



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE

**OPTIMIZACIÓN EN TIEMPO REAL DEL MODO DE
OPERACIÓN DE UN ABASTECIMIENTO DE AGUA
MEDIANTE TÉCNICAS METAHEURÍSTICAS.
APLICACIÓN A LA RED DE SUMINISTRO A VALENCIA
Y SU ÁREA METROPOLITANA.**

TESIS DOCTORAL

AUTOR:
D. VICENTE BOU SOLER

DIRECTOR:
Dr. FERNANDO MARTÍNEZ ALZAMORA

Valencia, enero de 2016

*Dedicado
a mis padres*

AGRADECIMIENTOS

Ha pasado más de una década desde que empecé en el sector del agua y ver evolucionar una línea de investigación te llena de satisfacción, más y cuando lo que desarrollas se aplica diariamente en el ámbito empresarial, parte de la información y los resultados obtenidos forman parte de esta tesis doctoral.

No podría empezar este documento sin olvidar mis agradecimientos a todas las personas que me han permitido colaborar en este sector y me han aportado su conocimiento, experiencias y entusiasmo para continuar en este trabajo.

En primer lugar agradecer a mi director de tesis D. Fernando Martínez Alzamora por darme la oportunidad de colaborar con él y enriquecerme con su conocimiento en un sector del que carecía de formación. Sus buenas ideas y sugerencias han contribuido al desarrollo de una línea de investigación del que forma parte esta tesis.

A las empresas del sector del agua con las que he colaborado, en especial al departamento de explotación de Aguas de Valencia por ser el promotor en la integración de modelos de simulación hidráulica con sistemas SCADA. Sin ellos no sería posible lo que es hoy en día la plataforma SCA-Red. Al departamento de explotación de Aguas de Málaga por sus sugerencias y buenas ideas en el ámbito de la gestión y análisis de la información que proviene de un sistema SCADA y el diseño de interfaces para la detección semiautomática de anomalías en redes de abastecimiento. A la empresa Operagua por su iniciativa en la integración de modelos hidráulicos con sistemas SCADA en la red de riego de la Acequia Real del Júcar.

A mis compañeros del Grupo de Redes Hidráulicas y Sistemas a Presión (REDHISP) con los que he compartido conocimiento y experiencias, en especial a Joan Carles y Oscar por su ayuda a la hora de resolver problemas hidráulicos, a Miguel Ángel y Hugo por sus conocimientos aportados en el área de los Sistemas de Información Geográfica. Finalmente a los demás compañeros que han pasado por el grupo pero que en la actualidad ya no están con nosotros.

Por otra parte, agradecer a mis amigos de siempre los momentos que hemos vivido y los que quedan por vivir y su paciencia en los momentos de ausencia por la dedicación de esta tesis, se que siempre estarán ahí y yo siempre estaré a su disposición.

Finalmente, mi agradecimiento más importante y personal va dirigido a mis padres por su cariño y apoyo en los momentos difíciles durante todos estos años para sacar adelante esta tesis, les debo todo en esta vida. También mi muestra de agradecimiento a la familia Theureau por el apoyo incondicional que me han mostrado en la recta final del presente trabajo.

TESIS DOCTORAL

**OPTIMIZACIÓN EN TIEMPO REAL DEL MODO DE OPERACIÓN DE UN
ABASTECIMIENTO DE AGUA MEDIANTE TÉCNICAS
METAHEURÍSTICAS. APLICACIÓN A LA RED DE SUMINISTRO A
VALENCIA Y SU ÁREA METROPOLITANA.**

RESUMEN

La operación de grandes sistemas de abastecimiento de agua es una tarea compleja con la presencia de numerosos elementos de control. Generalmente, en el transporte del agua desde los puntos de producción hasta los puntos de distribución intervienen depósitos, estaciones de bombeo y válvulas. El régimen de operación de estos elementos hidráulicos conlleva la combinación de innumerables reglas de control para satisfacer el nivel de servicio exigido por sus clientes.

Hoy en día, con los avances tecnológicos de las últimas décadas, los sistemas de control permiten a los operadores controlar el régimen de operación de las estaciones de bombeo y las válvulas, así como monitorizar el estado de la red hidráulica en todo momento a través de sistemas SCADA, pero generalmente las decisiones de operación son tomadas de forma empírica y en ocasiones no suelen ser las más óptimas desde el punto de vista energético. En consecuencia, la creciente complejidad de las redes de distribución de agua y la incertidumbre vinculada a la demanda diaria de los usuarios nos lleva a la necesidad del uso de un sistema de control óptimo como alternativa viable.

Con el aumento de precios de la energía, el coste de la energía eléctrica utilizada por los sistemas de bombeo representa la mayor parte del coste total de la operación en los sistemas de distribución de agua. Por esta razón, y porque los precios de la energía son variables hora a hora, es necesario un control óptimo en tiempo real del régimen de operación de las estaciones de bombeo y el régimen de regulación de las válvulas, con el fin de minimizar los costes energéticos y al mismo tiempo controlar las presiones en la red. Para alcanzar este objetivo es necesario definir un modelo de optimización que dé como resultado un escenario de operación viable.

Por otra parte, los modelos de simulación hidráulica permiten realizar el seguimiento del régimen de operación diaria de una red de abastecimiento de agua, y su integración en un sistema SCADA constituyen una herramienta de valiosa ayuda para la toma de decisiones. Para ello el modelo matemático deberá estar calibrado y permanentemente actualizado. Finalmente para llevar a cabo un control óptimo en tiempo real es necesario definir un modelo de previsión de demanda que permita anticipar el estado de la red para las próximas 24 horas.

La presente tesis presenta una metodología de operación óptima en tiempo real de una red hidráulica basada en el desarrollo de una plataforma que permite la integración de modelos de simulación, los modelos de predicción y los algoritmos de optimización con los sistemas SCADA. Con vistas a realizar una optimización en tiempo real lo más ajustada a la realidad se ha adoptado un modelo de previsión de demanda basado en patrones históricos procedentes de

los datos de consumos obtenidos a través del propio sistema SCADA. Finalmente se ha desarrollado un módulo de optimización para minimizar los costes energéticos del sistema de bombeo, el cual, consta básicamente de dos bloques. En el primer bloque el objetivo ha sido optimizar el régimen de operación de las bombas mediante un modelo por programación lineal con el objetivo de minimizar los costes de operación manteniendo los niveles en los depósitos dentro del rango prefijado. En el segundo bloque, una vez definido el estado de operación de las bombas, se han optimizado las consignas de las válvulas de regulación, consideradas como válvulas reductoras de presión, con tal de satisfacer la demanda total prevista cumpliendo las restricciones de presión máxima y mínima del sistema, de acuerdo con la operación de las bombas.

Como una aportación importante de la tesis, a la hora de realizar las simulaciones hidráulicas de las diferentes soluciones propuestas por el optimizador, se ha sustituido el simulador hidráulico por un modelo equivalente basado en una arquitectura de red neuronal paralelizada (ANN), el cual permite reducir significativamente el tiempo de cálculo, aspecto de gran importancia cuando se trata de implantar un sistema de optimización en tiempo real.

La metodología propuesta ha sido aplicada sobre la red a abastecimiento de agua a Valencia y su área metropolitana, considerando los bloques de tarifas eléctricas vigentes para el caso de estudio. La tesis doctoral presenta unos resultados que prueban la efectividad del modelo propuesto en la búsqueda de estrategias de operación viables para ser aplicado sobre un sistema de distribución de agua real compuesta por dos estaciones de bombeo, varios depósitos, y diversas válvulas de regulación motorizadas, en la que se han podido omitir muchos de los componentes físicos del sistema mediante el uso de una arquitectura ANN, pero sin perder de vista los puntos críticos donde se han establecido las restricciones de presión. La reducción del consumo eléctrico alcanzado, pone de manifiesto la importancia del modelo de optimización como instrumento de mejora de la eficiencia energética del sistema.

TESI DOCTORAL

**OPTIMITZACIÓ EN TEMPS REAL DEL MODE D'OPERACIÓ D'UN
ABASTIMENT D'AIGUA PER MITJÀ DE TÈCNiques
METAHEURÍSTIQUES. APLICACIÓ A LA XARXA DE SUBMINISTRAMENT
A VALÈNCIA I LA SEUA ÀREA METROPOLITANA.**

RESUM

L'operació de grans sistemes d'abastiment d'aigua és una tasca complexa amb la presència de nombrosos elements de control. Generalment, en el transport de l'aigua des dels punts de producció fins als punts de distribució intervenen dipòsits, estacions de bombament i vàlvules. El règim d'operació d'estos elements hidràulics comporta la combinació d'inerables regles de control per a satisfer el nivell de servici exigít pels seus clients.

Hui en dia, amb els avanços tecnològics de les últimes dècades, els sistemes de control permeten als operadors controlar el règim d'operació de les estacions de bombament i les vàlvules, així com monitoritzar l'estat de la xarxa hidràulica en tot moment a través de sistemes SCADA, però generalment les decisions d'operació són preses de forma empírica i de vegades no solen ser les més òptimes des del punt de vista energètic. En conseqüència, la creixent complexitat de les xarxes de distribució d'aigua i la incertesa vinculada a la demanda diària dels usuaris ens porta a la necessitat de l'ús d'un sistema de control òptim com a alternativa viable.

Amb l'augment de preus de l'energia, el cost de l'energia elèctrica utilitzada pels sistemes de bombament representa la major part del cost total de l'operació en els sistemes de distribució d'aigua. Per esta raó, i perquè els preus de l'energia són variables hora a hora, és necessari un control òptim en temps real del règim d'operació de les estacions de bombament i el règim de regulació de les vàlvules, a fi de minimitzar els costos energètics i al mateix temps controlar les pressions en la xarxa. Per a aconseguir este objectiu és necessari definir un model d'optimització que done com resultat un escenari d'operació viable.

D'altra banda, els models de simulació hidràulica permeten realitzar el seguiment del règim d'operació diària d'una xarxa d'abastiment d'aigua, i la seua integració en un sistema SCADA contituyen una ferramenta de valuosa ajuda per a la presa de decisions. Per això el model matemàtic haurà d'estar calibrat i permanentment actualitzat. Finalment per a dur a terme un control òptim en temps real és necessari definir un model de previsió de la demanda que permeta anticipar l'estat de la xarxa per a les pròximes 24 hores.

La present tesi presenta una metodologia d'operació òptima en temps real d'una xarxa hidràulica basada en el desenrotllament d'una plataforma que permet la integració de models de simulació, els models de predicció i els algoritmes d'optimització amb els sistemes SCADA. Amb vista a realitzar una optimització en temps real el més ajustada a la realitat s'ha adoptat un model de previsió de demanda basat en patrons històrics procedents de les dades de consums obtinguts a través del propi sistema SCADA. Finalment s'ha desenvolupat un mòdul d'optimització per minimitzar els costos energètics del sistema de bombament, el qual, consta bàsicament de dos

blocs. En el primer bloc l'objectiu ha estat optimitzar el règim d'operació de les bombes mitjançant un model per programació lineal amb l'objectiu de minimitzar els costos d'operació mantenint els nivells en els dipòsits dins del rang prefixat. En el segon bloc, un cop definit l'estat d'operació de les bombes, s'han optimitzat les consignes de les vàlvules de regulació, considerades com vàlvules reductores de pressió, per tal de satisfer la demanda total prevista complint les restriccions de pressió màxima i mínima del sistema, d'acord amb l'operació de les bombes.

Com una aportació important de la tesi, a l'hora de realitzar les simulacions hidràuliques de les diferents solucions proposades per l'optimitzador, s'ha substituït el simulador hidràulic per un model equivalent basat en una arquitectura de xarxa neuronal paralelitzada (ANN), el qual permet reduir significativament el temps de càlcul, aspecte de gran importància quan es tracta d'implantar un sistema d'optimització en temps real.

La metodologia proposada ha sigut aplicada sobre la xarxa a abastiment d'aigua a València i la seua àrea metropolitana, considerant els blocs de tarifes elèctriques vigents per al cas d'estudi. La tesi doctoral presenta uns resultats que proven l'efectivitat del model proposat en la busca d'estratègies d'operació viables per a ser aplicat sobre un sistema de distribució d'aigua real composta per dos estacions de bombament, uns quants dipòsits, i diverses vàlvules de regulació motoritzades, en la que s'han pogut ometre molts dels components físics del sistema per mitjà de l'ús d'una arquitectura ANN, però sense perdre de vista els punts crítics on s'han establert les restriccions de pressió. La reducció del consum elèctric aconseguit, posa de manifest la importància del model d'optimització com a instrument de millora de l'eficiència energètica del sistema.

PhD THESIS

**OPTIMIZATION IN REAL TIME OPERATING MODE OF A WATER
SUPPLY BY METAHEURISTICS METHODS. NETWORK APPLICATION TO
SUPPLY TO VALENCIA AND ITS METROPOLITAN AREA.**

ABSTRACT

The operation of large water supply systems is a complex task due to the presence of numerous elements of control. Generally, the water transport from the production point to consumption points involves the operation of tanks, pumping stations and valves. The regime of operation of these hydraulic elements requires the combination of many control rules to guarantee the quality service demanded by its customers.

Nowadays, the latest technological advances allow operators to control the operation settings of pump stations and valves, as well as monitor the status of the water network on real time through SCADA systems. Generally, operating decisions are performed empirically and are not usually the most optimal from an energy saving point of view. Consequently, the increasing complexity of water distribution networks and the uncertainty linked to daily consumer demand brings us to the necessity of using an optimal control system as a feasible alternative.

Due to the rise of energy prices, the energy cost of pumping represents most of the total operation cost in water distribution systems. In addition, energy price varies according to the tariff structure. For these reasons, optimal real-time control of the pumping stations and the valve operation settings is required in order to minimize energy costs while controlling pressure in the network. To achieve this objective it is necessary to define an optimization model that results in a reliable operation scenario.

Moreover, simulation of hydraulic models allows tracking the daily operation schedule of the water supply network. Its integration into a SCADA system is a valuable tool to aid the making of decisions. For this aim, the mathematical model must be calibrated, and regularly updated. Finally, to perform optimal control in real-time, it is necessary to define a demand forecast model to know in advance the state of the network for the following 24 hours.

This thesis exposes a methodology for optimal real-time operation of a hydraulic network based on the development of a platform that allows the integration of hydraulic simulation models, forecast models and optimization algorithms in SCADA systems. With the aim of performing the most adjusted model to actual scenarios, a demand forecast model has been developed based on historical patterns obtained from the SCADA system. Finally, an optimization module has been developed to minimize the energy costs of pumping systems, which basically consists of two blocks. In the first block, the goal is to optimize the operating regime of pumps using a linear programming model to minimize the operating costs while maintaining the water levels in tanks within a threshold range. In the second block, once optimal pump operation is set, setting of pressure reducing valves is optimized in order to satisfy the total expected demand within the system's restrictions of maximum and minimum pressure, according to the pump operation.

An important contribution of this thesis has been the replacement of the hydraulic model by an equivalent model based on parallelized architecture neural network (ANN), which significantly reduces the computation time, a very important aspect when a system for real-time optimization is implemented.

The proposed methodology has been applied to the water supply network of Valencia and its metropolitan area, taking into account current energy tariff structure. Results prove the effectiveness of the proposed model in the search for feasible operation strategies, to be applied to a real distribution system with two water pumping stations, several tanks, and various regulation valves remotely operated. Many of the physical components of the system have been replaced by using ANN architecture, without affecting the pressure constraints at critical points. The achieved energy saving highlights the importance of applying optimization models as a mean of improving system energy efficiency.

INDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	I
INDICE DE CONTENIDOS.....	VII
INDICE DE FIGURAS.....	XII
INDICE DE TABLAS.....	XV
ACRÓNIMOS.....	XVI

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN 1

1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	3

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE 5

2.1 LA OPERACIÓN DE LAS REDES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA	5
2.2 MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA OPERACIÓN DE REDES DE ABASTECIMIENTO	9
2.3 MODELOS DE PREVISIÓN DE LA DEMANDA.....	11
2.4 FUNDAMENTOS DE LAS REDES NEURONALES	13
2.4.1 Introducción.....	13
2.4.2 Modelo de neurona artificial.....	14
2.4.3 Arquitectura de una ANN.....	16
2.4.4 Proceso de entrenamiento de una ANN.....	17

CAPÍTULO 3. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN EN TIEMPO REAL DE LAS REDES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA25

3.1 LA GESTION ENÉRGICA.....	25
3.2 ESTRATEGIAS POSIBLES DE OPERACIÓN.....	26
3.3 GESTION DE MODELOS	29
3.3.1 Modelos de simulación de la red hidráulica	29
3.3.2 Modelo de previsión de demanda	31
3.4 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN	31
3.4.1 Introducción.....	31
3.4.2 Formulación de un problema de optimización.....	32
3.5 FORMULACIÓN GENERAL DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN PROPUESTO PARA LA MINIMIZACIÓN DE COSTES ENERGÉTICOS	33
3.6 METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN PROPUESTA	34

CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN HIDRÁULICA DEL COMPORTAMIENTO DE UNA RED DE ABASTECIMIENTO DE AGUA MEDIANTE REDES NEURONALES.....37

4.1 MODELOS DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA.....	37
4.1.1 Tipo de modelos matemáticos	38

4.1.2	Componentes de un modelo matemático	39
4.1.2.1	Componentes físicos	39
4.1.2.2	Componentes no físicos	43
4.1.3	Simulación mediante modelos matemáticos	44
4.1.4	Simulación hidráulica mediante metamodelos	48
4.2	ARQUITECTURAS DE REDES NEURONALES PARA SIMULAR EL COMPORTAMIENTO DE LA REDES HIDRÁULICAS	50
4.2.1	Simulación en régimen permanente	50
4.2.2	Análisis de factibilidad	51
4.2.3	Simulación de una etapa en régimen dinámico	52
4.2.4	Incorporación de las leyes de control en simulaciones dinámicas	52
4.2.5	Simulación dinámica completa en periodo extendido	54
4.3	GENERACIÓN DE PATRONES PARA EL ENTRENAMIENTO DE LAS ARQUITECTURAS ANN	55
4.4	ESTRUCTURA INTERNA DE LA TOOLKIT DE EPANET. FUNCIONES Y PROCESO GENERAL DE SIMULACIÓN.....	55
4.4.1	Generalidades del módulo de herramientas	56
4.4.2	Software de entrenamiento ANN. Nevprop v1.16.....	57
4.5	DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE PATRONES A 24 HORAS.....	57
4.6	COMPUTACION PARALELA. PARALELIZACION DEL PROCESO DE ENTRENAMIENTO.....	60
4.6.1	Aspectos generales.....	60
4.6.2	Modelo de paso de mensajes.....	61
4.6.3	Parametros de rendimiento	62
4.6.4	Paralelización del software de entrenamiento.....	65
4.6.4.1	Algoritmo secuencial del proceso de entrenamiento de una ANN	66
4.6.4.2	Paralelización del algoritmo de entrenamiento	68
 CAPÍTULO 5. MODELO DE PREVISIÓN DE LA DEMANDA		75
5.1	MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE LA DEMANDA.....	75
5.2	METODOLOGÍA APLICADA.....	76
5.3	FORMULACIÓN DE LOS COMPONENTES PERIÓDICOS DE LA DEMANDA.....	78
5.4	PREVISION DE LA DEMANDA PARA LAS PRÓXIMAS 24 HORAS.....	80
 CAPÍTULO 6. MODELO DE OPTIMIZACIÓN HÍBRIDO APLICANDO PROGRAMACIÓN LINEAL Y ALGORITMOS GENÉTICOS		83
6.1	PROGRAMACIÓN LINEAL	83
6.1.1	Módulo de programación lineal OpenSolver	84
6.2	FUNDAMENTOS DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS.....	84
6.2.1	Codificación de los cromosomas	86
6.2.2	Generación de la población inicial.....	86
6.2.3	Función de adaptación	86
6.2.4	Selección.....	86
6.2.5	Reproducción.....	87

6.2.6	Mutación.....	89
6.2.7	Inserción de los hijos en la población.....	89
6.2.8	Criterios de parada.....	90
6.2.9	Ajustes de los parámetros.....	90
6.2.10	Librería de programación de AG OptiGA.....	91
6.3	FORMULACIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA MINIMIZACIÓN DE COSTES ENERGÉTICOS.....	91
6.4	FORMULACIÓN DE LA OPTIMIZACIÓN DE LA REGULACIÓN DE LAS VÁLVULAS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN.....	95
6.4.1	Variables de decisión.....	95
6.4.2	Restricciones.....	96
6.4.3	Método de penalización de restricciones.....	96
6.4.4	Función objetivo transformada.....	98

CAPÍTULO 7. INTEGRACIÓN DE UN OPTIMIZADOR EN UN SISTEMA

SCADA PARA LA OPERACIÓN EN TIEMPO REAL. LA

PLATAFORMA SCA-Red.....99

7.1	OBJETIVOS DE LOS SISTEMAS SCADA EN REDES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA.....	99
7.2	COMPONENTES DE UN SISTEMA SCADA.....	100
7.3	PROCEDIMIENTOS DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	101
7.4	TIPO Y FORMATO DE LOS DATOS DE CAMPO.....	102
7.5	GESTIÓN DE ANOMALÍAS EN SISTEMAS SCADA Y PROCESADO DE LA INFORMACIÓN DE CAMPO.....	103
7.6	SINCRONIZACIÓN Y VALIDACIÓN DE DATOS.....	103
7.7	LIMITACIONES DE LOS SISTEMAS SCADA.....	104
7.8	INTEGRACIÓN DE MODELOS HIDRÁULICOS EN SISTEMAS SCADA.....	106
7.9	LA PLATAFORMA SCA-Red.....	107
7.9.1	Antecedentes.....	107
7.9.2	Capacidades de la plataforma SCA-Red.....	107
7.9.3	Estructura de la plataforma SCA-Red.....	109
7.10	ALMACENAMIENTO Y PROCESADO DE LOS DATOS SCADA.....	109
7.11	INTEGRACIÓN DE LA PLATAFORMA SCA-Red CON EPANET 2.0.....	111
7.11.1	Asignación de datos de campo en el modelo hidráulico.....	111
7.11.2	Interoperabilidad con el fichero EPANET.....	113
7.11.3	Filtrado de datos.....	114
7.12	ARQUITECTURA DISTRIBUIDA DE LA PLATAFORMA.....	115
7.12.1	Capa servidor.....	115
7.12.2	Capa cliente.....	116
7.12.3	Arquitectura hardware.....	117
7.12.4	Arquitectura software.....	118
7.12.5	Diagramas de secuencia.....	120
7.13	INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS DE OPTIMIZACIÓN PROPUESTOS EN LA PLATAFORMA SCA-Red.....	121
7.13.1	Optimización de escenarios pasados.....	121
7.13.2	Optimización de escenarios futuros y tiempo real.....	123

CAPÍTULO 8. CASO DE ESTUDIO: APLICACIÓN DE LA RED DE ABASTECIMIENTO DE AGUA A VALENCIA Y SU AREA METROPOLITANA.....	127
8.1 INTRODUCCIÓN.....	127
8.2 DESCRIPCIÓN DE LA RED HIDRÁULICA.....	127
8.3 PROCESO GENERAL PARA LA CONFECCIÓN DE DIFERENTES MODELOS.	129
8.3.1 Confección del modelo de detalle a partir del SIG	129
8.3.2 Confección y calibración del modelo estratégico	132
8.3.3 Confección del modelo hidráulico para el entrenamiento de la ANN	135
8.3.4 Régimen de operación de la red de Valencia	138
8.3.4.1 Objetivos principales	139
8.3.4.2 Tratamiento de la información SCADA.....	140
8.4 ARQUITECTURA ANN EMPLEADA PARA LA SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRAULICO DE LA RED DE ABASTECIMIENTO.....	143
8.4.1 Variables de entrada de la arquitectura ANN	143
8.4.2 Variables de salida de la arquitectura ANN.....	145
8.4.3 Parámetros empleados para la generación de patrones de entrenamiento de la ANN.....	147
8.4.4 Análisis de resultados de la paralelización del proceso de entrenamiento.....	148
8.4.5 Análisis de resultados de la simulación de la arquitectura ANN.	155
8.5 PREVISIÓN DE LAS ZONAS DE DEMANDA.....	160
8.5.1 Análisis de los resultados del modelo de previsión de demanda aplicado.....	161
8.6 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN	164
8.6.1 Optimización de los costes de energéticos en las estaciones de bombeo de las plantas de tratamiento	164
8.6.1.1 Variables de decisión.....	165
8.6.1.2 Restricciones del problema.....	166
8.6.1.3 Parámetros del modelo hidráulico	170
8.6.2 Optimización del régimen de operación de las válvulas.....	173
8.6.2.1 Variables de decisión.....	173
8.6.2.2 Restricciones del problema.....	174
8.6.2.3 Parametros del algoritmo genético	175
8.7 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN	176
8.7.1 Resultados de la optimización del régimen de operación de los grupos de bombeo .	176
8.7.2 Evaluación de los costes energéticos	183
8.7.3 Resultados de la optimización del régimen de operación de las válvulas.....	187
8.7.4 Tiempos de cálculo consumidos durante el proceso de optimización	191
CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	193
9.1 CONCLUSIONES	193
9.2 APORTACIONES ORIGINALES.....	194
9.3 TRABAJOS FUTUROS.....	196
9.4 PUBLICACIONES ASOCIADAS AL DESARROLLO DE LA TESIS.....	198
9.5 CONTRATOS DERIVADOS DEL DESARROLLO DE LA TESIS.....	199
BIBLIOGRAFIA	201
ANEXOS.....	209

ANEXO 1. DESCRIPCIÓN DEL FICHERO DE ENTRADA DEL SOFTWARE DE ENTRENAMIENTO NEVPROP 1.16.	211
ANEXO 2. CASOS DE ESTUDIO PARA EL ENTRENAMIENTO DE LAS ARQUITECTURAS ANN.....	217
ANEXO 3. PARÁMETROS LIBRERÍA ALGORITMOS GENÉTICOS OPTIGA	225
ANEXO 4. FUNCIONALIDADES DE LOS MÓDULOS DE LA PLATAFORMA SCA-RED	228
A4.1 Módulo SCA-Red MS	228
A4.2 Módulo SCA-Red AD.....	236
A4.3 Módulo SCA-Red RPT	241
A4.4 Módulo SCA-Red SVC	242

INDICE DE FIGURAS

FIGURA. 2.1. ESQUEMA DE UNA RED NEURONAL FEED-FORWARD.....	14
FIGURA. 2.2. MODELO DE NEURONA ESTÁNDAR	16
FIGURA. 2.3. PSEUDOCÓDIGO DEL ALGORITMO QUICKPROP.....	23
FIGURA. 3.1. ESTRUCTURA DE CONTROL MONITORIZADO.....	26
FIGURA. 3.2. ESTRUCTURA DE CONTROL ASISTIDO POR ORDENADOR	27
FIGURA. 3.3. ESTRUCTURA DE CONTROL EN TIEMPO REAL	28
FIGURA. 3.4. DIAGRAMA DE LA METODOLOGÍA DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN PROPUESTA	36
FIGURA. 4.1. COMPONENTES PRINCIPALES DE UN MODELO MATEMÁTICO	40
FIGURA. 4.2. DIAGRAMA DE FLUJO DE UN MODELO TIPO CUASI-ESTÁTICO.....	45
FIGURA. 4.3. ARQUITECTURA ANN PARA LA SIMULACIÓN DE MODELOS EN RÉGIMEN PERMANENTE.	50
FIGURA. 4.4. ARQUITECTURA ANN PARA EL ANALISIS DE FACTIBILIDAD.	51
FIGURA. 4.5. ARQUITECTURA ANN PARA LA SIMULACIÓN DE MODELOS EN RÉGIMEN DINÁMICO.	52
FIGURA. 4.6. ARQUITECTURA ANN PARA LA SIMULACIÓN EN RÉGIMEN DINÁMICO CON LEYES DE CONTROL.....	53
FIGURA. 4.7. ESQUEMA DE SIMULACIÓN DINÁMICA EN PERIODO EXTENDIDO BASADO EN LA SECUENCIA DE ARQUITECTURA ANN.....	54
FIGURA. 4.8. DIAGRAMA DEL PROCESO DE ENTRENAMIENTO DE LA ARQUITECTURA ANN.	57
FIGURA. 4.9. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA GENERACIÓN DE PATRONES DE ENTRENAMIENTO.	59
FIGURA. 4.10. ALGORITMO DE ENTRENAMIENTO SECUENCIAL	67
FIGURA. 4.11. PARALELIZACIÓN DEL ALGORITMO DE ENTRENAMIENTO.	70
FIGURA. 4.12. DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCEDIMIENTOS DEL NODO MAESTRO.....	72
FIGURA. 4.13. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LAS FASES DE EJECUCIÓN DE CADA NODO ESCLAVO	73
FIGURA. 5.1. ESTRUCTURA DE MODULOS DEL MODELO DE PREVISIÓN DE DEMANDA (ALVISI ET AL. 2007)	77
FIGURA. 6.1. CODIFICACIÓN DEL ESPACIO DE SOLUCIONES EN ESPACIO DE CROMOSOMAS.	85
FIGURA. 6.2. CICLO DE UN ALGORITMO GENÉTICO.	85
FIGURA. 6.3. EJEMPLO DE REPRESENTACIÓN DE UN CROMOSOMA PARA LA CONSIGNA DE PRESIÓN AGUAS ABAJO DE UNA VÁLVULA	86
FIGURA. 6.4. MÉTODO DE CRUCE 1-PUNTO.	88
FIGURA. 6.5. MÉTODO DE CRUCE 2-PUNTOS	88
FIGURA. 6.6. REPRESENTACIÓN DEL CROMOSOMA PARA LAS CONSIGNAS DE TRES VÁLVULAS DURANTE UN PERIODO T.	95
FIGURA. 7.1. ARQUITECTURA GENERAL DE UN SISTEMA SCADA.	101
FIGURA. 7.2. ESQUEMA DE ALMACENAMIENTO Y GESTIÓN DE LAS MEDIDAS DE CAMPO.	110
FIGURA. 7.3. ESQUEMA DE LA ARQUITECTURA HARDWARE.	117
FIGURA. 7.4. ESQUEMA DE LA ARQUITECTURA SOFTWARE.	118
FIGURA. 7.5. DIAGRAMA DE SECUENCIA UML PARA ESCENARIOS EN TIEMPO REAL	120
FIGURA. 7.6. ESQUEMA DE OPTIMIZACIÓN DE ESCENARIOS PASADOS.	122
FIGURA. 7.7. ESQUEMA DE OPTIMIZACIÓN DE ESCENARIOS FUTUROS Y TIEMPO REAL.....	125
FIGURA. 8.1. ESQUEMA DE LA RED DE DETALL DE VALENCIA.	128
FIGURA. 8.2. ESQUEMA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LA PRESA.	130
FIGURA. 8.3. ESQUEMA DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE PICASSENT	131
FIGURA. 8.4. MODELO DE DETALLE DE 26.000 NUDOS.....	132
FIGURA. 8.5. CURVAS DE PRESIÓN DE NUDOS REPRESENTATIVOS.....	134
FIGURA. 8.6. CURVAS DE CAUDAL EN TUBERIAS PRINCIPALES.	134
FIGURA. 8.7. MODELO ESTRATÉGICO DE LA RED DE VALENCIA (5000 NUDOS).....	135
FIGURA. 8.8. ESQUEMA DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN UTILIZADA PARA EL ENTRENAMIENTO DE LA ANN.	136

FIGURA. 8.9. GRÁFICOS DE CALIBRACIÓN DE PRESIONES EN NUDOS CRITICOS.	138
FIGURA. 8.10. CAUDALES EN TUBERIAS PRINCIPALES.	138
FIGURA. 8.11. DIFERENTES ESQUEMAS DE OPERACIÓN DE LA RED DE VALENCIA.	139
FIGURA. 8.12. PROMEDIO HORARIO DEL CAUDALIMETRO SJCALASANZ.	141
FIGURA. 8.13. CURVA DE MODULACIÓN DE LA DEMANDA TOTAL SOBRE EL EDITOR DE PATRONES EPANET.	141
FIGURA. 8.14. ESQUEMA DE LA ARQUITECTURA ANN EMPLEADA.	143
FIGURA. 8.15. TIEMPO DE ENTRENAMIENTO POR NÚMERO DE PROCESADORES.	149
FIGURA. 8.16. TIEMPOS DE COMUNICACIÓN.	149
FIGURA. 8.17. TIEMPO TOTAL (INCLUYENDO TIEMPO DE COMUNICACIÓN).	150
FIGURA. 8.18. COMUNICACIÓN ENTRE PROCESADORES.	150
FIGURA. 8.19. SPEEDUP PARA EL TIEMPO TOTAL DE PROCESAMIENTO.	151
FIGURA. 8.20. EFICIENCIA PARA EL TIEMPO DE PROCESAMIENTO.	151
FIGURA. 8.21. PRESIONES EN NUDOS CRITICOS EN EL INSTANTE T.	156
FIGURA. 8.22. POTENCIA TOTAL CONSUMIDA POR CADA GRUPO DE BOMBEO DE LA PLANTA DE LA PRESA EN EL INSTANTE T.	156
FIGURA. 8.23. POTENCIA TOTAL CONSUMIDA POR LOS GRUPOS DE BOMBEO DE LA PLANTA DE PICASSENT EN EL INSTANTE T	157
FIGURA. 8.24. NIVELES EN DEPÓSITOS PARA EL INSTANTE T+1.	157
FIGURA. 8.25. CAUDALES PRODUCIDOS PARA LA PLANTA DE LA PRESA Y PICASSENT EN EL INSTANTE T.	158
FIGURA. 8.26. CAUDALES DE INYECCIÓN DESDE DEPÓSITOS EN EL INSTANTE T.	159
FIGURA. 8.27. GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE EL CAUDAL MEDIDO Y LA PREVISIÓN DE LAS PROXIMAS 1H Y 24H DE LA ZONA DE DEMANDA VALENCIA.	162
FIGURA. 8.28. GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE EL CAUDAL MEDIDO Y LA PREVISIÓN DE LAS PROXIMAS 1H Y 24H DE LA ZONA DE DEMANDA PUEBLOS.	162
FIGURA. 8.29. GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE EL CAUDAL MEDIDO Y LA PREVISIÓN DE LAS PROXIMAS 1H Y 24H DE LA ZONA DE DEMANDA PINEDO.	162
FIGURA. 8.30. GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE EL CAUDAL MEDIDO Y LA PREVISIÓN DE LAS PROXIMAS 1H Y 24H DE LA ZONA DE DEMANDA GRAN CANARIA.	163
FIGURA. 8.31. GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE EL CAUDAL MEDIDO Y LA PREVISIÓN DE LAS PROXIMAS 1H Y 24H DE LA ZONA DE DEMANDA HORTA NORD.	163
FIGURA. 8.32. GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE EL CAUDAL MEDIDO Y LA PREVISIÓN DE LAS PROXIMAS 1H Y 24H DE LA ZONA DE DEMANDA TAV BLANQUES.	163
FIGURA. 8.33. NIVEL MEDIO DURANTE EL AÑO 2013 PARA EL DEPÓSITO DE LA PRESA (MANISES).	171
FIGURA. 8.34. NIVEL MEDIO DURANTE EL AÑO 2013 PARA EL DEPÓSITO DE PICASSENT.	171
FIGURA. 8.35. DEMANDA TOTAL Y DEMANDA DE SUBSECTORES DE LA RED.	172
FIGURA. 8.36. CAUDAL DE PRODUCCIÓN PARA LA PLANTA DE LA PRESA (ACT: AZUL)/ (OPT: ROJO).	178
FIGURA. 8.37. CAUDAL DE PRODUCCIÓN PARA LA PLANTA DE LA PRESA (ACT: AZUL)/ (OPT: ROJO).	178
FIGURA. 8.38. CAUDALES DE BOMBEO (ACT: AZUL / OPT: ROJO) FRENTE AL COSTE DE TARIFA ELÉCTRICA PARA LA PLANTA DE LA PRESA.	179
FIGURA. 8.39. CAUDALES DE BOMBEO (ACT: AZUL / OPT: ROJO) FRENTE A LOS COSTES ENÉRGICOS PARA LA PLANTA DE LA PRESA.	179
FIGURA. 8.40. CAUDALES DE BOMBEO (ACT: AZUL / OPT: ROJO) FRENTE AL COSTE DE TARIFA ELÉCTRICA PARA LA PLANTA DE PICASSENT.	180
FIGURA. 8.41. CAUDALES DE BOMBEO (ACT: AZUL / OPT: ROJO) FRENTE A LOS COSTES ENÉRGICOS PARA LA PLANTA DE PICASSENT.	180

