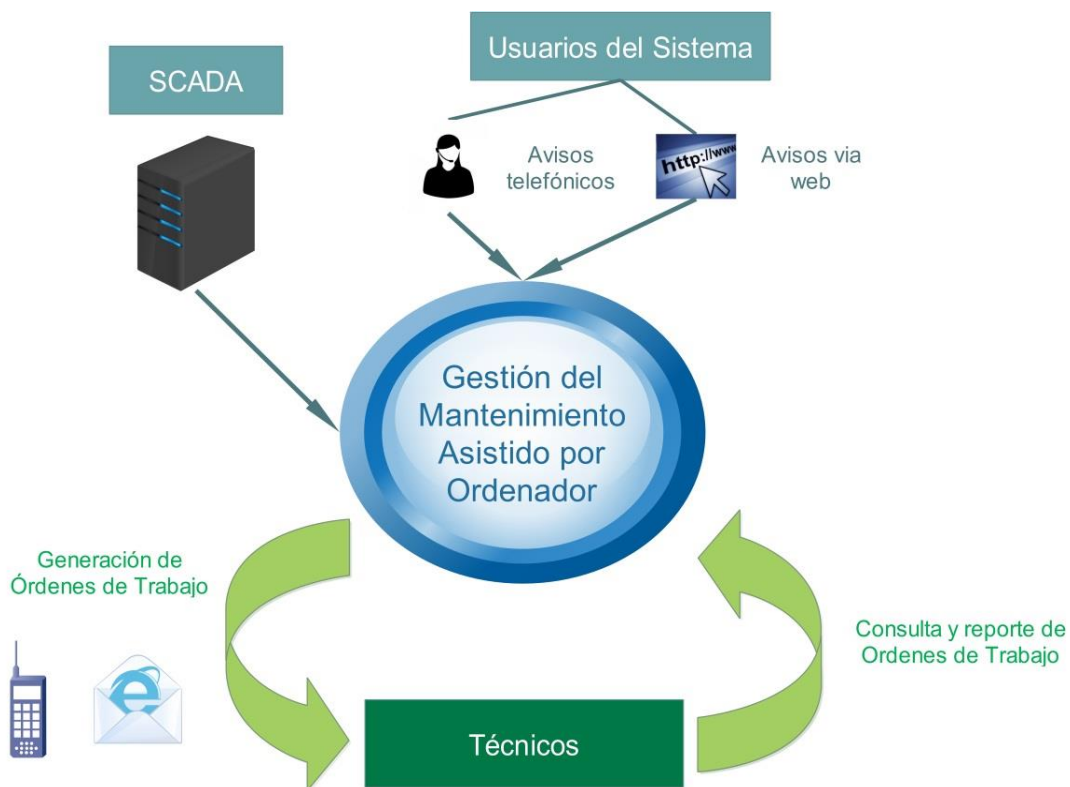
La mejora en la disposición de la información es el otro gran objetivo que debe de marcarse una organización al implantar un GMAO, pues la correcta gestión del mantenimiento requiere el almacenamiento de grandes volúmenes de información entre la que destaca el histórico de averías, la planificación del mantenimiento y la organización de órdenes de trabajo.

En el caso de los sistemas de abastecimiento de agua, el mantenimiento se desarrolla en grandes extensiones de terreno por lo que resulta esencial disponer de las herramientas adecuadas que faciliten las comunicaciones y la interoperabilidad de las diversas

herramientas. Por esta razón es necesario conectar el sistema GMAO a algunas del resto de herramientas informáticas que participan en las operaciones.

Además de las actuaciones orientadas al mantenimiento preventivo, una de las principales preocupaciones de las empresas de agua es la gestión del mantenimiento correctivo (roturas, incidencias, etc.).

La Figura 38 representa un esquema del tratamiento que un adecuado sistemas de gestión de mantenimiento por ordenador debe de realizar ante un aviso de incidencia. Como se puede observar, además del propio GMAO, las principales partes involucradas son los clientes de la red, el sistema SCADA y los contratistas o personal encargado de la reparación.



**Figura 38.** Tratamiento de los avisos y órdenes de trabajo mediante un GMAO (Fuente: elaboración propia)

### ○ Registro de alarmas

En general, la recepción de avisos o alarmas puede realizarse por medio de los siguientes soportes.



En primer lugar, el SCADA es la principal herramienta capaz de detectar y transmitir las anomalías en el sistema de explotación gracias a sus capacidades de captación y visualización de la información en tiempo real. Este hecho, junto con la posibilidad de acceder a la interfaz desde el puesto central y a través de dispositivos móviles facilita el control del sistema tanto desde la oficina como desde el propio campo.

En segundo lugar, los avisos pueden ser emitidos por los propios usuarios de la red que detectan las anomalías, de modo que existen dos posibles soportes de recepción en estos casos: la recepción telefónica o la recepción vía web. En el caso de utilizar el medio telefónico será necesario además disponer de un operador que se encargue de registrar la incidencia y tramitar la consecuente orden de trabajo al técnico.

- **Órdenes de trabajo**

Las órdenes de trabajo son los documentos mediante los cuales se informa a los responsables de las operaciones de mantenimiento sobre la tarea que deben de llevar a cabo. Estas órdenes son una de las partes más importantes en el proceso de reparación y mantenimiento, pues en ellas se recogen los datos más importantes sobre cada intervención.

El sistema de gestión del mantenimiento debe de ser capaz de automatizar al máximo el proceso de reporte de órdenes de trabajo. Mediante las herramientas tecnológicas actuales, los contratistas y resto de personal encargado del mantenimiento debe de ser capaz de recibir y visualizar las respectivas órdenes previamente tramitadas por la organización con el propósito de conseguir la máxima agilidad en el proceso.

Otro aspecto importante es la asignación de las órdenes de trabajo a los técnicos adecuados. El poseer un apropiado archivo de todos los datos referentes al mantenimiento (tipo de avería, especialista que ha llevado a cabo la reparación, etc.) puede facilitar la selección de los técnicos encargados de la operación. Además de por especialidad, la asignación automática de órdenes de trabajo se podrá realizar siguiendo otros criterios como la cercanía, el tipo de contrato, etc.

Una vez finalizada la reparación será necesario realimentar el sistema para mantener su fiabilidad. Para asegurar la actualización es conveniente obtener en el soporte especificado los cambios que las reparaciones han introducido en la red. En este aspecto cobra importancia la colaboración que los contratistas deben de realizar en cuanto a la entrega del trabajo

realizado. Se debe de asegurar el traspaso por parte de los contratistas de toda la información referente a la reparación en los formatos especificados por la empresa contratante (Archivos para el SIG, CAD, etc.).



# CAPÍTULO 7. SISTEMA INTEGRADO

## 7.1. NECESIDAD DE INTEGRACIÓN

La gestión de activos implica una amplia gama de tareas entre las que se incluyen la inspección y recogida de datos, la evaluación del estado de los componentes, la predicción del rendimiento futuro, la planificación y priorización del mantenimiento y de las operaciones de reparación, la evaluación de recursos financieros, etc.

Debido a esta variedad en la naturaleza de la información requerida, la comprensión y desarrollo de un enfoque integrador es un factor clave que determinará el éxito de cualquier solución tecnológica orientada a la gestión de activos. Con este propósito, se hace necesario avanzar hacia un **sistema integrado** en el que la información fluya entre todas las herramientas involucradas y el intercambio de datos se realice de manera segura y eficiente.

Como ya se ha comentado en la introducción, el abastecimiento de agua es un sector complejo que presenta una serie de singularidades respecto a los demás servicios urbanos (electricidad, gas, etc.). Además de controlar la continuidad del suministro, la facturación y la gestión de los clientes, una empresa de abastecimiento de agua debe de vigilar los indicadores de operación (presión, caudal y calidad del agua), procurando mantener estos dentro de unos límites aceptables para garantizar un adecuado servicio.

Todas estas particularidades unidas a la gran extensión de territorio ocupado por la red y a la importancia del recurso hacen del abastecimiento de agua una actividad compleja de gestionar. Es por esta razón por la que las actividades de gestión deben de ir más allá de las tareas de operación y control en las oficinas técnicas pues también adquieren gran importancia el trabajo de campo realizado por el personal y los contratistas y la información tanto aportada como recibida por los consumidores.

Por lo tanto, las exigencias y limitaciones que aportan las diversas perspectivas de todos los grupos de interés que participan en la actividad implican la necesidad de avanzar hacia un enfoque integrador y multidisciplinar que facilite y simplifique la toma de decisiones.

Siguiendo la “Guía para la Implantación de Sistema de Información en la Gestión de Redes de Suministro de Agua” (Cubillo, 1997), las necesidades a satisfacer mediante un enfoque integrador de las herramientas tecnológicas de gestión de redes son:

- En cuanto al cumplimiento de la **calidad del servicio**:
  - Garantías de disponibilidad de información precisa y actualizada de las infraestructuras, con referentes geográficas.
  - Conocimiento de la ubicación de los clientes en relación con infraestructuras y acontecimientos.
  - Conocimiento de la presión del suministro y su evolución correspondiente a cada cliente, así como valoración de la calidad del agua suministrada.
  - Conocimiento de interrupciones o insuficiencia en el suministro y evaluación de riesgos de rotura o problemas de calidad.
  - Evaluación del riesgo de disfuncionalidad de las infraestructuras y conocimiento georreferenciado de reclamaciones, anomalías, obras y clientes.
  - Conocimiento de la capacidad y solicitudes de suministro para situación actual y escenarios futuros.
  
- En cuanto a la eficiencia en la **gestión del recurso y en la gestión económico-financiera**:
  - Disponibilidad de información suficiente y precisa para la detección y gestión de agua no contabilizada y de información *on-line* del abastecimiento.
  - Mejora de la eficiencia en el seguimiento y control de obras y en la elaboración de proyectos.
  - Establecimiento, con criterios objetivos, de las necesidades de inversión en planes de renovación y mejora.
  - Valoración patrimonial georreferenciada con todas las infraestructuras de la empresa.

- Definición rápida, precisa y actualizada de soluciones (suficientes u óptimas) ante disfunciones y optimización de la operación (costes y riesgos).

## 7.2. LA IMPORTANCIA DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

El término gestión hace referencia al conjunto de operaciones realizadas para administrar y dirigir un negocio, empresa o servicio. Por consiguiente, entre los objetivos principales de un sistema de gestión asociado al abastecimiento de agua se encuentran la recopilación de datos fiables sobre las características físicas y de rendimiento de la red, así como el acceso de los administradores y demás partes interesadas a dichos datos para permitir planificar de manera eficiente las operaciones y asignar óptimamente los recursos disponibles.

Teniendo como base los objetivos citados, las herramientas involucradas en la gestión tienen que ser capaces de satisfacer los siguientes requisitos (Halfawy *et al*, 2002):

- i. Recopilación oportuna y eficaz de datos sobre las condiciones de la infraestructura y el sistema de explotación.
- ii. Empleo de modelos de simulación que resulten de apoyo en el proceso de toma de decisiones.
- iii. Desarrollo de una estructura capaz de fomentar la interoperabilidad y el intercambio de datos entre las diversas herramientas de software empleadas en la gestión.
- iv. Modelización, gestión y coordinación de las operaciones de mantenimiento.
- v. Capacidad de personalizar el sistema a las políticas de las organizaciones y a los proyectos específicos.

Puesto que la gestión es cada vez más intensiva en conocimiento, probablemente los requisitos más importantes sean mantener la precisión, consistencia e integridad en los datos implicados y asegurar la actualización de la información con el propósito de que el sistema represente en todo momento la situación real.

Dentro del ciclo integral del agua se pueden distinguir dos tipos de activos según su organización: Aquellos que se encuentran dispersos geográficamente (conducciones,

válvulas, bombes y demás componentes) y grupos de activos concentrados (plantas de tratamiento, desalinizadoras, etc.) (McKibben y Davis, 2002). Dentro de este contexto de posicionamiento geográfico es donde toman importancia los Sistemas de Información Geográfica. La capacidad que presentan estos programas para combinar información geográfica e información alfanumérica los convierte en la herramienta idónea para actuar como interfaz de todo el modelo de datos.



**Figura 39.** SIG como interfaz de la información (Fuente: adaptado de Halfawy *et al*, 2002)

Los SIG ofrecen toda una serie de funcionalidades que facilitan el manejo de grandes volúmenes de información procedente de diversas fuentes gracias a la posibilidad de incorporar en un mismo entorno de trabajo la representación gráfica del área objeto de estudio y las propiedades de los elementos contenidos en dicha área. Entre los principales beneficios de su uso como soporte de toda la información destacan:

- Además de los datos de inventario relativos a las características físicas de los componentes, el SIG permite la representación de una amplia gama de información

sobre otros aspectos importantes del sistema (rendimiento, planificación, operaciones, costes, mantenimiento, etc.).

- Mejora y facilita la explotación y el acceso a toda la información ya que facilita la visualización geográfica de la infraestructura.
- El SIG favorecerá la interoperabilidad y el intercambio eficiente de información al mejorar la comunicación entre todas las partes interesadas puesto que es accesible tanto desde una red interna (ordenadores personales) como a través de internet (ordenador portátil, PDA, tablet, teléfono móvil, etc.).

Siguiendo la reflexión anterior, los factores a tener en cuenta para llevar a cabo una correcta gestión del sistema pueden ser esquematizados en tres niveles bien diferenciados representados en la Figura 40.