FIGURA. 8.42. EVOLUCIÓN DEL NIVEL DEL DEPÓSITO MONTEMAYOR1 (ACT: AZUL/OPT: ROJO) RESPECTO AL PERIODO TARIFARIO DE 24 HORAS.	181
FIGURA. 8.43. EVOLUCIÓN DEL NIVEL DE DEPÓSITO PICASSENT1 (ACT: AZUL / OPT: ROJO) RESPECTO AL PERIODO TARIFARIO DE 24 HORAS.	181
FIGURA. 8.44. CAUDAL DE INYECCIÓN (ACT: AZUL /OPT: ROJO) DESDE EL DEPÓSITO DE MONTEMAYOR1 (DEMMANISES).	182
FIGURA. 8.45. CAUDAL DE INYECCIÓN (ACT: AZUL /OPT: ROJO) DESDE EL DEPÓSITO DE PICASSENT1 (DEMPICASSENT). ...	182
FIGURA. 8.46. COMPARATIVA DE CONSIGNAS DE VÁLVULAS SITUACIÓN ACTUAL (AZUL) Y LA SOLUCIÓN ÓPTIMA (ROJO): (A) SANÍSIDROV3, (B) SÍSIDROV2, (C) SONOFREV2, (D) NIIIV3.....	188
FIGURA. 8.47. COMPARATIVA DE CONSIGNAS DE VÁLVULAS SITUACIÓN ACTUAL (AZUL) Y LA SOLUCIÓN ÓPTIMA (ROJO): (A) FERIAMUESTRAS, (B) CAMPV1, (C) CAMPV2, (D) AVCID, (E) TRESFORQUES, (F) GAVILÉS.	189
FIGURA. 8.48. PRESIONES EN NUDOS CRÍTICOS EN LA SITUACIÓN ACTUAL (AZUL) Y SOLUCIÓN ÓPTIMA (ROJO): (A) GRANVIA, (B) PINEDO, (C) TAVBLANQUES, (D) GRANCANARIA.	190
FIGURA. A2.1. (A) RMSE CASO 1; (B) RMSE CASO 2.	218
FIGURA. A2.2. (A) RSME CASO 3; (B) RMSE CASO 4.	220
FIGURA. A2.3. (A) RSME CASO 5; (B) RMSE CASO 6; (C) RMSE CASO 7; (D) RMSE CASO 8.	222
FIGURA. A2.4. (A) RSME CASO 9; (B) RMSE CASO 10.	224
FIGURA. A4.1 INTERACCIÓN DEL MODULO SCA-RED-MS CON EL SISTEMA SCADA.	228
FIGURA. A4.2. DIAGRAMA DE ESTADOS DE LOS MODOS DE OPERACIÓN DEL MODULO SCA-RED MS.....	230
FIGURA. A4.3. SIMULACIÓN EN TIEMPO REAL.	231
FIGURA. A4.4. SIMULACIÓN DE SITUACIONES PASADAS.	232
FIGURA. A4.5. SIMULACIÓN DE SITUACIONES FUTURAS (CORTO PLAZO – PRÓXIMAS 24 HORAS).....	233
FIGURA. A4.6. EXPORTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO CORRESPONDIENTE A LOS DATOS DE CONSULTA.	233
FIGURA. A4.7. BALANCE HIDROMÉTRICO CORRESPONDIENTE A UN SUBSISTEMA.	234
FIGURA. A4.8. GRÁFICO COMPARATIVO (TARTA) DE LA INYECCIÓN TOTAL DEL SISTEMA VS DEMANDA DEL SISTEMA.	234
FIGURA. A4.9. GRÁFICO COMPARATIVO (LÍNEAS) DE LA INYECCIÓN TOTAL DEL SISTEMA VS DEMANDA TOTAL DEL SISTEMA.	235
FIGURA. A4.10. UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES REMOTAS Y VISUALIZACIÓN DE DATOS DE PUNTOS DE MEDIDA.....	235
FIGURA. A4.11. SISTEMA DE NAVEGACIÓN DEL MÓDULO SCA-RED AD.	236
FIGURA. A4.12. DECLARACIÓN DE UNA VARIABLE COMBINADA.	237
FIGURA. A4.13. REPRESENTACIÓN DE UNA VARIABLE COMBINADA A INTERVALOS DE 5 MIN., 15MIN., 1H.	237
FIGURA. A4.14. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE UNA SEÑAL COMBINADA CON DIVERSAS BASES DE TIEMPO: (A) SEMANAL, (B) HORARIA, (B) MENSUAL HORARIA, Y ANUAL CON AGRUPACIÓN (C) HORARIA,(D) DIARIA, (E) SEMANAL, (F) MENSUAL.	238
FIGURA. A4.15. GRÁFICO COMPARATIVO DE LA SERIE HORARIA (MARRON) CON LA CURVA PATRÓN (AZUL).	239
FIGURA. A4.16. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE UMBRALES PARA UNA SEÑAL.	239
FIGURA. A4.17. REPRESENTACIÓN COMPARATIVA DE CAUDAL/PRESIÓN.....	240
FIGURA. A4.18. REPRESENTACIÓN GRÁFICA PARA UNA SEÑAL DE CAUDAL PARA LOS MESES DE MAYO Y JUNIO DE 2014... ..	240
FIGURA. A4.19. INFORME PARA UNA SEÑAL COMBINADA.	241
FIGURA. A4.20. INFORMES DE TAREAS PROGRAMADAS: (A) DOCUMENTO, (B) DATOS ALFANUMÉRICOS.	242

INDICE DE TABLAS

TABLA 8.1. RESUMEN DE LOS ELEMENTOS DE LA RED DE VALENCIA.	136
TABLA 8.2. RESUMEN CONFIGURACIÓN ARQUITECTURA ANN.	143
TABLA 8.3. VARIABLES DE ENTRADA ANN PARA LOS GRUPOS DE BOMBEO.	144
TABLA 8.4. VARIABLES DE ENTRADA ANN PARA LAS CONSIGNAS DE VÁLVULA.	144
TABLA 8.5. VARIABLES DE ENTRADA PARA LAS ZONAS DE DEMANDA.	144
TABLA 8.6. VARIABLES DE ENTRADA ANN PARA LOS NIVELES DE DEPÓSITO EN EL INSTANTE T.	145
TABLA 8.7. VARIABLES DE SALIDA ANN PARA LA POTENCIA CONSUMIDA POR LOS GRUPOS DE BOMBEO.	145
TABLA 8.8. VARIABLES DE SALIDA ANN PARA LA PRESIÓN EN NUDOS CRÍTICOS.	145
TABLA 8.9. VARIABLES DE SALIDA ANN DE LOS CAUDALES DE PRODUCCIÓN DE LAS PLANTAS.	146
TABLA 8.10. VARIABLES DE SALIDA ANN PARA LOS CAUDALES DE INYECCIÓN DESDE DEPÓSITOS.	146
TABLA 8.11. VARIABLES DE SALIDA DE LOS NIVELES DE DEPÓSITOS EN T+1.	146
TABLA 8.12. CASOS DE ENTRENAMIENTO.	148
TABLA 8.13. RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DE LA ARQUITECTURA ANN.	160
TABLA 8.14. COEFICIENTES DE DETERMINACIÓN PARA LA PREVISIÓN A 1H.	161
TABLA 8.15. COEFICIENTES DE DETERMINACIÓN PARA LA PREVISIÓN A 24H.	161
TABLA 8.16. RANGO DEL NÚMERO DE BOMBAS POR GRUPO DE BOMBEO.	165
TABLA 8.17. COSTE DE BOMBEO POR PLANTA.	166
TABLA 8.18. COSTES DE TRATAMIENTO POR PLANTA.	166
TABLA 8.19. CAUDAL MÁXIMO DE BOMBEO POR PLANTA.	167
TABLA 8.20. POTENCIA MÁXIMA POR PLANTA.	168
TABLA 8.21. ESTRUCTURA DE TARIFAS CORRESPONDIENTE AL AÑO 2013.	168
TABLA 8.22. TARIFAS DEL BLOQUE 4 PARA EL AÑO 2013.	169
TABLA 8.23. NIVELES MÍNIMO, MÁXIMO E INICIAL DE LOS DEPÓSITOS DE CADA PLANTA DE TRATAMIENTO.	172
TABLA 8.24. CAUDAL DE BOMBEO PARA CADA GRUPO DE BOMBAS.	173
TABLA 8.25. COSTES DE BOMBEO PARA CADA GRUPO DE BOMBAS.	173
TABLA 8.26. LÍMITES DE CONSIGNA DE VÁLVULAS.	174
TABLA 8.27. RANGO DE PRESIONES EN NUDOS CRÍTICOS.	175
TABLA 8.28. PARÁMETROS DE ENTRADA AG.	175
TABLA 8.29. FACTORES DE PONDERACIÓN DE LAS PENALIZACIONES.	176
TABLA 8.30. REGLAS DE OPERACIÓN DE LOS GRUPOS DE BOMBEO PARA LA SITUACIÓN ACTUAL DURANTE EL PERIODO DE 24 HORAS.	177
TABLA 8.31. REGLAS DE OPERACIÓN ÓPTIMA DE LOS GRUPOS DE BOMBEO DURANTE EL PERIODO DE 24 HORAS.	177
TABLA 8.32. COSTES DE PRODUCCIÓN, BOMBEO Y TOTALES EN LA PLANTA DE LA PRESA Y PICASSENT.	183
TABLA 8.33. DISTRIBUCIÓN DE COSTES ENERGÉTICOS POR PLANTA PARA LA SITUACIÓN ACTUAL.	184
TABLA 8.34. DISTRIBUCIÓN DE VOLUMEN BOMBEADO POR PLANTA POR PERIODO TARIFARIO PARA LA SITUACIÓN ACTUAL.	184
TABLA 8.35. DISTRIBUCIÓN DEL VOLUMEN INYECTADO POR PLANTA POR PERIODO TARIFARIO PARA LA SITUACIÓN ACTUAL.	184
TABLA 8.36. COSTES ÓPTIMOS DE PRODUCCIÓN, BOMBEO Y TOTALES EN LA PLANTA DE LA PRESA Y PICASSENT.	185
TABLA 8.37. DISTRIBUCIÓN DE COSTES ENERGÉTICOS POR PLANTA PARA LA SOLUCIÓN ÓPTIMA.	185
TABLA 8.38. DISTRIBUCIÓN DE VOLUMEN BOMBEADO POR PLANTA POR PERIODO TARIFARIO PARA LA SITUACIÓN ÓPTIMA.	186
TABLA 8.39. DISTRIBUCIÓN DEL VOLUMEN INYECTADO POR PLANTA POR PERIODO TARIFARIO PARA LA SITUACIÓN ÓPTIMA.	186
TABLA A2.1. PARÁMETROS ANN PARA LA SIMULACIÓN EN RÉGIMEN PERMANENTE.	217
TABLA A2.2. PARÁMETROS ANN PARA EL ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD EN RÉGIMEN PERMANENTE.	219
TABLA A2.3. PARÁMETROS ANN PARA LA SIMULACIÓN EN RÉGIMEN DINÁMICO.	221
TABLA A2.4. PARÁMETROS ANN PARA LA SIMULACIÓN EN RÉGIMEN DINÁMICO CON LEYES DE CONTROL.	223

ACRÓNIMOS

AG:	Algoritmo genético.
ANN:	Red neuronal artificial (del inglés: Artificial neural network).
DMA:	District Meter Area.
DSS:	Decision Support System (del inglés: Sistema para la ayuda a la toma de decisiones)
EPS:	Simulación en periodo extendido (del inglés: Extended Period Simulation).
HMI:	Human Machine Interface.
MAE:	Mean Absolute Error.
MAPE:	Mean Absolute Percentage Error.
MES:	Manufacturing Execution System.
MIMD:	Multiple Instruction Multiple Data.
MMI:	Man Machine Interface.
MPI:	Message Passing Interface
MPM:	Multiplicative Penalty Method.
MUX:	Multiplexor.
OLEDB:	Object Linking and Embedding for Databases.
OPC:	Ole for Process Control.
PD:	Programación dinámica.
PL:	Programación lineal.
PLC:	Programmable Logic Controller.
PNL:	Programación no lineal.
PM:	Probabilidad de mutación.
RMSE:	Root Mean Square Error.
RTU:	Remote Terminal Unit.
RBP:	Red Backpropagation.
SCO:	Sistema de control óptimo.
SIG:	Sistema de Información Geográfica.
SIMD:	Simple Instruction Multiple Data.
SCADA:	Supervisory Control and Data Acquisition.
SSID:	Simple Intruction, Simple Data.
SVG:	Scalable Vector Graphics.
UML:	Unified Modeling Language.
VB:	Visual Basic.
VBA:	Visual Basic for Applications.
VLQ:	Válvula limitadora de caudal.
VRP:	Válvula reductora de presión.
VSP:	Válvula sostenedora de presión.
VRC:	Válvula de rotura de carga.
VR:	Válvula de regulación.
VPG:	Válvula de propósito general.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL

La gestión diaria de la operación de un sistema de distribución de agua es una tarea compleja. En la actualidad, los operadores de salas de control con su experiencia son capaces de controlar el régimen de operación de las bombas y válvulas para garantizar el nivel de servicio requerido por sus clientes. Sin embargo, la creciente complejidad de dichas redes de distribución y la incertidumbre vinculada a la demanda de los usuarios llevan a la necesidad del uso de un sistema de control óptimo (SCO) como alternativa viable.

Un SCO puede ser desarrollado a partir de la definición de tres modelos: **un modelo de simulación hidráulica** de la red de abastecimiento de agua, **un modelo de previsión de la demanda** y un **modelo de optimización**.

Hoy en día, muchas empresas del sector del agua han adoptado un sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) en sus instalaciones para mejorar la operación de su red de abastecimiento de agua. Estos sistemas establecen el estado actual de la red y transmiten estos datos a un centro de control a intervalos regulares y cortos de tiempo. Tales sistemas permiten a los operadores controlar las presiones y caudales a lo largo de la red de distribución de agua y operar sobre varios elementos de control (por ej, bombas y válvulas) desde una ubicación central. El SCO puede funcionar como un elemento independiente del entorno de operación (optimización off-line) o directamente integrado con un sistema de control en tiempo real (CTR) (optimización on-line).

Con el aumento de los precios de la energía, el coste de la electricidad consumido en las estaciones de bombeo representa la mayor parte del coste total de operación en los sistemas de distribución de agua. Por esta razón, muchos de los estudios realizados en los últimos años se han centrado en la optimización horaria de la operación de los sistemas de bombeo. Sin embargo, muchos de ellos asumen una demanda media y un situación estándar de la red, lo que sería aplicable solo como recomendación. Otros realizan la optimización en tiempo real para las próximas 24 horas, a partir de una hora dada (usualmente medianoche), y una estimación de la demanda para dicho periodo, y durante el mismo gestionan los posibles desvíos. Los sistemas más avanzados, revisan cada hora la programación óptima para el futuro más cercano, en base a la situación actual en cada momento. Ello requiere una comunicación constante entre el sistema real y el optimizador, así como el desarrollo de algoritmos computacionalmente eficientes que pueda identificar rápidamente una solución aceptable bajo cualquier circunstancia, ya no solo orientada a reducir el consumo energético, sino también a garantizar el servicio.

Para una gestión eficiente de la operación cada vez se hace más necesario disponer de un modelo de simulación hidráulica integrado en el propio sistema SCADA así como de una base de datos histórica del estado de todos los elementos hidráulicos que configuran la red. El hecho

de contar un modelo hidráulico integrado ofrece además otras ventajas como permitir el entrenamiento de operadores, simular situaciones de emergencia y planificar planes de actuaciones futuras. Por otra parte, el modelo permite también ahorrar en infraestructuras de control, al permitir estimar el estado de la red en puntos no teledados. Otra de las ventajas de integrar modelos en sistemas SCADA es disponer en todo momento de un modelo matemático siempre actualizado y gestionar distintos escenarios de operación a criterio del técnico encargado de la gestión.

Desde el punto de vista de la optimización en tiempo real, es necesario implementar modelos hidráulicos que sean lo suficientemente rápidos a nivel de cálculo para dar respuesta a la operación diaria de una red de abastecimiento. Por ello se han planteado modelos de simulación alternativos a los modelos convencionales de la red completa, como son los modelos estratégicos, modelos estadísticos, o modelos basados en redes neuronales.

1.2 OBJETIVOS

Los objetivos que se persiguen alcanzar con la presente tesis son:

- Definir diferentes arquitecturas de redes neuronales para simular el comportamiento de una red de abastecimiento de agua en diferentes condiciones de control operacional.
- Implementar un algoritmo paralelo que mejore el rendimiento computacional durante el proceso de entrenamiento de las diferentes arquitecturas de redes neuronales.
- Implementar un modelo de previsión de demanda para estimar los consumos de los distintos sectores en los que se divide la red, delimitados en ocasiones por los propios elementos de control, de modo que el reparto de los caudales inyectados se ajuste lo más posible de las demandas reales de cada sector.
- Definir un modelo de optimización para la minimización de costes energéticos, que sea aplicable en tiempo real, y revisable cada vez que sea necesario, aportando soluciones casi inmediatas a los retos planteados. Para ello el proceso de optimización se dividirá en dos bloques, en una primera fase se realizará la optimización del régimen de operación de las estaciones de bombeo y en una segunda fase se obtendrán las consignas de las válvulas para hacer compatible el régimen de bombeo propuesto con las restricciones de presión en la red.
- Implementación de una plataforma para la ayuda a la toma de decisiones en el control operacional que integre un modelo de simulación hidráulica con un sistema SCADA junto con un optimizador en tiempo real.
- Validación de los modelos anteriormente mencionados sobre un caso de estudio real complejo, como va a ser la red de suministro de agua a la ciudad de Valencia y toda su área metropolitana.

- Análisis de resultados de las mejoras obtenidas tras aplicar el modelo de optimización propuesto.

1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La presente tesis esta estructurada en 9 capitulos, más una serie de anexos donde se complementa la información utilizada en algunos capítulos.

El contenido de los diferentes capítulos se describe a continuación:

El **Capítulo 1** introduce a modo resumen el marco de trabajo de la presente tesis, describiendo los objetivos a alcanzar.

El **Capítulo 2** hace una revisión bibliográfica del estado del arte de la operación en las redes de abastecimiento de agua, los métodos de optimización aplicados hasta el momento, y los modelos de previsión de demanda, así como los fundamentos de las redes neuronales.

El **Capítulo 3** plantea la formulación del modelo de optimización para reducir los costes energéticos en la operación de redes de abastecimiento de agua, y describe la metodología concreta aplicada en la presente Tesis.

El **Capítulo 4** realiza una descripción de los modelos de simulación hidráulica así como los componentes que constituyen un modelo matemático y el régimen de simulación cuasi-estático. Posteriormente se definen las diferentes arquitecturas de redes neuronales propuestas en la presente Tesis para emular el comportamiento de un simulador hidráulico aplicado a una red de abastecimiento de agua, cubriendo las funcionalidades más usuales. Finalmente se desarrolla una implementación paralela del algoritmo empleado en el proceso de entrenamiento, a fin de acelerar los tiempos de cálculo.

El **Capítulo 5** describe la formulación del modelo de previsión de demanda adoptado en el presente trabajo.

El **Capítulo 6** desarrolla la formulación del modelo de optimización híbrido aplicado en el presente trabajo, el cual se basa en la descomposición del problema en dos etapas, una que optimiza el régimen de operación de las bombas usando un modelo lineal, y otra que determina las consignas óptimas de las válvulas de regulación aplicando algoritmos genéticos.

El **Capítulo 7** se inicia con una breve introducción a los sistemas scada y la integración de los modelos hidráulicos en estos sistemas. A continuación se detallan los distintos componentes que constituyen la plataforma de ayuda a la toma de decisiones SCA-Red y el papel que juega esta plataforma en la operación diaria de las redes de abastecimiento agua. Finalmente se plantea la integración de los modelos propuestos en el presente trabajo (arquitectura ANN, previsión de demanda, optimizador) en dicha plataforma para implementar un sistemas de control óptimo en tiempo real del modo de operación de la red.

El **Capítulo 8** aplica la metodología desarrollada en los capítulos anteriores sobre un caso real, la red de abastecimiento de agua a Valencia y su área metropolitana.

El **Capítulo 9** finalmente recoge las conclusiones obtenidas tras la aplicación de la metodología al caso de estudio y los futuros trabajos de investigación a desarrollar dentro del marco de la presente Tesis.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se va a realizar una revisión bibliográfica de los bloques fundamentales tratados en el presente trabajo. A lo largo de la Tesis se abordan diferentes metodologías de distinta naturaleza para conseguir el objetivo buscado. En la organización del documento se ha preferido realizar una presentación previa del estado del arte de cada una de ellas dentro del presente capítulo, dejando para los capítulos posteriores el desarrollo y aplicación particular de cada una de ellas.

Se comienza describiendo la problemática y tareas asociadas a la operación de las redes de abastecimiento de agua. A continuación se pasa revista a los métodos de optimización desarrollados en las últimas décadas, y en particular a los métodos basados en algoritmos genéticos. Para concluir se hace una revisión bibliográfica de los modelos de previsión de demanda, como una parte fundamental del modelo de optimización a corto plazo, y se presenta una introducción a los fundamentos de las redes neuronales y sus aplicaciones, las cuales serán utilizados para simular el comportamiento de la red hidráulica.

2.1 LA OPERACIÓN DE LAS REDES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

Una red de abastecimiento de agua es un sistema complejo, tanto más cuanto mayor es la población abastecida. La garantía del servicio exige tener un control en todo momento del modo de operación del sistema. Para redes simples, el control de funcionamiento de la red se relega a una serie de automatismos que, por ejemplo, arrancan o paran las bombas en función del nivel en un depósito o de la presión en un punto; otros automatismos permiten mantener la presión aguas abajo de las válvulas o el caudal de paso por las mismas. Sin embargo, en redes más complejas, los automatismos constituyen sólo una ayuda y las empresas encargadas de garantizar el servicio disponen de personal especializado que opera por turnos, cuya función principal es vigilar el estado del sistema de distribución de agua y corregir las consignas en un momento dado si fuera necesario.

En términos generales, la operación de cada sistema de abastecimiento de agua es muy particular, ya que depende en gran medida de las características y parámetros físicos de los elementos hidráulicos que lo configuran.

Para facilitar la tarea de los operadores, las empresas del sector del agua disponen hoy en día, gracias a los avances tecnológicos, de sistemas de monitorización y control de los datos de campo (sistemas SCADA, del inglés *Supervisory Control And Data Acquisition*) que les permiten observar y controlar el estado del sistema en todo momento (telemedida), así como aplicar acciones de control sobre los elementos hidráulicos situados remotamente (telemando). Generalmente estos sistemas de monitorización están conectados a bases de datos en las que

almacenan la información que van recibiendo de los distintos puntos de medida distribuidos por la red. Dicha información se guarda con una o varias frecuencias de muestreo, dependiendo del uso que se le vaya a dar posteriormente.

En términos generales, un sistema SCADA está constituido por un conjunto de instrumentos de campo, sistemas de comunicaciones y sistemas de hardware y software que permiten monitorizar y controlar remotamente el comportamiento de un sistema físico, en nuestro caso de una red de abastecimiento de agua.

Los sistemas SCADA utilizan esquemas simplificados para monitorizar el sistema a controlar, que en nuestro caso se concretan en esquemas generales de la red de abastecimiento, o esquemas de detalle de las estaciones de tratamiento de agua, de las estaciones de bombeo o de las válvulas de regulación. En redes complejas, los diferentes sinópticos pueden agruparse por zonas de presión o por subsistemas, conformando un sistema de visualización jerárquico. El objetivo de los sinópticos es poder analizar de un solo golpe de vista los valores de las variables más relevantes, para tomar las decisiones oportunas de una forma rápida.

El uso más habitual que se hace actualmente de los sistemas SCADA es para la detección y gestión de posibles alarmas en el sistema. En los sistemas más complejos, el número de variables de seguimiento puede exceder fácilmente de las 1000 señales. En este caso, los sistemas SCADA ofrecen un gestor de alarmas que permite clasificar éstas por categorías e importancia, de modo que en caso de acumulación de alarmas, el sistema ofrece al operador las más relevantes conforme a una prioridad preestablecida. Normalmente las alarmas son recepcionadas y tratadas debidamente por los operadores, lo que queda registrado en la BdD del sistema SCADA. Antes de tomar las decisiones, los operadores hacen uso de los sinópticos para observar las señales monitorizadas, y determinar qué puntos de la red están dentro o fuera de los límites preestablecidos, y en qué medida. Es este punto donde un sistema de ayuda a la toma de decisiones (DSS) puede ser más necesario.

La información adquirida por los sistemas SCADA puede también ser utilizada para cargar automáticamente un modelo hidráulico de la red, ahorrando el enorme trabajo que supone la recolección de datos y su actualización. Entre los datos normalmente recopilados a este fin se encuentran niveles de depósito, estado de bombas, consigna de válvulas, caudales o presiones en red. Normalmente los datos deben tratarse antes de alimentar un modelo, para obtener por ejemplo los patrones de consumo.

En situaciones de emergencia, las simulaciones en tiempo real, son de gran ayuda en los centros de operación. Para este tipo de situaciones, la actualización del modelo hidráulico con la información procedente del SCADA puede realizarse de manera rápida y sencilla, lo que de otra manera invalidaría su uso en estos casos.

Otra de las ventajas que se deriva de utilizar la información procedente de sistemas SCADA es la posibilidad de calibrar el modelo hidráulico cuantas veces sea necesario, para tener éste siempre actualizado. Muchos sistemas SCADA disponen de sistemas de gestión de bases de datos donde almacenan toda la información procedente de la telemida, la cual posteriormente

puede ser consultada y preparada para lanzar el proceso de calibración del modelo matemático. La automatización del proceso de calibración, permite lanzar éste cuando se observen desviaciones sistemáticas, y así mantener el modelo siempre calibrado para que las simulaciones sean más próximas a la realidad

Normalmente los sistemas SCADA tradicionales no incorporan ningún sistema de ayuda a la toma de decisiones, salvo los que resultan de la aplicación de una serie de reglas simples. Sin embargo, la integración de un optimizador en tiempo real en el entorno de un sistema SCADA, puede incrementar enormemente su utilidad, proporcionando al operador una serie de consignas óptimas, que éste puede tener simplemente como referencia. En un estado más avanzado, y sobretodo para redes sencillas, las consignas elaboradas por el optimizador pueden incluso programarse, en cuyo caso el operador queda encargado tan solo de gestionar los desvíos entre el comportamiento real del sistema y la previsión. La optimización es pues, desde el punto de vista del control, un valor añadido a incorporar a los sistemas SCADA, el cual debe quedar siempre supeditado a la gestión de las posibles alarmas. En este sentido, un optimizador en tiempo real, capaz de adaptarse a las circunstancias reales en cada momento, es preferible a los optimizadores más clásicos, cuyas consignas fijas se establecían para periodos de 24 horas, sin posibilidad de ser actualizadas ante cambios imprevistos.

Refiriéndonos ahora a la red, el control óptimo a aplicar depende en gran medida de su concepción y sus características hidráulicas. Hay redes que se alimentan simplemente por gravedad a partir de una fuente de agua situada a mayor cota que las demandas, pero lo usual es que haya que bombear el agua previamente hasta los depósitos de regulación del sistema. En otras ocasiones, el bombeo se efectúa directamente contra la red, relegando a las válvulas el control de las presiones de suministro. Normalmente, por seguridad, se dispone de más de una fuente de suministro y de varios depósitos de alimentación sectoriales, cada uno a la cota más adecuada conforme al sector a abastecer. Se diferencian en este caso la denominada red de alta, encargada de inyectar el agua al sistema y de repartirla entre los diversos depósitos, y la red de baja, encargada de distribuir el agua a los abonados desde los depósitos sectoriales. En el caso de grandes ciudades, la distribución puede realizarse en primera instancia a través de una red arterial o primaria, desde la que se alimentan los distintos sectores, esta vez, regulados simplemente por válvulas de control sin capacidad de almacenamiento.

Se depende de esta breve descripción que la complejidad de las redes puede llegar a ser elevada, y que el sistema de control óptimo a aplicar en cada caso depende en gran medida de la concepción de la red en cada caso. Es por tanto difícil generalizar y encontrar un optimizador universal válido para cualquier situación.

En la optimización del sistema, la variable tiempo desempeña un papel fundamental, así como los valores iniciales de partida y los finales a alcanzar, particularmente en lo que se refiere a los depósitos. El sistema a optimizar es un sistema dinámico en el que la decisión en cada instante, afecta a las decisiones a tomar en el instante siguiente, estando afectadas además por la demanda prevista a satisfacer y por los precios de la energía en dicho instante. (solo en el caso de que no hubieran depósitos, se podrían independizar la optimización para cada instante de tiempo).

Desde un punto de vista simplemente operativo, los parámetros a controlar en un sistema de distribución de agua son fundamentalmente las presiones en la red y los volúmenes almacenados en los depósitos como reserva. La mayoría de los automatismos se regulan simplemente para tratar de mantener los niveles de los depósitos y las presiones en red dentro de unos márgenes. Sin embargo, cuando se trata de optimizar la operación de la red, los niveles en depósitos y las presiones en la red se imponen simplemente como condiciones de contorno, dejando a cambio la regulación de las válvulas y la operación de las bombas como grados de libertad sobre los que el optimizador puede decidir a fin de minimizar el valor de una función objetivo o buscar la mejor opción entre varias en caso de aplicar técnicas multiobjetivo.

Así la introducción de los optimizadores en la gestión de las redes de abastecimiento puede llevar a un nuevo paradigma de operación. Mientras que tradicionalmente se ha asumido que una buena política desde el punto de vista de la seguridad era mantener los depósitos en alto grado de llenado, dicha política sin embargo no es la mejor desde el punto de vista energético, en el que conviene hacer uso del agua almacenada en éstos para poder parar los bombeos en las horas en que la energía es más cara. Lo mismo ocurre si lo analizamos desde el punto de vista de la calidad del agua, donde lo que interesa es que los depósitos se llenen y vacíen con la mayor frecuencia para así renovar el agua y disminuir los tiempos de retención.

Por otra parte, entre los objetivos a satisfacer puede imponerse también, simplemente el hecho de garantizar el servicio o disminuir al máximo la afeción a los usuarios en situaciones de emergencia, por ejemplo, cuando cumplir todas las restricciones impuestas no sea posible. Las situaciones de emergencia pueden derivarse de incendios, roturas en tuberías principales, entrada de contaminantes en la red, cortes eléctricos. Ni que decir tiene, que las operaciones de emergencia son un componente importante dentro de las funciones que un operador debe gestionar en las tareas de operación de un sistema de distribución de agua. Ello abre un nuevo campo de desarrollo, donde las técnicas metaheurísticas de optimización se presentan probablemente como las más adecuadas.

Todas estas consideraciones nos llevan a la necesidad de aplicar métodos de optimización multiobjetivo como soporte de un sistema de ayuda a la toma de decisiones que sea realista y pueda ser aceptado por las compañías gestoras sin objeciones. En la presente Tesis, sin embargo, solo se ha contemplado por ahora el objetivo de reducir el consumo energético cumpliendo las restricciones de presión en red y de nivel en los depósitos, como un primer paso para futuros desarrollos derivados de la misma.

2.2 MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA OPERACIÓN DE REDES DE ABASTECIMIENTO

Los métodos de optimización aplicados en la operación de redes de abastecimiento de agua empieza a tener interés a partir de la década de los 80, pero hay pocas publicaciones que hagan referencia a la aplicación de dichos modelos en ámbitos de tiempo real.

Entre los diversos autores que han tratado el tema podemos citar a los siguientes: Coulbeck et al. (1988), Zessler y Shamir (1989), Jowitt y Germanopoulos (1992), Coulbeck y Orr (1993), y Lansey y Awumah (1994), Nitivattananon et al. (1996), Pezeshk y Helweg (1996), Boulos et al. (2000), Pasha y Lansey (2009), Pulido-Calvo et al. (2011).

Coulbeck et al. (1988), Coulbeck y Orr (1993) presentaron un sistema de control completamente automatizado implementado en el Reino Unido con el fin de minimizar los costes de operación. El sistema utilizaba datos teledados procedentes de un sistema SCADA y estaba compuesto de un módulo de simulación hidráulica, un módulo de previsión de la demanda y un módulo optimizador. Este último módulo siempre tenía actualizadas las consignas de operación previstas para las próximas 24 horas, las cuales se volvían a generar de nuevo cada 24 horas.

Zessler y Shamir (1989), Lansey Awumah (1994) y Nitivattananon et al. (1996) propusieron el uso de modelos de programación dinámica para periodos de optimización de 24 horas.

Jowitt y Germanopoulos (1992) plantearon un modelo de programación lineal para optimizar el coste energético de las estaciones de bombeo de una red de distribución de agua en el Reino Unido. Los autores tuvieron en cuenta el problema de la eficiencia de las bombas, la tarifa eléctrica y las restricciones aplicadas durante el régimen de operación. En dicha publicación describen la linealización de las ecuaciones hidráulicas y las restricciones del problema. El método fue considerado por los autores como un método robusto y de bajo coste computacional.

Lansey y Awumah (1994), también consideraron en el modelo de optimización propuesto la minimización del coste energético, teniendo en cuenta el número de accionamientos de las bombas. La optimización fue realizada empleando la técnica de la programación dinámica y el modelo fue aplicado a una red de distribución en Austin, Texas, dando como resultado un ahorro en costes energéticos del 9%.

Por otro lado, Nitivattananon et al. (1996) emplearon igualmente la técnica de la programación dinámica para optimizar la operación de la ciudad de Pittsburg, Pensilvania, teniendo en cuenta el número de accionamientos de las bombas. El modelo desarrollado realizaba una discretización del sistema de abastecimiento de agua en varios subsistemas con el objetivo de reducir el tiempo de cálculo. La optimización se realizó en dos fases: largo y corto plazo. La fase de largo plazo (mensual) daba como resultado una solución aproximada a fin de estimar los costes energéticos durante ese periodo de análisis, y en la fase a corto plazo actualizaba los

resultados obtenidos durante la etapa de largo plazo. Finalmente se obtuvieron unos ahorros de consumo energético del orden del 20 %.

Pezeshk y Helweg (1996) plantearon un modelo denominado “algoritmo de búsqueda adaptativa” para optimizar la operación de un sistema de distribución de agua mediante un modelo de búsqueda discreta. El algoritmo se ejecutaba cuando la presión en un determinado punto de control quedaba fuera de los límites definidos de mínimo o máximo. Cuando estaba en modo ejecución, se seleccionaban las bombas más próximas al punto de control para seleccionar la que permitía suministrar el agua a menor coste, determinando así la bomba que había que activar o parar. La mayor ventaja de este método es la rápida convergencia hacia una solución óptima, lo que permitía su aplicación en tiempo real.

Boulos et al. (2000) aplicaron un modelo optimización operacional combinando un simulador hidráulico (H2ONet) con algoritmos genéticos. Además de tener como objetivo minimizar el coste energético, consideraron implícitamente las restricciones de los niveles de los depósitos y el número de accionamientos de las bombas. Los autores justificaron haber reducido los costes energéticos en las estaciones de bombeo además de mantener los niveles de servicio exigidos.

Pasha y Lansley (2009) presentaron metodologías preliminares que podían utilizarse para optimizar el régimen de operación de las bombas y los depósitos. Los autores utilizaron un método de programación lineal para obtener soluciones casi óptimas de forma rápida, aplicándolo sobre un sistema hipotético de un solo depósito.

Pulido-Calvo et al. (2011) aplicaron un modelo de optimización que tenía en cuenta tanto el diseño como la operación de una red hidráulica. Para la optimización diaria proponen un algoritmo ad hoc basado en el concepto del periodo de vaciado del depósito, aplicable a una red en la que el agua es bombeada a través de uno o varios depósitos intermedios. Partiendo de un nivel inicial en el depósito para el instante actual, se determina el periodo de vaciado como el comprendido entre el instante actual o un instante de llenado y el instante en que el nivel en el depósito desciende por debajo de un valor prefijado (pueden considerarse varios periodos de vaciado dentro del periodo de optimización). El objetivo es ahora determinar la combinación de bombas que permiten evitar el ‘vaciado’ del depósito, utilizando las horas en que la tarifa eléctrica es mas barata. El proceso se repite, aumentando progresivamente la duración del periodo de vaciado hasta alcanzar el horizonte de optimización considerado.

Una dificultad inherente a la mayoría de los métodos de optimización revisados es que son aplicables para situaciones o para configuraciones muy específicas del sistema a optimizar, por ejemplo, para un reducido número de fuentes de alimentación o de depósitos intermedios.

En un intento de generalizar los métodos de optimización a cualquier tipología de la red de suministro, destacan los trabajos publicados por los investigadores del proyecto POWADIMA¹,

¹ POWADIMA: POTABLE WATER DISTRIBUTION MANAGEMENT. Proyecto subvencionado por el V Programa Marco de la Unión Europea.

(Jamieson et al, 2007), (Rao y Salomons 2007), (Salomons et al. 2007) y (Martínez et al. 2007), los cuales fueron el origen de la presente Tesis.

Jamieson et al. (2007) presentan un metamodelo heurístico para optimizar la operación en tiempo real, sustituyendo el simulador hidráulico convencional por un modelo representado por una red neuronal artificial (ANN), con el objetivo de reducir el tiempo de cálculo consumido durante las simulaciones. La optimización del modo de operación fue realizada empleando la técnica de los algoritmos genéticos (AG), y lo aplicaron sobre una red sintética conocida en la literatura como AnyTown (Walski et al. 1987), la cual fue previamente modificada. Por otro lado (Salomons et al. 2007) y (Martínez et al. 2007) aplicaron el modelo ANN-GA a las redes de abastecimiento de Haifa, Israel y Valencia, España, respectivamente. Los resultados obtenidos tras el proceso de optimización fueron una reducción de costes energéticos anuales del orden del 25% y 17% respectivamente.