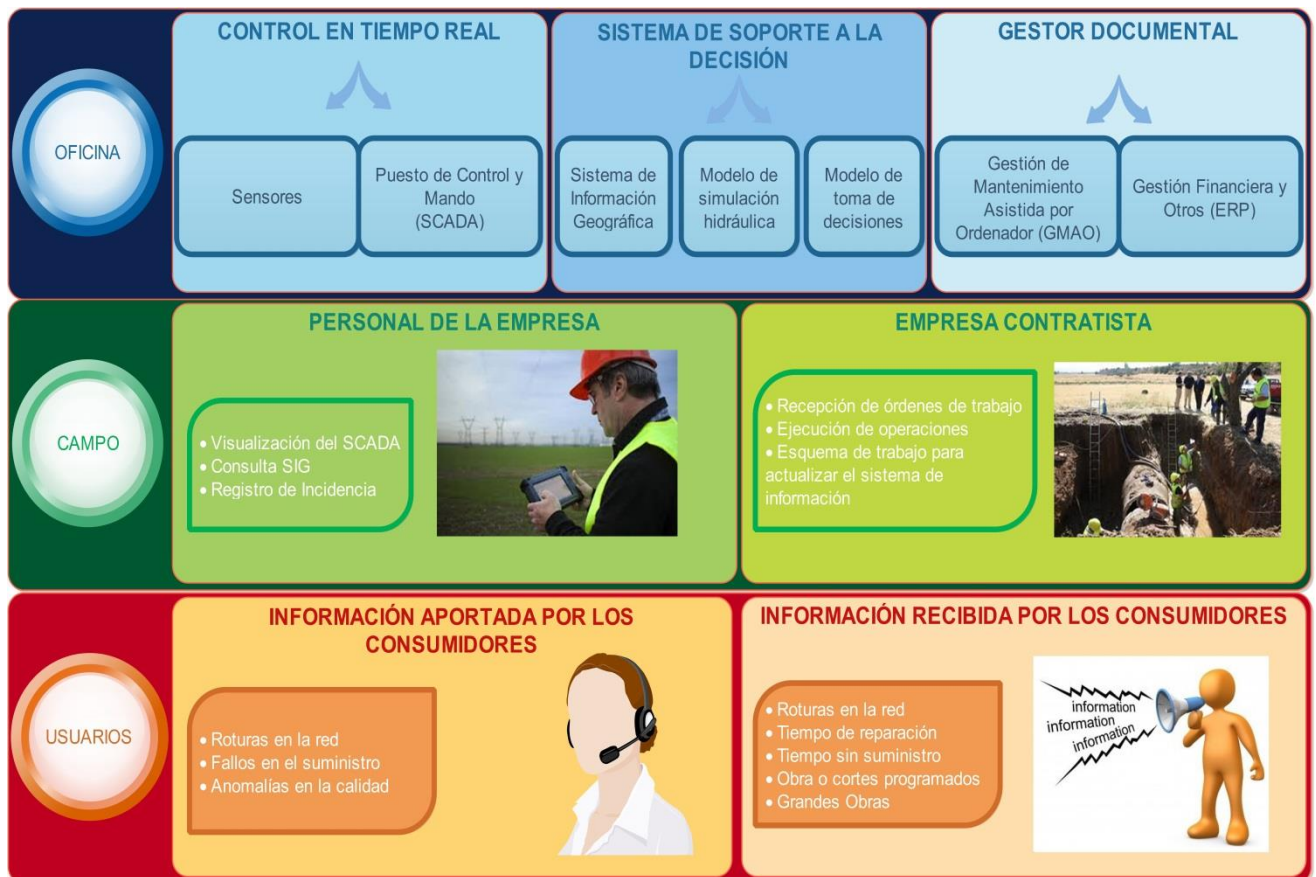


Figura 40. Niveles que intervienen en la gestión de activos (Fuente: elaboración propia)



## 7.3. CONEXIONES NECESARIAS

Uno de los propósitos fundamentales de este trabajo es dar una visión de los medios e interconexiones necesarias para establecer un modelo de gestión de activos en una empresa de agua. Dentro de este objetivo, resulta esencial detallar las conexiones que deben de existir entre las distintas herramientas y agentes involucrados en la gestión para fomentar la interoperabilidad y el intercambio eficiente de información, pues el nivel de integración entre las aplicaciones determinará el grado de eficiencia obtenido por el programa de gestión (Baird, 2012).

Para ello, siguiendo la estructura marcada en la Figura 40, se detallan a continuación las siguientes conexiones necesarias para el establecimiento de un sistema integrado.

### 7.3.1. BLOQUE OFICINA

Las principales herramientas involucradas en esta sección son los sistemas SCADA, el SIG, el modelo matemático y los sistemas de gestión financiera (ERP, etc.) y mantenimiento (GMAO), siendo necesarias las siguientes integraciones:

- ❖ **SCADA-SIG-MODELO:** Un requisito fundamental para asegurar la validez de un modelo matemático de una red de agua es su correcta actualización y calibración. Con este propósito es necesario establecer una conexión permanente con el Sistema de Información Geográfica para poder representar en cada momento los elementos que componen la red, así como con el sistema SCADA para acceder a las medidas de campo en tiempo real.

Por un lado, la conexión SCADA-SIG hace posible que los datos recopilados por el primero se encuentren representados y disponibles en el SIG. Por otro lado, la conexión SIG-Modelo (ya desarrollada en el 4.5.1) posibilita tanto la elaboración como el propio mantenimiento del modelo.

Además de estos beneficios, la combinación de las tres herramientas puede facilitar la planificación de las actuaciones en la red mediante la comparación de los datos de medidas reales y los datos resultados de la simulación. Cuando las diferencias entre ambos valores son pequeñas, los datos registrados por el SCADA pueden emplearse para la calibración del modelo. Sin embargo, cuando las diferencias entre ambos

valores superan ciertos límites, pueden reflejar una anomalía en algún sensor de medida o elemento de la red.

- ❖ **SCADA-GMAO:** Esta conexión es imprescindible para gestionar las operaciones de mantenimiento. Gracias a estas dos herramientas se puede automatizar el proceso de registro de alarmas y generación de órdenes de trabajo.

### 7.3.2. BLOQUE CAMPO

Los factores principales que conforman este bloque son los contratistas encargados de las obras y el personal de campo, de modo que las conexiones requeridas con el resto de herramientas son las siguientes:

- ❖ **PERSONAL-SCADA/-SIG/-GMAO:** El personal de la empresa juega un papel fundamental en las labores de operación y mantenimiento. Por este motivo, es necesario que mientras realizan su trabajo en campo tengan acceso a los sistemas de información de la red. Hoy en día, los avances tecnológicos facilitan enormemente este requisito ya que por medio de dispositivos móviles (tabletas electrónicas, smartphones, portátiles, etc.) el personal puede:
  - Conocer la ubicación exacta de los activos (posición y características de los elementos, indicadores de ruta hasta el punto de trabajo, etc.).
  - Toma de datos en el campo (toma de medidas en campo, anotaciones y edición de elementos en el SIG).
  - Comunicación con la oficina central y su base de datos (acceso a las órdenes de trabajo, visualización del SCADA, etc.).
  - Organizar las actuaciones ante averías o roturas (polígonos de corte).
- ❖ **CONTRATISTAS-GMAO:** Es un eslabón fundamental en la cadena de automatización de órdenes de trabajo. Ya sea mediante avisos telefónicos, correo electrónico o demás medios, el GMAO debe de ser capaz de enviar los reportes de las obras a realizar a la contrata especificada para ello.