2.3 MODELOS DE PREVISIÓN DE LA DEMANDA

La previsión es la estimación del valor de una variable en un tiempo futuro a partir de datos pasados, siendo las previsiones de demanda esenciales para ayudar a determinar los recursos necesarios para una empresa. La demanda es la cantidad de insumo que un consumidor compra a un determinado precio dentro de un cierto período de tiempo. La elección del método que se adopte para la previsión de la demanda depende de la naturaleza del producto y de diversos factores, tales como la disponibilidad de datos históricos, el horizonte de previsión a largo, medio o corto plazo, la precisión requerida, el presupuesto disponible y el patrón de los datos existentes (estacional, cíclico o tendencia) (Kumar y Suresh, 2009).

Las etapas de un modelo de previsión de la demanda son:

- Objetivo del modelo.
- Captura de datos de consumo.
- Selección de la técnica de previsión.
- Obtención de los resultados de las previsiones y monitorización del modelo.

Los modelos de previsión se pueden dividir en dos categorías: **cualitativos** o **cuantitativos**.

Los **modelos cualitativos** están basados en estimaciones y opiniones de expertos, siendo utilizados cuando no existen datos disponibles.

Los **modelos cuantitativos** se utilizan para definir explícitamente una previsión determinada utilizando una lógica definida y una combinación de operaciones matemáticas. Se utilizan en este caso dos tipos de modelos: series temporales y causales.

Los modelos de series temporales utilizan datos históricos de la demanda como base para determinar patrones que pueden repetirse en un futuro. Los modelos causales buscan relacionar

las demandas (variable dependiente) como otros factores, crecimiento poblacional, clima (variables independientes)

Los modelos cuantitativos utilizan la información histórica disponible y son los más utilizados como herramienta de apoyo a la ayuda de toma de decisiones.

Los datos históricos de la demanda tienen cuatro componentes (Kumar y Suresh, 2009):

- **Tendencia:** Es un movimiento gradual en los datos a largo plazo (crecimiento o disminución).
- **Variación estacional:** Son variaciones similares que ocurren durante periodos determinados. La estacionalidad puede ser trimestral, mensual, semanal, diaria, o hasta incluso en determinadas horas.
- **Variación cíclica:** Son los cambios sobre la línea de tendencia a largo plazo.
- **Componente aleatoria:** Son efectos esporádicos (impredecibles) debido a su ocurrencia inusual. Se considera como un error aleatorio o residuo después eliminarse la tendencia, la variación cíclica y las variaciones estacionales de la serie de datos.

El incremento en la disponibilidad de las bases de datos integradas en los sistemas SCADA ha permitido mejorar las formulaciones de los modelos de previsión de la demanda. La previsión de la demanda de agua se está convirtiendo en una herramienta básica para el diseño, operación y gestión de los sistemas de abastecimiento. Si bien la previsión a largo plazo es de interés principalmente para la planificación y el diseño, la previsión a corto plazo es útil en la operación y la gestión diaria de las redes de distribución de agua (Alvisi et al. 2007), (Herrera et al. 2010).

La disponibilidad de previsiones de demanda horarias en un modelo matemático calibrado es crucial por una serie de razones (Herrera et al. 2010):

- Desde un punto de vista operacional, permite a las empresas gestoras de los abastecimientos de agua determinar esquemas de regulación y bombeo óptimos para abastecer la demanda prevista. El objetivo es mejorar la eficiencia energética a través de un menor consumo energético en los sistemas de bombeo.
- Desde el punto de vista de la calidad, permiten determinar la combinación más adecuada de las fuentes de agua disponibles para cumplir los estándares establecidos.
- Desde el punto de vista de la vulnerabilidad, la comparación entre las medidas previstas y las medidas reales, pueden ayudar a identificar posibles fallos en la red (fugas de agua y roturas en tuberías). Esto proporciona el primer paso en los procedimientos para establecer una gestión de alarmas de forma anticipada.

Varios modelos predictivos han sido presentados para la previsión de la demanda, desde un nivel residencial (Alcocer-Yamanaka et al. 2008), (Alvisi et al. 2003), (Buchberger y Wells

1996), (Buchberger y Wu 1995) hasta niveles urbanos, (Alvisi et al. 2007, Qi y Chang 2011, Salomons et al. 2007, Zhou et al. 2002) y sobre un base temporal diaria u horaria.

Las técnicas aplicadas para generar previsiones horarias son similares a las técnicas utilizadas para generar previsiones diarias. En (Bakker et al. 2013) se presenta una buena revisión bibliográfica. Para el control optimo cuasi-real de los sistemas de bombeo, la previsión de la demanda a nivel horario es de uso común, basados en un perfil de la demanda promedio o un proceso de predicción de demanda adaptativo, capaces de abordar adecuadamente la alta variabilidad de la demanda (Alvisi et al. 2007). En la literatura se han propuesto varias aproximaciones estadísticas capaces de hacer frente al comportamiento estocástico de la demanda de los consumidores, incluyendo también factores económicos, demográficos y climáticos (Ghiassi et al. 2008).

Aunque un modelo de previsión de demanda es una parte esencial de un sistema de control óptimo, la elección de un modelo en particular no depende directamente del algoritmo de optimización utilizado, pero sí de los datos disponibles y del modelo simulación hidráulica aplicado.

2.4 FUNDAMENTOS DE LAS REDES NEURONALES

2.4.1 Introducción

Las redes neuronales o redes neuronales artificiales (ANN) son una clase de herramientas computacionales que operan de forma análoga a los procesos biológicos del cerebro. Las redes neuronales son también referidas como sistemas de conexionado o sistemas de procesamiento paralelo distribuido. Están compuestas de un conjunto de unidades de procesamiento (nodos) altamente interconectados, cada uno responsable de llevar a cabo unos cálculos simples.

Los nodos están organizados en una serie de capas, e interconectados a través de unos enlaces funcionales.

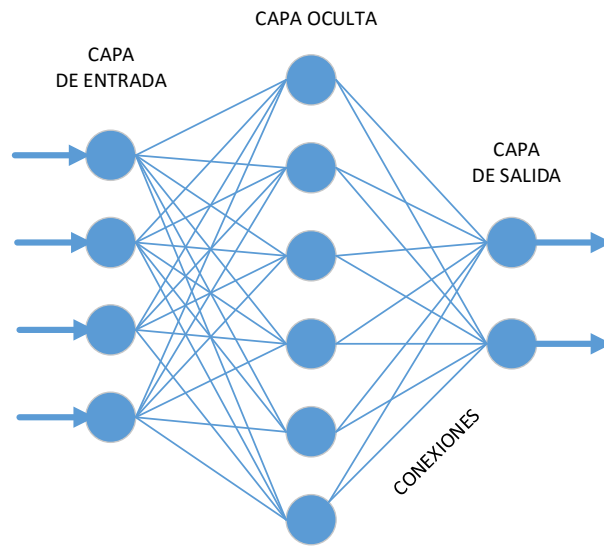


Figura. 2.1. Esquema de una red neuronal feed-forward

La Fig. 2.1 muestra un esquema típico de una red neuronal feed-forward de tres capas, formada por una capa de entrada, una capa oculta, y una capa de salida.

Una de las principales ventajas de las redes neuronales es que tienen capacidad de autoaprendizaje y de resolver problemas no lineales. A partir de un conjunto secuencial de datos de entrada y un conjunto de datos de salida para un sistema dado, la red se organiza internamente de tal manera que reproduce la salida esperada para el conjunto de datos de entrada. El proceso interno de auto-organización o de desarrollo generalizado de la representación del sistema forma parte del proceso de aprendizaje, y es crítico para conseguir la reproducción eficiente de la ANN. Se dice que una ANN estará bien entrenada si la desviación entre la salida de la ANN y la salida impuesta está dentro de un límite de tolerancia establecido.

En base a la topología de la red, las características de los nodos y el proceso de aprendizaje, hay varios tipos de redes neuronales como pueden ser: las redes de Hopfield (Hopfield, 1982), de Kohonen (Kohonen, 1988) o de feed-forward (Rumelhart et al. 1986). Las ANN feed-forward emplean el algoritmo *back-propagation* durante el proceso de entrenamiento.

2.4.2 Modelo de neurona artificial

Se denomina **procesador elemental o neurona** a un dispositivo simple de cálculo que, a partir de un vector de entrada procedente del exterior o de otras neuronas, proporciona una única respuesta o salida. Los elementos que constituyen la neurona de etiqueta i (Fig. 2.2) son los siguientes:

- Conjunto de **entradas**, $x_j(t)$
- **Pesos sinápticos o pesos** de la neurona i , w_{ij} que representan la intensidad de interacción entre cada neurona presináptica j y la neurona postsináptica i .
- **Regla de propagación** $\sigma(w_{ij}, x_j(t))$, que proporciona el valor del potencial postsináptico $h_i = \sigma(w_{ij}, x_j(t))$ de la neurona i en función de sus pesos y entradas. La función más usual utilizada es de tipo lineal, y se basa en la suma ponderada de las entradas con los pesos sinápticos

$$h_i(t) = \sum_j w_{ij} x_j$$

- **Función de activación** $f_i(a_i(t-1), h_i(t))$, que proporciona el estado de activación actual $a_i(t) = f_i(a_i(t-1), h_i(t))$ de la neurona i en función de su estado anterior $a_i(t-1)$ y de su potencial postsináptico actual. Sin embargo en muchos modelos de ANN se considera que el estado actual de la neurona no depende de su estado anterior, sino únicamente del actual

$$a_i(t) = f_i(h_i(t))$$

Existen distintos tipos de funciones de activación. Para el diseño de las arquitecturas planteadas en el apartado 4.2 se ha utilizado la función sigmoide que viene denotada como

$$a_i(t) = \frac{1}{1 + e^{-h_i(t)}}$$

- **Función de salida** $F_i(a_i(t))$, que proporciona la salida actual $y_i(t) = F_i(a_i(t))$ de la neurona i en función de su estado de activación.

Con frecuencia se añade al conjunto de pesos de la neurona un parámetro adicional θ_i , que denominaremos umbral (en ocasiones también denominado bias), que resta del potencial postsináptico, por tanto el argumento de la función de activación queda:

$$\sum_j w_{ij} x_j - \theta_i$$

añadiendo de esta forma un grado de libertad adicional a la neurona.

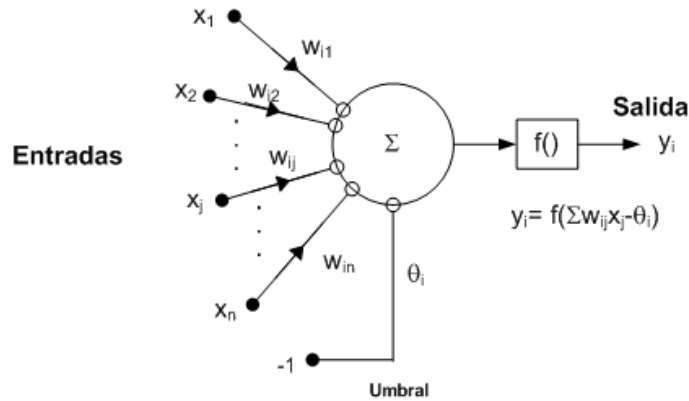


Figura. 2.2. Modelo de neurona estándar

En conclusión, el modelo de neurona artificial queda expresado de la siguiente manera:

$$y_i(t) = f_i\left(\sum_j w_{ij}x_j - \theta_i\right)$$

Ahora bien si hacemos que los índices i y j empiecen en 0, podemos definir $w_{i0} \equiv \theta_i$ y $x_0 \equiv -1$ (constante), con lo que el potencial postsináptico se obtiene de la suma desde $j = 0$

$$y_i(t) = f_i\left(\sum_{j=0}^n w_{ij}x_j\right)$$

Finalmente ya definida la neurona, bastaría establecer la forma de la función de activación para determinarla por completo. Así, para una función de activación de tipo escalón, la expresión quedaría de la siguiente manera

$$y_i(t) = F_i\left(\sum_{j=0}^n w_{ij}x_j\right)$$

2.4.3 Arquitectura de una ANN

Se denomina arquitectura a la topología, estructura o patrón de conexionado de una red neuronal. En una ANN, los nodos se conectan por medio de sinapsis; esta estructura de conexiones sinápticas determina el comportamiento de la red. Las conexiones sinápticas son direccionales, es decir, la información solamente puede propagarse en un único sentido. En general, las neuronas se suelen agrupar en unidades estructurales denominadas **capas**. Finalmente, el conjunto de una o más capas constituye la **red neuronal**.

Se distinguen tres tipos de capas: entrada, salida y oculta. Una **capa de entrada** o sensorial está compuesta por neuronas que reciben datos o señales procedentes del entorno (como por

ejemplo, procedentes de sensores). Una **capa de salida** es aquella cuyas neuronas proporcionan la respuesta de la red neuronal. Una **capa oculta** es aquella que no tiene conexión directa con el entorno. Este tipo de capa proporciona a la red neuronal grados de libertad adicionales, gracias a los cuales puede encontrar representaciones internas correspondientes a determinados rasgos del entorno, dotándola de una gran riqueza computacional.

Dentro de los distintos tipos de arquitecturas ANN que se ha utilizado para la emulación de modelos hidráulicos, destaca el perceptrón multicapa de tipo ‘feed-forward’, constituida por una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida.

Como algoritmo de aprendizaje en esta tesis se ha utilizado el **Backpropagation**. Dependiendo de los análisis realizados para cada caso de estudio, el número de neuronas utilizadas variará en cada capa.

2.4.4 Proceso de entrenamiento de una ANN

El proceso de entrenamiento o aprendizaje en las redes neuronales puede definirse como el proceso de ajuste de los parámetros libres de la red a partir de un proceso de estimulación por el entorno que la rodea. El tipo de aprendizaje vendrá determinado por la forma en la que dichos parámetros son adaptados. En la mayor parte de las ocasiones el aprendizaje consiste simplemente en determinar un conjunto de pesos sinápticos que permita a la red realizar correctamente el tipo de procesamiento deseado.

Los dos tipos básicos de entrenamiento son el **supervisado** y el **no supervisado**. A continuación pasaremos a describirlos de forma breve:

- a) **Entrenamiento supervisado:** En este tipo de aprendizaje se presenta a la red un conjunto de patrones, junto con la salida deseada u objetivo, e iterativamente ésta ajusta sus pesos hasta que su salida tiende a ser la deseada, utilizando para ello información del error que se comete en cada paso. De este modo, la red es capaz de estimar relaciones entrada/salida sin necesidad de proponer una cierta forma funcional de partida.
- b) **Entrenamiento no supervisado:** En este tipo de aprendizaje se presentan a la red multitud de patrones, sin adjuntar la respuesta que deseamos. La red por medio de la regla de aprendizaje estima $p(x)$, a partir de lo cual podemos reconocer regularidades en el conjunto de entradas, extraer rasgos o agrupar patrones según su similitud (clustering).

En el ámbito de la presente tesis se entrenarán arquitecturas de ANNs mediante procesos de entrenamiento supervisado. El método más extendido en el entrenamiento de este tipo de redes es el denominado algoritmo **Backpropagation**.

Rumelhart et al. (1986) formularon un método para que una red neuronal aprendiera la asociación que existe entre los patrones de entrada y las clases correspondientes, utilizando varios niveles de neuronas.

El método Backpropagation (propagación del error hacia atrás), basado en la generalización de la regla delta (Hilera et al. 1995), a pesar de sus limitaciones, ha ampliado de forma considerable el rango de aplicaciones de las redes neuronales. El funcionamiento de la red backpropagation (RBP) consiste en el aprendizaje de un conjunto predefinido de pares de entradas-salidas dados como ejemplo: primero se aplica un patrón de entrada como estímulo para la primera capa de las neuronas de la red, se va propagando a través de todas las capas superiores hasta generar una salida, se compara el resultado en las neuronas de salida con la salida que se desea obtener y se calcula un valor de error para cada neurona de salida. A continuación, estos errores se transmiten hacia atrás, partiendo de la capa de salida hacia todas las neuronas de la capa intermedia que contribuyan directamente a la salida. Este proceso se repite, capa por capa, hasta que todas las neuronas de la red hayan recibido un error que describa su aportación relativa al error total. Basándose en el valor del error recibido, se reajustan los pesos de conexión de cada neurona, de manera que en la siguiente vez que se presente el mismo patrón, la salida esté más cercana a la deseada

El método de aprendizaje Backpropagation requiere el uso de neuronas cuya función de activación sea continua, y por lo tanto, diferenciable. Generalmente, la función utilizada es del tipo sigmooidal.

Los pasos seguidos en el algoritmo de Backpropagation se describen a continuación:

1.- Inicializar los pesos $\{w_{ij}\}$, normalmente con valores pequeños (<1) y aleatorios.

2.- Introducir un patrón $\vec{x}_p = (x_{p_1}, \dots, x_{p_n})^T$

3.- Calcular la entrada para la primera capa oculta.

$$net_j^1 = \sum_{i=1}^{n^0} w_{ij}^1 x_{pi} + \theta_j^1$$

4.- Calcular la salida de la primera capa oculta.

$$y_j^1 = f_s(net_j^1)$$

5.- Repetir los pasos 3 y 4 para todas las capas ocultas y para todas las neuronas.

6.- Calcular la entrada a la capa de salida:

$$net_j^m = \sum_{i=1}^{n^{m-1}} w_{ij}^m y_i^{m-1} + \theta_j^m$$

7.- Calcular la salida de la red:

$$y_j^m = f_s(net_j^m)$$

8.- Calcular el término de error para los nodos de salida:

$$\delta_j^m = (d_j - y_j^m) f_s'(net_j^m)$$

9.- Calcular el término de error para cada uno de los nodos de la capa oculta:

$$\delta_j^l = f_s'(net_j^l) \cdot \sum_{k=1}^{n^{l+1}} w_{jk}^{l+1} \delta_k^{l+1}$$

10.- Actualizar los pesos y el bias de los nodos de la capa de salida:

$$w_{ij}^m(t+1) = w_{ij}^m + \eta \delta_j^m y_i^{m-1}$$

$$\theta_j^l(t+1) = \theta_j^l(t) + \eta \delta_j^l \cdot 1$$

(Nota: Se ha de tener en cuenta que los pesos se actualizan una vez se han calculado todos los términos de error).

11.- Actualizar los pesos y el bias de los nodos de las capas ocultas:

$$w_{ij}^l(t+1) = w_{ij}^l(t) + \eta \delta_j^l y_i^{l-1}$$

$$\theta_j^l(t+1) = \theta_j^l(t) + \eta \delta_j^l \cdot 1$$

El algoritmo Backpropagation funciona calculando la primera derivada parcial del error total con respecto a cada peso. Dada esta información podemos calcular el gradiente descendente en el espacio de los pesos. Si avanzamos con decrementos infinitesimales del gradiente, podemos garantizar el alcance de un mínimo local.

Por supuesto, si queremos encontrar una solución en el menor tiempo posible, lo que tendremos que tomar no son incrementos infinitesimales, sino incrementos lo más grandes posibles, sin salirnos del espacio de la solución.

Se han planteado dos tipos de aproximación para este problema. La primera aproximación intenta ajustar dinámicamente el ratio de aprendizaje, bien globalmente o de manera separada para cada peso, basado en algunos métodos heurísticos de la historia de la computación. El término del **momento** usado en el Backpropagation estándar es una forma de esta estrategia; están los intervalos fijos para el ajuste de parámetros que se recomiendan en (Plaut, 1986), aunque en este caso el ajuste de parámetros se basa más en la experiencia del programador que de la red. (Franzini, 1987) investigó una técnica heurística que ajustaba el parámetro global (epsilon), incrementándolo siempre que dos vectores sucesivos del gradiente fueran casi iguales y decrementándolo en caso contrario. (Jacobs, 1987). Llevó a cabo un estudio empírico que comparaba el backpropagation estándar con el **momento** a una regla que ajustaba dinámicamente un parámetro del ratio de aprendizaje separado para cada peso.

Cater, (1987) usó una heurística más compleja para ajustar el ratio de aprendizaje. Todos estos métodos mejoran en cierto grado la velocidad del aprendizaje global.

El otro tipo de aproximación hace explícito el uso de la derivada parcial de segundo orden del error respecto a cada peso. Dada esta información, podemos seleccionar un nuevo conjunto de pesos usando el método de Newton o alguna técnica de optimización más sofisticada. Desafortunadamente, calcular de forma correcta la segunda derivada, requiere un coste de cómputo global muy elevado, así que se utiliza para ello una cierta aproximación. (Parker, 1987), (Watrous, 1987), (Becker y LeCun, 1988) trabajaron en esta área. (Watrous, 1987) implementó dos algoritmos y los puso en práctica en el problema de la función XOR. Ofrecía una cierta mejora sobre el método backpropagation, pero parece que sus métodos eran escalables para problemas mucho más grandes.

Fahlman, (1988) desarrolló el algoritmo Quickprop relacionando estas dos aproximaciones. Es un método de segundo orden, basado en el método de Newton, pero en esencia es más heurístico que formal. Se siguen los mismos procedimientos que en el método backpropagation, pero para cada peso se guarda una copia del cálculo de la derivada del error del paso anterior del entrenamiento $\frac{\delta E}{\delta w(t-1)}$, junto con la diferencia entre los valores actuales y anteriores de este peso. El valor de $\frac{\delta E}{\delta w(t)}$ está disponible para el entrenamiento actual en la fase de actualización de los pesos.

En este punto se pueden hacer dos suposiciones:

- a) El error frente a la curva del peso para cada peso puede ser aproximado por una parábola cóncava.
- b) El cambio en la pendiente de la curva de error, visto para cada peso, no afecta para el resto de pesos que están cambiando al mismo tiempo.

Para cada peso, de manera independiente, utilizamos la pendiente anterior y la pendiente actual del error y el cambio del peso entre los puntos en los cuales estas pendientes fueron medidas para determinar una parábola; entonces directamente saltamos al punto mínimo de esta parábola. El cálculo es muy simple y sólo utiliza la información local del peso que está siendo actualizado:

$$\Delta w(t) = \frac{S(t)}{S(t-1) - S(t)} \Delta w(t-1)$$

donde $S(t)$ y $S(t-1)$ son los valores actuales y previos de $\frac{\delta E}{\delta w}$. Por supuesto, este nuevo valor es una ruda aproximación al valor óptimo del peso, pero cuando se aplica de manera iterativa es bastante efectivo.

Utilizando esta fórmula de actualización, si la pendiente actual es algo más pequeña que la anterior, pero en la misma dirección, el peso cambiará en la misma dirección. El paso será más grande o más pequeño, dependiendo de cuanto se redujo la pendiente en el paso anterior. Si la pendiente actual está en la dirección opuesta a la anterior, eso significa que hemos cruzado sobre el mínimo y ahora estamos en el lado opuesto del valle. En este caso, el paso siguiente nos colocará en alguna parte entre las posiciones actual y anterior. El tercer caso ocurre cuando la pendiente actual está en la misma dirección que la anterior, pero es del mismo tamaño o más grande en magnitud.

Se ha experimentado con varias formas de manejar este tercer caso. El método que parece que mejor funciona es crear un nuevo parámetro μ , denominado “factor máximo de crecimiento”.

No se permite en ningún paso que el peso sea superior en magnitud que μ veces el paso anterior para ese peso; si el paso calculado por la fórmula del Quickprop fuese demasiado grande, infinito o creciente para la pendiente actual, en lugar de otro utilizaremos μ -veces el paso anterior como valor del nuevo paso. La idea es que, en vez de suavizar, la curva del error sea más escarpada a medida que se va descendiendo. Se puede acelerar, pero dentro de unos límites, puesto que existe un cierto “ruido” que procede de la actualización de otras unidades. Las pruebas realizadas demuestran que para valores grandes de μ , la red se comporta de manera caótica y no converge. El valor óptimo de μ , depende en cierto grado del tipo del problema, pero con valores de 1.75 funciona bien para una amplia variedad de problemas.

Puesto que el método Quickprop cambia los pesos basándose en lo que sucedió durante la actualización anterior del peso, necesitamos una manera de reiniciar el proceso. Además, necesitamos una manera de volver a empezar el proceso de aprendizaje para un peso que previamente haya tomado un valor nulo, pero que ahora tenga una pendiente no nula a causa de algún cambio en la red. El procedimiento es utilizar el gradiente descendente, basado en la pendiente actual y un cierto factor de aprendizaje ε , y empezar el proceso o reiniciar el proceso para cualquier peso que tenga valor nulo en el paso anterior. En la Fig. 2.3 se muestra el pseudocódigo del algoritmo Quickprop.

```

PARA CADA  $w_i$ 
  SI  $\Delta w_{i-1} > 0$  ENTONCES
    SI  $\frac{\delta E}{\delta w_i} > 0$  ENTONCES
      
$$\Delta w_i = \eta * \frac{\delta E}{\delta w_i}$$

    SI  $\frac{\delta E}{\delta w_i} > \frac{\mu}{1-\mu} * \frac{\delta E}{\delta w_{i-1}}$  ENTONCES
      
$$\Delta w_i = \frac{\Delta w_i}{\mu} * \Delta w_{i-1}$$

    SINO
      
$$\Delta w_i = \Delta w_i + \frac{\frac{\delta E}{\delta w_i} * \Delta w_{i-1}}{\frac{\delta E}{\delta w_{i-1}} - \frac{\delta E}{\delta w_i}}$$

  SINO SI  $\Delta w_{i-1} < 0$  ENTONCES
    SI  $\frac{\delta E}{\delta w_i} < 0$  ENTONCES
      
$$\Delta w_i = \eta * \frac{\delta E}{\delta w_i}$$

    SI  $\frac{\delta E}{\delta w_i} > \frac{\mu}{1-\mu} * \frac{\delta E}{\delta w_{i-1}}$  ENTONCES
      
$$\Delta w_i = \frac{\Delta w_i}{\mu} * \Delta w_{i-1}$$

    SINO
      
$$\Delta w_i = \Delta w_i + \frac{\frac{\delta E}{\delta w_i} * \Delta w_{i-1}}{\frac{\delta E}{\delta w_{i-1}} - \frac{\delta E}{\delta w_i}}$$

  SINO
    
$$\Delta w_i = \eta * \frac{\delta E}{\delta w_i}$$

  
$$w_i = w_i + \Delta w_i$$

  SI  $w_i > \text{limite peso}$  ENTONCES REENTRENAMIENTO
  
```

Figura. 2.3. Pseudocódigo del algoritmo Quickprop.

CAPÍTULO 3. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN EN TIEMPO REAL DE LAS REDES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

En el presente capítulo se van a describir los componentes esenciales que intervienen en el proceso de optimización de una red de abastecimiento. Seguidamente se procederá a formular el problema de optimización para la minimización de costes energéticos. Finalmente se propondrá un esquema de la metodología de optimización empleada en la presente tesis.

3.1 LA GESTION ENÉRGICA

Las redes de abastecimiento de agua se controlan para satisfacer diversos objetivos, incluyendo la mejora del rendimiento hidráulico y de los costes de explotación. Las medidas de rendimiento hidráulico incluyen niveles de presión, la calidad del agua, y varias medidas de la fiabilidad del sistema (Mays, 2000).

Por su parte, los costes de explotación se ven influenciados por factores tales como la operación general de la red, los costes de mantenimiento y los costes de bombeo. En los sistemas de abastecimiento de agua convencionales, el coste del bombeo del agua tratada representa la mayor parte del importe total de la factura eléctrica. Cuando la alimentación del sistema procede de aguas subterráneas, los costes de bombeo suponen casi la totalidad de los costes de operación. En consecuencia, el objetivo fundamental de las estrategias de control óptimo de los sistemas de distribución de agua es reducir al mínimo los costes de bombeo. Para ello, el sistema de control óptimo debe proporcionar al operador la política de operación de coste mínimo para cada una de las estaciones de bombeo que configuran el sistema de abastecimiento.

En el modo más habitual de operación, el control de la operación de las bombas se lleva a cabo de modo automático estableciendo consignas de nivel en los depósitos de aspiración o impulsión, consignas de presión a la salida de la estación de bombeo o en algún punto crítico de la red, o simplemente a través de temporizadores programados. En cambio la operación óptima del sistema de bombeo pretende determinar los instantes de arranque o paro de las bombas, o bien la velocidad de giro de éstas en cada momento, para reducir los costes de operación, aplicando ahora las consignas de nivel máximo o mínimo en los depósitos, de presión máxima o mínima en los nudos, o el paro o arranque forzados en algún momento, simplemente como restricciones del problema de decisión óptima.

3.2 ESTRATEGIAS POSIBLES DE OPERACIÓN

Cuando consideramos la operación automática de un sistema de distribución de agua, se han de tener en cuenta al menos tres niveles diferentes de control. El nivel más bajo de control se basa en la monitorización de las señales de campo en tiempo real (telemedida) y la actuación sobre los elementos de control desde el panel de mando (telemando), tal como se muestra en la Fig. 3.1, lo que se conoce como un **control monitorizado**. El corazón de esta estructura es un servidor que recoge y registra los datos, monitoriza el estado del sistema, y transmite las directivas del operador a los diversos dispositivos de control de campo.

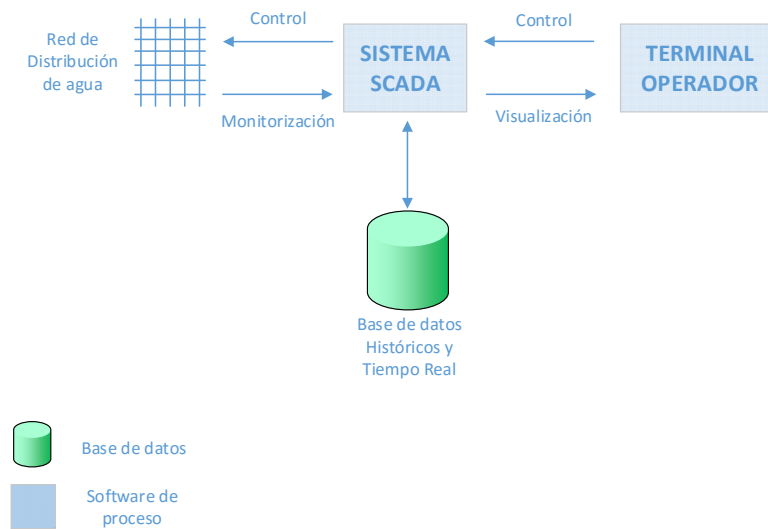


Figura. 3.1. Estructura de control monitorizado

El siguiente nivel de control automatizado, se muestra en la Fig. 3.2. Es una estructura asistida por ordenador, a veces llamada **simulación en tiempo real**. Esta estructura de control proporciona a los operadores un entorno interactivo que incorpora un sistema SCADA vinculado con un software capaz de predecir el estado del sistema hidráulico. El control asistido por ordenador permite a los operadores examinar las consecuencias de sus acciones antes de aplicarlas en los dispositivos de campo.

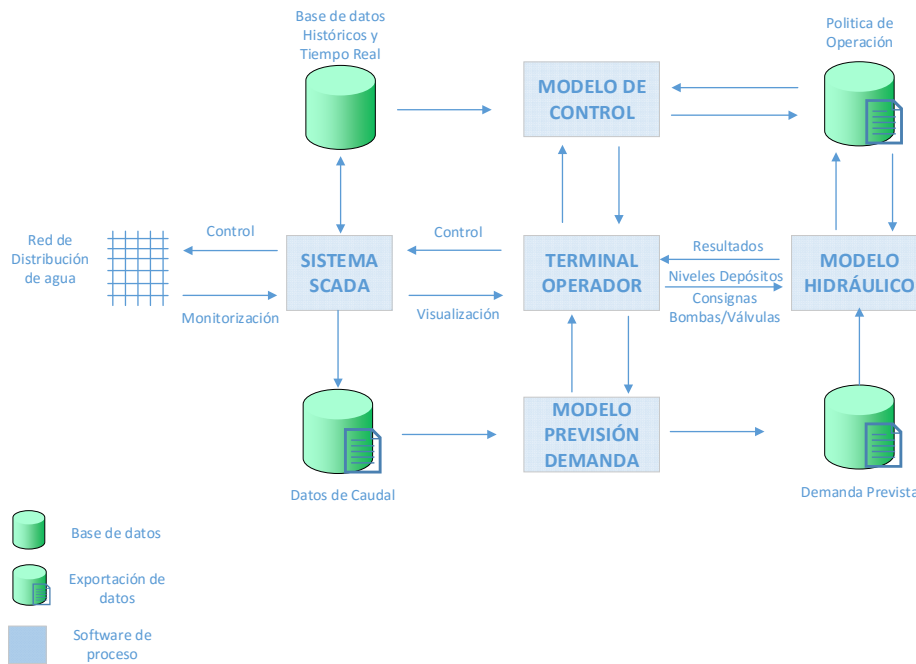


Figura. 3.2. Estructura de control asistido por ordenador

El nivel más final de la estructura de control se muestra en la Fig. 3.3. Dicha estructura se suele denominar **control en tiempo real**, debido a que la estructura es capaz de proporcionar una política de operación optimizada, basada en una predicción de la demanda y unos objetivos concretos a satisfacer. Implementa una política de actuación automática via un enlace directo entre el servidor SCADA y los dispositivos de campo. Por supuesto, como medida de seguridad, el operador siempre tiene el completo control manual sobre la estructura de control en todo momento. Aun cuando el control óptimo totalmente automatizado y desasistido es posible, en los grandes sistemas de abastecimiento, hay una vigilancia presencial las 24 horas del día. El sistema de control óptimo en tal caso sugiere al operador la secuencia óptima de operaciones a realizar a corto plazo y las consecuencias derivadas de ello, debiendo el operador confirmar con antelación la estrategia propuesta por el optimizador, ya que en estos casos el operador es el responsable último de todas las actuaciones sobre el sistema.

Los componentes principales de un sistema de control, además del sistema SCADA encargado de conectar el panel de mando con las variables físicas, son: un **modelo matemático** de la red de abastecimiento, un **modelo de previsión** de la demanda, y un **modelo de optimización** para el control óptimo. Cada uno de estos componentes se describirá en los sucesivos apartados.

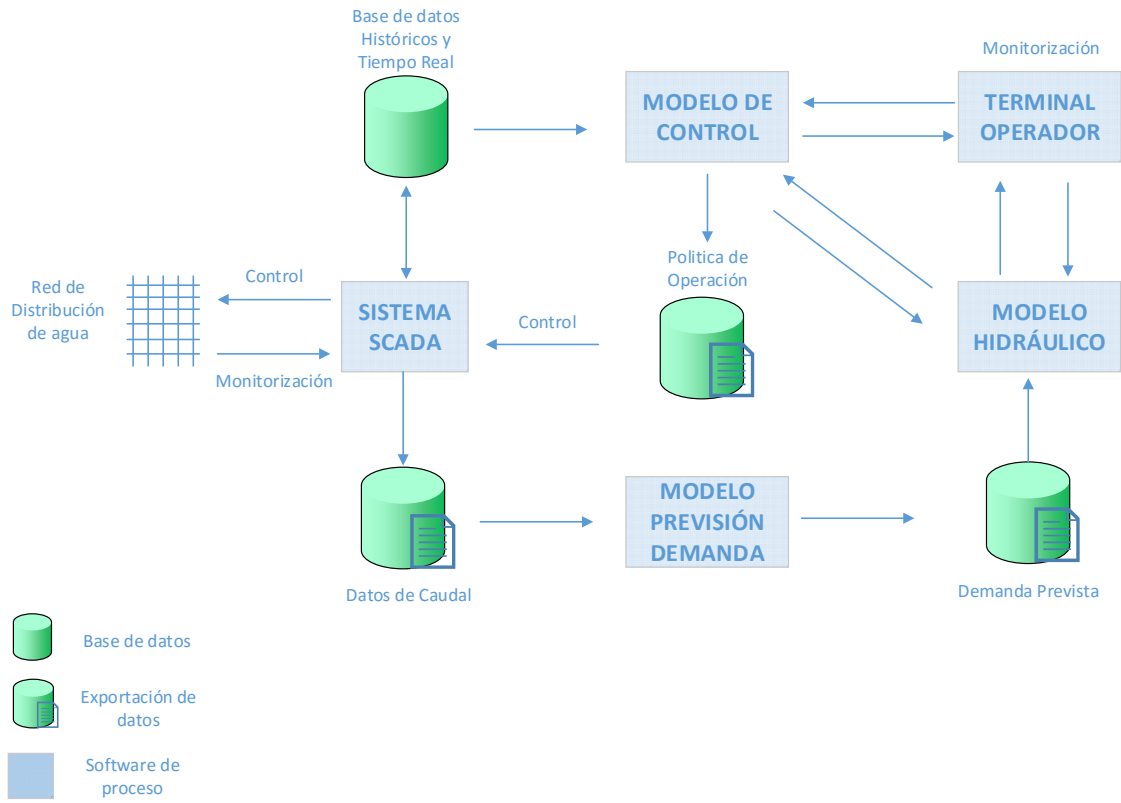


Figura. 3.3. Estructura de control en tiempo real

3.3 GESTION DE MODELOS

3.3.1 Modelos de simulación de la red hidráulica

Para evaluar el coste de una política en particular de la operación de las bombas o para evaluar las limitaciones operacionales asociadas, se requiere de algún tipo de modelo matemático del sistema de distribución. La confección de los posibles modelos incluyen: modelos de balance de masa, modelos de regresión, modelos hidráulicos simplificados, modelos de simulación hidráulica y el uso de redes neuronales artificiales (ANN).

1. **Modelos de balance de masa.** En sistemas simples constituidos por un solo depósito, o por bien por varios depósitos alimentando sistemas independientes, pudiendo transferir cualquier caudal entre los mismos dentro de unos límites, un simple modelo de balance de masas puede ser suficiente para representar el comportamiento del sistema y sus restricciones.

Se admite en estos modelos que las bombas únicamente operan entre la cámara de aspiración y los depósitos, o bien entre ellos, de modo que el caudal impulsado por cada bomba es constante independientemente del nivel en los mismos. Se admite igualmente que los requisitos de presión en los nudos se satisfacen, siempre que los niveles de los depósitos se mantengan dentro de los rangos establecidos. En tal caso, el modelo de optimización se simplifica mucho al ser un problema lineal, siendo las variables de decisión el caudal a elevar por cada bomba en cada instante, o bien su estado de marcha o paro, a fin de minimizar el coste total de operación (proporcional al caudal elevado en cada momento) en un periodo horizonte, debiendo satisfacer la demanda prefijada y cumplir las restricciones de nivel establecidas.

Los modelos de balance de masas son aplicables a muchos sistemas reales, y permiten proporcionar soluciones suficientemente aproximadas en tiempos de cálculo muy breves. Además permite realizar fácilmente un análisis de sensibilidad de la respuesta frente a posibles variaciones en las restricciones o en los términos de coste.

2. **Modelos de regresión.** Cuando la simplificación que supone un modelo de balance de masas no es posible, el comportamiento no lineal del sistema hidráulico se puede representar con más precisión mediante el uso de un conjunto de ecuaciones de regresión no lineal. La información necesaria para la construcción de dichos modelos puede ser obtenida de diversas formas. La nube de puntos requerida para ajustar las curvas de regresión puede generarse mediante repetidas ejecuciones de un modelo de simulación calibrado, variando los niveles de los depósitos y las condiciones de carga (Ormsbee et al. 1987), o mediante el uso de los datos reales tomados del sistema SCADA y almacenados en la base de datos. Las curvas de regresión pueden aplicarse para establecer relaciones presión-caudal entre elementos representativos de la red, las curvas de comportamiento o de rendimiento de las bombas, o bien caracterizar las demandas del sistema (Tarquin y Dowdy, 1989).

Los modelos de regresión tienen la ventaja de ser capaces de incorporar un cierto grado de no linealidad del sistema, al tiempo que proporcionan un mecanismo eficiente a nivel de cálculo para evaluar la respuesta del sistema. Sin embargo, las curvas de regresión y las bases de datos solo contienen información para una red determinada y un determinado rango de demandas definido. Si la red cambia apreciablemente, o si las demandas previstas están fuera del rango declarado en la base de datos, este enfoque ofrece resultados erróneos. Por otra parte, las curvas de regresión son aproximaciones de la respuesta del sistema. Cuando las desviaciones son apreciables, los errores se pueden acumular en el transcurso del periodo de operación, afectando negativamente al algoritmo de optimización y en la exactitud de los resultados.

3. Modelos simplificados de la red hidráulica. Como paso intermedio a los modelos de regresión no lineales y a los modelos de simulación hidráulica, se pueden utilizar modelos hidráulicos simplificados. En tal caso, la red hidráulica se puede aproximar a un macromodelo o ser analizado usando un sistema de ecuaciones hidráulicas linealizadas.

4. Modelos de simulación hidráulica. La simulación de modelos hidráulicos proporciona la capacidad de modelar la dinámica no lineal del sistema de distribución de agua mediante la resolución de un conjunto de ecuaciones hidráulicas que constituyen el régimen de simulación cuasi-estático. Para un sistema de distribución de agua, se incluyen las ecuaciones de conservación de masa y de conservación de la energía.

A diferencia de los modelos de balance de masas y los modelos de regresión, los modelos de simulación hidráulica se adaptan mejor a los cambios y variaciones de las zonas de demanda. Aunque los modelos de simulación hidráulica son más robustos, requieren más información para ser formulados y tienen más costes computacionales a la hora de obtener resultados cuando se integran en los modelos de optimización.

5. Modelos de redes neuronales. Para reducir los requisitos de cálculo de un modelo de simulación hidráulica, el modelo puede ser sustituido por un modelo basado en redes neuronales que represente la respuesta del sistema (Ormsbee y Lingireddy, 1995). En este caso, la red neuronal puede ser entrenada y utilizada en sustitución del modelo de simulación. Los datos requeridos durante el proceso de entrenamiento proceden generalmente de un modelo de simulación previamente calibrado. De forma alternativa una red neuronal puede ser entrenada utilizando datos procedentes del sistema SCADA.

Los fundamentos de las redes neuronales han sido descritos en el apartado 2.4, mientras que el proceso de entrenamiento será descrito en el capítulo 4. Se dice que una red neuronal está bien entrenada cuando la desviación entre la salida de la red neuronal y la salida especificada está dentro de los límites establecidos. Varios tipos de arquitecturas de red neuronal pueden construirse en función de la topología de la red, las características de los nodos y el proceso de aprendizaje.

3.3.2 Modelo de previsión de demanda

Para desarrollar una política óptima de la operación del régimen del bombeo, las demandas de la red de distribución deben ser conocidas. Debido a que la curva de la demanda diaria real de un abastecimiento no se conoce de antemano, la política de operación óptima es estimada utilizando demandas previstas a partir de un modelo de previsión de demanda.

Las demandas previstas se pueden incorporar en el modelo de control óptimo usando un enfoque global, proporcional o distribuido.

En un enfoque global, las demandas del sistema típicamente están representadas por un único valor agrupado. Este enfoque se utiliza normalmente combinando modelos hidráulicos de balance de masa.

Los modelos de demanda proporcional se utilizan normalmente con modelos de regresión. En tales casos, los parámetros de regresión se derivan de un único patrón de demanda que pueden variar proporcionalmente respecto a la demanda total del sistema.

Un modelo de demanda distribuida es aplicable cuando se utiliza un modelo de simulación completo de la red. En tal caso, la demanda total del sistema puede ser distribuida temporal y espacialmente entre diversos puntos de demanda de la red. Un modelo de demanda distribuida permite la implementación de unas políticas de control óptimas que se adapta a las variaciones significativas de la demanda en el sistema, que pueden ocurrir en el transcurso del periodo de operación escogido.

En la literatura existen diversas técnicas para la previsión de la demanda, pero la disponibilidad de los datos (tanto espaciales como temporales) ha limitado el desarrollo y la aplicación de muchas herramientas disponibles. Como resultado, es necesario un trabajo adicional en esta área, como el desarrollo de modelos predictivos a corto plazo y desagregación espacial utilizando los datos históricos a corto plazo. Con el incremento de la disponibilidad de las bases de datos SCADA, se pretende obtener una formulación y un rendimiento de los modelos de previsión mas ajustados a la realidad.

En el capítulo 5 se describirá la formulación del modelo de previsión de demanda adoptado en el presente trabajo.

3.4 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN

3.4.1 Introducción

Como se ha visto en el apartado 2.2, diversos modelos de optimización han sido aplicados en la literatura. Los modelos de optimización constituyen un componente fundamental en el control óptimo de la operación de una red de distribución de agua.

Principalmente los modelos de optimización son aplicados en la minimización de costes energéticos, localización de fugas, dimensionado óptimo de tuberías, control de calidad del agua, control óptimo de la operación.

La selección adecuada del algoritmo de optimización para resolver el modelo de control asociado dependerá del rendimiento de los tiempos de ejecución en la obtención de los resultados y de la complejidad de las ecuaciones que definan el problema a resolver para cumplir el objetivo propuesto.

3.4.2 Formulación de un problema de optimización

Dependiendo de la naturaleza del problema a resolver, este se debe reformular de forma que sea conveniente para su análisis desde el punto de vista de la optimización. Un problema matemático de optimización está constituido por (Hillier y Lieberman 2006):

- **Variables de decisión**

Representan las n decisiones cuantificables a tomar cuyos valores (x_1, x_2, \dots, x_n) , deben ser calculados.

- **Función objetivo**

Determina el grado de ejecución de una combinación de valores de las variables de decisión, representadas de forma matemática.

- **Restricciones**

Suponen cualquier limitación de los valores que puede tomar una variable de decisión. Se expresan también matemáticamente.

Las restricciones asociadas con el problema consisten en limitaciones físicas del sistema y otros requisitos definidos exteriormente. Las restricciones físicas incluyen limitaciones en la potencia, regulación de los grupos de bombeo y de los dispositivos de regulación. Los requisitos externos se refieren a restricciones como las presiones mínimas en los nudos y rendimientos mínimos de los equipos de bombeo permitidos.

Una vez establecido el problema matemático, se requiere investigar el algoritmo de optimización más adecuado para resolver el problema. La elección debe estar regida por las características del problema a resolver.

Existen diversas técnicas de programación matemática como la programación lineal (PL), programación dinámica (PD), programación no lineal (PNL) y métodos metaheurísticos como los algoritmos genéticos (AG), para resolver el problema de minimización del coste energético (Mays 2000).

3.5 FORMULACIÓN GENERAL DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN PROPUESTO PARA LA MINIMIZACIÓN DE COSTES ENERGÉTICOS

El problema de minimización de los costes energéticos durante la operación diaria de un sistema de abastecimiento de agua con varias fuentes de suministro es uno de los problemas más estudiados en la literatura. En términos generales, la función objetivo a minimizar se puede expresar como:

$$\text{Min} \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (c_k * q_{k,t} + \sum_{p=1}^{n_k} W_{p,k,t}) * P_{k,t}$$

donde:

- K : Es el número total de plantas de tratamiento,
- T : Es el número total de instantes dentro del intervalo de optimización, generalmente 24 horas, a intervalos de 1 hora.
- c_k : Representa el coste energético de producción por cada m^3 de agua filtrada desde cada planta en kWh/m^3 (este coste es fijo e igual para cada instante).
- $q_{k,t}$: Representa el caudal producido desde cada planta k a la hora t en m^3/h .
- $W_{p,k,t}$: Representa la potencia total consumida por la bomba p (o grupo de bombas p) de la planta k a la hora t , en kW.
- n_k : Representa el número de bombas (o grupos de bombeo) consideradas en la planta k .
- $p_{k,t}$: Representa el precio de la energía en la planta k a la hora t , en €/kWh.

La función objetivo está sujeta a una serie de restricciones como:

- Límites del caudal de producción máximo y mínimo $q_{k,t}$ de cada planta y en cada hora t .
- Relación entre la energía consumida y el caudal bombeado por cada bomba p (o grupo de bombeo). Por lo general, se supone que el caudal bombeado es igual al caudal producido.
- Límites de la potencia máxima consumida en cada planta k a la hora t .
- Si cada planta esta provista de un depósito, la ecuación de balance de masa debe cumplirse para cada depósito k en cada hora t . Estas ecuaciones tienen en cuenta el caudal producido $q_{k,t}$ en cada planta k , como el caudal entrante al depósito y la demanda $d_{k,t}$ de cada planta k , como el caudal de salida de cada depósito (estas ecuaciones no cambian si alguna parte de la demanda tiene un by-pass con el depósito, o por otra parte, si no hay depósitos, entonces $q_{k,t} = d_{k,t}$).
- Límites en los niveles máximo y mínimo de los depósitos.

- Recuperación de los niveles iniciales de los depósitos al final del periodo de optimización (durante 24 h).
- Ecuaciones de la red de distribución (continuidad en los nudos y pérdida de energía en las líneas), que relaciona el caudal de salida de cada planta con la demanda total del sistema y su carga, las leyes de control para los componentes de la red y los niveles de los depósitos.
- Presión mínima y máxima en los nudos críticos, que dependen de las características de cada planta, la demanda total y su carga, las leyes de control de los componentes de la red y las ecuaciones del sistema de distribución.

Siendo las variables de decisión básicamente la cantidad de agua producida desde cada planta de tratamiento k en cada hora t . El conjunto de variables de decisión pueden incrementarse cuando se tienen en cuenta componentes de regulación (bombas y válvulas), que pueden afectar a las presiones y a la distribución de demandas desde diferentes puntos de suministro.

En términos generales, es un problema complejo a resolver debido a:

- El carácter secuencial de las variables de decisión (la decisión en la hora t depende de la decisión en la hora $t-1$).
- La presencia de variables de decisión continuas y discretas (las variables discretas se refieren normalmente al estado de bombas on/off, y las variables continuas referidas a los caudales producidos o a las consignas de las válvulas). El uso de unas u otras dependerá de la formulación del problema.
- El comportamiento no lineal del sistema hidráulico.
- La dificultad para resolver las restricciones de las variables de decisión.
- El gran número de restricciones totales a cumplir, porque las ecuaciones hidráulicas deben ser formuladas para cada instante t .

3.6 METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN PROPUESTA

La metodología propuesta para la optimización de la operación en tiempo real de una red de abastecimiento de agua mediante el uso de una arquitectura ANN para la simulación hidráulica en periodo extendido, se puede resumir en los siguientes puntos:

1 – Formular el problema de optimización (incluyendo la definición de la función objetivo y determinar las restricciones y las variables de decisión). Para este punto el problema de optimización se divide en dos bloques, en primera instancia, el objetivo será determinar la configuración óptima del estado de bombas que minimice el coste energético. A partir de los

caudales de inyección a la red obtenidos, un segundo problema de optimización tendrá como objetivo determinar las consignas óptimas de regulación de las válvulas existentes en la red de distribución para satisfacer la demanda. Para el primer bloque se desarrollará un algoritmo de optimización mediante programación lineal, siendo un algoritmo de optimización basado en AG el modelo de optimización del segundo bloque, los resultados de ambos modelos serán evaluados por la arquitectura ANN. En los apartados 6.3 y 6.4 respectivamente se realizará una descripción más detallada de la formulación de ambos bloques que constituyen el modelo de optimización propuesto en el presente trabajo.

2 – Implementar una arquitectura ANN (metamodelo) para la simulación hidráulica de las posibles soluciones a optimizar. Dicho proceso incluye las siguientes fases de desarrollo:

- Desarrollo de un modelo de simulación. Para ello se tiene que tener en cuenta:
 - Complejidad del modelo (por ej: número de válvulas, tuberías, depósitos, bombas);
 - Duración y número de intervalos de tiempo de la simulación.
 - Duración del periodo de control operacional (el periodo de tiempo utilizado en una simulación para determinar los costes energéticos).
 - Evaluación de las restricciones (durante el periodo de simulación pueden suceder irregularidades, a consecuencia de esto, los valores definidos en los límites de las restricciones deben ser lo suficientemente ajustados para minimizar dichas irregularidades).
 - Generación de valores aleatorios utilizando un modelo de simulación hidráulica que sirvan como patrones de entrada de datos al metamodelo, asegurando que solo se generan soluciones hidráulicamente factibles (por ej: presiones no negativas), la generación de estos patrones puede requerir cambios en la formulación del problema de optimización.
 - Determinar los nudos críticos como variables de salida del modelo de simulación hidráulica.
 - Calibrar (entrenar) la arquitectura ANN mediante el algoritmo de back-propagation después de dividir el conjunto de datos en un conjunto de datos de entrenamiento, test y validación (el proceso de calibración implica el ajuste de la matriz de pesos de la ANN para que los valores obtenidos por el metamodelo estén los más próximos a los datos generados por el modelo de simulación). Cuando la configuración de la arquitectura ANN crece en complejidad (número de nodos de entrada, nodos de la capa oculta y nodos de salida), el proceso de entrenamiento aumenta el tiempo de cálculo considerablemente. Por esta razón, en la presente tesis se ha implementado una versión paralelizada del algoritmo de entrenamiento que permite reducir en gran medida dicho tiempo de cálculo.
- En el apartado 4.2 se definirán las distintas arquitecturas ANN empleadas en el presente trabajo para emular el comportamiento de las redes hidráulicas, por otra parte los detalles de la implementación paralela del proceso de entrenamiento se describirán en el apartado 4.6.4

3 – Implementar un modelo de previsión de demanda para el control operacional en tiempo real. Dicho modelo de previsión de demanda se basará en el análisis de series temporales históricas de caudales de consumo procedentes del sistema SCADA. Los resultados obtenidos se utilizarán como datos de entrada para el primer bloque del modelo de optimización (PL) así como para las entradas de la arquitectura ANN correspondientes a las zonas de demanda consideradas en la red de abastecimiento de agua. En el capítulo 5 se describirá la formulación del modelo de previsión de demanda empleado en la presente tesis.

4 – Resolver el problema de optimización:

- a) Optimizar el problema utilizando la arquitectura ANN entrenada sustituyendo el modelo de simulación hidráulica.

Durante el proceso de optimización;

- Evaluar con la arquitectura ANN cada nueva mejor solución obtenida tras la evaluación del proceso de optimización.
- Mantener un registro del conjunto de las mejores soluciones evaluadas por el metamodelo.

- b) Realizar una búsqueda local utilizando el modelo de simulación, a partir de la mejor solución obtenida en el punto 4.a (en este caso, debido a que el metamodelo es una aproximación, pequeñas mejoras en la calidad de la solución se pueden conseguir mediante una búsqueda local después de la ejecución del AG).

En la Fig. 3.4 se muestra el diagrama de flujo de la metodología empleada en el presente trabajo. Dicha metodología será aplicada a un caso de estudio real, cuyos resultados serán presentados en el Capítulo 8.

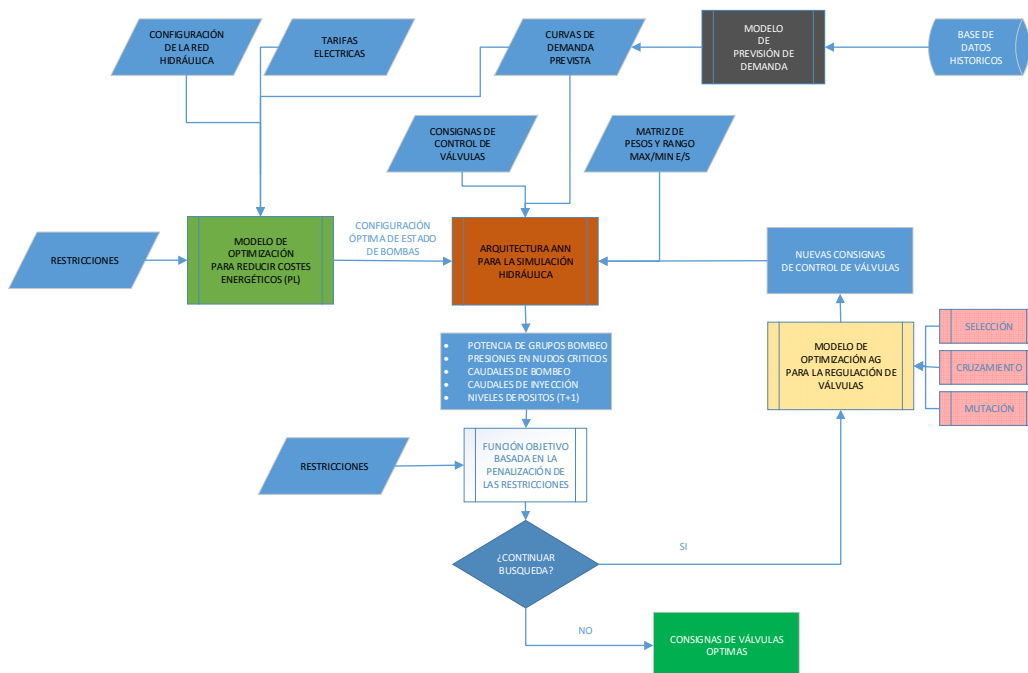


Figura. 3.4. Diagrama de la metodología del proceso de optimización propuesta

CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN HIDRÁULICA DEL COMPORTAMIENTO DE UNA RED DE ABASTECIMIENTO DE AGUA MEDIANTE REDES NEURONALES

En este capítulo se va a describir la metodología seguida para definir las distintas arquitecturas ANN dirigidas a emular la simulación hidráulica de un modelo matemático. El objetivo es agilizar el cálculo de la respuesta de la red ante un escenario determinado, sin necesidad de calcular las presiones y caudales en todos los elementos del sistema. El escenario quedará caracterizado por el valor asignado a unas pocas variables que constituyen la entrada de la ANN, las cuales estarán asociadas a las señales de control. Por su parte, la salida de la ANN nos dará directamente los valores de las presiones, niveles, caudales o potencias en los elementos a controlar, sin necesidad de resolver el sistema de ecuaciones que caracteriza el comportamiento de la red hidráulica.

Antes de describir la estructura de la ANN, procederemos a comentar los componentes que configuran un modelo de simulación hidráulica, siguiendo el modelo de datos utilizado por EPANET. Posteriormente se plantearán las distintas arquitecturas ANN para realizar simulaciones en régimen permanente y en régimen dinámico. Una vez propuestas las distintas arquitecturas ANN se procederá a desarrollar un módulo de generación de patrones de entrenamiento. Para la generación de los patrones de entrenamiento y la validación del ajuste de la ANN se hará uso del modelo de simulación hidráulica Anytown modificado (Walski et al. 1987).

Tras realizar diversos procesos de entrenamiento de las arquitecturas propuestas, y comprobar el elevado coste en tiempo de cálculo requerido para el entrenamiento de las arquitecturas ANN de mayor complejidad, en particular las empleadas para realizar simulaciones en periodo extendido, se ha diseñado e implementado una versión paralela del software de entrenamiento. Posteriormente se compararán los resultados predichos por la ANN con los obtenidos mediante el programa EPANET para verificar la bondad del entrenamiento, y se valorarán los ahorros de tiempo conseguidos utilizando la ANN en sustitución del modelo detallado de EPANET.

4.1 MODELOS DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA

Un modelo matemático de una red de distribución de agua consiste en un conjunto de elementos hidráulicos debidamente conectados siguiendo el esquema de la red, cuyo objetivo es reproducir el comportamiento físico del sistema real con la mayor exactitud posible. Dicho esquema consiste en esencia en un conjunto de nudos, que representan depósitos, embalses, y puntos de consumo o de inyección, conectados por un conjunto de líneas que representan las tuberías, bombas y válvulas de regulación, manuales o automáticas. La simulación hidráulica finalmente

se lleva a cabo mediante un programa de cálculo que configura y resuelve el sistema de ecuaciones resultante de aplicar las leyes de conservación de la masa y la energía sobre los elementos de la red.

La confección de un modelo matemático puede ser una tarea más o menos compleja dependiendo de si la red es de nueva creación o ya está en servicio. En el segundo caso la toma de datos es mucho más laboriosa, y además el modelo de la red deberá ajustarse lo más posible a la realidad existente. Ello exige recopilar y procesar gran cantidad de información procedente de varias fuentes, ya sean datos en papel, digitalizados, o gestionados por un sistema de información geográfica (SIG). Por otra parte, para que la simulación hidráulica sea lo más fiel posible a la realidad se necesita disponer de un modelo calibrado. El proceso de calibración exige disponer de datos de campo proporcionados por sistemas SCADA para un mayor ajuste de los parámetros hidráulicos de todos los elementos incluidos en el esquema de la red de distribución.

Finalmente disponer de un modelo calibrado permitirá una mejor gestión y control de la operación de la red, permitiendo realizar simulaciones hidráulicas de los distintos escenarios de operación a la hora de tomar decisiones.

4.1.1 Tipo de modelos matemáticos

El régimen de funcionamiento de una red de distribución va cambiando a medida que transcurre el tiempo, y se modifica el estado de los elementos de regulación del sistema, al objeto de satisfacer las demandas de los consumidores en cada momento. El modelo matemático de la red debe ser capaz de reproducir el comportamiento de la misma bajo cualquier escenario.

Dependiendo del tipo de análisis a realizar los modelos matemáticos se pueden clasificar en:

- **Modelos estáticos.** Simulan el estado de la red en un instante determinado, generalmente una situación de consumo punta, o el instante en el que una zona puede quedar bajo presiones mínimas. Aunque los modelos estáticos se han utilizado sobretodo en fase de proyecto para garantizar la respuesta de la red en las condiciones más desfavorables, también constituyen instantes de paso de un modelo dinámico.
- **Modelos dinámicos.** Se distinguen entre los modelos inerciales, que tienen en cuenta los transitorios que se producen en la red por maniobras en los elementos de regulación y estaciones de bombeo; y los modelos no inerciales o en periodo extendido, que desprecian el efecto de los transitorios. Estos últimos simulan el comportamiento dinámico de la red como una sucesión de simulaciones estáticas en las que de un estado a otro se tiene en cuenta tan solo la variación habida en las demandas de los nudos, en los niveles de los depósitos, en la posición de los elementos de regulación, o en el estado de funcionamiento de las estaciones de bombeo. (Cabrera et al. 1996).

Por otra parte, según sea la utilidad que se le vaya a dar al modelo matemático se distinguen:

- **Modelos estratégicos o macromodelos.** Son modelos en los que se incluyen unos pocos elementos, en particular aquellos que tienen mayor relevancia sobre el objetivo buscado. Se utilizan para la elaboración de planes directores, la planificación y evaluación de nuevas infraestructuras o ampliación de las ya existentes, la optimización de la producción, o el control de la red en tiempo real.

La información requerida para construir el modelo se reduce a las líneas principales de transporte, unos pocos nudos en los que se concentra el consumo de determinados sectores de la red secundaria, los depósitos de regulación, las estaciones de bombeo y las válvulas de regulación más relevantes.

- **Modelos arteriales:** Incluyen las grandes canalizaciones de la red distribución, por encima de un determinado diámetro. Se utilizan sobretodo para el diseño y dimensionado de las ampliaciones de la red. Dado que las zonas de ampliación usualmente no están urbanizadas, la asignación de caudales se hace en base a unas dotaciones estimadas, no siendo necesario llegar a un mayor grado de definición.
- **Modelos de detalle.** Se incluyen la mayoría de los elementos de la red. Se utilizan para las operaciones diarias de control y regulación de la red: gestión de maniobras, localización de fugas, telecontrol y telemando, regulación de presiones, y otros. También son imprescindibles cuando se requiere simular la evolución de la calidad del agua en la red de distribución.

4.1.2 Componentes de un modelo matemático

Los componentes que constituyen un modelo matemático se pueden dividir en dos grupos: componentes *físicos*, atendiendo a las características de los elementos reales que configuran la red de distribución de agua, y *no físicos*, los cuales alojan la información complementaria necesaria para simular el comportamiento de los elementos físicos, como son las curvas de modulación de la demanda o las leyes de control que operan sobre el sistema.

4.1.2.1 Componentes físicos

A continuación se hace una breve descripción de cada uno de los elementos físicos que constituyen el modelo matemático de una red de distribución, los cuales se representan en la Fig. 4.1.

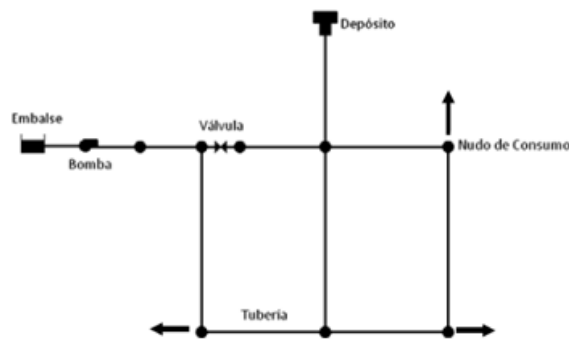


Figura. 4.1. Componentes principales de un modelo matemático

▮ NUDOS DE CAUDAL

Los nudos de caudal son los puntos de la red donde confluyen las tuberías, y a través de los cuales el agua entra o sale de la misma. Las propiedades asociadas a los nudos son la cota respecto a un nivel de referencia (normalmente el nivel del mar), la demanda de agua (flujo que abandona la red), y la calidad inicial del agua.

Los resultados obtenidos para los nudos en cada uno de los periodos de simulación son la altura piezométrica (suma de la cota más la altura de presión), la presión y la calidad del agua.

Los nudos de caudal pueden también representar una demanda variable en el tiempo, tener asignados distintos tipos de demanda (doméstica, industrial, etc), o representar una demanda negativa, indicando que el caudal entra a la red a través del nudo. La variación de la demanda en los mismos queda determinada a través de una curva de modulación previamente declarada.

▮ EMBALSES

Los embalses son nudos que representan una fuente externa de alimentación, de capacidad ilimitada, o bien un sumidero de caudal. Se utilizan para configurar elementos como lagos, captaciones desde ríos, acuíferos subterráneos, o también puntos de entrada a otros subsistemas. Los embalses pueden utilizarse también como puntos de entrada de contaminantes. Dado que un embalse actúa como un elemento de contorno del sistema, su altura o calidad del agua no se verán afectadas por lo que pueda ocurrir en la red.

Las propiedades de un embalse son su altura piezométrica (que coincidirá con la cota de la superficie libre del agua si éste se encuentra a la presión atmosférica), y la calidad del agua en el mismo en el caso de realizar un análisis de calidad.

■ DEPÓSITOS

Los depósitos son nudos con cierta capacidad de almacenamiento, en los cuales el volumen de agua almacenada puede variar con el tiempo durante la simulación. Los datos básicos de un depósito son la cota de solera (para la cual el nivel del agua es cero), el diámetro (o su diámetro equivalente si no es cilíndrico), el nivel inicial del agua, los niveles mínimo y máximo permitidos, y la calidad inicial del agua.

Los principales resultados asociados a un depósito a lo largo de la simulación son, la altura piezométrica (cota de la superficie libre), la presión o nivel del agua sobre la cota de solera, y la calidad del agua. El nivel del agua en los depósitos debe oscilar entre el nivel mínimo y el nivel máximo.

■ TUBERÍAS

Las tuberías son líneas que transportan el agua de un nudo a otro. Se debe asumir que las tuberías están completamente llenas en todo momento, esto es, que el flujo es a presión. La dirección del flujo es siempre del nudo de mayor a menor altura piezométrica. Los principales parámetros de una tubería son: los nudos inicial y final, el diámetro, la longitud, el coeficiente de rugosidad (para calcular las pérdidas de carga) y su estado, esto es, si se encuentra abierta, cerrada, o posee válvula de retención.

Las pérdidas de carga en una tubería pueden calcularse en EPANET utilizando tres fórmulas distintas: Hazen-Williams, Darcy-Weisbach o Chezy-Maning (Rossman, 2000a), siendo la fórmula de Darcy-Weisbach la más utilizada. Además, en las tuberías reales normalmente hay elementos auxiliares como elementos de unión o válvulas, que dan lugar a pérdidas de carga adicionales. Estos elementos quedan representados en el modelo mediante un “*coeficiente de pérdidas menores*” asociado a cada tubería.

Los resultados de la simulación asociados a una tubería son el caudal circulante, la velocidad del flujo, la pérdida de carga unitaria, el factor de fricción para la fórmula de Darcy-Weisbach, y la calidad media del agua (a largo de la tubería).

■ BOMBAS

Las bombas son líneas que comunican energía al fluido elevando su altura piezométrica. Los datos principales de una bomba son sus nudos de aspiración e impulsión, su curva característica (o relación entre caudal trasegado y la altura comunicada), y su curva de rendimiento.

Al igual que las tuberías, las bombas pueden pararse o arrancarse durante la simulación en instantes prefijados, o cuando se cumplan determinadas condiciones en la red. El modo de operación de una bomba puede también imponerse asignando una curva de modulación a su velocidad relativa.

El resultado principal asociado a una bomba es el caudal impulsado y el incremento de altura comunicada al fluido.

■ VÁLVULAS

Las válvulas son líneas que estrangulan el paso de caudal en un punto determinado de la red. Las válvulas manuales se regulan mediante la asignación de un coeficiente de pérdidas a la misma, mientras que las válvulas automáticas actúan por sí mismas con el fin de mantener el valor de una consigna, bien sea la presión aguas arriba, la presión aguas abajo, la pérdida de carga o el caudal de paso. Las propiedades principales asociadas a una válvula son los nudos aguas arriba y aguas abajo, el diámetro, la consigna y su estado.

Los resultados de la simulación asociados a una válvula son el caudal de paso y la pérdida de carga que origina.

Los tipos básicos de válvulas contemplados en EPANET son:

- Válvulas Reductoras de Presión (**VRP**) (en inglés **PRV**)
- Válvulas Sostenedoras de Presión (**VSP**) (en inglés **PSV**)
- Válvulas de Rotura de Carga (**VRC**) (en inglés **PBV**)
- Válvulas de Limitadoras del Caudal (**VLQ**) (en inglés **FCV**)
- Válvulas de Regulación (**VR**) (en inglés **TCV**)
- Válvulas de Propósito General (**VPG**) (en inglés **GPV**).

Las **VRPs** tratan de limitar la presión en el nudo aguas abajo de la válvula, para que no exceda de un valor de consigna prefijado. En un modelo la válvula puede presentar cualquiera de los tres estados siguientes:

- **parcialmente abierta** (esto es, activa) para mantener la presión aguas abajo en el valor de consigna prefijado, siempre y cuando la presión aguas arriba sea superior al valor de consigna.
- **completamente abierta**, si la presión aguas arriba es inferior al valor de consigna.
- **cerrada**, si la presión aguas abajo excede a la del nudo aguas arriba (para impedir el flujo inverso).

Las **VSPs** tratan de mantener la presión en el nudo aguas arriba de la válvula. En un modelo, la válvula puede presentar cualquiera de los tres estados siguientes:

- **parcialmente abierta** (esto es, activa) para mantener la presión aguas arriba en el valor de consigna prefijado, siempre y cuando la presión aguas abajo sea inferior al valor de consigna.
- **completamente abierta**, si la presión aguas abajo es superior al valor de consigna.
- **cerrada**, si la presión aguas abajo excede a la del nudo aguas arriba (para impedir el flujo inverso).

Las **VRCs** fuerzan el valor de la caída de presión a través de la válvula. El flujo a través de la válvula puede ser en cualquier dirección.

Las **VLQs** limitan el caudal de paso a través de la válvula a un valor prefijado (siempre inferior al caudal máximo correspondiente a válvula abierta).

Las **VRs** son bidireccionales y simulan una válvula parcialmente cerrada, cuyo comportamiento queda determinado por el valor del coeficiente de pérdidas menores en la válvula.

Las **VPGs** se utilizan para representar una línea cuya relación pérdida-caudal es proporcionada por el usuario, en lugar de seguir el comportamiento típico de las válvulas establecido por las fórmulas hidráulicas

4.1.2.2 Componentes no físicos

Dentro del grupo de componentes no físicos de un modelo matemático se incluyen las curvas de comportamiento de algunos elementos, las curvas de modulación y leyes de control

■ CURVAS DE COMPORTAMIENTO

Las Curvas de Comportamiento son series que contienen pares de datos ordenados, las cuales representan una relación entre dos magnitudes.

Los tipos de curvas de comportamiento que pueden existir en un modelo matemático pueden ser: curvas características y curvas de rendimiento de las bombas, curvas de cubicación de depósitos y curvas de pérdidas para válvulas de propósito general (GPV).

■ CURVAS DE MODULACIÓN

Las Curvas de Modulación (o Patrones) son una secuencia de factores multiplicativos que, aplicados sobre un valor base, hacen que éste varíe con el tiempo. Las Curvas de Modulación se aplican a las demandas en los nudos, a las alturas de los embalses, a la velocidad de giro de las bombas, a las inyecciones de contaminantes en la red, y al precio de la energía.

■ LEYES DE CONTROL

Las Leyes de Control son reglas que determinan el modo de operación de la red durante la simulación. Controlan el estado de determinadas líneas de la red (bombas y válvulas generalmente) en función del tiempo, de los niveles en los depósitos o de las presiones en puntos de referencia. Las leyes de control pueden clasificarse en dos categorías: simples y/o basadas en reglas.

Las leyes de control simples se declaran mediante una única sentencia, y cambian el estado o la consigna de una línea en base al nivel de agua de un depósito, la presión en un nudo, el instante desde el inicio de la simulación o la hora del día.

En cambio, las leyes de control basadas en reglas permiten controlar el estado de las líneas o las consignas en base a una combinación de situaciones que puedan darse en la red para el instante de cálculo. Se declaran mediante varias de sentencias vinculadas entre sí conforme una determinada sintaxis.

4.1.3 Simulación mediante modelos matemáticos

Una vez identificados los elementos físicos que configuran un modelo matemático y añadida la información necesaria para modelar el comportamiento de los mismos, en este apartado se describen los modelos de cálculo que determinan la respuesta de la red a partir de los datos anteriores, centrándonos en el modelo cuasi-estático por ser el más empleado, y el que también implementa el simulador de EPANET.

■ El modelo de simulación cuasi-estático

El funcionamiento de un sistema de distribución de agua está necesariamente asociado a la variable tiempo, la cual debe ser considerada explícitamente. En efecto, en los sistemas de distribución de agua los consumos, y consecuentemente los caudales que circulan por las tuberías y las presiones en los nudos, no se mantienen constantes en el tiempo, sino que presentan fluctuaciones diarias importantes. Por otro lado, los niveles de agua en los depósitos están cambiando constantemente, las instalaciones de bombeo arrancan y paran, las válvulas son maniobradas, etc.