- ❖ **PERSONAL-CONTRATISTAS:** El personal también debe de tener conexión directa con los contratistas encargados de ejecutar las obras.

### 7.3.3. BLOQUE USUARIOS

Por último, los usuarios también forman parte de los agentes involucrados en la gestión, por lo que es necesario establecer los enlaces necesarios entre estos y el resto del sistema:

- ❖ **USUARIO-SCADA-GMAO:** Esta conexión es esencial para facilitar dos requisitos fundamentales. Por un lado, ayudar a la recepción de avisos por parte de terceros y a la transformación de dichos avisos en órdenes de trabajo. Por otro lado, mejorar la información recibida por parte de los usuarios mediante la programación automática de informes de roturas, fallos en la red, grandes obras a realizar, parámetros de calidad del agua, etc.



# **CAPÍTULO 8. USUARIOS DE LA RED**

## **8.1. INFORMACIÓN PÚBLICA Y TRANSPARENCIA**

La transparencia es uno de los valores éticos que todo prestador de un servidor público debe tener en cuenta en el ejercicio de su función y que, además de un valor, es una herramienta fundamental de exigibilidad pública y de responsabilidad con la sociedad. Junto al concepto de transparencia vienen ligados otros conceptos como el derecho al acceso a la información y la rendición de cuentas relacionadas con la actividad.

En el caso de los abastecimientos de agua las exigencias no son menores. Teniendo en cuenta la importancia del recurso que se maneja y el contexto económico actual, los organismos operadores tienen la obligación de elaborar informes periódicos para la población con el objetivo de facilitar el acceso a la información y de rendir cuentas de sus actividades. La toma de decisiones de los gerentes de empresas de agua no puede depender solo de las relaciones coste-beneficio o del costo de oportunidad, y mucho menos de intereses políticos de personas o grupos. Será por tanto necesario apoyar las decisiones en información validada y en principios y valores aceptados socialmente que conduzcan hacia la sostenibilidad en la gestión.

Por lo tanto, uno de los primeros requerimientos para favorecer la transparencia es el derecho a informar y ser informado. El papel de los clientes no se debe de limitar a la mera recepción del servicio, sino que se deben de transformar en una parte más dentro de todos los agentes involucrados en la gestión. Por consiguiente, es objetivo de los responsables del servicio convertir el entorno social en una parte interactiva en la que los abonados sean partícipes en la detección de averías y reciban de manera objetiva, oportuna y completa la información que les afecte directamente (grandes obras, cortes en el suministro, duración de dichos cortes, etc.)

Otro escalón más hacia la transparencia lo constituye la rendición de cuentas (concepto asociado al término anglosajón *accountability*). Alnoor Ebrahim, profesor de la Universidad de Harvard, define la idea rendir cuentas como “*la responsabilidad de responder por un desempeño ante las expectativas de distintas audiencias o partes interesadas*”. Así pues, al igual que un empleado rinde cuentas a su jefe, una entidad encargada de un servicio público debe de rendir cuentas a la comunidad.

Atendiendo a estas consideraciones, la transparencia se puede entender como una forma de dirigir y gestionar cualquier actividad de carácter público. En este sentido, la implementación de una estructura organizativa que favorezca el flujo de información entre las distintas herramientas y automatice en la mayor medida de lo posible todas las tareas de gestión puede significar un gran paso hacia dicho fin.

## **8.2. OBLIGACIONES Y DERECHOS DE LAS PARTES IMPLICADAS**

En los diferentes Reglamentos del Servicio de Abastecimiento de Agua que regulan las condiciones entre la Entidad Suministradora que presta el servicio de suministro domiciliario de agua potable y los abonados al mismo suelen incluirse un conjunto de artículos que hacen referencia a los derechos y obligaciones de cada una de las partes involucradas en la actividad.

La mayor parte de dichos requerimientos están estrechamente ligados al control del servicio (calidad, regularidad, garantías, etc.), la organización de las actividades de mantenimiento y la información a los usuarios, actividades directamente relacionadas con la gestión de activos.

En los siguientes puntos se resume la información contenida en dichos Reglamentos de diversas ciudades españolas.

### **8.2.1. OBLIGACIONES DE LA ENTIDAD SUMINISTRADORA**

- **Prestación del servicio** a todo el peticionario dentro del ámbito en el que esté instalada la red así como su aplicación a todo abonado final que lo solicite para su uso en edificios, locales e instalaciones.

- **Potabilidad y calidad del agua.** La Entidad Suministradora está obligada a garantizar la potabilidad y la calidad necesaria para el agua de consumo humano con arreglo a las disposiciones sanitarias vigentes y hasta el límite de propiedad del usuario.
- **Regularidad y garantía del servicio.** La Entidad Suministradora estará obligada a mantener la regularidad del suministro de agua y, salvo en caso de averías accidentales o fuerzas de causa mayor, las condiciones de caudal y presión dentro de unos límites.
- **Conservación de las instalaciones.** La Empresa Concesionaria estará obligada a mantener y conservar a su largo las redes e instalaciones de abastecimiento adscritas al servicio.
- **Facturación y tarifas.** La Entidad Suministradora deberá efectuar la facturación en base a las lecturas periódicas de equipos de medida y aplicar a los distintos tipos de suministros los precios y cuadros de tarifas que se encuentren en vigor en cada momento.
- **Avisos.** Se deberá de mantener un servicio permanente de recepción de avisos disponible las 24 horas del día mediante el cual los abonados o usuarios puedan dirigirse para comunicar averías o recibir información en caso de urgencia.
- **Reclamaciones.** La Empresa Concesionaria deberá contestar las reclamaciones de los usuarios que se le formulen por escrito en un plazo máximo definido.
- **Información.** Es competencia de la Empresa Suministradora informar a los receptores del servicio de las posibles anomalías en el suministro y de los proyectos incluidos en los instrumentos de planeamiento o ejecución.

### 8.2.2. DERECHOS DE LOS ABONADOS

- **Potabilidad del agua.** Los usuarios tienen derecho a recibir en sus instalaciones agua que reúna las condiciones higiénicas y sanitarias vigentes según la normativa aplicable en cada momento.
- **Prestación del servicio.** Los usuarios tiene derecho a la disposición permanente del suministro de agua en las condiciones de presión y caudal establecidas.
- **Facturación y contrato.** Los abonados tienen derecho a la facturación de los consumos según las tarifas vigentes, así como a recibir periódicamente los datos de dicha

facturación de manera clara y precisa. También tiene derecho a formalizar mediante un contrato las condiciones básicas del suministro.

- **Reclamaciones y atención personal.** Los usuarios tienen derecho a formular las consultas y reclamaciones que crean convenientes siguiendo los procedimientos adecuados. Asimismo, deben de ser tratados correcta y adecuadamente por el personal de la Entidad Suministradora.





# CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES

## 9.1. SOBRE LA GESTIÓN DE ACTIVOS COMO FORMA DE ORGANIZACIÓN

Las empresas de agua se enfrentan a retos sin precedentes debido al envejecimiento continuo de los activos de la infraestructura junto con la disminución de los presupuestos dedicados al mantenimiento. En este contexto, existe una necesidad urgente de mejorar el conocimiento sobre la red y de mejorar tanto la eficacia como el control sobre todos los costes relacionados con el sistema.

Dada esta problemática, resulta evidente la necesidad de avanzar hacia sistemas de gestión más eficientes y sostenibles capaces de aprovechar el constante desarrollo de las herramientas tecnológicas para facilitar la toma de decisiones y la explotación del servicio.

El objetivo básico de la gestión de activos es satisfacer el nivel requerido del servicio de la manera más rentable mediante la inspección y recolección de datos, la evaluación del estado y rendimiento de los activos así como la planificación y priorización de las operaciones de mantenimiento y sustitución. Se trata pues de un sistema de organización que tiene como objetivo alcanzar el equilibrio entre los costes, el rendimiento del sistema y el riesgo asociado al fallo del mismo.

Toda empresa interesada en este modelo de gestión tiene que tener en cuenta que el proceso de implantación de esta filosofía implica tres niveles de decisión diferentes (Holte, 2010):

- a. *Estratégico*: implica la identificación de la condición de la red y el establecimiento de los objetivos a alcanzar. Hay que tener en cuenta varias consideraciones respecto a este tema. En primer lugar, el camino hacia la gestión de activos es un proceso laborioso y con perspectiva a medio-largo plazo y, en segundo lugar, no existe un manual que seguir de forma precisa para lograr su implementación, dadas las singularidades de cada organización y servicio.

- b. *Táctico*: requiere una correcta planificación táctica del proceso de toma de decisiones.
- c. *Operativo*: implica la utilización de herramientas tecnológicas que facilite la operación y explotación del sistema.

En definitiva, a pesar del evidente esfuerzo tanto económico como humano que se necesita, las ventajas que se pueden lograr resultan indiscutibles:

- Mejoras en la eficiencia de la red y reducción de los niveles de fugas.
- Optimización del rendimiento y del valor del ciclo de vida de los activos gracias a la optimización de los tiempos de renovación y rehabilitación.
- Mejora en el seguimiento y gestión de los activos al igual que en la gestión de los recursos humanos. Se consigue obtener un gran volumen de información de los componentes de la red al igual que su representación georreferenciada, lo que facilita tanto las consultas como la toma de decisiones.
- Excelencia en el servicio al cliente, lo que conlleva a un mayor grado de satisfacción de los mismos. Mejora de la información recibida por los mismos así como de su participación en la gestión de la red (detección de fugas, fallos de calidad, etc.).
- Y, quizás lo más atractivo desde el punto de vista de los administradores, la reducción de costes tanto operativos como de servicio (disminución de los tiempos de viaje del personal, programación óptima de renovación y rehabilitación, reducción del personal involucrado en el sistema, etc.)

## **9.2. SOBRE LAS NECESIDADES TECNOLÓGICAS EN LOS ABASTECIMIENTOS**

El papel de las herramientas informáticas en la gestión de activos es el suministro de instrumentos y técnicas que permitan mejorar las capacidades de captura, almacenamiento y evaluación de diversos aspectos de los activos de la empresa.

A lo largo del trabajo se ha profundizado en cuatro herramientas básicas y disponibles para toda empresa de agua, mediante las cuales, garantizando la interoperabilidad y el flujo de información, se puede avalar la consecución de todos los requisitos de un sistema de gestión

de activos. Es esa interoperabilidad precisamente uno de los principales requisitos que se tienen que tener en cuenta ya que, dada la gran cantidad de datos e información que es necesario procesar, la integración eficiente de todas las tecnologías resulta fundamental. A continuación se detallan algunas de las conexiones que se deben de establecer para asegurar el funcionamiento del sistema.

- **SCADA-SIG-MODELO:** Para que los modelos hidráulicos sean verdaderamente útiles deben estar permanentemente actualizados y calibrados. Dicho objetivo se puede conseguir integrando ambas herramientas en un soporte común basado tanto en la información sobre la red disponible en el GIS como en las medidas de campo obtenidas mediante el SCADA. Esta posibilidad abre las puertas de la utilización de los modelos no sólo en planificación, sino también en la operación diaria de las redes y en la toma de decisiones que puedan afectar al funcionamiento.
- **Instrumentos del personal de campo:** Mediante el empleo de dispositivos electrónicos, el personal de campo debe de ser capaz de visualizar la interfaz del SCADA con el objetivo de ayudar en la realización de sus tareas. De igual modo, los técnicos deben de tener la posibilidad de visualizar y consultar el SIG y sus informes, así como de introducir las modificaciones realizadas en el mismo.
- **GMAO:** El sistemas de gestión del mantenimiento debe de estar en permanente conexión con el SCADA y con el servicio de atención a los clientes para facilitar y automatizar el proceso de gestión de órdenes de trabajo y permitir el almacenamiento del historial de fallos del sistema.

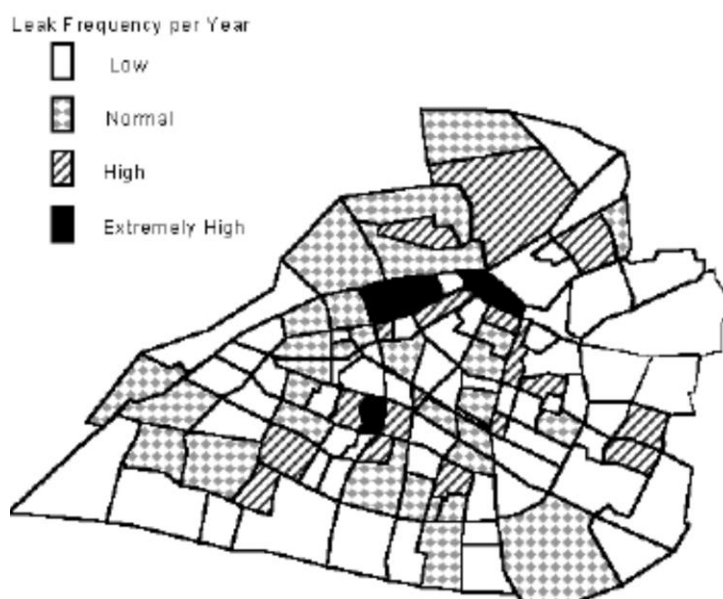
### **9.3. SOBRE LA IMPORTANCIA DE LOS SIG**

El desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica ha sido una de las claves de una gran parte de los procesos innovadores de las empresas gestoras de redes de abastecimiento. El principal motivo de este hecho no se encuentra sólo en las posibilidades de análisis y representación de estos programas, sino en el conjunto de características que hacen de estos los principales candidatos para convertirse en el núcleo en el cual se acoplen e integren todos los sistemas y herramientas que anteriormente actuaban de manera independiente y sin conexión.