Cuando las condiciones de contorno varían gradualmente en el tiempo, es aceptable despreciar el efecto de la compresibilidad, y también el término de aceleración o término de inercia en las ecuaciones de conservación de la energía, lo que equivale a efectuar la hipótesis de que el equilibrio hidráulico en régimen permanente se establece de una forma casi instantánea cada vez que cambian las condiciones de operación.

De este modo es posible analizar las condiciones de funcionamiento hidráulico del sistema mediante el cálculo de una secuencia de soluciones estáticas a lo largo del periodo de

simulación, quedando como único vínculo entre un instante y el siguiente el balance de masas en los depósitos, lo que determinará la evolución del nivel en los mismos. La Fig. 4.2 muestra el diagrama de flujo de una simulación utilizando el modelo cuasi-estático.

Los modelos de simulación en régimen cuasi-estático permiten una comprensión eficaz del comportamiento de los sistemas y sus respuestas a los diferentes condicionantes (valores de consigna) impuestos a lo largo del tiempo. Por otro lado, este tipo de modelos es especialmente indicado para el dimensionado hidráulico de los depósitos de distribución (determinación de las cotas de solera, volúmenes de regulación y altura de agua), y consecuentemente para afrontar el reto de optimizar el gasto energético.

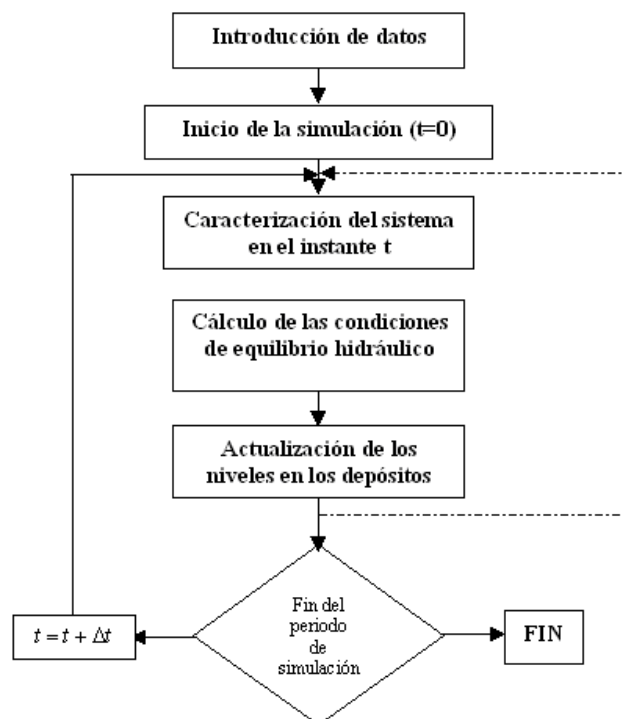


Figura. 4.2. Diagrama de flujo de un modelo tipo cuasi-estático.

▪ Caracterización del sistema en el instante t

La caracterización del estado del sistema en el instante t supone imponer el estado de las demandas en los nudos de la red y de todos los elementos regulación para dicho instante, de acuerdo con las curvas de modulación de la demanda, las leyes de control dependientes del tiempo, así como las leyes de control dependientes de los niveles en los depósitos. Tras ello el sistema queda preparado para proceder a equilibrar presiones y caudales.

Calcular las presiones en los nudos y caudales en las líneas que cumplen las ecuaciones de equilibrio o de conservación de la masa y la energía, siendo compatibles con las condiciones de contorno impuestas al sistema (demandas en nudos, niveles en depósitos, estado de bombas, consignas de válvulas, etc).

▪ **Cálculo de las condiciones de equilibrio hidráulico**

Como su nombre indica, el cálculo de las condiciones de equilibrio hidráulico consiste en determinar los caudales circulantes por las líneas y las alturas (o presiones) en los nudos de la red, compatibles con las ecuaciones de conservación de la masa y de la energía, y con las condiciones de contorno impuestas al sistema (demandas en nudos, niveles en depósitos, estado de bombas, consignas de válvulas, etc).

Para ello EPANET resuelve simultáneamente el conjunto de ecuaciones formado por las ecuaciones de continuidad en los nudos, y las ecuaciones de pérdidas en las líneas (tuberías, bombas y válvulas), de modo que el número de ecuaciones es igual al número de incógnitas. Para su resolución emplea el algoritmo del gradiente generalizado (GGA), en cuyo proceso las ecuaciones de nudos se desacoplan de las ecuaciones de pérdidas, de modo que primero se determinan las alturas en los nudos, y a continuación los caudales en las líneas.

Tras obtener los nuevos valores de presiones y caudales se comprueba la compatibilidad de los resultados, y en particular:

- Los niveles en los depósitos supuestos inicialmente deben ser coherentes con los niveles y los resultados de caudales aportados o extraídos de los mismos.
- Las consignas sobre las bombas supuestas inicialmente deben ser coherentes con los resultados obtenidos del modelo estático.
- La posición inicial de las válvulas de retención debe ser la misma y coherente con la obtenida del módulo de análisis estático. Esta misma condición puede extenderse al caso de válvulas automáticas tales como reductoras de presión, sostenedoras de presión, limitadoras de caudal, etc.

Además se comprueba si hay que aplicar algunas de las leyes de control dependientes de dichos valores, en cuyo caso, se modifica el estado del elemento de regulación correspondiente y se vuelve a efectuar el equilibrado. Para una mayor eficiencia, en algunos casos dichas condiciones se verifican antes de terminar las iteraciones, como ocurre con las válvulas de retención y algunas válvulas automáticas.

▪ **Determinación del próximo instante de cálculo y actualización de los caudales en depósitos**

Un aspecto fundamental en la simulación de sistemas de distribución de agua en régimen cuasi-estático es la forma en que se efectúa la integración del balance de caudales en cada depósito, con la finalidad de calcular las fluctuaciones de los respectivos niveles de agua a lo largo del tiempo, variaciones que conjuntamente con la evolución de caudales en los nudos, confieren el carácter dinámico al modelo cuasi-estático.

El intervalo de cálculo hidráulico utilizado para llevar a cabo la simulación en periodo extendido (EPS) puede ser fijado por el usuario. El valor típico es de una hora. Sin embargo, en ocasiones el intervalo utilizado internamente por el software de simulación puede ser más corto, por alguna de las siguientes razones:

- La intercalación de un instante en el que se desean conocer los resultados.
- La intercalación de un instante obligado por las curvas de modulación
- El llenado o vaciado de un depósito.
- La activación de una ley de control simple o basada en reglas.

El procedimiento seguido por EPANET para avanzar en la simulación es el siguiente:

- a) Una vez encontrada una solución para el instante actual, el incremento de tiempo adoptado para avanzar hasta el instante siguiente será el mínimo entre:
- El instante en que comienza un nuevo periodo de demanda,
 - El menor intervalo de tiempo que hace que se llene o vacíe algún depósito,
 - El menor intervalo de tiempo para el cual el nivel en algún depósito alcanza el valor de referencia que provoca el cambio de estado de alguna línea (p. ej. arrancar o parar una bomba), según figura en alguna de las leyes de control simples,
 - El próximo instante en que debe actuar alguna de las leyes de control simple reguladas por tiempo,
 - El próximo instante en que alguna de las leyes de control basadas en reglas provoquen un cambio en la red.

Para calcular el instante en que se alcanza un determinado nivel de depósito, se supone que éste evoluciona linealmente en base a los caudales actuales que entran o salen del depósito.

- b) Una vez determinado el intervalo de avance, se actualiza el tiempo de la simulación, se calculan las nuevas demandas, se ajustan los niveles en los depósitos en base a los últimos caudales calculados, y se verifican las reglas de control para determinar qué líneas deben cambiar su estado.

- c) Se desencadena un nuevo proceso iterativo para resolver el conjunto de ecuaciones, partiendo de los caudales actuales.

4.1.4 Simulación hidráulica mediante metamodelos

El objetivo del uso de los metamodelos es desarrollar y utilizar modelos computacionalmente más eficientes que sustituyan a los modelos de simulación en un proceso de optimización (Razavi et al. 2012). En recursos hídricos, un metamodelo se utiliza como alternativa en sustitución de un modelo de simulación más complejo y más costoso computacionalmente (Broad et al., 2005). Numerosas herramientas y algoritmos han sido desarrollados para obtener un metamodelo, pero hay que destacar el uso de las ANN dentro de este ámbito.

Jamieson et al. (2007), y más tarde (Skworcow et al. 2010) realizaron un estudio de factibilidad para ver si era posible llevar a cabo un control operacional en tiempo real de una red de abastecimiento de agua, concluyendo que no era factible aplicar un modelo de simulación hidráulica a gran escala para un control operacional óptimo.

Para superar este obstáculo (Jamieson et al. 2007) propusieron el uso de arquitecturas ANN para capturar el comportamiento hidráulico de un modelo de simulación a gran escala. A continuación dicho modelo heurístico podría ser utilizado por un algoritmo genético (AG) para llevar a cabo optimizaciones en tiempo real.

La metodología propuesta, una combinación de una arquitectura ANN y un AG, fue aplicada a tres casos de estudio descritos en (Salomons et al., 2007); (Martínez et al., 2007); (Rao and Salomons, 2007).

Los siguientes apartados se centran en la utilización de arquitecturas ANNs para replicar el comportamiento de un modelo de simulación hidráulica. Este enfoque se describe con mayor detalle en (Martínez et al. 2005) y (Rao y Alvarruiz, 2007).

El uso de las ANNs está bien extendido en el ámbito de los recursos hídricos, especialmente en modelos de previsión de demanda (Maier y Dandy, 2000). Las ANNs son ampliamente reconocidas por su precisión y robustez a la hora de resolver problemas no lineales, pero sin embargo requieren de un considerable número de patrones de entrada/salida (normalmente del orden de miles) durante el proceso de entrenamiento y verificación, lo que limita su uso en proyectos de gran envergadura debido al elevado tiempo de cálculo exigido para el entrenamiento. A pesar de esta limitación, (Rao y Alvarruiz 2007) decidieron capturar las características hidráulicas de un modelo de red de distribución de agua mediante ANNs. Esta propuesta requería realizar un gran número de simulaciones con el modelo hidráulico para generar múltiples escenarios de operación posibles, combinando niveles iniciales de los depósitos, demandas, estados de bombas y consignas de válvulas. Estos conjuntos de E/S fueron utilizados para entrenar y validar el modelo de arquitectura ANN. Para validar los resultados obtenidos por la ANN comparados con los resultados que se obtendrían a través del modelo de simulación hidráulica se utilizó como indicador el error cuadrático medio (RMSE).

La arquitectura de ANN propuesta se utilizó a continuación para predecir los niveles de los depósitos en el instante siguiente, así como, las presiones y caudales en puntos críticos de la red. Para validar la idoneidad de la ANN, (Rao y Alvarruiz, 2007) implementaron primeramente un metamodelo sobre la red Anytown modificada (Walski et al., 1987), una red muy referenciada en la literatura.

Similares resultados fueron descritos en (Martínez et al., 2007), donde la misma arquitectura de ANN fue utilizada para reemplazar el modelo hidráulico de la red de distribución de la ciudad de Valencia en el proceso de optimización de su modo de operación.

Según Martínez et al. (2007) el número de neuronas en la capa oculta es algo subjetivo, basado en la experiencia y en un profundo grado de conocimiento del modo como funciona el modelo de simulación hidráulica. Determinar la arquitectura ANN apropiada resultó ser a veces un procedimiento laborioso basado en ensayo y error. Estos ensayos pueden introducir muchas incertidumbres en la representación de la ANN del modelo hidráulico (Broad et al., 2010), incluso un pequeño error en el metamodelo puede tener un impacto significativo sobre los resultados de la optimización obtenidos.

4.2 ARQUITECTURAS DE REDES NEURONALES PARA SIMULAR EL COMPORTAMIENTO DE LA REDES HIDRÁULICAS

En este apartado se describe la configuración de las distintas arquitecturas ANN empleadas en esta Tesis para simular el comportamiento de una red hidráulica, con el objetivo de obtener unos resultados lo mas próximos posibles a los proporcionados por el modelo de simulación hidráulica en periodo extendido. Primeramente formularemos la arquitectura empleada para reproducir los diferentes estados de la red en régimen permanente, y a continuación abordaremos su extensión para llegar a reproducir una simulación completa en régimen dinámico.

4.2.1 Simulación en régimen permanente

La arquitectura general que se ha utilizado para emular los modelos hidráulicos en régimen permanente se muestra en la Fig. 4.3:

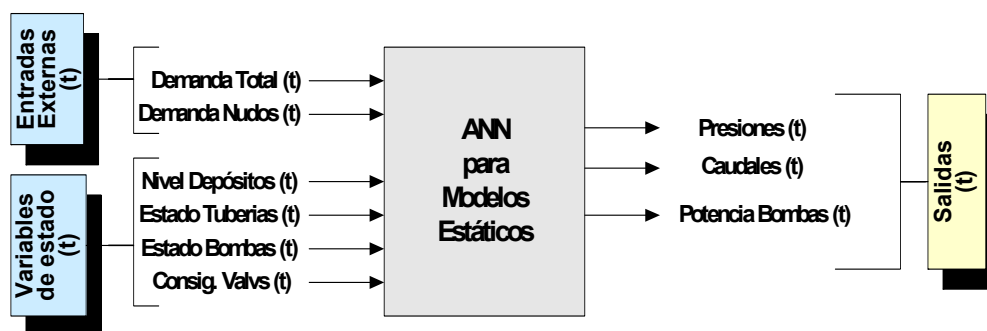


Figura. 4.3. Arquitectura ANN para la simulación de modelos en régimen permanente.

Para este tipo de simulación se requiere predecir las presiones en determinados puntos de la red, los caudales que circulan por determinadas tuberías y las potencias consumidas por las bombas que suministran agua a la red, en función de las acciones de control aplicadas y otras variables de estado como son los niveles en los depósitos o las demandas externas aplicadas, todas las cuales actúan como variables de entrada de la red.

En particular las variables de entrada consideradas en este tipo de arquitectura son las siguientes:

- Demanda total de toda la red
- Demandas en determinados nudos de la red
- Niveles en depósitos.
- Estado de las bombas.
- Estado de las tuberías.
- Consignas de válvulas.

4.2.2 Análisis de factibilidad

En ocasiones la combinación de valores propuestos para las variables de entrada conduce a situaciones de operación no válidas, debido por ejemplo al cierre inesperado de alguna válvula automática y el consiguiente aislamiento de una zona, presiones negativas en algunos nudos por no operar las bombas adecuadas, etc. Todas estas situaciones no factibles son detectadas por el simulador hidráulico de EPANET, y deben ser evitadas en cualquier simulación en periodo extendido, pues invalidarían todos los cálculos subsiguientes a esta situación.

Por ello la situación de factibilidad o infactibilidad de un determinado conjunto de variables de entrada debe ser detectada previamente mediante otra arquitectura ANN entrenada a tal fin. En este tipo de arquitectura se intenta determinar el estado factible o no factible, o lo que es lo mismo, la emisión de un determinado mensaje de error por parte del simulador de EPANET, que puede ocurrir al variar las variables de entrada, concretamente, el estado de las bombas y el número de tuberías abiertas o cerradas en un momento dado durante el periodo de simulación. La variable de salida se configura en función de los posibles errores observados durante la simulación hidráulica. La representación de las entradas y salida de la arquitectura se muestra en la siguiente Fig. 4.4:

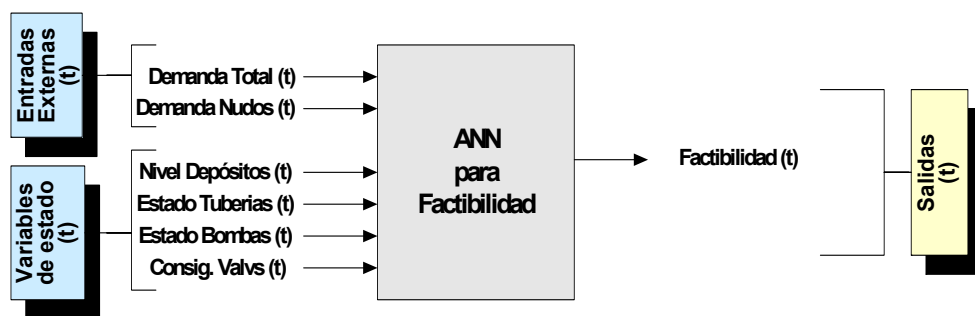


Figura. 4.4. Arquitectura ANN para el análisis de factibilidad.

En este caso dicha arquitectura solo presenta una salida que indica la factibilidad de la simulación, 0 si no factible o 1 si es factible.

Las variables de entrada consideradas para este tipo de análisis son las mismas que en el caso anterior (ver Fig. 4.3):

- Demanda total de la red
- Demandas en determinados nudos
- Niveles de depósitos
- Estado de bombas
- Estado de tuberías
- Consignas de válvulas

4.2.3 Simulación de una etapa en régimen dinámico

La arquitectura ANN que se presenta en el siguiente apartado (Fig. 4.5) intenta modelar simulaciones en régimen dinámico. A diferencia de la arquitectura ANN en régimen permanente (Fig.4.3), en esta configuración se entrenaran los datos dependientes del estado anterior.

En particular, las variables que se irán actualizando a lo largo del tiempo van a ser los niveles en los depósitos. Las demás variables de salida son las mismas que se consideraron en el modelo en régimen permanente.

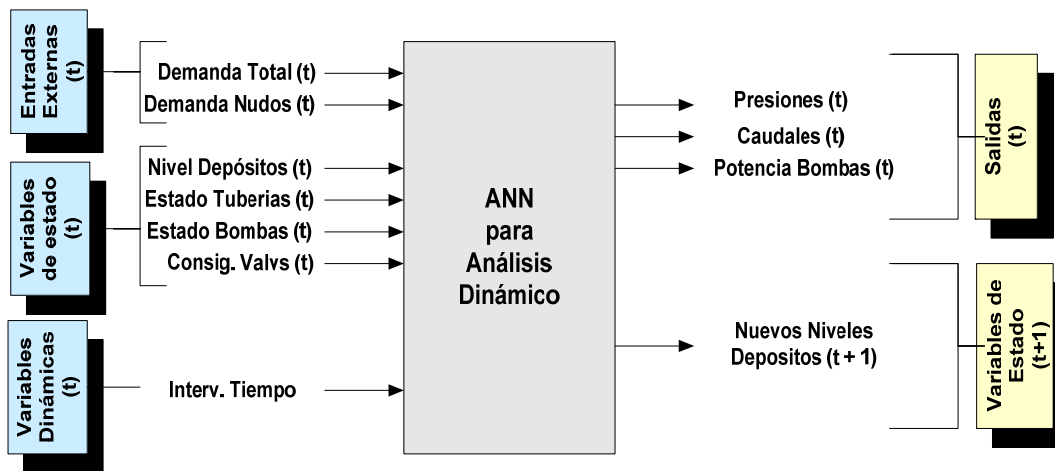


Figura. 4.5. Arquitectura ANN para la simulación de modelos en régimen dinámico.

Como variables de entrada solo se ha añadido el intervalo de tiempo de simulación, a fin de verificar el curso temporal de los resultados de las variables de entrada. Las demás variables de entrada son las mismas que se consideraron para la arquitectura ANN en régimen permanente.

4.2.4 Incorporación de las leyes de control en simulaciones dinámicas

Una vez evaluada la arquitectura ANN para realizar simulaciones dinámicas, le añadiremos más variables de entrada, a fin de perfeccionar el entrenamiento de la ANN y asemejar los resultados a los obtenidos por el propio módulo de cálculo del simulador hidráulico. En particular se trata ahora de entrenar la red para que aprenda a desencadenar las acciones de control que el simulador hidráulico efectúa durante la simulación, en función de las consignas establecidas,

La arquitectura ANN empleada para realizar este tipo de simulaciones se muestra de forma esquemática en la siguiente figura.

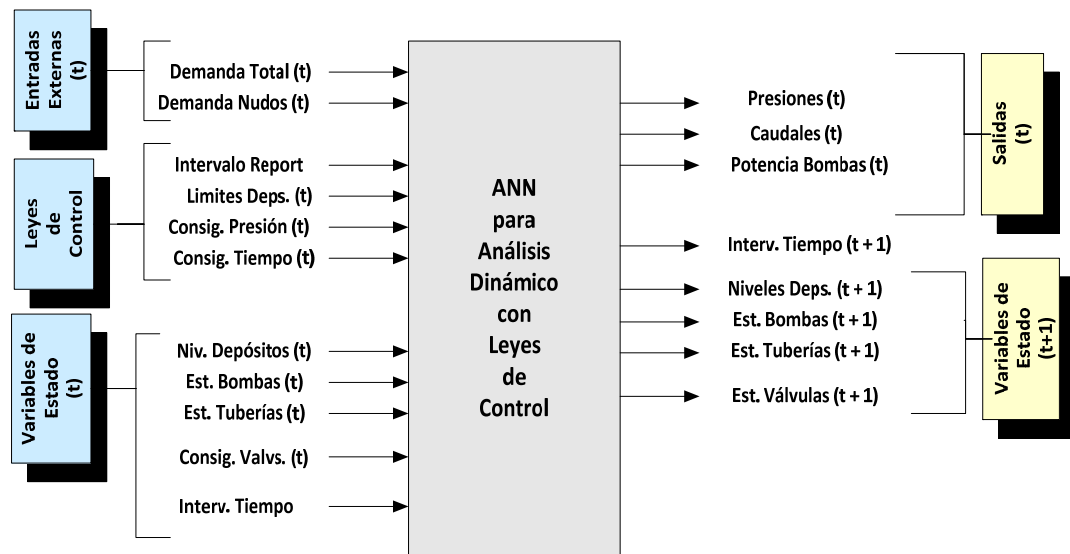


Figura. 4.6. Arquitectura ANN para la simulación en régimen dinámico con leyes de control.

A diferencia de la arquitectura del apartado anterior (Fig. 4.5), en la presente arquitectura ANN (Fig. 4.6) se han añadido las siguientes variables de entrada, las cuales representan las consignas que pueden llegar a modificar la secuencia de los cálculos:

- Límites en depósitos.
- Consignas de presión.
- Consignas de tiempo.
- Intervalo de presentación de resultados (informes).

Como variables de salida, se han añadido nuevas variables que serán utilizadas como variables de entrada para el instante siguiente de tiempo. Dichas variables son las siguientes:

- Intervalo de tiempo (t+1)
- Estado de Bombas en (t+1)
- Estado de Tuberías en (t+1)
- Estado de Válvulas en (t+1)

donde la primera de las nuevas salidas es la que nos fijará el incremento de tiempo para el avance de la simulación, el cual no será fijo en este caso.

4.2.5 Simulación dinámica completa en periodo extendido

Una vez evaluadas las arquitecturas anteriores, el paso siguiente es intentar encadenar el proceso de simulación en el tiempo, con el objetivo de realizar un análisis secuencial del funcionamiento dinámico en periodo extendido de la red de distribución de agua, considerando únicamente la arquitectura ANN previamente entrenada, en este punto el simulador hidráulico ya no será el encargado de realizar los cálculos hidráulicos.

El objeto de este análisis es ir encadenando resultados en el tiempo, es decir, inicialmente se configuran las variables de entrada, ya sean las consignas de control, variables de estado, y valores prefijados de entradas externas. A continuación al procesar el primer instante de tiempo de la simulación, obtendremos los valores de las variables de salida y los resultados actualizados de las variables de estado, que servirán para configurar la entrada de la red neuronal en el siguiente instante de la simulación. De esta manera se irán encadenando los resultados de un instante al siguiente, con el fin de obtener una simulación completa a 24 h, considerando todos los cambios que pueda experimentar la red durante dicho periodo.

A continuación en la Fig. 4.7 se muestra esquemáticamente el proceso de simulación dinámica en periodo extendido:

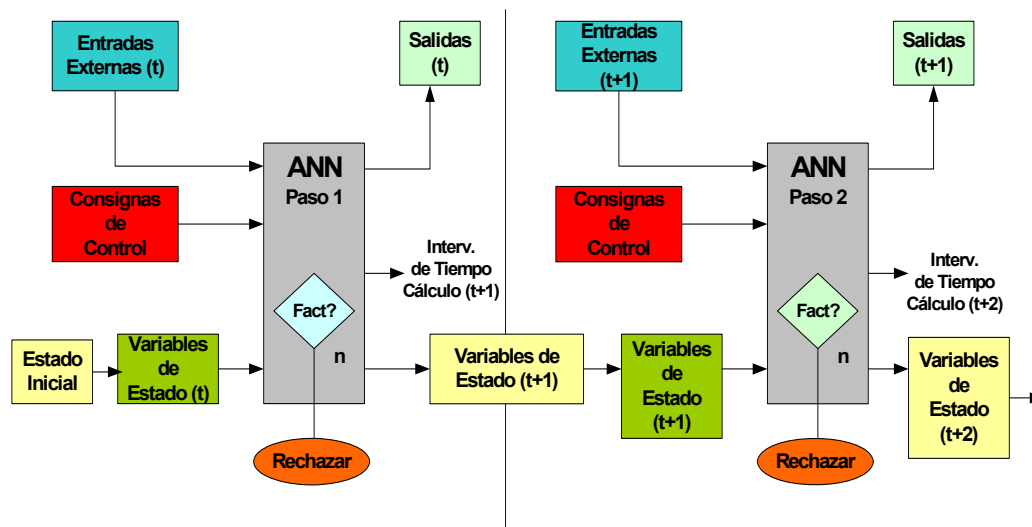


Figura. 4.7. Esquema de simulación dinámica en periodo extendido basado en la secuencia de arquitectura ANN.

4.3 GENERACIÓN DE PATRONES PARA EL ENTRENAMIENTO DE LAS ARQUITECTURAS ANN

Una vez diseñada la arquitectura ANN para un caso particular de estudio, el próximo paso a seguir será confeccionar los patrones de entrenamiento y test para ver si posible predecir los resultados obtenidos por el modelo de simulación hidráulica.

Para ello primeramente, se seguirá una secuencia de pasos a la hora de confeccionar dichos patrones. La manera de obtener dichos patrones se explicará en los sucesivos apartados.

Primeramente se dará una breve descripción de la interfaz de programación que ofrece el software de simulación hidráulica EPANET (Rossman, 2000b), posteriormente se describirán algunos detalles acerca de los parámetros utilizados por el software de entrenamiento de ANNs Nevprop 1.16 (Goodman, 1993) en el Anexo 1, con el objetivo de construir un fichero de entrada con los patrones generados para que pueda ser interpretado por el mismo y finalmente se describirá la aplicación desarrollada para la generación de patrones a 24 horas.

4.4 ESTRUCTURA INTERNA DE LA TOOLKIT DE EPANET. FUNCIONES Y PROCESO GENERAL DE SIMULACIÓN

EPANET (Rossman, 2000a) es un programa que analiza el comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de distribución de agua. En este apartado se describe el módulo de herramientas que incorpora, así como las funciones para obtener y modificar los datos hidráulicos, el formato del fichero de entrada de datos que definen los componentes de una red de distribución de agua se describe con mas detalle en (Rossman, 2000a).

El Módulo de Herramientas (también llamado Toolkit) es una librería de enlace dinámico (DLL) constituida por una serie de funciones que permiten a los desarrolladores personalizar el módulo de cálculo de EPANET (Rossman, 2000b) según sus necesidades. Estas funciones pueden incorporarse en aplicaciones desarrolladas para Windows implementadas en C/C++, Delphi Pascal, Visual Basic, o cualquier otro lenguaje que permita llamadas a funciones integradas en una DLL. El Módulo de Herramientas viene acompañado de algunos ficheros de cabecera, ficheros para la declaración de las funciones, y ficheros de librerías .lib que ayudan a simplificar la tarea de conectar el Módulo de Herramientas de EPANET con el código desarrollado en un compilador específico.

4.4.1 Generalidades del módulo de herramientas

El Módulo de Herramientas es una extensión del programa de simulación hidráulica EPANET. Este programa realiza simulaciones en período extendido (cuasi-estáticas) del comportamiento hidráulico y de la evolución de la calidad del agua en sistemas de distribución de agua a presión. Para garantizar la convergencia del sistema de ecuaciones a resolver en cada instante bajo cualquier circunstancia, EPANET utiliza el método del gradiente (Todini y Pilati, 1987).

EPANET permite realizar un seguimiento de la evolución del caudal en tuberías, la presión en los nudos, el nivel de agua en los depósitos y la concentración de cualquier sustancia química a lo largo de la red, durante un periodo de simulación prolongado. Además también puede determinar los tiempos de permanencia del agua en la red (análisis del envejecimiento del agua) y su procedencia desde las diferentes fuentes de suministro.

El Módulo de Herramientas proporciona una serie de funciones que permiten al programador utilizar el módulo de cálculo hidráulico y de calidad de EPANET en aplicaciones de forma personalizada. Antes de utilizar las herramientas disponibles, el usuario debe familiarizarse con el modo en que EPANET representa una red hidráulica, así como los parámetros de diseño y operación que se requieren para ejecutar una simulación. Esta información puede obtenerse en la ayuda en línea que ofrece el programa EPANET, o bien leyendo el manual del usuario.

La forma típica de trabajar con las funciones que ofrece el módulo de herramientas es la siguiente:

1. Utilizar la función **ENopen** para abrir el módulo de herramientas, así como el fichero de datos de entrada a EPANET.
2. Utilizar la serie de funciones **ENsetxxx** para cambiar las características del sistema deseadas.
3. Ejecutar una simulación hidráulica completa utilizando la función **ENSolveH** (esta función guarda automáticamente los resultados en un fichero de resultados hidráulicos) o bien utilizando la secuencia de funciones **ENOpenH** - **ENinitH** - **ENrunH** - **ENnextH** - **ENcloseH** para llevar a cabo la simulación hidráulica paso a paso, y acceder a los resultados a través de la serie de funciones **ENgetxxx**.
4. Ejecutar una simulación completa del modelo de calidad mediante la función **ENSolveQ** (esta función guarda automáticamente los resultados hidráulicos y de calidad en un fichero de salida) o bien utilizando la secuencia de funciones **ENopenQ** - **ENinitQ** - **ENrunQ** - **ENnextQ** - **ENcloseQ** para ejecutar el modelo de calidad paso a paso, y acceder a los resultados a través de la serie de funciones **ENgetxxx**.
5. Volver al paso 2 para ejecutar nuevos análisis, o bien utilizar la función **ENreport** para guardar un informe de resultados formateado en el fichero de informe de resultados.

6. Llamar a la función **ENclose** para cerrar todos los ficheros y liberar la memoria reservada al efecto.

4.4.2 Software de entrenamiento ANN. Nevprop v1.16

NevProp (Goodman, 1993) fue desarrollado en la Universidad de Nevada para la investigación de modelos biomédicos. Fue diseñado para ser de fácil utilización y ejecutable en múltiples plataformas, soportando gran carga de datos y permite la monitorización de los procesos de entrenamiento.

La descripción de la estructura de fichero de entrada y los parámetros que lo componen, así como algunas particularidades a la hora de construir el fichero de entrada se describen en el Anexo 1.

4.5 DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE PATRONES A 24 HORAS

El procedimiento seguido durante el proceso de entrenamiento de una arquitectura ANN para predecir el comportamiento del modelo hidráulico puede verse en el siguiente esquema (Fig. 4.8):

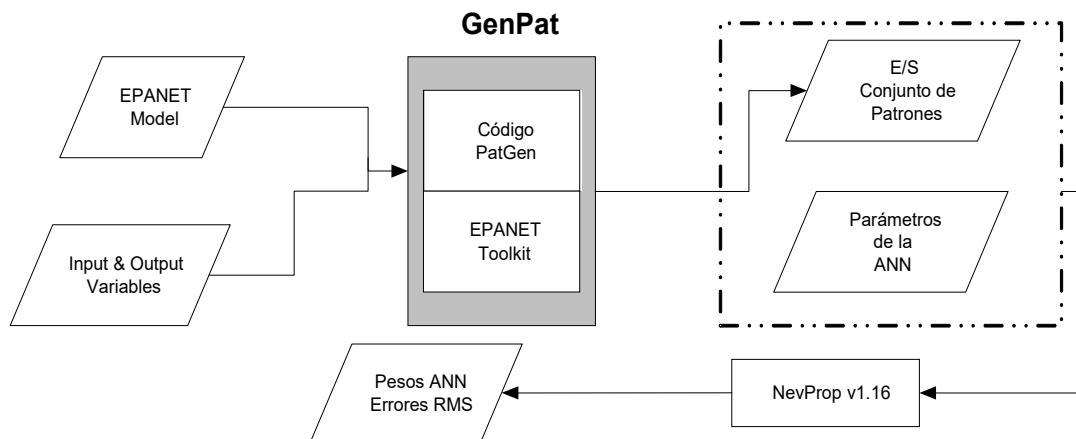


Figura. 4.8. Diagrama del proceso de entrenamiento de la arquitectura ANN.

La parte central de este esquema es el programa Nevprop, el cual se encarga de realizar los procesos de entrenamiento. Las entradas que se necesitan para este proceso son un conjunto de patrones de entrenamiento y otro de test. Además es necesario introducir una serie de parámetros que configuren la arquitectura de la ANN (p. ej: número de neuronas en la capa oculta), y otros parámetros que afectan al algoritmo de entrenamiento (factor de aprendizaje, algoritmo de aprendizaje...).

La entrada de datos al programa Nevprop es mediante un fichero plano de texto con extensión “.net”.

A la hora de automatizar el proceso de generación de un conjunto de patrones de entrenamiento y de test se ha implementado una aplicación llamada “**GenPat**”.

La funcionalidad de este programa es proporcionar valores aleatorios a las variables que se consideran como entradas, y simular el modelo hidráulico en EPANET con estas variables de entrada. Como resultado de cada instante de tiempo, el programa obtendrá un patrón con las entradas y las salidas seleccionadas, el cual será utilizado durante el proceso de entrenamiento. A la hora de simular el modelo hidráulico en EPANET, la aplicación GenPat hace uso de la Toolkit de EPANET

Los parámetros de entrada que se le suministran a GenPat son el fichero del modelo hidráulico y la información correspondiente a las variables de entrada y salida de la arquitectura ANN, concretamente:

- Identificación de las variables que actúan como entradas y cuales corresponden a las salidas.
- Rango de variación de cada variable de entrada, basándose en los datos procedentes del SCADA.

La secuencia de pasos seguidos en la aplicación GenPat se describe a continuación:

1. Lectura del modelo en EPANET. El fichero de EPANET contiene el modelo de la red de distribución de agua. Dicho modelo es leído mediante el uso de funciones de la Toolkit de EPANET.
2. Procesar la información de las entradas y salidas de la arquitectura ANN.
3. Generar un conjunto de patrones con las entradas y salidas que se van a analizar. Esta es la parte central del programa.
4. Normalizar los valores de entrada y salida de los patrones generados en el punto anterior.
5. Guardar los patrones normalizados en un fichero.

La Fig. 4.9 muestra el diagrama de flujo del proceso de generación de los patrones con los valores de las entradas y salidas escogidas para la arquitectura ANN durante el proceso de análisis.

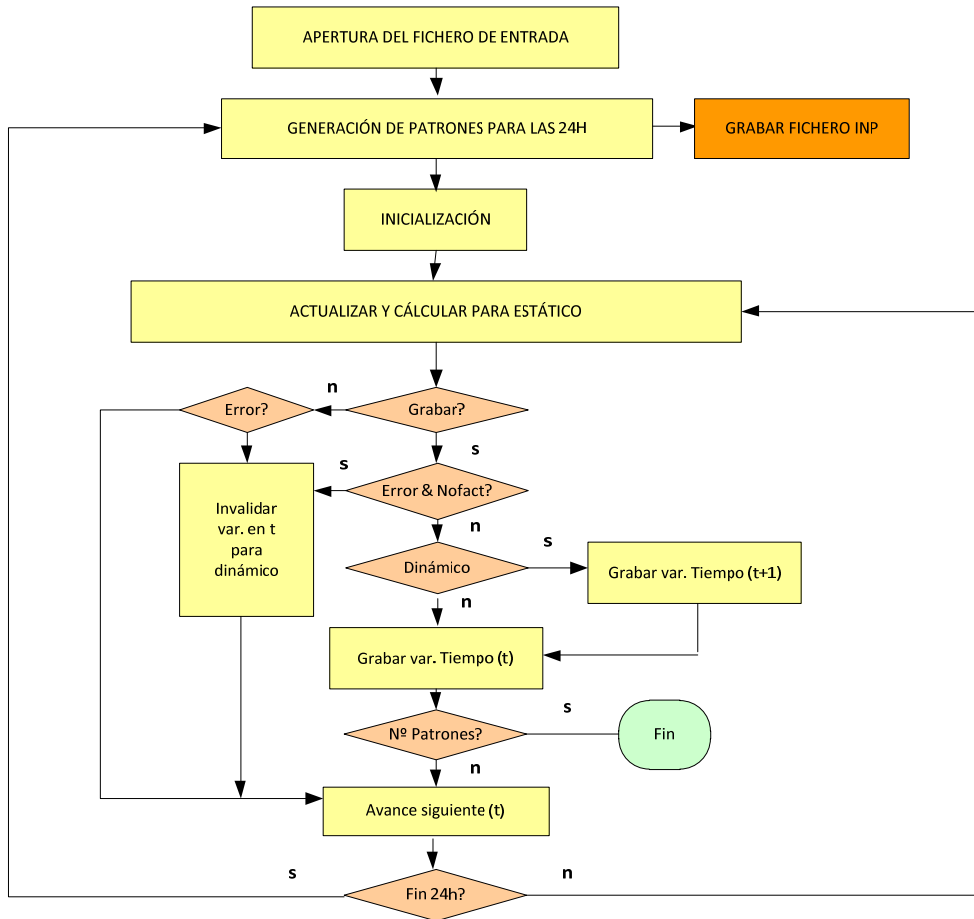


Figura. 4.9. Diagrama de flujo para la generación de patrones de entrenamiento.