La toma de decisiones sobre cualquier estrategia u operación a llevar a cabo debe de estar basada en información fiable y de calidad, por lo que es necesario disponer de un sistema integrado que garantice este requisito.

En este sentido, los SIG proporcionan un marco eficaz para recoger, almacenar y analizar aquella información cuya componente espacial resulte muy importante con el propósito de ayudar en este proceso. Además de la representación georreferenciada de los elementos de la red, estas herramientas pueden realizar diversas operaciones relacionadas con el análisis espacial, la incorporación de información alfanumérica (diámetros, número de fugas, año de puesta en servicio, etc.) así como la integración de diversas herramientas (modelos matemáticos, información del SCADA, sistemas expertos de soporte a la decisión, etc.).

Además de ayudar en las labores cotidianas de operación, la principal importancia de los SIG puede residir en sus capacidades como herramientas de soporte de la toma de decisiones. Un ejemplo claro se encuentra en las facilidades que incorpora para la planificación del mantenimiento. Las fugas y roturas de una red de agua pueden mostrar cierta tendencia a ocurrir en grupos o lugares marcados. En este sentido, el análisis espacial de las frecuencias de fugas (o cualquier otro parámetro influyente en la toma de decisiones) puede ser utilizado para identificar las zonas con tasas extremadamente altas, tal y como se representa en la siguiente Figura.



**Figura 41.** Análisis espacial de la frecuencia de fugas en Malmö, Suecia (Fuente: EPA, 2002)

## 9.4. DESARROLLOS FUTUROS

- ❖ Intensificación en la implantación e integración de herramientas tecnológicas.

El campo de la gestión de activos aplicado a la industria del agua se encuentra hoy en día poco desarrollado. Como se ha comentado en el capítulo de introducción, el nivel de tecnificación en las infraestructuras de aguas está lejos de alcanzar las cifras deseadas.

Siguiendo algunos datos representativos de la AEAS, el 77% de los municipios encuestados posee un Sistema de Información Geográfica para controlar sus activos, mientras que el 70% tienen implementado un modelo matemático de la red. A pesar de que estos datos no resultan del todo negativos, el porcentaje de organizaciones que tengan integradas ambas herramientas es mucho menor. Por lo tanto, y como conclusión a estos datos, la primera línea de trabajo a seguir en cuanto al desarrollo futuro es continuar con la implementación de las diferentes herramientas desarrolladas en el trabajo, así como proseguir con su evolución, mejora e integración.

Por otra parte, es necesario cambiar las estrategias de las compañías en cuanto a la implementación de las herramientas. Normalmente, las empresas de agua instalan el conjunto de sistemas de soporte sin visión colectiva, es decir, sin tener en cuenta los beneficios que pueden obtener de su integración. Sin embargo, si se parte del modelo de gestión de activos como propósito a conseguir se mejorará tanto la elección de los equipos como su configuración. En definitiva, se trata de pasar de metodologías inductivas (partir de las herramientas para lograr la gestión de activos) a estrategias deductivas (apoyarse en la gestión de activos para establecer las necesidades del sistema).

- ❖ La gestión de activos y las Smart Cities.

El aumento de la implantación de herramientas para la gestión al igual que el fomento de la automatización de los procesos resulta muy interesante dada la actual iniciativa que promueve el desarrollo de las llamadas *Smart Cities*: “*ciudades que permiten conocer mucho mejor que es lo que ocurre en todos los diversos ciclos que tienen lugar en ellas, desde el ámbito hidráulico hasta el ámbito energético*” (Murillo, 2014). Este nuevo concepto está asociado a ciudades en las que se busca una mayor participación de los ciudadanos en las labores de gestión de los servicios con el objetivo mejor la eficiencia energética y la

---

sostenibilidad, empleando para ello las tecnologías de información y comunicaciones como soporte y herramienta del sistema. Como se puede observar, estos valores están directamente relacionados con la gestión de activos.

Por lo tanto, además de su aplicación a las redes de abastecimiento de agua, se debe de extender el empleo de soluciones tecnológicas que aseguren la optimización del proceso de toma de decisiones a los demás servicios involucrados en las actividades urbanas.

Dada la naturaleza de este sistema de gestión, su extrapolación a los distintos servicios que requieran la supervisión y control de los activos resulta fácilmente concebible. Así por ejemplo, los servicios de electricidad, gas, transportes, gestión de residuos e infraestructuras en general puede beneficiarse de este método de organización.

#### ❖ Aplicación de la tecnología Big Data.

El término “*Big Data*” se aplica a toda aquella información que no puede ser procesada o analizada utilizando los procesos o herramientas tradicionales. Debido a la acumulación masiva de datos que el conjunto de herramientas va a generar, el empleo de esta tecnología en el tratamiento de la información sobre las redes de agua potable es más que interesante.

Las principales ventajas del empleo de esta tecnología se pueden resumir en las llamadas “Tres V’s”: Volumen de datos, Variedad de datos y Velocidad de procesamiento. Estos tres conceptos son los que actualmente se encuentran más desarrollados en el ámbito de aplicación de esta conjunto de técnicas. Sin embargo, se hace necesario añadir una cuarta uve realmente importante, la veracidad de los resultados. Para que el análisis sea verdaderamente útil, los conocimientos extraídos deben de ser fiables y se deben de poder utilizar para cualquier decisión o actividad.

Aparte de proporcionar mayor capacidad de almacenamiento y velocidad de análisis, la tecnología *Big Data* puede extender las posibilidades de captación de información a límites inimaginables.

Un claro ejemplo se encuentra en la capacidad de obtener información a partir de las redes sociales (como Twitter o Facebook), tan extendidas hoy en día. Mediante el procesamiento de la información obtenida en estos soportes se pueden obtener infinidad de datos relacionados con las preferencias de los consumidores, posibles fallos en la red, detección de roturas, etc.

Aunque la idea parezca surrealista, la obtención de datos a partir de estos medios de comunicación en clara expansión es una idea posible gracias al *Big Data*.

## **9.5. CONCLUSIONES GENERALES**

Este trabajo es el resultado de una profunda revisión bibliográfica acerca de la situación actual de los abastecimientos de agua, la filosofía de organización orientada a la gestión de activos y las principales herramientas tecnológicas involucradas en este método de gestión.

El presente estudio se ha desarrollado con el objetivo de proporcionar una introducción general a los gestores y operadores de sistemas de abastecimiento sobre la gestión de activos y los requisitos tecnológicos necesarios para llevarla a cabo. Asimismo, se ha remarcado la importancia del tratamiento de la información implicada, la necesidad de avanzar hacia la gestión sostenible de la red y el importante papel de los usuarios del sistema.