4.6 COMPUTACION PARALELA. PARALELIZACION DEL PROCESO DE ENTRENAMIENTO.

Conforme la arquitectura de una ANN crece en complejidad con el número de entradas, nodos en la capa oculta y número de salidas, es necesario confeccionar un gran número de patrones de entrenamiento y test para ajustar los resultados lo más exactos posibles con respecto a los resultados obtenidos mediante la simulación de un modelo matemático. En el transcurso del proceso de entrenamiento, obtener unas tasas de error lo más bajas posibles requiere unos consumos de tiempo de cálculo bastante considerables. Por esta razón es necesario optimizar el proceso de entrenamiento utilizando otras técnicas más eficientes. Llegados a este punto, se han realizado unas modificaciones en la implementación del software de entrenamiento utilizando técnicas de paralelización. En este apartado se hará una breve introducción a la computación paralela, pasando por las distintas arquitecturas paralelas existentes, el modelo de paralelismo adoptado en la implementación del software de entrenamiento y finalmente se describirán los indicadores que evalúan el rendimiento de la paralelización adoptada.

4.6.1 Aspectos generales

La computación paralela o procesamiento en paralelo consiste en acelerar la ejecución de un programa simultáneamente por varias unidades de proceso. Surge así, de forma natural, la idea de la computación paralela, que genéricamente consiste en utilizar n procesadores para multiplicar idealmente por n la velocidad computacional obtenida por un único procesador. Por supuesto, esta es una situación ideal que muy rara vez se consigue en la práctica.

Normalmente, los problemas no pueden dividirse perfectamente en partes totalmente independientes y se necesita, por tanto, una interacción entre ellas que ocasiona una disminución de la velocidad computacional.

En este sentido se habla de mayor o menor grado de paralelismo en la medida en que un algoritmo sea más o menos divisible en partes independientes con igual coste computacional.

Entre las interacciones hay que considerar principalmente las dos siguientes:

- La transferencia de datos.
- La sincronización de los cálculos de los diferentes procesadores

Los multiprocesadores se pueden clasificar de varias formas, atendiendo a diversos criterios. Una importante clasificación (Flynn, 1966) se basa en la posibilidad de procesar uno o más flujos de instrucciones y/o datos. En función del tipo de procesamiento tenemos 4 grupos:

- **SSID (Simple Instruction, Simple Data)**. Un flujo simple de instrucciones opera sobre un flujo simple de datos, este es el modelo clásico de von Neumann.

- **SIMD (Simple Instruction Multiple Data)**. Un flujo simple de instrucciones opera sobre múltiples flujos de datos. Todos los procesadores ejecutan la misma instrucción aunque sobre distintos datos. A este tipo pertenecen fundamentalmente los procesadores matriciales. Este tipo de multiprocesadores pueden ser de memoria compartida o de memoria distribuida.
- **MIMD (Multiple Instruction Multiple Data)**. Cada procesador ejecuta su propio código sobre datos distintos a los de otros procesadores. A este tipo corresponden los multiprocesadores paralelos.
- **MIMD (Multiple Instruction Multiple Data)**. Es equivalente al tipo **SSID**.

4.6.2 Modelo de paso de mensajes

Dentro de los modelos computacionales (Kumar et al. 1994) el modelo de programación paralela por paso de mensajes es el más utilizado en la actualidad. Algunas características fundamentales son:

- Está formado por tareas, que encapsulan datos locales.
- Cada tarea es identificada por un único nombre.
- Las tareas interactúan entre sí mediante el envío y recepción de mensajes.
- Este modelo es distinto al de Tarea/Canal sólo en el mecanismo de transferencia de mensajes. En vez de enviar un mensaje por el canal x se envía el mensaje a la tarea y.
- El modelo no impide que las tareas creen otras tareas dinámicamente.
- El sistema se dice que implementa MIMD, las tareas ejecutan distintos programas sobre distintos datos.

Por lo general se utiliza el modelo SIMD, en donde el sistema crea un número fijo de tareas iguales y no se permite la creación y terminación dinámica.

Algunos de los aspectos importantes a tener en cuenta en este modelo son:

- **Tareas y Canales:** Son modelos simples que permiten trabajar sobre el modelo de multicomputador. El conjunto de tareas y canales representan un proceso de cálculo. Cada tarea encapsula su propio programa y dispone de una memoria local e interfaces de comunicación. Un canal está representado por una cola de mensajes que permite comunicar tareas. La tarea emisora pone un mensaje en la cola y la tarea receptora se bloquea hasta que el mensaje llegue. Las tareas pueden a su vez crear otras tareas y finalmente deben terminar. Los canales pueden ser creados o borrados, por lo tanto la conectividad entre tareas puede variar dinámicamente. Las tareas pueden ser proyectadas en un mismo o múltiple procesador. Se puede concluir que la abstracción de la tarea proporciona un mecanismo de localidad de los datos, mientras que la abstracción de canal proporciona un mecanismo que indica que el cálculo de una tarea necesita un medio de comunicación para enviar y recibir el resultado de ese proceso.

- **Modos de operación:** Un cálculo puede estar formado por una o más tareas, las cuales se ejecutan concurrentemente. El número de tareas puede variar durante su ejecución. Una tarea puede realizar cuatro operaciones básicas, enviar mensajes, recibir mensajes, crear nuevas tareas y terminar. La operación de envío es asíncrona mientras que la de recepción es síncrona.
- **Modelo de paralelismo de datos:** Explota la concurrencia que proviene de las aplicaciones, donde se puede aplicar la misma operación para múltiples elementos de una estructura de datos.
- **Modelo de memoria compartida:** Las tareas comparten un espacio común de memoria. Se utilizan un mecanismo de tipo semáforos (Kumar et al. 1994) para el control de accesos a la memoria compartida.

Una de las librerías de programación que implementa el modelo de paso de mensajes utilizada en la presente tesis ha sido la librería MPI (Snir, 1998).

Entre los objetivos de la librería MPI es desarrollar un estándar para ser ampliamente utilizado, que permita escribir programas usando paso de mensajes. Por lo tanto, la interfaz debería establecer un estándar práctico, portable, eficiente y flexible.

A continuación se presentan los objetivos de MPI:

- Diseñar una API (Application Programming Interface).
- Hacer eficiente la comunicación.
- Permitir que las aplicaciones puedan usarse en ambientes heterogéneos.
- Soportar conexiones de la interfaz con C y Fortran 77, con una semántica independiente del lenguaje.
- Proveer una interfaz de comunicación confiable.
- No diferir significativamente de algunas implementaciones tales como PVM (Geist, 1994).
- Definir una interfaz programable en diferentes plataformas sin tener que hacer cambios significativos.

4.6.3 Parametros de rendimiento

En este apartado se describen los parámetros que se utilizan a la hora de medir el rendimiento de un algoritmo paralelo para ver si realmente se obtiene o no una mejora comparable con la implementación existente del algoritmo secuencial del que se parte.

Los parámetros que evalúan el rendimiento de un algoritmo paralelo son los siguientes (Hennessy y Patterson, 1995):

- **Speedup** : Un parámetro relativo de rendimiento entre un sistema multiprocesador y un sistema de un único procesador es el speedup, definido como:

$$S(n) = \frac{\text{Tiempo de ejecución usado por un procesador}}{\text{Tiempo de ejecución usado por } n \text{ procesadores}} = \frac{t_s}{t_p}$$

El parámetro $S(n)$ proporciona un valor de incremento de velocidad usando un sistema multiprocesador.

Para comparar un algoritmo paralelo frente a uno secuencial, utilizaremos el algoritmo secuencial más rápido ejecutado sobre un único procesador. El algoritmo paralelo resultante normalmente tiene una implementación diferente a la secuencial.

También podemos expresar $S(n)$ en términos de pasos de cálculo:

$$S(n) = \frac{\text{Número de pasos de cómputo usando un procesador}}{\text{Número de pasos de cómputo usando } n \text{ procesador}}$$

El máximo speedup es n con n procesadores. Si el algoritmo paralelo obtiene un tiempo mejor que n con respecto al speedup del algoritmo secuencial en cuestión, el algoritmo paralelo puede ser emulado por un sistema de un único procesador, lo que deriva que el algoritmo secuencial inicial no es óptimo.

El speedup máximo de n se obtiene cuando el cómputo se puede dividir de forma equitativa entre todos los procesos, es decir, un proceso ejecutándose por cada procesador siendo:

$$S(n) = \frac{t_s}{t_p / n} = n$$

- **Overhead**: Todas las causas que desencadenan una eficiencia no óptima de un sistema paralelo son referidas como el overhead debido a un procesamiento en paralelo.

Definimos el **overhead total** o **función overhead** de un sistema paralelo como la parte del coste que no es contemplado por el algoritmo óptimo secuencial sobre un computador monoprocesador. Es el tiempo total adicional consumido por todos los procesadores que se requiere para resolver el mismo problema que el mejor algoritmo secuencial ejecutado sobre un solo procesador.

Denotaremos la función overhead de un sistema paralelo mediante T_0 . Es una función de tamaño W y de número de procesadores p , se suele escribir como $T_o(W, p)$.

El coste de resolver un problema de tamaño W sobre p procesadores, o la suma del tiempo total consumido por todos los procesadores, es pT_p . El valor obtenido por W es el tiempo

consumido para realizar el proceso, y el resto es el overhead. Por consiguiente, la relación entre el coste (pT_p), el tamaño del problema (W), y la función de overhead está dada por:

$$T_o = pT_p - W$$

Existen varios factores que contribuyen al overhead en la versión paralela y que limitan el speedup notablemente:

- Periodos donde no todos los procesadores están realizando cálculos y simplemente están pasivos.
- Operaciones o cálculos extra que en el algoritmo secuencial no aparecían.
- Tiempo de comunicación para envío de mensajes.

▪ **Ley de Amdahl:** Asumiendo que habrán algunas partes que solo pueden ser ejecutadas por un solo procesador, la situación ideal sería que todos los procesadores realizaran operaciones para otros instantes de tiempo. Si la fracción de tiempo de cálculo que no puede ser dividida en tareas concurrentes es f , y no hay overhead que afecte cuando los procesos son divididos en partes concurrentes, el tiempo de ejecución de un proceso con n procesadores está dado por $ft_s + (1 - f)t_s / n$. Por consiguiente el factor del speedup viene dado por:

$$S(n) = \frac{t_s}{ft_s + (1 - f)t_s / n} = \frac{n}{1 + (n - 1)f}$$

Para el caso de que el número de procesadores fuese lo suficientemente grande la expresión anterior quedaría de la manera siguiente:

$$S(n) \underset{n \rightarrow \infty}{=} \frac{1}{f}$$

, siendo $1/f$ el máximo speedup que puede obtenerse.

▪ **Eficiencia:** La eficiencia del sistema se define como:

$$E = \frac{\text{Tiempo de ejecución usado por un procesador}}{\text{Tiempo de ejecución usado por un multiprocesador } \times \text{numero de procesadores}}$$

$$= \frac{t_s}{t_p \times n}$$

por tanto llegamos a:

$$E = \frac{S(n)}{n} \times 100\%$$

La eficiencia proporciona la fracción de tiempo en la cual los procesadores se están utilizando para realizar algún tipo de cálculo. Por ejemplo, Si $E = 50 \%$ significará que los procesadores se están utilizando la mitad del tiempo. La eficiencia máxima del 100% tiene lugar cuando todos los procesadores están siendo utilizados para el cálculo todo el tiempo y el **speedup** fuese n .

- **Coste:** El tiempo del procesador o el coste del cálculo se define como:

$$\text{Coste} = (\text{Tiempo de ejecución}) \times (\text{Numero total de procesador es utilizados})$$

El coste de un cálculo secuencial es el tiempo de ejecución t_s , mientras que el de un cálculo paralelo es $t_p \times n$. El tiempo de ejecución paralelo t_p viene expresado de la forma $t_s / S(n)$.

Por lo tanto, el coste de un algoritmo paralelo se define como:

$$\text{Coste} = \frac{t_s n}{S(n)} = \frac{t_s}{E}$$

- **Escalabilidad:** La escalabilidad es a veces un término un poco impreciso en su definición. Suele utilizarse en ocasiones para indicar que un diseño hardware puede ser incrementado en tamaño y pueda así obtener unas mejores prestaciones. Esto puede describirse como arquitectura o hardware escalable.

También suele utilizarse para indicar que un algoritmo paralelo puede adaptarse a un incremento del volumen de datos con un incremento bajo y acotado de pasos de cómputo. Esto puede describirse como escalabilidad algorítmica.

La escalabilidad de un sistema paralelo es una medida de su capacidad para incrementar el **speedup** en proporción al número de procesadores. Es un parámetro que refleja la capacidad de un sistema paralelo de incrementar el procesado de la información de manera eficiente.

4.6.4 Paralelización del software de entrenamiento

En este apartado se describen las mejoras a nivel de implementación realizadas en el software de entrenamiento de las distintas arquitecturas ANN propuestas.

Inicialmente se parte de una implementación secuencial cuyo coste temporal crece a medida que los parámetros de la ANN se incrementan sustancialmente. Para optimizar este coste temporal se opta por la alternativa de implementar una versión paralela del mismo, dicha tarea será un poco tediosa debido a la naturaleza del algoritmo y de su implementación en sí, debido a que muchas variables utilizadas en su codificación son globales y la mayoría de funciones no utilizan paso de parámetros.

De esta manera antes de pasar a una implementación paralela, tendremos que realizar una serie de modificaciones en el código secuencial que faciliten dicha codificación paralela, los detalles de dichas modificaciones caen fuera de los objetivos de la presente tesis.

4.6.4.1 Algoritmo secuencial del proceso de entrenamiento de una ANN

El software utilizado para el proceso de entrenamiento de la ANN ha sido Nevprop v1.16 como ya se describió brevemente en el apartado 4.4.2. En la Fig. 4.10 se muestra la secuencia de pasos realizados por el algoritmo secuencial durante el proceso de entrenamiento de una ANN realizada por el software NevProp.

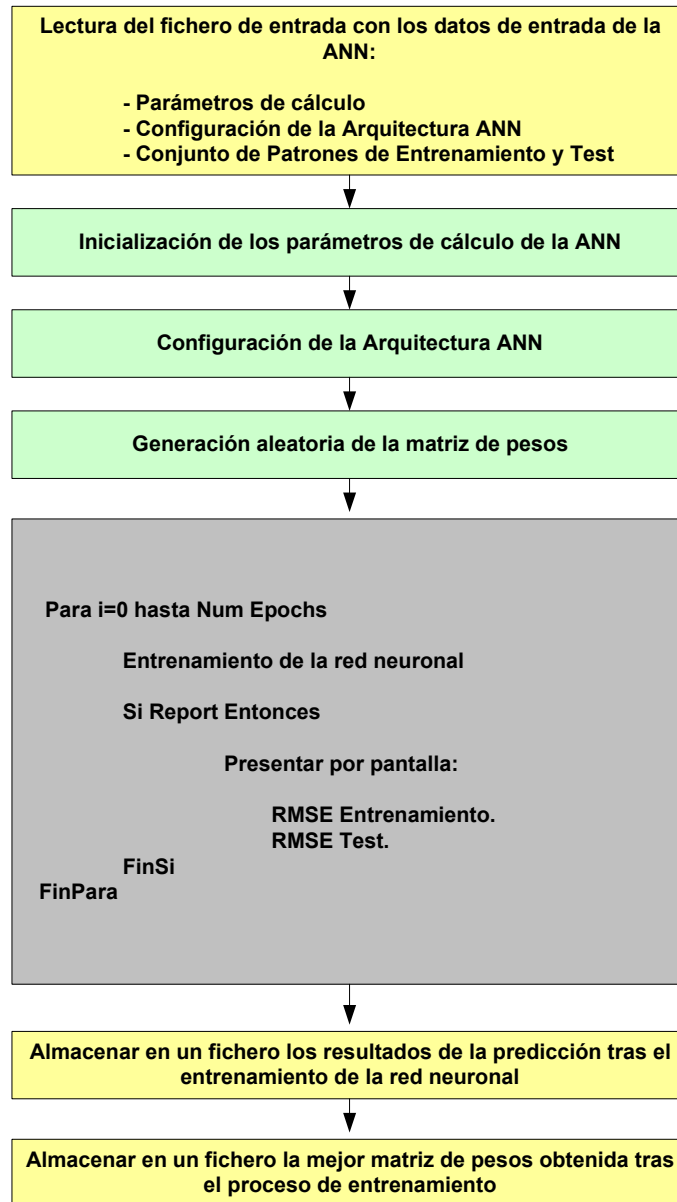


Figura. 4.10. Algoritmo de entrenamiento secuencial

4.6.4.2 Paralelización del algoritmo de entrenamiento

El objetivo de este apartado es describir la técnica que se ha empleado para paralelizar el algoritmo de entrenamiento con tal de reducir los costes temporales de entrenamiento de una ANN determinada en función de la variación de la configuración de sus parámetros. Como se ha podido experimentar a lo largo de los entrenamientos realizados, el coste temporal durante el proceso de aprendizaje de la ANN aumenta en función de una serie de parámetros. Fundamentalmente, cuando el número de nodos en la capa oculta y el número de patrones de entrenamiento y de test crecen, los tiempos de simulación son bastante altos.

Para la implementación paralela de Nevprop se ha empleado el interfaz de paso de mensajes MPI sobre un cluster Linux y como protocolo de comunicaciones se ha utilizado TCP/IP.

El cluster funciona bajo Linux y está formado por 12 nodos (IBM xSeries 330 SMP), de los cuales uno se utiliza como *front end*, y los 11 restantes son únicamente de cálculo.

En primer lugar, como se ha dicho en el apartado anterior, se ha tenido que realizar alguna reestructuración en la implementación secuencial del software Nevprop. A la hora de implementar la versión paralela del software se ha tenido que reestructurar cada función del código fuente para que tuviese disponible durante su ejecución los datos necesarios para el cálculo y eliminar en cierta manera la globalidad en la declaración de variables internas como existía en la versión inicial del programa.

Una vez realizada la reestructuración de la localidad de las variables y la parametrización de las funciones, el paso siguiente ha sido verificar que el proceso de entrenamiento llegaba a los mismos resultados que los obtenidos con la implementación inicial.

Una vez realizadas esta serie de comprobaciones ya se pasó al posterior análisis e implementación de la versión paralela del programa.

La primera fase de la paralelización del proceso fue identificar que partes del código se podían ejecutar de forma simultánea sin que el resultado producido afectara a otras partes del proceso de cálculo. Una vez analizada esta parte, seguidamente fue determinar el coste temporal que suponía realizar esos cálculos en función del tamaño de datos de entrada que tenía el proceso de entrenamiento.

En este punto se llegó a la conclusión de que cuando la arquitectura tomaba cierta envergadura y el conjunto de patrones era considerable, los tiempos de cálculo eran bastante elevados, por lo que había de alguna manera particionar el conjunto de patrones de entrenamiento.

Llegados a este punto, había que tomar una decisión acerca de la estrategia a seguir. Existen diversas estrategias a la hora de paralelizar el proceso de entrenamiento de una ANN.

Las estrategias que se plantean fueron las siguientes:

- Paralelización a nivel de capas
- Paralelización a nivel de ANN
- Paralelización del conjunto de patrones de entrenamiento.

El primer tipo de paralelización tiene el problema de que no es escalable, debido a que cada capa es asignada a un procesador, más dos procesadores que se destinan a la actualización para cada capa, suponiendo en nuestro caso con una configuración de tres capas para la ANN (entradas-capa oculta-salidas). Por lo tanto este tipo de paralelización puede alcanzar mejoras que difieran poco respecto a la implementación secuencial cuando hablamos de coste temporal, porque gran parte del tiempo se invierte en comunicaciones.

Ya cuando trata de una paralelización a nivel de ANN, la idea es dividir la ANN completa en subredes, las cuales estarán en cada uno de los procesadores que constituyen la arquitectura del cluster. Pero en el caso de estudio que se está analizando no se necesitan configuraciones de ANN demasiado complejas para realizar este tipo de paralelización. Aparte cabe añadir la problemática que cada subred no puede operar de forma autónoma. Por ejemplo en la fase hacia delante, cada nodo de la capa de salida precisa conocer la salida de toda la capa oculta y no sólo de la parte correspondiente a su subred. Lo mismo se puede decir de una neurona de la capa oculta hacia atrás. Por lo que en estos casos afectarán como en el caso anterior los tiempos de comunicación frente a los tiempos de cálculo, perjudicando así los tiempos totales de cálculo del proceso de entrenamiento.

Finalmente, en la paralelización por conjunto de patrones, cada procesador tiene la arquitectura completa de la red neuronal y una porción del conjunto de patrones de entrenamiento y de test, por lo tanto cada procesador realiza las fases de entrenamiento hacia delante y hacia atrás, y calcula la proporción de error respecto al valor real de la salida. Posteriormente cada procesador envía los errores obtenidos, y es el procesador maestro quien calculará el error total y la actualización de los pesos. Por lo tanto la única comunicación en el proceso iterativo de entrenamiento que habrá a grandes rasgos entre el procesador maestro y los demás procesadores esclavos será, el del envío de la matriz de pesos actualizada por parte del nodo maestro a los demás nodos esclavos, y la de los procesadores esclavos al realizar el entrenamiento que enviarán al nodo maestro los errores obtenidos tras el cálculo de una iteración determinada.

Por lo tanto, se tomó la decisión de paralelizar el código secuencial a nivel de conjunto de patrones de entrenamiento y de test.

En cierta manera la filosofía de la programación paralela se basa en distribuir el trabajo entre varios procesadores con tal de obtener tasas de tiempo inferiores a las que daría el mismo programa en una implementación secuencial. Para ello debe existir un nodo que haga de maestro (master) que es el que se encargue de centralizar las tareas que realizarán los demás procesadores, que llamaremos esclavos (slaves) o subprocesos, organizar de alguna manera los datos de los resultados parciales, almacenarlos o mostrarlos en algún dispositivo de salida.

Por ello, en el caso que se está describiendo, se tendrá que determinar que tareas o procesos de cálculo son los que realizará el nodo maestro y cuáles serán las subtareas que realizarán los nodos esclavos.

Pero cabe añadir, que debe existir un medio de comunicación por el cual los nodos esclavos se comuniquen con el nodo maestro para irle enviando los resultados de los cálculos parciales que vayan realizando, para ello emplearemos el modelo de comunicación por paso de mensajes, concretamente el estándar MPI para la implementación del código.

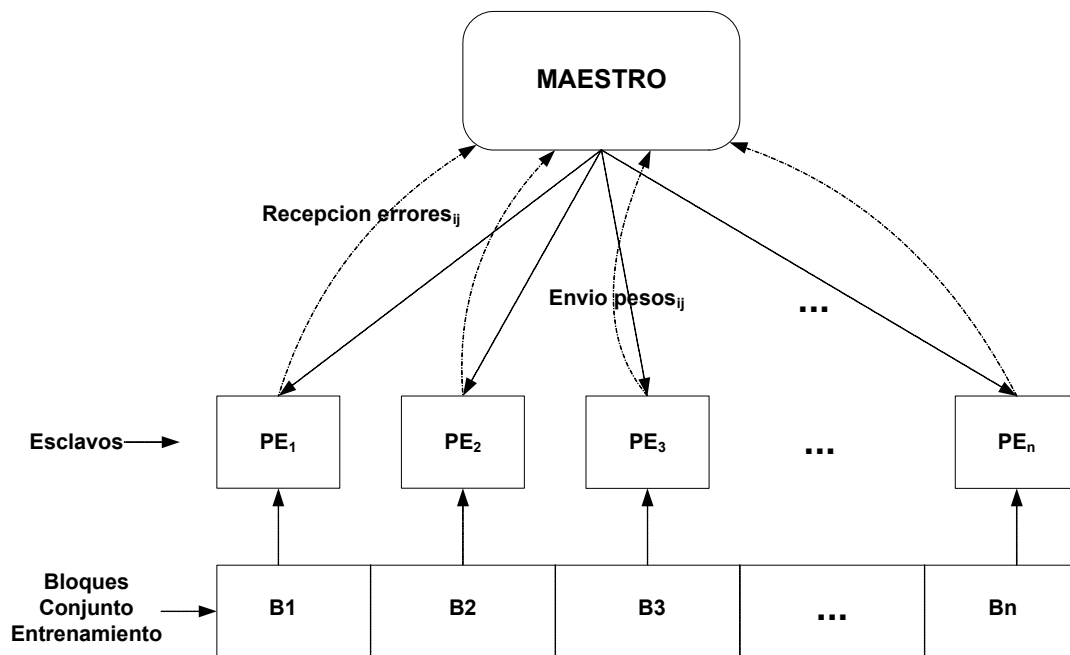


Figura. 4.11. Paralelización del algoritmo de entrenamiento.

Una vez hecha esta breve introducción de los pasos a llevar a cabo, se pasará a detallar el conjunto de secuencias de proceso realizadas por el nodo maestro y cada uno de los nodos esclavos conforme se muestra en la Fig. 4.11.

Los cálculos que realiza el nodo maestro se describen a continuación:

- Primeramente se deben cargar los datos de los parámetros que afectan al proceso de entrenamiento, ya sean la configuración de la arquitectura de la ANN, el conjunto de patrones y los parámetros necesarios para el algoritmo de aprendizaje.
- Seguidamente todos estos datos deben ser transmitidos a los sucesivos nodos esclavos.

- Denotar que cada nodo recibirá los rangos de las particiones del conjunto de patrones con las que debe operar.

A partir de este punto entraríamos en un proceso iterativo de aprendizaje con tal de reducir el error en la predicción de los datos de salida de la ANN. La secuencia de cálculos que se realizarán en cada iteración son las que enumeran a continuación:

- Al inicio de cada epoch (iteración) los nuevos valores de los pesos son difundidos a todos los nodos esclavos.
- Cada nodo esclavo realizará el entrenamiento con la porción de datos determinada previamente para esta epoch.
- Una vez que cada nodo esclavo realiza el proceso entrenamiento para ese conjunto de patrones, finalmente generará un conjunto de errores que enviará al nodo maestro el cual acumulará estos errores.
- El nodo maestro calcula el nuevo valor de los pesos para la próxima epoch.

Con una cierta frecuencia preestablecida en función del número de epochs establecido por el usuario, el nodo master presentará por pantalla la evolución del proceso de aprendizaje, mostrando los errores que se van alcanzan cada cierto periodo.

Este proceso continua hasta que hay suficientes epochs para que el proceso de entrenamiento se pueda completar.

En la Fig. 4.12 se muestra un diagrama de bloques de las fases de ejecución que se realizan en el nodo maestro:

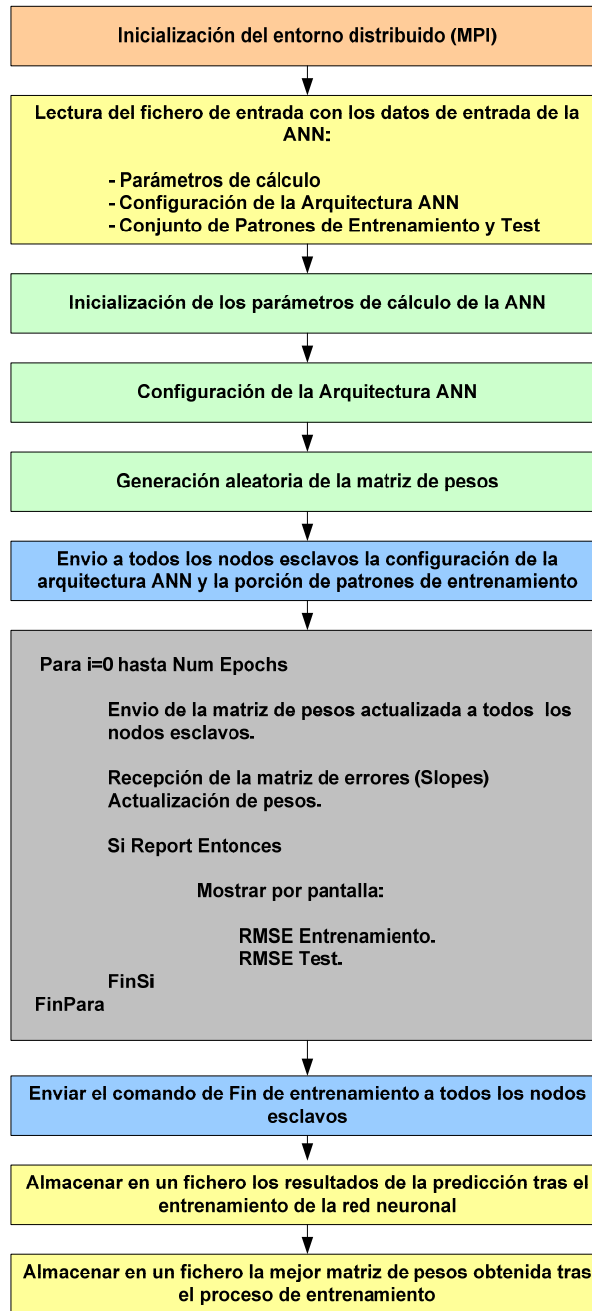


Figura. 4.12. Diagrama de flujo de procedimientos del nodo maestro

Por otra parte, los cálculos que se realizan en cada nodo esclavo se describen a continuación:

- Cada nodo esclavo inicialmente recibe los datos de la arquitectura ANN y los parámetros necesarios para el proceso de entrenamiento.
- Recepción del conjunto de patrones de entrenamiento.
- Recibe un mensaje conteniendo la actualización de los pesos.
- Utiliza los rangos del conjunto de patrones con los que debe realizar los entrenamientos.
- Entrena la red neuronal para ese conjunto de patrones.
- Envía el conjunto de errores generados tras el proceso de entrenamiento.

En la Fig. 4.13 se muestra el diagrama de bloques de cada una de las fases de ejecución realizadas por cada nodo esclavo durante el proceso de entrenamiento:

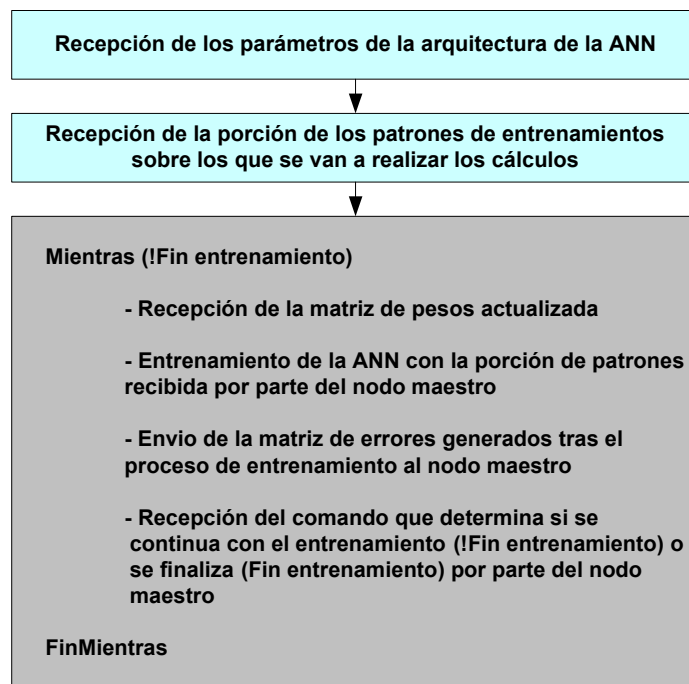


Figura. 4.13. Diagrama de bloques de las fases de ejecución de cada nodo esclavo

CAPÍTULO 5. MODELO DE PREVISIÓN DE LA DEMANDA

5.1 MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE LA DEMANDA

Son muchas las metodologías aplicadas en la literatura para efectuar la predicción de la demanda de un abastecimiento a corto plazo, a partir de los datos históricos. Entre ellas destacamos:

- Los métodos que aplican técnicas de suavizado o de alisamiento, como el alisamiento exponencial, el cual pondera los términos del pasado utilizando coeficientes que siguen por ejemplo una progresión geométrica. Se emplean sobre todo para predecir tendencias en procesos no estacionarios. Las demandas de una población, sin embargo, no muestran una variación basada en tendencias, sino que más bien siguen unos patrones que se suelen repetir a lo largo del año, lo que reduce la utilidad de estos métodos para predecir tan solo el futuro más inmediato
- Los métodos basados en la construcción de series temporales, considerando éstas como procesos autorregresivos, de medias móviles o una combinación de ambas, también conocidos como procesos ARMA (Box et. al. 1994). El alcance de la previsión de estos modelos es mayor que los anteriores, si bien un requisito para identificar un proceso aleatorio como un modelo ARMA es que éste sea estacionario. Las demandas de un abastecimiento no son estacionarias, aunque pueden transformarse en estacionarias identificando previamente la parte integral si existe (procesos ARIMA), pero sobretodo, identificando la parte estacional, muy presente en las curvas de demanda observadas de una población. La estacionalidad de las demandas es básicamente diaria, semanal y anual. Sin embargo, la identificación de los coeficientes de un proceso estacional, cuyo número aumenta considerablemente al crecer el número de ciclos, tiene en este caso un alto coste computacional; además para la predicción se requiere utilizar valores del pasado a largo plazo, lo cual no favorece la rapidez de cálculo para predicciones en tiempo real.
- Los métodos basados en el entrenamiento de redes neuronales (ANN), cuyas variables en entrada se identifican con los valores pasados que más influencia tienen sobre los correspondientes valores futuros. En el caso de la predicción de la demanda suelen tenerse en cuenta los valores de ésta en las horas anteriores, en las horas similares del día anterior, o en días similares de semanas anteriores. La ventaja de las redes neuronales es que permiten predecir el comportamiento de la demanda, asumiendo que su dependencia con las variables de entrada fuera no lineal. Su principal desventaja es el alto coste computacional que supone el entrenamiento de la ANN (tanto más cuanto mayor sea el número de entradas consideradas), cuyos parámetros de ponderación pueden quedar desfasados en poco tiempo. Como en el caso de los procesos ARIMA,

para la predicción se requiere también hacer uso de valores del pasado a largo plazo, lo que ralentiza el proceso de cálculo.

- Los métodos basados en la confección de patrones, que permitan identificar con bastante aproximación la variabilidad de la demanda con las horas del día, con el día de la semana, o con la estación del año. La mayor dificultad de este método es saber elegir los días y horas más adecuadas para confeccionar cada patrón, o lo que es lo mismo, determinar cuántos patrones son identificables y en qué casos se aplican los mismos. Asimismo es relevante saber diferenciar el nivel de agregación de las demandas en cada caso, pues nada tienen que ver la variación de las demandas medias horarias con la de las demandas medias diarias o semanales.
- Los métodos basados en modelos de intervención que permiten tener en cuenta el efecto de fenómenos puntuales, como periodos festivos o ciertos acontecimientos sobre el valor de la demanda. Estos métodos son normalmente complementarios de los anteriores, por lo que cabe considerarlos en una última fase de refinamiento.

5.2 METODOLOGÍA APLICADA

Ante la diversidad de los métodos analizados, se ha decidido aplicar en la presente tesis una técnica basada en la identificación previa de patrones, sobre los que a continuación se superpone una componente estocástica predecible hasta cierto punto mediante un proceso ARIMA, a cuyo fin se asume que dicha componente se comporta como una serie temporal estacionaria.

El objetivo fundamental de esta parte del optimizador, es predecir la demanda futura a 24 horas con la mayor precisión, y al propio tiempo, utilizando el menor tiempo de cálculo posible. Para la técnica elegida los patrones pueden confeccionarse de una sola vez para todo un año, o bien revisarse a medida que se dispone de nuevos datos. Al restar de los valores reales observados los patrones previamente identificados, se obtiene una componente variacional apenas influenciada por los valores del pasado a largo plazo, de modo que es posible predecir dicha componente con buena aproximación utilizando solo los datos más recientes, lo que resulta altamente deseable para un proceso que debe operar en tiempo real

Para la confección de los diferentes patrones cabe aplicar distintos niveles de agregación. Así, para predecir las variaciones estacionales de la demanda, o bien su variación a lo largo de una semana para poner de manifiesto el efecto de sábados y domingos, lo más conveniente es trabajar con las demandas medias diarias. Si además consideramos la demanda total compuesta por la agregación de varios componentes, la identificación de los distintos patrones resulta más fácil y fiable. Una vez predicha la demanda diaria, para la predicción de la demanda horaria conviene ahora utilizar patrones de base horaria, a superponer sobre la media diaria.