La principal conclusión y beneficio que se ha obtenido una vez finalizado el trabajo es la comprensión y el “know how” de muchos aspectos acerca de los sistemas de distribución de agua no desarrollados a lo largo del proceso de formación. Entre ellos destacar el sistema de captación de datos en tiempo real (SCADA), la aplicación de los Sistemas de la Información Geográfica a las redes de distribución, las nociones básicas de la confección de modelos hidráulicos y la toma de contacto con los sistemas GMAO.

Además de estos conceptos, se ha adquirido una gran cantidad de conocimientos y experiencias a nivel personal relacionadas con la búsqueda y organización de la información que con certeza serán útiles el día de mañana.





## ■ BIBLIOGRAFÍA

- ALONSO, C. D. (2010). “Modelo híbrido para la toma de decisiones en programas de rehabilitación de tuberías para sistemas de abastecimiento de agua: Aplicación a la ciudad de Celaya”. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Univ. Politécnica de Valencia.
- ARMSTRONG, L. (2012). “Hydraulic Modeling and GIS”. ISBN: 9781589483019. Esri Press.
- BACH, P., RAUCH, W., MIKKELSEN, P., McCARTHY, D., & DELETIC, A. (2014).”A critical review of integrated urban water modelling-Urban drainage and beyond”. Environmental Modelling & Software. N° 54, Abril 2014, Pag. 88-107.
- BAIRD, G (2012). “Money Matters: Turning data into intelligence to improve infrastructure management”. Journal AWWA. Volumen 104, N° 12 (Diciembre 2012), Pag. 22-25.
- BALSA BARREIRO, J., & BROCAL RUÍZ, R. (2011). “Los sistemas GMAO y SIG como herramientas para la gestión integrada en la administración local”.
- BARTOLÍN, H. (2012). “Confección de modelos de redes de distribución de agua desde un SIG y desarrollo de herramientas de apoyo a la toma de decisiones”. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Univ. Politécnica de Valencia.
- BENAVIDES, H. (2010) “Diagnóstico de sostenibilidad de un abastecimiento de agua e identificación de las propuestas que la mejoren”. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia.
- BOE (2003). Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. BOE 45 (21 febrero 2003): 7228-7245.
- BOLETÍN OFICIAL DE LA REGIÓN DE MURCIA (2014). Reglamento del servicio de suministro de agua de Alhama de Murcia. BORM N° 114 (20 mayo 2014).

- BOLETÍN OFICIAL PROVINCIAL DE BARCELONA (2012). Reglamento del servicio metropolitano del ciclo integral del agua. B.O.P N° 222 (6 noviembre 2012).
- BOLETÍN OFICIAL PROVINCIAL DE VALENCIA (2004). Reglamento del servicio de abastecimiento de agua potable de la ciudad de valencia. B.O.P N° 219 (14 septiembre 2004).
- BUENFIL, M. (2009). “Guía para organismos operadores de agua potable, alcantarillado y saneamiento”. Centro Virtual de Información del Agua. México.
- CABRERA MARCET, E., (2002). “El suministro de agua urbano en España”. Fundación Nueva Cultura del Agua. Panel Científico-Técnico de seguimiento de la política de aguas.
- CABRERA ROCHERA, E. (2001). “Diseño de un sistema para la evaluación de la gestión de abastecimiento urbanos”. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Univ. Politécnica de Valencia.
- CABÚS, J. R., NAVARRETE, D. G., & PORRAS, R. P. (2004). “Sistemas SCADA”. Universidad Politécnica de Cataluña.
- CHRISTODOULOU, S., ASLANI, P., & DELIGIANNI, A. (2006). “Integrated GIS-based management of water distribution networks”. Proceedings of the 2006 ASCE International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering, Junio. Pag. 14-16.
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. (2007). “Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Modelización hidráulica y de calidad del agua en redes de agua potable”. ISBN: 978-968-817-880-5. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Natural. México.
- DAMAS, M. (2000). “Integración de sistemas para la supervisión, control y optimización de redes de abastecimiento de agua. Aplicación a la ciudad de Granada”. Tesis Doctoral. Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores. Universidad de Granada.
- DE LA HERMOSA, R. R., GÓMEZ, A., & CARNERO, M. C. (2009). “Control de la implantación de un sistema de gestión del mantenimiento asistido por ordenador en un hospital de nueva planta”. Conferencia Iberoamericana en Sistemas, Cibernética e Informática.

- DOUROJEANNI A., JOURAVLEV, A. & CHÁVEZ, G. (2002). “Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica”. Recursos Naturales e Infraestructura. Santiago de Chile, Naciones Unidas, CEPAL: 83.
- EDWARDS, J., KOVAL, E., LENDT, B., & GINTHER, P. (2009). “GIS and Hydraulic Model Integration: Implementing Cost-Effective Sustainable Modeling Solutions”. Journal American Water Works Association, N° 101, Pag. 34-42.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, US-EPA (2002).”Decision-Support tools for Predicting the Performance of Water Distribution and Wastewater Collection Systems”. EPA/600/R- 02/029.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, US-EPA. (2003). “Asset Management: A Handbook for Small Water Systems One of the Simple Tools for Effective Performance (STEP)”. Guide Series. EPA /816/R-03/016.
- ESPONERA, M<sup>a</sup> D. (2008). “Autocontrol en el servicio de suministro de agua. Manual básico de gestión de los riesgos para la salud”. Diputación de Barcelona. Área de Presidencia. ISBN: 978-84-9803-497-4.
- EXPÓSITO GARCÍA, A., & BERBEL, J. (2006). “Análisis del coste del servicio de abastecimiento urbano de agua en la Demarcación del Guadalquivir”. Universidad de Córdoba.
- FLORES, P., DODIGNON, M. & CASTILLO, Y. (2013). “Sistemas de telecontrol y telemedida en redes de abastecimiento y saneamiento”. XXXII Jornadas técnicas de AEAS. San Sebastián. España (Junio de 2013).
- GARCÍA, J., PÉREZ, F., URREA, M. (2011). “Abastecimiento de Aguas [Material de clase]”. Departamento de Ingeniería Civil. Área de Ingeniería Hidráulica. Universidad Politécnica de Cartagena.
- GARCÍA-SERRA, J., & CABRERA, E. (1998). “Problemática de los abastecimientos urbanos en España. Propuesta de urgentes soluciones”. I Congreso Ibérico Sobre Gestión y Planificación Aguas. El Agua a debate desde la Universidad. Por una Nueva Cultura del Agua. Zaragoza, 14-18 de Septiembre.
- GARRIDO, S. G. (2003). “Organización y gestión integral de mantenimiento”. Ediciones Díaz de Santos. ISBN: 84-7978-548-9.