Identificar patrones supone agrupar eventos semejantes, y a continuación establecer medias sobre ellos. Así por ejemplo, podemos considerar un cierto número de semanas consecutivas

para calcular a continuación la demanda media de un día determinado de la semana. Siguiendo esta misma pauta, para obtener patrones de variación de la demanda estacional, sería necesario considerar las demandas de días similares a lo largo de varios años. Pero ello exigiría un alto coste computacional, además de disponer de una larga serie de datos históricos. Por ello, una estrategia alternativa que puede dar buen resultado es descomponer la variación de la demanda a lo largo del último año, asumiendo que ésta fuera cíclica, en una serie de Fourier, y a continuación extraer los armónicos más relevantes que permite reproducir con cierta bondad las fluctuaciones de la demanda a lo largo del año. Al restar esta componente de la demanda total se obtendrá un proceso más estacionario, sobre el cual resultará ahora más fácil y fiable identificar las variaciones de la demanda debidas exclusivamente al ciclo semanal.

La técnica que vamos a seguir en esta tesis, acorde con los principios expuestos, fue propuesta por Alvisi et al. (2007) para ser incorporada en el proyecto POWADIMA, origen de la presente tesis como ya se ha comentado.

A continuación se describe con mayor detalle el procedimiento aplicado para efectuar la previsión de la demanda a 24 horas, ya sea para la totalidad del abastecimiento, o bien para los diferentes sectores de demanda identificados. Ni qué decir tiene, que a mayor población abastecida, mayor precisión se obtendrá al efectuar las previsiones, para cualquiera de los métodos descritos.

El método adoptado se compone de dos módulos (Fig. 5.1). En el primer módulo se estima la demanda media diaria para el día siguiente, para lo cual se tienen en cuenta los patrones estacionales y semanales, además de una componente persistente que tiene en cuenta las desviaciones a corto plazo, estimada mediante un proceso AR(1). En el segundo módulo, a la demanda media diaria prevista, se le superpone el patrón de demanda horaria correspondiente, más una nueva componente persistente que tiene en cuenta las desviaciones horarias a corto plazo, estimada en este caso mediante un proceso AR(24)x(1) para tener en cuenta la mayor fluctuación de la demanda horaria. Ello se resume en el diagrama adjunto.

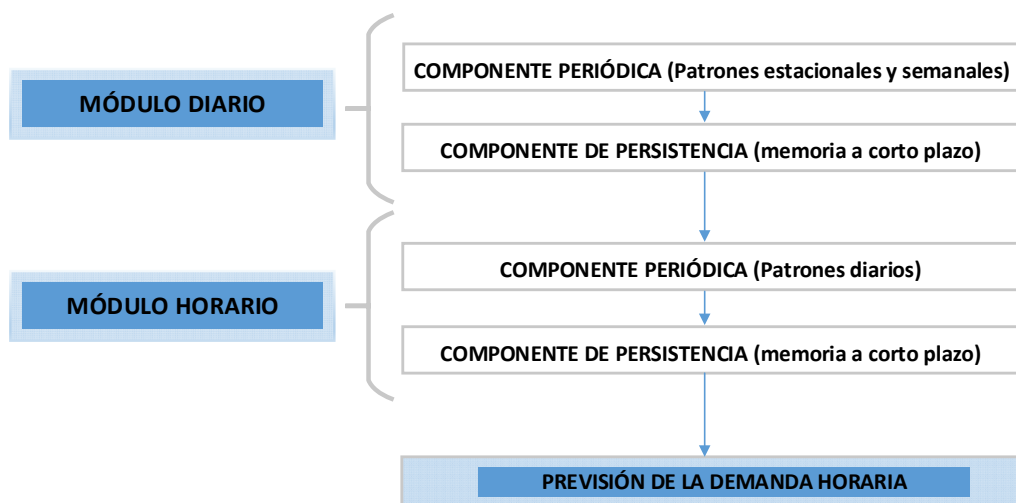


Figura. 5.1. Estructura de módulos del modelo de previsión de demanda (Alvisi et al. 2007)

A la hora de definir el modelo de previsión de la demanda mediante series temporales, se tienen que tener en cuenta las componentes periódicas de cada uno de los módulos por un lado, y la componente estocástica por otro. En el siguiente apartado se describe la formulación de cada uno de los componentes que intervienen en el modelo de previsión.

5.3 FORMULACIÓN DE LOS COMPONENTES PERIÓDICOS DE LA DEMANDA

En el modulo de previsión diaria y horaria se definen primeramente unos componentes periódicos, cuya formulación se describe a continuación.

▪ Componente periódica diaria

El patrón de la demanda de agua media diaria a largo plazo $\overline{Q}_d^{D,S}$ es modelado a partir de la descomposición en series de Fourier de los datos observados a lo largo del último año:

$$\overline{Q}_d^{D,S} = \overline{Q} + \sum_{k=1}^k \left[a_k \cos \frac{2\pi k}{365} d + b_k \sin \frac{2\pi k}{365} d \right] \quad (\text{Ec. 5.1})$$

, donde $d = 1, 2, \dots, 365$ hace referencia al día juliano del año, \overline{Q} es el valor medio del ciclo estacional, k es el número de armónicos considerados, y a_k y b_k son los coeficientes de Fourier que se calculan como:

$$a_k = \frac{2}{365} \sum_{d=1}^{365} \overline{Q}_d^{D,obs} \cos \frac{2\pi d}{365} k \quad (\text{Ec. 5.2})$$

$$b_k = \frac{2}{365} \sum_{d=1}^{365} \overline{Q}_d^{D,obs} \sin \frac{2\pi d}{365} k \quad (\text{Ec. 5.3})$$

, siendo $\overline{Q}_d^{D,obs}$ el valor medio diario observado para la demanda de agua.

▪ Componente periódica semanal

El patrón semanal diario de los componentes determinísticos de la demanda o consumo de agua esta basado en un conjunto de términos de corrección semanales que representan la parte periódica semanal $\overline{\Delta}_{i,j}^{D,W}$ para cada día de la semana. Puesto que los patrones semanales se ven afectados por la estación del año, se distingue un patrón distinto para cada estación, de modo que la componente periódica semanal se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$\overline{\Delta}_{i,j}^{D,W} = \overline{Q}_{i,j}^D - \overline{Q}_j^W \quad (\text{Ec. 5.4})$$

, donde:

- $\overline{Q}_{i,j}^D$: Es el valor medio diario de la demanda observada en un día de la semana i (Lunes,..., Domingo, $i = 1,2,..,7$), durante la estación j (invierno, primavera, verano, otoño, $j=1,..,4$) del año.
- \overline{Q}_j^W : Representa el valor medio semanal de la demanda durante la estación j (invierno, primavera, verano, otoño) del año.

▪ **Componente periódica horaria**

El patrón horario está compuesto por un conjunto de términos correctivos a aplicar sobre la demanda media diaria. Puesto que los patrones horarios pueden cambiar con el día de la semana, y también con la estación, se diferencian ambos a la hora de identificar los patrones horarios, de modo que la componente periódica horaria $\overline{\Delta}_{n,i,j}^h$ se expresa como:

$$\overline{\Delta}_{n,i,j}^h = \overline{Q}_{n,i,j}^h - \overline{Q}_{i,j}^D \quad (\text{Ec. 5.5})$$

donde:

- $\overline{Q}_{n,i,j}^h$: Representa el valor de la media horaria de la demanda a la hora n ($n = 1, 2,3,..,24$) del día de la semana i en la estación j .
- $\overline{Q}_{i,j}^D$: Representa el valor medio diario de la demanda observada para el día de la semana i en la estación j .

Como se ha comentado en la introducción, el cálculo de las componentes periódicas puede realizarse una sola vez al concluir el año, o bien se pueden revisar las medias para contemplar los valores más recientes, al tiempo que se abandonan o no los valores más antiguos.

En cualquier caso, los valores del pasado a largo plazo quedan condensados en las componentes periódicas, con lo que el predictor de demandas ya no necesita recurrir a los valores pasados para efectuar la previsión de las demandas futuras.

5.4 PREVISION DE LA DEMANDA PARA LAS PRÓXIMAS 24 HORAS

De acuerdo con la formulación adoptada, la previsión de la demanda para las próximas 24 horas se efectúa en dos etapas.

En la primera etapa, se estima el valor de la demanda diaria para el día actual d , o para el día siguiente respecto al instante en que se lanza la predicción, mediante la expresión:

$$Q_d^{D,for} = \overline{Q}_d^{D,S} + \overline{\Delta}_{i,j}^{D,W} + \delta_d^D \quad (\text{Ec. 5.6})$$

donde:

- $\overline{Q}_d^{D,S}$: Representa la demanda media diaria estimada para el día juliano d , contado desde el comienzo del año, de acuerdo con la descomposición de Fourier
- $\overline{\Delta}_{i,j}^{D,W}$: Representa la corrección de la componente semanal periódica.
- δ_d^D : Representa la componente de persistencia diaria a corto plazo.

La componente de persistencia a corto plazo δ_d^D de la demanda diaria, esto es, la desviación entre la demanda media diaria y el valor estimado basado con los componentes periódicos $\overline{Q}_d^{D,S}$ y $\overline{\Delta}_{i,j}^{D,W}$ se puede modelar utilizando un proceso autoregresivo AR(1), de modo que:

$$\delta_d^D = \phi_1 \cdot \delta_{d-1}^D \quad (\text{Ec. 5.7})$$

donde:

- ϕ_1 : Es el parámetro autoregresivo que puede ser calibrado en base a las desviaciones de los datos diarios observados $\overline{Q}_d^{D,obs}$ en el proceso autoregresivo.

$$\delta_d^D = \overline{Q}_d^{D,obs} - [\overline{Q}_d^{D,S} + \overline{\Delta}_{i,j}^{D,W}]$$

Este parámetro se determina efectuando un análisis de regresión sobre cualquier conjunto de datos pasados, y puede actualizarse cuando sea necesario.

En la segunda etapa se efectúa ya la predicción de la demanda horaria para las próximas 24 horas a partir de una hora determinada del día t , de modo que para k horas más adelante, la demanda horaria prevista $Q_{t+k}^{h,for}$ se calcula como:

$$Q_{t+k}^{h,for} = Q_d^{D,for} + \bar{\Delta}_{n,i,j}^h + \varepsilon_{t+k} \quad (\text{Ec. 5.8})$$

donde:

- $Q_d^{D,for}$: Es la previsión de la demanda diaria para el día d correspondiente al instante t , conforme a la expresión anterior,
- $\bar{\Delta}_{n,i,j}^h$: Es la componente periódica horaria antes calculada para la hora n del día correspondiente al instante $t + k$
- ε_{t+k} : Representa la componente de persistencia horaria a corto plazo.

Los residuos horarios o componentes de persistencia de la demanda horaria se modelan mediante un modelo AR(24)x(1) sobre los errores ε_{t+k-1} y ε_{t+k-24} de modo que:

$$\varepsilon_{t+k} = \psi_1 \cdot \varepsilon_{t+k-1} + \psi_{24} \cdot \varepsilon_{t+k-24} \quad (\text{Ec. 5.9})$$

donde los coeficientes ψ_1 y ψ_{24} dependen de la hora del día $t+k \equiv n = 1, 2, \dots, 24$, empezando a contar la hora desde el principio del año y calibrados en base a los errores de los valores observados ε_t^{obs} , donde:

$$\varepsilon_t^{obs} = Q_t^{h,obs} - [Q_d^{D,obs} + \bar{\Delta}_{n,i,j}^h]$$

El cálculo de los coeficientes ψ_1 y ψ_{24} se efectúa igualmente mediante un análisis de regresión sobre conjuntos de valores históricos recientes.

Si las próximas 24 horas quedan comprendidas entre el día juliano d y el día $d+1$, el valor de $Q_d^{D,for}$ debe actualizarse en consecuencia.

CAPÍTULO 6. MODELO DE OPTIMIZACIÓN HÍBRIDO APLICANDO PROGRAMACIÓN LINEAL Y ALGORITMOS GENÉTICOS

En el presente capítulo se va a dar una breve introducción a la PL, así como los fundamentos de los algoritmos genéticos. Posteriormente después de detallar las herramientas que se van a utilizar en el desarrollo del modelo de optimización híbrido, se procederá a formular los modelos de optimización. En primer lugar, se desarrollará un modelo de optimización de minimización de costes energéticos mediante programación lineal, dando como resultado las consignas óptimas del estado de las bombas en las estaciones de bombeo. En segundo lugar, a partir de los resultados obtenidos en el primer modelo, mediante un modelo de optimización basado en algoritmos genéticos se intentará encontrar el modo de regulación óptimo de las consignas de válvulas en la red de distribución.

6.1 PROGRAMACIÓN LINEAL

La PL es la rama de la programación matemática que se utiliza para resolver problemas en los que la función objetivo y todas las restricciones son funciones lineales de las variables de decisión. Los problemas no lineales se resuelven con frecuencia vía PL suponiendo que parte de la función objetivo y la solución espacial restringida son aproximadamente lineales dentro de un intervalo definido, en torno a la solución.

Un problema de PL estándar responde a la siguiente formulación (Hillier y Lieberman 2006):

Maximizar o minimizar la función objetivo de tipo lineal:

$$Z = c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + \dots + c_n \cdot x_n$$

, sujeta a las restricciones, también de tipo lineal,

$$\begin{aligned} a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + \dots + a_{1n} \cdot x_n &\leq b_1 \\ a_{21} \cdot x_1 + a_{22} \cdot x_2 + \dots + a_{2n} \cdot x_n &\leq b_2 \\ &\vdots \\ a_{m1} \cdot x_1 + a_{m2} \cdot x_2 + \dots + a_{mn} \cdot x_n &\leq b_{1m} \end{aligned}$$

, con $x_i \geq 0 ; i = 1, 2, \dots, n$

6.1.1 Módulo de programación lineal OpenSolver

Microsoft Excel dispone de una herramienta llamada solver para resolver problemas de optimización lineal, pero tiene la limitación de 200 variables de decisión. A consecuencia de esta limitación, a la hora de implementar el modelo de optimización lineal del presente trabajo se hará uso de otra herramienta llamada OpenSolver (Mason y Dunning, 2010).

OpenSolver es un complemento de Microsoft Excel VBA que extiende el solver integrado en Excel con solvers más potentes. OpenSolver proporciona las siguientes características:

- Ofrece una variedad de solvers para su uso en Excel, incluyendo el motor de optimización de código libre, COIN-OR² que puede resolver problemas lineales y de programación entera de forma rápida.
- Compatible con el Solver de Excel, no es necesario cambiar la formulación de la hoja de cálculo.
- No tiene limitaciones en el número de variables de decisión para el problema a resolver.
- Es software de código libre.

6.2 FUNDAMENTOS DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS

Los algoritmos genéticos fueron desarrollados por John Holland, junto a su equipo de investigación, en la universidad de Michigan en la década de 1970 (Holland, 1975). Éstos combinan las nociones de supervivencia del más apto con un intercambio estructurado y aleatorio de características entre individuos de una población de posibles soluciones, conformando un algoritmo de búsqueda que puede aplicarse para resolver problemas de optimización en diversos campos (Goldberg, 1989).

Imitando la mecánica de la evolución biológica en la naturaleza, los algoritmos genéticos operan sobre una población compuesta de posibles soluciones al problema. Cada elemento de la población se denomina **cromosoma**. Un cromosoma es el representante, dentro del algoritmo genético, de una posible solución al problema. La forma en que los cromosomas codifican a la solución se denomina **codificación** (Fig. 6.1).

² Computational Infrastructure for Operations Research, <http://www.coin-or.org/>

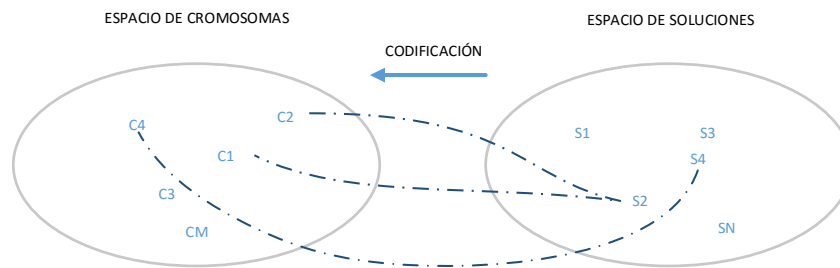


Figura. 6.1. Codificación del espacio de soluciones en espacio de cromosomas.

El algoritmo genético va creando nuevas **generaciones** de esta población, cuyos individuos son cada vez mejores soluciones al problema. La creación de una nueva generación de individuos se produce aplicando a la generación anterior operadores genéticos, adaptados de la genética natural. La Fig. 6.2 representa el esquema de funcionamiento del algoritmo genético.

El proceso comienza seleccionando un número de cromosomas para que conformen la población inicial. A continuación se evalúa la función de adaptación para estos individuos. La función de adaptación da una medida de la aptitud del cromosoma para sobrevivir en su entorno. Debe estar definida de tal forma que los cromosomas que representen las mejores soluciones tengan valores más altos de adaptación.

Los individuos más aptos se seleccionan en parejas para reproducirse. La reproducción genera nuevas cromosomas que combinan características de ambos padres. Estos nuevos cromosomas reemplazan a los individuos con menores valores de adaptación. A continuación, algunos cromosomas son seleccionados al azar para ser mutados. La mutación consiste en aplicar un cambio aleatorio en su estructura. Luego, los nuevos cromosomas deben incorporarse a la población; estos cromosomas deben reemplazar a cromosomas ya existentes. Existen diferentes criterios que pueden utilizarse para elegir a los cromosomas que serán reemplazados. El ciclo de selección, reproducción y mutación se repite hasta que se cumple el criterio de terminación del algoritmo, momento en el cual el cromosoma mejor adaptado se devuelve como solución (Fig. 6.2).

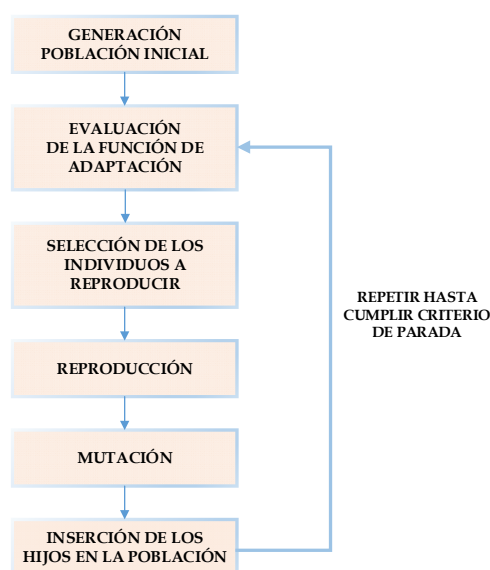


Figura. 6.2. Ciclo de un algoritmo genético.

6.2.1 Codificación de los cromosomas

El esquema de representación es el que define de qué forma se corresponden los cromosomas con las soluciones al problema. Para diseñar el esquema de codificación, se buscan los parámetros que identifican a las soluciones, y luego se codifican estos parámetros dentro del cromosoma.

59.66	49.31	16.34	...	20.71	36.44
T: 0	1	2		22	23

Figura. 6.3. Ejemplo de representación de un cromosoma para la consigna de presión aguas abajo de una válvula durante 24 horas.

La Fig. 6.3 muestra un posible esquema de representación para un problema que tiene como soluciones la consigna de presión aguas abajo de una válvula durante un periodo de simulación de 24 horas. En este caso tenemos una representación del cromosoma de la consigna de presión aguas abajo de una válvula por valor o en formato real. La longitud del cromosoma ocupa 24 posiciones correspondientes a los instantes en los que transcurre el periodo de simulación.

6.2.2 Generación de la población inicial

La población inicial debe contener cromosomas que estén bien dispersos por el espacio de soluciones. La manera más simple de cumplir con este objetivo es elegir cromosomas al azar. El uso de una heurística (Bezdek et al. 1994) puede ayudar a generar una población inicial compuesta de soluciones de mediana calidad, ahorrando tiempo al proceso de evolución, siempre y cuando se garantice una dispersión suficiente para la búsqueda.

6.2.3 Función de adaptación

La función de adaptación (fitness) cuantifica la aptitud de cada cromosoma como solución al problema, y determina su probabilidad de ser seleccionado para la fase de reproducción y poder pasar parte de su material genético a la siguiente generación. La función de adaptación es el indicador que hace evolucionar la población hacia cromosomas más aptos, por lo que una buena definición de esta función es fundamental para un correcto funcionamiento del algoritmo.

6.2.4 Selección

La selección de los individuos que van a reproducirse se realiza mediante un operador de selección. El operador de selección realiza la elección basándose en los valores de adaptación de los individuos. Existen distintos operadores de selección que pueden utilizarse (Miller et al. 1995), de los cuales se describen los más comunes.

- **Basado en el ranking:** Los cromosomas se ordenan de acuerdo a sus valores para la función de adaptación. Luego, se seleccionan para la reproducción a los primeros m (la cantidad que sea necesaria) cromosomas.
- **Ruleta:** Los cromosomas se colocan en segmentos continuos, de tal forma, que el segmento para cada individuo sea de tamaño proporcional a su valor de aptitud, y que la suma de las longitudes de los segmentos sea igual a 1. Se genera un número al azar entre 0 y 1, y el individuo cuyo segmento comprende el número generado es seleccionado para la reproducción; el procedimiento se repite hasta que se obtiene el número deseado de individuos.
- **Elitista:** Este operador de selección siempre seleccionará los mejores individuos de la población.

6.2.5 Reproducción

Este operador es el encargado de transferir el material genético de una generación a la siguiente. A diferencia de otros métodos de optimización, los algoritmos genéticos no solamente exploran la vecindad de las mejores soluciones, sino que recombinan sus partes para formar nuevas soluciones (Goldberg, 1989).

El objetivo de los operadores de reproducción es, partiendo de dos cromosomas padres, generar uno o más cromosomas hijos que hereden características de ambos padres (Falkenauer, 1999).

Los operadores de reproducción más típicos generan dos hijos a partir de dos padres. A continuación se describen los más utilizados.

- **CRUCE 1-PUNTO**

Este operador consiste en separar a los padres en dos partes para formar dos hijos intercambiando las partes de cada padre. Si los cromosomas se componen de N bloques, se elige un número al azar c , tal que $1 \leq c < N$, y luego se asigna al primer hijo los primeros c bloques del primer padre y los últimos $N - c$ bloques del segundo padre. Se procede en forma inversa para formar al segundo hijo. La Fig. 6.4 muestra un ejemplo de la aplicación de éste operador.

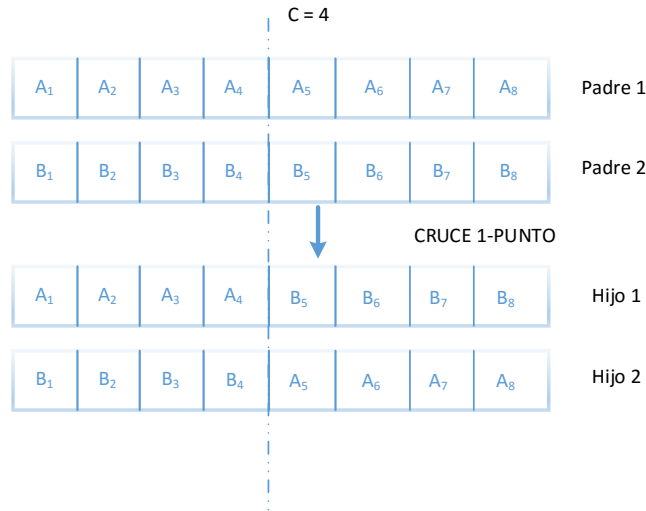


Figura. 6.4. Método de cruce 1-punto.

• **CRUCE M-PUNTO**

Es evidente que en el operador de cruce 1-punto, el primer y último bloque de uno de los padres no puede pasar juntos al hijo en ningún caso. El operador de cruce m-punto avanza un paso más, quitando esta restricción. Mediante el cruce m-punto, se eligen M puntos de corte al azar, y las secciones de cada padre se pasan a los hijos en forma alternada. La Fig. 6.5 muestra un ejemplo de este procedimiento, para el caso en que M es igual a 2.

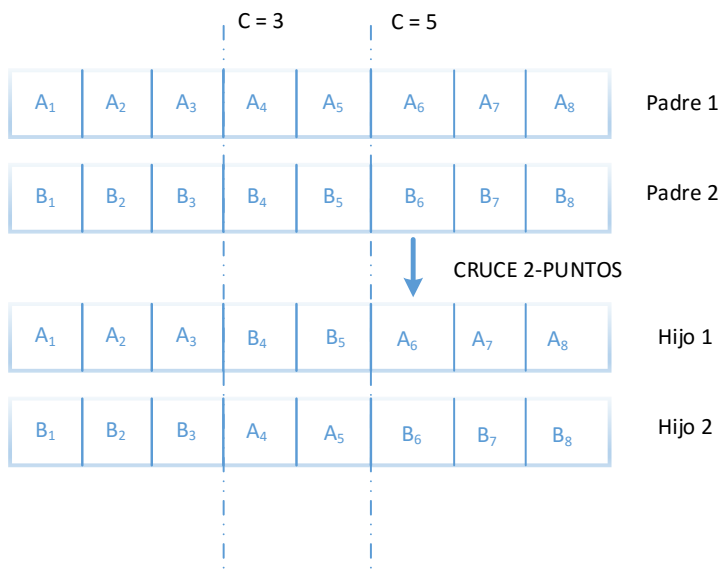


Figura. 6.5. Método de cruce 2-puntos

6.2.6 Mutación

La mutación de cromosomas (junto con la generación de la población inicial) es el encargado de proveer al sistema de material genético. La mutación se implementa mediante un operador de mutación. El operador de cruce genera nuevas soluciones intercambiando bloques de las soluciones existentes, pero sin el operador de mutación, el algoritmo genético no tendría forma de crear nuevos bloques. Este operador es el que permite que la exploración del espacio de búsqueda sea amplia.

El operador de mutación trabaja a nivel de bloque dentro de los cromosomas, haciendo cambios aleatorios de acuerdo a una probabilidad PM (probabilidad de mutación). La naturaleza del cambio depende de la composición de los bloques de los cromosomas. Si cada bloque es un bit (en la codificación binaria), el único cambio posible es invertir su valor. Si los bloques son números reales, la modificación podría ser la suma o sustracción de un pequeño valor aleatorio.

6.2.7 Inserción de los hijos en la población

La reinscripción de hijos consiste en incorporar los nuevos cromosomas en la población. Los métodos de reinscripción son diferentes según la cantidad de cromosomas generados sea menor, igual o mayor que la cantidad de elementos existentes en la población. A continuación se describen distintos criterios de inserción:

- **Se generan tantos cromosomas como elementos en la población**

Consiste en generar mediante la reproducción tantos hijos como elementos existen en la población, y reemplazar todos los cromosomas de la generación anterior por los nuevos (Goldberg, 1989). Cada cromosoma vive exactamente una generación. Un inconveniente que presenta este método es que suele reemplazar buenas soluciones por soluciones de menor calidad.

- **Se generan más cromosomas que elementos en la población**

Se eligen los mejores cromosomas entre los que se generaron, y se eliminan los cromosomas sobrantes. Luego, se reemplaza la población completa por la nueva generación.

- **Se generan menos cromosomas que elementos en la población**

Este esquema exige seleccionar entre los cromosomas de la población aquellos que se eliminarán. A continuación se describen los métodos más utilizados:

- **Inserción uniforme:** Los cromosomas a ser reemplazados se eligen al azar entre los miembros de la población. Se corre el riesgo de eliminar buenas soluciones, ya que no se tiene en cuenta la aptitud de los cromosomas.
- **Inserción elitista:** Se eligen los cromosomas menos aptos para ser reemplazados.
- **Inserción por torneo invertido:** Se utiliza en combinación con el método de selección por torneo. Funciona exactamente igual que el método de selección por torneo pero seleccionando con probabilidad p al peor cromosoma del torneo para ser reemplazado.

6.2.8 Criterios de parada

El criterio de parada del algoritmo genético es el encargado de definir el momento en el cual debe detenerse el ciclo de evolución y adoptar el cromosoma más apto como la solución encontrada por el algoritmo genético. A continuación se describen los criterios más comúnmente utilizados.

- **Convergencia de identidad**

Este criterio consiste en detener al algoritmo genético cuando un determinado porcentaje de los cromosomas de la población representan a la misma solución.

- **Convergencia de aptitud**

Este criterio no espera a que la población se componga mayoritariamente de una sola solución, sino que finaliza la ejecución del algoritmo cuando los valores de aptitud de un determinado porcentaje de las soluciones son iguales, o difieren en un pequeño porcentaje.

- **Cantidad de generaciones**

Utilizando cualquiera de los dos criterios anteriores no puede estimarse un número máximo de generaciones, ya que esto dependerá no solamente de los parámetros del algoritmo genético sino también del azar. Esto puede ser un problema, sobre todo si se quieren comparar los tiempos de resolución de un problema mediante algoritmos genéticos con otros métodos (Estivill-Castro, 2000). El criterio de terminación por cantidad de generaciones consiste simplemente en finalizar la ejecución una vez que ha transcurrido un número determinado de generaciones.

6.2.9 Ajustes de los parámetros

A pesar que los algoritmos genéticos resuelven problemas de optimización, hay que establecer unos valores adecuados para los siguientes parámetros: tamaño de la población, número de generaciones, tasa de cruzamiento y tasa de mutación. DeJong y Spears, (1990) proponen que la siguiente configuración de parámetros trabaja mejor que otras combinaciones de parámetros durante el proceso de optimización: **tamaño de la población=50; número de generaciones=1000; cruce=2-puntos; probabilidad de cruce=0.6; mutación=bit-flip; probabilidad de mutación =0.001**

6.2.10 Librería de programación de AG OptiGA

Con la creciente popularización de los AGs en los últimos años, han surgido varias librerías de programación enfocadas a la optimización siguiendo esta técnica. En el presente trabajo se utiliza el componente Activex (OCX) OptiGA³ para la implementación de algoritmos genéticos. Dicho componente ha sido integrado en el compilador VB para el desarrollo del algoritmo del problema de optimización de las consignas óptimas de regulación de válvulas. En el Anexo 3 se describen todas las opciones que ofrece este componente para realizar las simulaciones del proceso de optimización basada en esta técnica.

6.3 FORMULACIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA MINIMIZACIÓN DE COSTES ENERGÉTICOS

El problema propuesto a resolver se reduce a un problema cuya función objetivo es lineal. Esta simplificación se basa en los siguientes supuestos:

- El caudal de cada bomba, cuando esta activa, es constante, y no depende de las demandas ni de los niveles de los depósitos.
- El caudal de salida de cada planta k en cada instante t es dado ‘a priori’ o definido dentro de unos límites.
- Las presiones del sistema no dependen de la decisión tomada en las plantas de tratamiento.

Teniendo en cuenta estas hipótesis, la formulación del problema de reducir los costes energéticos basados en variables continuas puede ser propuesta. En realidad:

- Si las presiones no dependen de las decisiones tomadas en cada planta de tratamiento, pueden ser calculadas o restringidas ‘a posteriori’, teniendo en cuenta la decisión óptima de los caudales procedentes de cada fuente, la asignación de la demanda y las leyes de control de las válvulas y las bombas que configuran la red.
- Por otra parte, si los caudales procedentes de cada planta de tratamiento están definidos ‘a priori’ o son considerados como variables de decisión del problema lineal, no dependerán de las leyes de control de las válvulas y las bombas que configuran la red, y de esta manera todas las restricciones referentes a la red hidráulica no serán tenidas en cuenta. El número de restricciones en este caso se reduce bastante, no teniendo en cuenta las ecuaciones no lineales y no siendo necesario resolverlas para las variables de decisión.

³ OptiGA: <http://www.optiwater.com/optiga>

- Si el caudal de cada bomba es constante, conforme a la curva característica y de comportamiento de la bomba, la altura y la eficiencia serán también constantes cuando la bomba este activa, y también la potencia consumida.
- De esta manera las **variables de decisión** serán ahora una fracción del tiempo en que cada bomba p de la planta de tratamiento k , debe estar activa en cada intervalo de tiempo t , que será denotado como $x_{p,k,t}$. En consecuencia, todas las variables de decisión serán continuas, dentro del intervalo $[0,1]$. Por ejemplo, si el intervalo considerado es de una hora, un valor $x_{p,k,t} = 0.5$ significará que la bomba p de cada planta de tratamiento k estará funcionando durante media hora durante el periodo t .
- El caudal bombeado por la bomba p desde la planta de tratamiento k en el instante t será expresado como:

$$q_{p,k,t} = x_{p,k,t} QP_{p,k}$$

, donde $QP_{p,k}$ es el caudal constante para la bomba p desde la planta de tratamiento k cuando esté activa, y el consumo energético para el tratamiento será expresado como:

$$w_{p,k,t} (\text{tratamiento}) = x_{p,k,t} QP_{p,k} * c_k$$

, donde: c_k es el coste energético de producir $1 m^3$ de agua tratada en la planta de tratamiento k , en kWh/m^3 .

- Por otro lado, el consumo energético para la bomba p de la estación de bombeo k en el instante t será:

$$w_{p,k,t} (\text{bombeo}) = x_{p,k,t} WP_{p,k}$$

, donde: $WP_{p,k}$ es el consumo energético por hora para la bomba p desde la planta de tratamiento k cuando esta activa. Si se expresa ahora $WP_{p,k} = c'_{p,k} * QP_{p,k}$ siendo $c'_{p,k}$ la energía consumida por m^3 para la bomba p desde la fuente k , en kWh/m^3 , obtendremos:

$$w_{p,k,t} (\text{bombeo}) = x_{p,k,t} * QP_{p,k} * c'_{p,k}$$

Finalmente, si $p_{k,t}$ es el coste por kWh en el instante t en la planta k , el problema de optimizar los costes energéticos del bombeo puede ser formulado como la siguiente **función objetivo**:

$$\text{Min} \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^{P_k} \sum_{t=1}^{24} [x_{p,k,t} * QP_{p,k} * (c_k + c'_{p,k})] * p_{k,t}$$

La formulación anterior esta sujeta a las siguientes restricciones:

- **Continuidad para los volúmenes en los depósitos:**

$$(z_{k,t} - z_{k,t-1})S_k = \left[\sum_{p=1}^{P_k} x_{p,k,t} QP_{p,k} - q_{k,t} \right] \Delta t \quad , \quad \forall k,t$$

Formulado para todos los instantes t y para todas las plantas de tratamiento k provistas de un depósito. En la anterior expresion $q_{k,t}$ es el caudal de inyección desde la planta k en el instante t , y se asume que $\Delta t = 1 \text{ hora}$, y $QP_{p,k}$ y $q_{k,t}$ vienen expresados en m^3/h .

- **Demanda total de la red:**

$$\sum_{i=1}^M d_{i,t} = D_t = \sum_{k=1}^N q_{k,t} \quad , \quad \forall t$$

La demanda total de la red D_t debe ser satisfecha en cada instante t desde todos los puntos de producción, siendo $d_{i,t}$ la demanda de cada uno de los nudos M de la red, y $q_{k,t}$ el caudal inyectado a red desde la planta de tratamiento k en el instante t .

- **Límites para los niveles de depósitos:**

$$z_{k,\min} \leq z_{k,t} \leq z_{k,\max} \quad , \quad \forall k,t$$

Formulados para todos los depósitos de cada planta de tratamiento k y para todos los instantes de tiempo t , donde $z_{k,\min}$ y $z_{k,\max}$ representan los niveles de los depósitos máximo y mínimo permitidos en cada planta k .

- **Recuperación de los niveles en los depósitos:**

$$z_{k,24} = z_{k,0} \quad , \quad \forall k$$

Formulados para todos los depósitos k . Esta condición se aplica para simulaciones a 24 horas en periodo extendido. Si el volumen final no se limitara, los depósitos se vaciarían al máximo, obviamente porque esta es la solución más barata.

- **Limites en los caudales de producción por planta:**

$$Q_{\min,k} \leq \sum_{p=1}^{P_k} x_{p,k,t} QP_{p,k} \leq Q_{\max,k} \quad , \quad \forall k,t$$

Formulados para cada planta de tratamiento k y para todos los instantes de tiempo t . De hecho, el caudal total producido en cada planta k en cada instante t está limitado de

manera automática entre 0 y $\sum_{p=1}^{P_k} QP_{p,k}$, debido a los límites de las variables de decisión.

Sin embargo, en algunos casos la naturaleza de las plantas de tratamiento puede limitar el caudal producido al mínimo $Q_{min,k}$, y también al caudal máximo $Q_{max,k}$, normalmente por debajo de la capacidad máxima de bombeo, dada por la suma anterior.

En otros casos, las bombas pueden tomar agua desde los depósitos de agua filtrada, que permiten bombear más caudal del que se produce desde cada planta de tratamiento.

Tener en cuenta el volumen de los depósitos de agua filtrada ampliaría la formulación del problema, añadiendo nuevas restricciones, por lo que por el momento no serán tenidos en cuenta.

- **Limites en la potencia máxima por planta de tratamiento:**

$$\sum_{p=1}^{P_k} x_{p,k,t} * QP_{p,k} * (c_k + c'_{p,k}) \leq W_{max,k} \quad , \quad \forall k,t$$

Formulado para todas las plantas k y todos los instantes de tiempo t . En esta ocasión, la potencia total consumida en cada planta de tratamiento k y en cada instante t estará

limitada entre 0 y $\sum_{p=1}^{P_k} QP_{p,k} * (c_k + c'_{p,k})$, debido a los límites de las variables de

decisión. Sin embargo, el término más importante es $\sum_{p=1}^{P_k} QP_{p,k} * c'_{p,k}$, y habitualmente

puede que no todas las bombas de las estaciones de bombeo estén funcionando simultáneamente, porque alguna de ellas se considera que están en stand-by. Como hay un coste mensual en la factura eléctrica que depende de la potencia máxima permitida, normalmente las empresas limitan la potencia máxima del consumo energético del tratamiento más el consumo energético de np-stb bombas, siendo np el número total de bombas y stb el número de bombas que están en stand-by.