- GARRIDO, S. G. (2010). "La contratación del mantenimiento industrial". Ediciones Díaz de Santos. ISBN: 978-84-9969-018-6.
- GRUPO DE MECÁNICA DE FLUIDOS (1997). "Cursos de análisis, diseño, operación y mantenimiento de redes hidráulicas a presión". Universidad Politécnica de Valencia.
- HADZILACOS, T., KALLES, D., PRESTON, N., MELBOURNE, P., CAMARINOPOULOS, L., EIMERMACHER, M. & DAEGROV, S. (2000). "Utilnets: a water mains rehabilitation decision-support system". Computers, environment and urban systems, N° 24, 215-232.
- HALFAWY, M. R., PYZOHA, D., & EL-HOSSEINY, T. (2002). "An integrated framework for GIS-based civil infrastructure management systems". Proceedings of the Canadian Society for Civil Engineers (CSCE) Conference, Montreal, Canadá.
- HANSON, P. H. (2008). "Asset management in the age of GIS-Two approaches to managing water pipeline infrastructure". Journal American Water Works Association. N° 100, Pag. 131.
- HOLTE, K. (2010). "Use and Collection of data in Gemini VA in Asset Management". Norwegian University of Science and Technology. Faculty of Engineering Science and Technology. Department of Hydraulic and Environmental Engineering.
- LA ROCA, F. (2012). "Los costes de los servicios relacionados con el agua". Fundación Nueva Cultura Del Agua. <http://www.fnca.eu/>
- LÓPEZ, A., LÓPEZ, F., MARTÍNEZ, F., & PÉREZ, R. (2006). "El modelo de la red de distribución como herramienta de gestión y toma de decisiones: La importancia de la calibración del mismo". Congreso Ibérico sobre gestión y planificación del agua. Departamento de Ingeniería hidráulica y Medio Ambiente. Univ. Politécnica de Valencia.
- MAKAR, J. M., & KLEINER, Y. (2000). "Maintaining water pipeline integrity". NRC Publications Archive.
- MARTÍNEZ, F. (2002). "Epanet 2.0 en Español - Manual de Usuario". Grupo REDHISP. Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia.

- MARTÍNEZ, F. J. (2002). “Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica a la gestión técnica de redes de distribución de agua potable”. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Univ. Politécnica de Valencia.
- MAYORGA, A. V., MEJUTO, M. F., & FERNÁNDEZ, S. C. (1997). “La información geográfica y los SIG”. Revista de la Facultad de Educación de Albacete, N °12, Pag. 361-371.
- MAYS, L. W. (2000). “Manual de sistemas de distribución de agua”. Editorial McGraw Hill. ISBN: 0-07-134213-3.
- MCKIBBEN, J., & DAVIS, D. (2002). “Integration of GIS with Computerized Maintenance Management Systems (CMMS) and Asset Management Systems”. <http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc02../pap0554/p0554.htm>
- MESA, J. M., MARTÍNEZ, G. M., PRENDES, B., & BELLO, A. (2007). “Aplicación de los sistemas de información geográfica a la gestión de las tareas de mantenimiento urbano”. IMU: Ingeniería municipal, N °225, Pag. 54-57.
- MISIŪNAS, D. (2008). “Failure Monitoring and Asset Condition Assessments in Water Supply Systems”. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Industrial Eléctrica y Automatización. Universidad técnica de Vilnius. Lituania.
- ORMSBEE, L. (2006) “The History of Water Distribution Network Analysis: The Computer Age”. 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, Cincinnati, Ohio, USA, Agosto 27-30, 2006.
- ORTÍ, R. B., TODA, A. C., & Val, A. A. (2008). “Los costes de los servicios urbanos del agua: un análisis necesario para el establecimiento y control de tarifas”. Hacienda pública española, N° 186, Pag. 123-155.
- PARRA, J.C. (2013). “Desarrollo de un conjunto de herramientas d soporte a la decisión y su implementación en un plan de gestión técnica para la renovación de redes de abastecimiento y saneamiento de agua”. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Univ. Politécnica de Valencia.
- PENABA, J. C. (2003). “Metodología para el desarrollo de sistemas de información en sanidad. Aplicación del Sistema de Información Nacional de Aguas de Consumo (SINAC)”. Revista de Salud Ambiental, 3(2), Pag. 91-96.

- PEÑA LLOPIS, J. (2008). “Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión del territorio: entrada, manejo, análisis y salida de datos espaciales: teoría general y practica para ESRI ArcGIS 9”. San Vicente, Alicante. Editorial Club Universitario.
- PIATTINI, M.; GARCÍA, F.; CABALLERO, I. (2006). “Calidad de sistemas informáticos”. Editorial Ra-ma. Madrid.
- PIÑERO, J. (2011). “Manual de gestión de bases de datos”. Editorial CEP. Madrid. ISBN: 978-84-681-4866-3.
- RAMOS, M. J. (2006). “Sistemas gestores de bases de datos. Grado Superior”. Editorial McGraw-Hill. ISBN: 8448148797.
- REINOSA, J., MALDONADO, C., MUÑOZ, R., DAMIANO, L., ABRUTSK, M. (2012). “Bases de datos”. Editorial Alfaomega. Buenos Aires. ISBN: 978-987-1609-31-4.
- RODRÍGUEZ PENIN, A. (2007). “Sistemas SCADA. Segunda Edición”. Editorial Alfaomega Marcombo. ISBN 978-970-15-1305-7.
- ROJAS, R. (2002). “Guía para la vigilancia y control de la calidad del agua para consumo humano”. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. División de Salud y Ambiente. Organización Panamericana de la Salud. Lima.
- SÁNCHEZ, J. (2004). “Principios sobre bases de datos relacionales”.
- SOLBES, A. C., & ALZAMORA, F. M. (2006). “Combinación de Modelos Matemáticos y SIG para la Gestión Eficiente de Redes”. III Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. Colegio de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
- STONE, S. L., DZURAY, E. J., MEISEGEIER, D., DAHLBORG, A., ERICKSON, M., & TAFURI, A. N. (2002). “Decision-support tools for predicting the performance of water distribution and wastewater collection systems”. US Environmental Protection Agency (EPA), Office of Research and Development.
- TOMLINSON, R. (2008). “Pensando En El SIG: Planificación del Sistema de Información Geográfica Dirigida a Gerentes”. ISBN: 9781589482296. Esri Press.
- TREPANIER, M., GAUTHIER, V., & BESNER, M. (2006). “A GIS-based tool for distribution system data integration and analysis”. Journal of Hydroinformatics. N° 7, Pag. 13-24.

VANIER, D. J. (2004). “MIIP Report: Geographic Information Systems (GIS) and Interoperability of Software for Municipal Infrastructure Applications”. National Research Council (NRC). Canadá.

VANIER, D. J., TEFAMARIAM, S., SADIQ, R., & LOUNIS, Z. (2006). “Decision models to prioritize maintenance and renewal alternatives”. National Research Council (NRC). Canadá.

WORLD BANK (2002). “Más Allá Crecimiento Económico, Glosario”. <http://www.worldbank.org/depweb/spanish/beyond/global/glossary.html>.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. (1987). “Our common future”. Oxford: Oxford University Press.