- **Número de bombas activas en un periodo tarifario**

Con el objetivo de optimizar el régimen de funcionamiento de los grupos de bombeo es necesario forzar los cambios de estado de las bombas de cada grupo de bombeo para un determinado periodo, para que su modo operación sea uniforme o reducir el número de bombas activas conforme avanza el tiempo. Por ello, la restricción puede definirse como:

$$n_{q,t} \geq n_{q,t+1} \quad \forall q \in Q, \quad t = t_i \dots t_{f-1} \in \tau$$

, donde: $n_{q,t}$ representa el número de bombas activas del grupo de bombeo q en el instante t , Q es el número de grupos de bombeo considerados en el problema, y τ es el periodo de tarifa considerado empezando en el instante t_i y t_f . Esta restricción no se aplica en el último instante t_f del periodo de tarifa considerado.

6.4 FORMULACIÓN DE LA OPTIMIZACIÓN DE LA REGULACIÓN DE LAS VÁLVULAS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN

En el apartado anterior se ha optimizado el régimen de operación de las bombas de las estaciones de bombeo en las plantas de tratamiento. A partir del régimen de operación óptimo de los sistemas de bombeo y de los caudales de inyección obtenidos procedentes de los depósitos, a fin de satisfacer la demanda en la red de distribución, se deben operar una serie de válvulas con el objetivo de mantener las presiones y los niveles de los depósitos por planta dentro de los límites establecidos. Para el desarrollo del modelo de optimización para regular las válvulas en un régimen de operación óptimo se realizará una implementación de un algoritmo basado en AG.

6.4.1 Variables de decisión

En este modelo de optimización las variables de decisión serán el conjunto de consignas de control de válvulas $y_t = (y_{1t}, y_{2t}, \dots, y_{Kt})$ donde $t = 1, \dots, T$, para todos los instantes tiempo t dentro del periodo de optimización T siendo K el numero de válvulas a operar y T el número de intervalos de tiempo hasta cumplir el periodo de operación de 24h.

Para este problema se han considerado el tipo de válvulas reductoras de presión, adoptándose una codificación real del cromosoma donde cada gen tomará el valor de la consigna aguas abajo de la válvula correspondiente.

Cada posible solución (individuo) está representada por un vector (cromosoma) de dimensión $(K*T)$, describiendo las diferentes combinaciones de consigna de válvula en el periodo de operación. La Fig. 6.6 muestra un ejemplo de un vector solución para tres válvulas considerando un periodo de operación T .

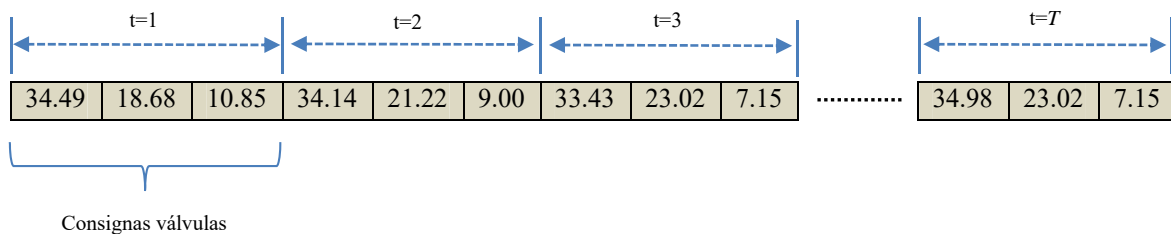


Figura. 6.6. Representación del cromosoma para las consignas de tres válvulas durante un periodo T .

6.4.2 Restricciones

Las restricciones a definir en este modelo de optimización son las siguientes:

- **Restricción de presión en nudos críticos**

Para cada intervalo de operación, la presión en cualquier nudo de conexión j puede estar limitado entre un valor máximo y mínimo. Esto puede expresarse como:

$$P_{min,j} \leq P_{j,t} \leq P_{max,j} \quad \forall j \forall t$$

, donde $P_{j,t}$ representa la presión en el nudo j en el instante t ; $P_{min,j}$ es la presión mínima requerida en el nudo j y $P_{max,j}$ es la presión máxima permitida en el nudo j .

- **Restricción en caudal de inyección óptimo por cada planta de tratamiento**

El caudal de inyección procedente de cada planta de tratamiento k durante el intervalo de tiempo t puede estar restringido a un valor óptimo expresado como:

$$Qiny_{k,t} \leq Qiny_{opt,k,t} \quad \forall k \forall t$$

, donde: $Qiny_{k,t}$ es el caudal inyectado desde la planta de tratamiento k en el instante t ; y $Qiny_{opt,k,t}$ representa el caudal de inyección óptimo suministrado por la planta de tratamiento k .

6.4.3 Método de penalización de restricciones

Aunque los AGs pueden tratar fácilmente con este tipo de problemas de optimización no lineal, un AG convencional no incorpora explícitamente las restricciones en la formulación. En su lugar, como con muchas otras técnicas de optimización, el problema de la optimización con restricciones se reformula como un algoritmo de optimización sin restricciones mediante la incorporación de las restricciones en la función objetivo. Cualquier solución no factible es penalizada.

Para este modelo en particular, se ha utilizado el método MPM (multiplicative penalty method), en el que la función objetivo se multiplica por un factor proporcional al total de la cantidad de violación de la restricción evaluada en ese momento. El coste del multiplicador $\mu(x)$ que penaliza una solución no factible está dado por una función lineal.

$$\mu(x) = 1 + \sum w_m v_m \quad m = 1, \dots, M$$

, donde: w_m son los pesos de las restricciones y la penalización de las restricciones v_m es medida mediante la expresión:

$$v_m = [\max(0, g_m(x) - b_m)], \text{ siendo } m = 1, \dots, M$$

, donde: $g_m(x)$ es la m -ésima restricción; b_m es la m -ésima constante que limita superiormente a la restricción, y M es el número total de restricciones.

La nueva función objetivo transformada vendrá determinada por:

$$\text{Min } \mu(x)$$

Si los resultados de una solución no tienen penalizada ninguna de las restricciones, entonces la función $\mu(x)$ será 1 y la función objetivo o el ajuste de la solución será igual a la función objetivo. Los pesos de restricciones, w_m pueden ser constantes o variar con cada generación y pueden ser el mismo o variar para todas las restricciones M . Una descripción detallada del método MPM y otros se pueden encontrar en (Hilton y Culver, 2000).

Conforme a las restricciones definidas en el apartado anterior el conjunto de penalizaciones se formularía de la siguiente forma:

- **Penalización P1: Presiones inferiores a la mínima:**

$$P_1 = \lambda_1 \sum_{i=1}^N [\max_t(0, p_{\min,i} - p_{i,t})] \quad \forall i, \forall t$$

donde:

- λ_1 : Factor de ponderación aplicado a la penalización.
- N : Representa el número de nudos.
- $p_{\min,i}$: La presión mínima impuesta como restricción en el nudo i .
- $p_{i,t}$: La presión obtenida tras el proceso de simulación del nudo i en el instante t .

- **Penalización P2: Presiones superiores a la máxima:**

$$P_2 = \lambda_2 \sum_{i=1}^N [\max_t(0, p_{i,t} - p_{\max,i})] \quad \forall i, \forall t$$

donde:

- λ_2 : Factor de ponderación aplicado a la penalización.
- N : Representa el número de nudos.
- $p_{\max,i}$: La presión máxima impuesta como restricción en el nudo i .
- $p_{i,t}$: La presión obtenida tras el proceso de simulación del nudo i en el instante t .

- **Penalización P3: Caudales de inyección superiores al óptimo aportado por cada planta de tratamiento:**

$$P_3 = \lambda_3 \sum_{i=1}^R [\max_t(0, QIny_{i,t} - QIny_{\text{opt},i,t})] \quad \forall i, \forall t$$

donde:

- λ_3 : Factor de ponderación aplicado a la penalización.
- R : Representa el número de caudales de inyección procedentes de depósitos de cada planta de tratamiento.
- $QIny_{\text{opt},i,t}$: Caudal de inyección óptimo impuesto como restricción procedente del depósito i en el instante t .

- $Q_{Iny_{i,t}}$: Caudal de inyección resultante tras el proceso de simulación procedente del depósito i en el instante t .

6.4.4 Función objetivo transformada

Para la resolución de este problema de optimización la función objetivo transformada (función de adaptación) solo se tendrán en cuenta las penalizaciones de las restricciones descritas en el apartado anterior.

Para la resolución de este problema solo se tendrán en cuenta un conjunto de penalizaciones de las restricciones a cumplir. El objetivo en la regulación de las válvulas será mantener el rango de presiones definidos en cada una de ellas a fin de satisfacer la demanda en los distintos sectores en los que esta distribuida la red de abastecimiento. Por otra parte también se tendrá como objetivo regular el caudal inyectado procedente de los depósitos de las plantas de tratamiento dentro de los límites definidos para los mismos.

Finalmente la función objetivo transformada a minimizar pasará a ser definida por la suma de las penalizaciones definidas en el apartado anterior resultando la siguiente expresión:

$$FObj = P_1 + P_2 + P_3$$

, donde P_1 representa la penalización aplicada cuando no se cumple la restricción de presión inferior a la mínima en un nudo, P_2 por presión superior a la máxima, P_3 por caudal de inyección procedente de depósito superior al óptimo establecido por el modelo de optimización del régimen de operación de las estaciones de bombeo para cada planta de tratamiento.

CAPÍTULO 7. INTEGRACIÓN DE UN OPTIMIZADOR EN UN SISTEMA SCADA PARA LA OPERACIÓN EN TIEMPO REAL. LA PLATAFORMA SCA-RED

7.1 OBJETIVOS DE LOS SISTEMAS SCADA EN REDES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA.

Un sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA) es un sistema informático distribuido ampliamente utilizado principalmente para monitorizar y controlar de forma remota el estado de los elementos hidráulicos distribuidos por toda la red de abastecimiento de agua desde una ubicación central.

Los sistemas SCADA permiten al personal encargado de la operación de la red ver las medidas remotamente, tales como niveles de depósito, e aplicar el régimen de operación remotamente de los elementos de la red, tales como bombas y válvulas. Los sistemas SCADA pueden activar alarmas sonoras desde una ubicación central cuando surge algún fallo en el sistema de distribución de agua. Los operadores también pueden usar un registro histórico del comportamiento temporal de varias variables del sistema (como niveles de depósito). El valor añadido de los sistemas SCADA se puede mejorar si se incorporan funcionalidades adicionales, como el modelado y la simulación mediante modelos hidráulicos (Cameron, 1998).

Cuando se trabaja con los datos SCADA, el modelador a menudo tiene acceso a más datos que se pueden procesar fácilmente. Por ejemplo, el modelador puede tener varias semanas de datos con los que calibrar un modelo de simulación en periodo extendido (EPS) y puede seleccionar un día o días representativos como base para la calibración. Seleccionar el mejor período para la simulación del modelo de entre miles de datos que pueden estar en varias fuentes de datos distintas es extremadamente difícil. Por lo general, no hay un día en que toda la instrumentación esté funcionando correctamente, por lo que la selección de ese día a menudo se basa en la búsqueda del día con menos problemas y que la información para todos los puntos de la red que se este analizando este completa (Walski, 2003).

Otro de los retos de trabajar con los datos SCADA es que las lecturas en ocasiones puede ser incorrectas, errores en escala de tiempo, o la presencia de huecos en los históricos de los datos en bruto, pueden no ser evidentes dentro de todo el conjunto de datos. Afortunadamente, el modelador puede utilizar varios procedimientos para recopilar y organizar la información SCADA en un formato más sencillo de utilizar. Por lo general estos formatos suelen ser hojas de cálculo o archivos de texto tabulados. Las tablas y gráficos obtenidos utilizando estos procedimientos pueden ser luego utilizados directamente para una variedad de aplicaciones externas, incluyendo la calibración de un modelo de simulación en periodo extendido, previsión de las operaciones de la red de abastecimiento de agua, y la estimación de la pérdida de agua durante roturas en tuberías (Walski, 2003).

En redes de abastecimiento de agua, los principales objetivos de los sistemas SCADA son los siguientes:

- Monitorizar el sistema.
- Obtener el control sobre el sistema y asegurarse de que siempre se alcanza el rendimiento requerido.
- Reducir los niveles de personal de operación mediante la automatización y la operación del sistema desde un puesto centralizado.
- Proporcionar información sobre el funcionamiento de la red y establecer procedimientos eficaces para su gestión.
- Almacenar los datos del comportamiento de la red de abastecimiento de agua, por tanto, permitir la generación de los correspondientes informes requeridos por cualquier organismo regulador.
- Establecer un régimen de operación eficiente de la red minimizando la necesidad de la visitas a estaciones remotas y reducir potencialmente el consumo energético durante las operaciones de bombeo a través de la optimización de la operación.
- Proveer de un sistema de alarmas que detecte las incidencias producidas en la red de abastecimiento de agua desde un centro de control.

Sin embargo, un modelo hidráulico también se puede utilizar para ayudar a los operadores de sistemas SCADA a establecer las consignas para un sistema SCADA ya existente o para un nuevo sistema implantado en nuevas instalaciones. En este sentido, en lugar de experimentar con el sistema real, el operador puede probar diferentes estrategias de control en el modelo hidráulico y determinar si las nuevas consignas son una mejora o produce situaciones desfavorables.

Antes de que un sistema SCADA este operativo, por lo general se realizan pruebas mediante la simulación de situaciones de emergencia en periodo extendido. Los resultados de estas simulaciones pueden utilizarse para determinar las consignas de puntos críticos de control. Los resultados de la simulación del modelo hidráulico pueden enlazarse con el sistema SCADA. Esta funcionalidad ofrece la posibilidad de simular secuencias de eventos más realistas y probar mejor los sistemas SCADA.

7.2 COMPONENTES DE UN SISTEMA SCADA

Los sistemas SCADA abarcan la transferencia de datos entre un servidor central y un número de estaciones remotas (RTU) y el servidor central y los terminales del operador de la red. Un sistema SCADA genérico emplea una forma de multiplexación de datos (MUX's) entre el servidor central y las RTU's (Fig. 7.1). Estos multiplexadores de datos encaminan los datos mediante una comunicación bidireccional entre las RTUs a través de una red local, mientras que

hacen uso de uno o muy pocos enlaces físicos dentro de una red troncal de área amplia (WAN) para pasar los datos al servidor central.

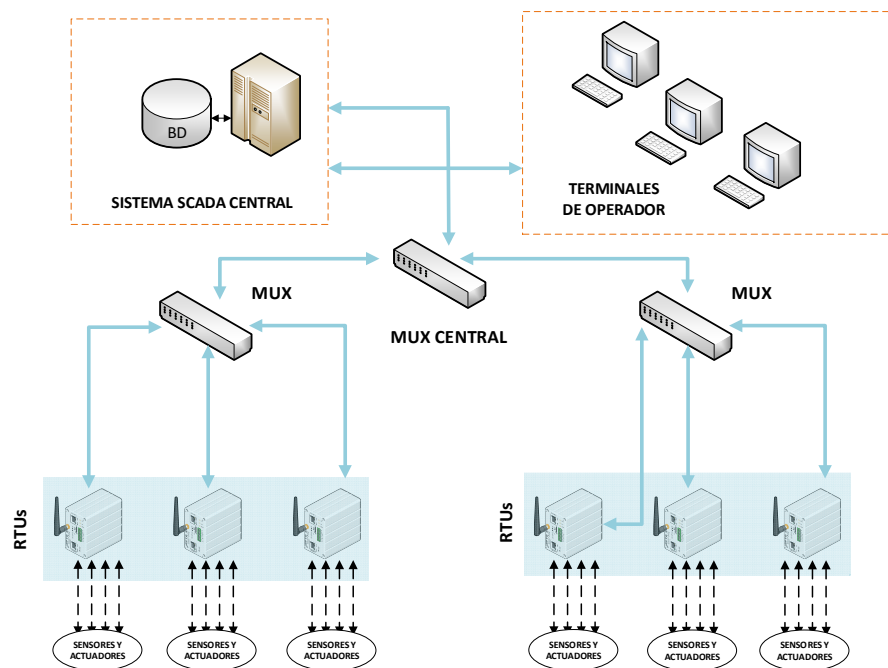


Figura. 7.1. Arquitectura general de un sistema SCADA.

Un aspecto importante de cualquier sistema SCADA es el software utilizado en el sistema. El componente software más obvio es la interfaz del operador o paquete software MMI/HMI (Man Machine Interface/Human Machine Interface). Dependiendo del tamaño y naturaleza de la aplicación SCADA, el software puede suponer un coste considerable cuando el sistema SCADA se está desarrollando, manteniendo y ampliando. Cuando el software está bien definido, diseñado, implementado y testeado, un sistema SCADA puede llevarse a cabo con éxito. Malos planteamientos de estas fases en este tipo de proyectos fácilmente causarán la ejecución de proyectos SCADA sin éxito.

Muchos sistemas SCADA emplean software comercial propietario sobre el que se desarrolla todo el sistema. El software propietario a menudo está configurado para una plataforma de hardware específica y no pueden interactuar con el software o hardware producido por proveedores de la competencia.

7.3 PROCEDIMIENTOS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

La adquisición de datos en los sistemas SCADA se lleva a cabo por primera vez en la RTU, que realiza peticiones a la interfaz de datos de los dispositivos de campo que están conectados a la misma. El tiempo consumido para realizar esta tarea se denomina intervalo de muestreo y puede ser programable. El servidor central realiza peticiones a la RTU (por lo general a un ritmo mucho más lento) para acceder a los datos en un proceso conocido como polling. Algunos sistemas permiten que la RTU transmita valores de campo y alarmas al servidor central sin que

este envíe peticiones. Este mecanismo se conoce como datos no solicitados. Los datos no solicitados por lo general solo se transmiten cuando los datos de campo tienen cierta desviación respecto a un porcentaje establecido de antemano, a fin de minimizar el uso de canales de comunicación, o cuando existe una alarma que indique alguna anomalía.

Las acciones de control que se realizan en el servidor central son gestionadas como consignas que se envían a la RTU. En cualquier caso, cualquier acción de control tomada por un operador que inicia sesión en el servidor central iniciará un canal de comunicaciones con la RTU para poder enviar los comandos de control al dispositivo de campo que quiera operar. Normalmente los sistemas SCADA emplean varias capas para comprobar que la transmisión de los datos es recibida por las estaciones remotas con éxito.

7.4 TIPO Y FORMATO DE LOS DATOS DE CAMPO

Los distintos tipos de datos recibidos desde los sistemas SCADA se pueden clasificar en las siguientes categorías:

- **Analógicos (números reales):** Los datos analógicos se suelen representar por enteros o enteros en coma flotante (siguiendo los estándares IEEE). Este tipo de datos se suelen utilizar para representar gráficamente su evolución en el tiempo o también para generar alarmas para indicar posibles anomalías.
- **Digitales (on/off o abierto/cerrado):** Los datos digitales se suelen utilizar para indicar alarmas sonoras, dependiendo del estado del medidor en cada momento.
- **Pulsos:** Los datos de tipo pulso, como los que puede enviar una señal de un totalizador, se acumulan en cada una de las estaciones remotas distribuidas por la red o en el centro de control donde está ubicado el sistema SCADA. Por lo general se convierten al mismo formato que los datos analógicos, sin embargo, son transformados de la misma forma a como serían adquiridos de manera directa por los equipos de instrumentación.
- **Bits de estados (o flags):** Los bits de estado normalmente complementan a los datos analógicos. Por ejemplo, un flag puede complementar a una entrada analógica si el sistema SCADA determina que un valor es posiblemente no válido.

En los sistemas SCADA generalmente existen ciertas opciones a la hora de transferir los datos a aplicaciones externas. Por ejemplo, disponen de ciertas funcionalidades de exportación de datos a texto ASCII, hojas de cálculos o paquetes software propietario de datos históricos.

Una vez los datos están en el formato adecuado (tabulados o en base de datos), es posible manipular dichos datos para analizar el comportamiento del transductor de medida o de la planta que se esté supervisando.

7.5 GESTIÓN DE ANOMALÍAS EN SISTEMAS SCADA Y PROCESADO DE LA INFORMACIÓN DE CAMPO

Cada sistema SCADA gestiona de forma diferente los eventos de error producidos en el sistema de control. Algunos sistemas se basan principalmente en la redundancia inherente del sistema SCADA y otros utilizan algún tipo de mecanismo de almacenamiento para guardar los datos y que se puedan recuperar posteriormente cuando el sistema SCADA haya vuelto a un estado de operación estable. Entre los mecanismos existentes los podríamos resumir en: almacenamiento de datos en RTUs y sistemas redundantes.

La mayoría de sistemas SCADA utilizan una combinación de los mecanismos anteriores para asegurar la continuidad de los datos durante los eventos de fallo. El operador dispone de interfaces gráficas que representan a modo de esquema la disposición de los elementos hidráulicos en la red de distribución de agua.

La representación de estos elementos hidráulicos viene acompañada de elementos gráficos que dinamizan su estado en todo momento, así como de valores numéricos que muestran la magnitud de la medida. La interfaz gráfica del sistema SCADA también puede estar acompañada de una representación gráfica de series de valores para llevar un seguimiento temporal de las magnitudes sobre las que se va a realizar la operación de sistema de distribución de agua.

El sistema SCADA puede disponer de muchas pantallas gráficas y el operador puede seleccionar de entre las más relevantes en todo momento.

Por otra parte el sistema SCADA dispone de pantallas adicionales donde se podrán mostrar las alarmas en todo momento de toda la red de distribución de agua.

7.6 SINCRONIZACIÓN Y VALIDACIÓN DE DATOS

Cuando en la base de datos del sistema SCADA se presentan lecturas incorrectas, el modelador típicamente examina otro período de tiempo y un conjunto de datos que no contenga errores. Sin embargo, si un único evento en el sistema de distribución tiene que ser analizado o si la recogida de los datos SCADA requiere un esfuerzo especial por los operadores SCADA, el modelador puede no tener la opción de seleccionar otro período libre de errores. En ocasiones, manteniendo conversaciones con los operadores SCADA, se puede tener una idea de las causas de las inconsistencias en los datos y de esta manera permitir al modelador realizar las correcciones correspondientes en los datos de partida. Muchas veces para solventar la presencia de errores en los datos, se suelen completar la información a partir de gráficos, dataloggers, u otros dispositivos de medición. Pero en este caso, existe el problema de que cada fuente de datos presenta una escala de tiempos diferente, por esta razón habrá que implementar métodos que sincronicen estos datos a una escala de tiempos compatible con el modelo de simulación hidráulica que se desee analizar (Walski, 2003).

La simulación en periodo extendido requiere que la información SCADA este pautada a intervalos de tiempo compatibles con los intervalos de tiempo de simulación del modelo hidráulico. Los instantes de tiempo establecidos en el modelo dependen del tipo de análisis que se vaya a realizar. Generalmente estos intervalos de tiempo suelen ser de una hora y el periodo

total de simulación de 24 horas. Sin embargo, hay veces que puede resultar difícil importar los datos procedentes del SCADA a intervalos de tiempo que directamente correspondan con los intervalos de tiempo de simulación del modelo (Walski, 2003).

Con la comodidad de la monitorización y el control remoto a través de sistemas SCADA surge la problemática de la dependencia del consumo de dicha información recibida por parte de estos sistemas. El usuario que maneja esos datos puede suponer que la calidad de esa información es buena, cuando en realidad la única forma de estar seguro de la integridad de esa información es a través de un análisis crítico, generalmente basado en la observación diaria de los datos gráficamente.

Existen complementos de software para sistemas SCADA que ofrecen una detección continua y automática de los datos que se reciben de los sensores y actuadores. Estas aplicaciones se basan en técnicas estadísticas y metaheurísticas para la detección de errores en los datos. Sin embargo, hoy por hoy en los sistemas SCADA se aplican técnicas más convencionales a la hora de verificar la información procedente de los sensores y de sistemas críticos conectados a un sistema SCADA.

7.7 LIMITACIONES DE LOS SISTEMAS SCADA

A continuación se enumeran una serie de funcionalidades y procedimientos que no están presentes en los sistemas SCADA convencionales.

- No permiten monitorizar puntos de la red de distribución para los cuales no está implementado un sistema de comunicaciones.
- Generalmente suelen ser sistemas cerrados muy particulares del fabricante del sistema SCADA. En los últimos años y con los avances tecnológicos, dichos sistemas ofrecen protocolos de comunicación abiertos que permiten la integración de software de terceros. Dichos módulos de desarrollo e interconexión suelen venderse a parte con lo que encarecen el precio final del sistema y su coste va sujeto al número de variables (puntos de medida) que se quiera gestionar en el sistema SCADA.
- En ocasiones no ofrecen protocolos de seguridad en su sistema de comunicaciones. Los sistemas SCADA generalmente suelen estar aislados de las conexiones de red exteriores y en algunos casos resulta difícil su integración en entornos corporativos. Los protocolos de seguridad implementados suelen ser en ocasiones particulares para el abastecimiento donde están implantados.
- Pocos sistemas SCADA suelen tener integrado un sistema de simulación hidráulica en tiempo real. En algunas ocasiones cuando se habla de tal integración, no es más que una mera conexión a una base de datos históricos que permite la exportación de los datos para su posterior carga en el modelo hidráulico, siendo un proceso off-line.
- La información que se almacena en la base de datos de un sistema SCADA suele presentar diferentes escalas de tiempo dependiendo de la variable que se intenta medir

(valores promedio, instantáneos, por cambio de estado). A la hora de importar dicha información en un modelo hidráulico, se tendrán que sincronizar todos los datos para adecuarlos a la escala de tiempos definido en el modelo.

- Hoy por hoy, los sistemas SCADA disponen de bases de datos para almacenar los datos procedentes de la telemetría, pero no siempre se almacenan los históricos de todos los puntos de medida debido a la cantidad de espacio en disco que se podría consumir, por lo que se requiere de mecanismos de compresión de los datos o de un modelo de datos bien diseñado para gestionar dicha cantidad de información y que su consulta sea ágil. Otros en cambio limitan la capacidad de almacenamiento para no ralentizar el sistema SCADA. Por esa razón los fabricantes de sistemas SCADA ofrecen productos alternativos MES⁴ (Meyer et. al., 2009) para gestionar la información histórica, lo que encarece más el sistema.
- Con frecuencia la información que es adquirida por el sistema SCADA contiene errores de medida o huecos de información, por lo que el post-proceso de esa información se suele realizar mediante el uso de aplicaciones externas y asistida por un operador del sistema.
- Realizar un seguimiento de la calidad de los datos procedentes del SCADA tiene un coste económico y suele necesitar de personal cualificado para gestionar esa información para generar informes de la calidad de los mismos. Por lo tanto, la disponibilidad de procedimientos automáticos de detección de errores y huecos de información en los históricos agilizaría dicha tarea, ahorrando costes.
- Los sistemas SCADA disponen de librerías de programación (API) que permiten a los desarrolladores añadir algoritmos ad-hoc y personalizar los sinópticos para un fin concreto. Generalmente estas librerías están limitadas en cuanto a prestaciones de desarrollo se refiere. Por lo que en ocasiones es necesario desarrollar librerías externas que se puedan integrar en el sistema SCADA, pero no todos los sistemas ofrecen esta versatilidad, por lo que puede convertirse en una ardua tarea.
- Generalmente a la hora de integrar un modelo hidráulico en un sistema SCADA para su simulación en tiempo real, se debe disponer de todos los datos necesarios para cargar el modelo; niveles de depósito, presiones, caudales, zonas de demanda, etc. Pero no todas las variables involucradas en estos cálculos están disponibles en tiempo real o no existe telemetría para dichos puntos de control en el sistema SCADA. En este tipo de situaciones, se tendrá que estimar el valor de estas variables definiendo procedimientos ad-hoc.

⁴ **MES** (del inglés: *Manufacturing Execution System*), son sistemas de ejecución aplicados a procesos en planta que posteriormente han sido adaptados a otros sectores industriales. Monitorizan todo el proceso de automatización y almacenan la información y la gestionan de forma inteligente estableciendo indicadores de gestión.

- Antes de importar los datos de campo en un modelo matemático, se tendrán que realizar ciertos procesos de filtrado de los datos, a fin de que la simulación se realice de forma correcta y precisa. No todos los sistemas SCADA implementan procedimientos de filtrado automático de los datos y en ocasiones en el caso de existir, los umbrales definidos para desencadenar el proceso de filtrado son bastante básicos, definiendo umbrales escalares bastante holgados, para que no se generen una cantidad de alarmas considerable.

7.8 INTEGRACIÓN DE MODELOS HIDRÁULICOS EN SISTEMAS SCADA

Los sistemas SCADA monitorizan el funcionamiento del sistema de distribución de agua donde las señales están distribuidas en estaciones remotas por toda la zona de servicio. Sin embargo, puede haber ubicaciones en el sistema de distribución, tales como pozos, donde se carece de conexiones de alimentación eléctrica y sistema de comunicaciones requeridos para una estación remota funcional.

En estas situaciones, los caudales y las presiones pueden estimarse a partir de información SCADA de estaciones remotas cercanas.

Cuando estos cálculos no son relativamente complejos, se pueden realizar en el software SCADA (por ej., mediante la compensación de las lecturas de presión de otras estaciones en base a diferencias de presión). Sin embargo, cuando estimar dichos valores es más complejo, se requiere del uso de un modelo hidráulico que haga de interfaz con el software SCADA para estimar los parámetros donde no existen puntos de medida (Ingeduld, 2000).

Los pasos a seguir en el cálculo de los datos de los puntos no telemedidos son:

- Exportar los datos sobre las condiciones de contorno del sistema SCADA.
- Configurar el modelo matemático para que coincida con esas condiciones específicas reales.
- Ejecutar el modelo para ver los resultados de simulación o importar dichos resultados en el sistema SCADA.

Este tipo de procedimiento suele estar automatizado y de este modo se logra de alguna forma la vinculación dinámica de datos entre el sistema SCADA y el software de simulación hidráulica.

Otro ejemplo de esta integración es la estimación de la pérdida de agua durante posibles roturas en tuberías. El seguimiento del caudal de agua en la red de distribución durante las roturas en arterias principales puede ayudar a cuantificar las pérdidas. En general, una rotura significativa se mostrará en los registros SCADA como, lecturas de presión bajas, una disminución inexplicable en los niveles de los depósitos, un caudal excesivo en las estaciones de bombeo, u otras inconsistencias en los datos.

La información del SCADA para el período de tiempo que afecta a la rotura puede ser importada a un modelo hidráulico y realizar la simulación de las condiciones del sistema en el momento de la rotura. Ajustando las demandas, o coeficientes de emisor, en la ubicación de la

rotura e intentando simular diferentes horas de inicio y fin de la rotura, el modelador debería ser capaz de igualar los resultados del modelo a los registros SCADA durante la rotura y por tanto, determinar la cantidad de agua que se pierde.

7.9 LA PLATAFORMA SCA-Red

7.9.1 Antecedentes

La plataforma SCA-Red fue concebida como una herramienta para ayudar a los operadores de salas de control de empresas del sector del agua durante el proceso de toma de decisiones (DSS) de las operaciones de la red en tiempo real mediante el uso de un modelo hidráulico integrado en el sistema de control. Con este objetivo un modelo calibrado y actualizado debe estar disponible, este logro fue uno de los objetivos del proyecto CALNET (Martínez et al. 2005). Siguiendo este planteamiento, para obtener un modelo actualizado es necesario disponer de bases de datos SIG corporativas (Bartolin et al, 2006). Antes de importar el modelo hidráulico en la plataforma SCA-Red, es simplificado y calibrado mediante herramientas SIG utilizando valores de campo procedentes del sistema SCADA.

Disponer de un modelo de simulación hidráulica en tiempo real constituye además una herramienta de gran valor para reaccionar adecuadamente en situaciones de emergencia, o ante una posible contaminación no controlada del agua en la red en algún punto, tema de gran preocupación hoy en día en países como EEUU e Israel (Tiburce et al., 1999; Janke, 2010).

En su primera versión, el sistema de información que alimentaba la plataforma estaba constituido por la lectura de 250 señales hidráulicas.

A partir del año 2009, tras diversas pruebas e implantación con éxito de la primera versión, capaz de producir modelos en tiempo real ajustados a las medidas de campo, la plataforma SCA-Red se ha ido extendiendo cubriendo mas ámbitos geográficos, al tiempo que se han ido incorporando nuevas funcionalidades, además de la monitorización y simulación que venía utilizándose hasta el momento. A día de hoy la plataforma SCA-Red sigue extendiéndose en funcionalidades para cubrir las necesidades internas del departamento de explotación de la empresa.

7.9.2 Capacidades de la plataforma SCA-Red

Entre las mejoras incorporadas en la versión actual de la plataforma, cabe destacar:

- Extensión de la zona monitorizada y modelada, gestionando más puntos de medida integrados en el modelo matemático.
- Incorporación de señales de diferente procedencia (telemando y multilog), sincronizadas en una misma base de tiempos, a fin de establecer una coherencia y permitir la correcta simulación del estado de la red en cada instante. Actualmente las versiones implantadas

gestionan los históricos de alrededor de 1000 puntos de medida hidráulicos. El modelo de datos de la plataforma está adaptado en estos momentos para gestionar un volumen de 80.000 señales hidráulicas.

- Incorporación de nuevas herramientas de consulta e interpretación gráfica: solapamiento de señales por tiempo y magnitud, combinación de señales de una misma magnitud mediante expresiones aritméticas, cálculo de balances sectoriales, etc...
- Almacenamiento de las consultas temporales y generación de informes, para su reutilización.
- Notificación de incidencias del sistema de información por correo electrónico.
- Gestión básica de anomalías, basadas en indicadores estadísticos y curvas patrón históricas.
- Geolocalización de estaciones remotas sobre un fondo geográfico y visualización del estado de los elementos hidráulicos tanto en tiempo real como en consultas de datos diferidas.
- Integración de paneles sinópticos en la propia base de datos, permitiendo su actualización y mantenimiento en tiempo real, sin necesidad de parar el sistema o la simulación hidráulica que se esté llevando en curso.
- En el diseño e implementación de los paneles sinópticos se utilizan tecnologías de desarrollo basadas en estándares W3C⁵ permitiendo su implantación en distintos dispositivos hardware y sistemas operativos.
- Permite la interoperabilidad con cualquier sistema SCADA propietario dado que la plataforma implementa diversos protocolos de comunicación y automatización compatibles con los distintos fabricantes existentes en el mercado. En las implantaciones ejecutadas hasta el momento, SCA-Red se ha integrado con éxito en sistemas Siemens, Omron, Telemecanique y LabView.
- La plataforma SCA-Red opera en paralelo de forma independiente al sistema SCADA, no interfiriendo con las tareas de control. Esta funcionalidad permite que más usuarios pueden ver el estado de la red sin tener que estar en la propia sala de control de la empresa.

⁵ W3C: World Wide Web Consortium, es un consorcio internacional que produce recomendaciones y estándares Web

7.9.3 Estructura de la plataforma SCA-Red

Actualmente la plataforma SCA-Red está constituida por cuatro módulos:

- **SCA-Red MS (Monitorización y simulación):** La funcionalidad de este módulo consiste en la monitorización y simulación de la red de distribución de agua a partir de los datos del sistema de control y de otros datos calculados, esto es, no adquiridos directamente a través de sensores físicos, pero derivados de éstos y necesarios para la correcta generación de resultados.
- **SCA-Red AD (Análisis y consulta de datos):** Este módulo permite representar series de datos con diversa longitud y agrupación temporal, y comparar diversas magnitudes (caudal, presión, nivel, estado de bomba), para un mismo periodo de consulta, o la misma magnitud en distintos periodos temporales.
- **SCA-Red RPT (Generación de Informes):** Módulo de generación de informes que permite exportar a libros Excel, informes de seguimiento y de detalle relativos a la evolución de las magnitudes telemidas, así como de los balances hídricos para los distintos sistemas y subsistemas de la red de agua.
- **SCA-Red SVC (Servicios de Sistema):** Módulo formado por un conjunto de servicios de sistema que están continuamente en ejecución en el sistema operativo, para actualizar la información y emitir mensajes con cierta periodicidad.

Una descripción mas detallada de las funcionalidades de cada uno de los módulos que se acaban de enumerar puede consultarse en el Anexo 4.

7.10 ALMACENAMIENTO Y PROCESADO DE LOS DATOS SCADA

Para gestionar toda la información que utiliza la plataforma SCA-Red, es necesario el uso de un sistema de información que aloje todos los datos necesarios, para posteriormente combinarlos y permitir al usuario realizar una gran variedad de consultas. En el siguiente diagrama se representa las distintas etapas que se llevan a cabo durante la gestión y almacenamiento de los datos en tiempo real y la generación de datos históricos que posteriormente se monitorizarán desde el módulo SCA-Red MS.

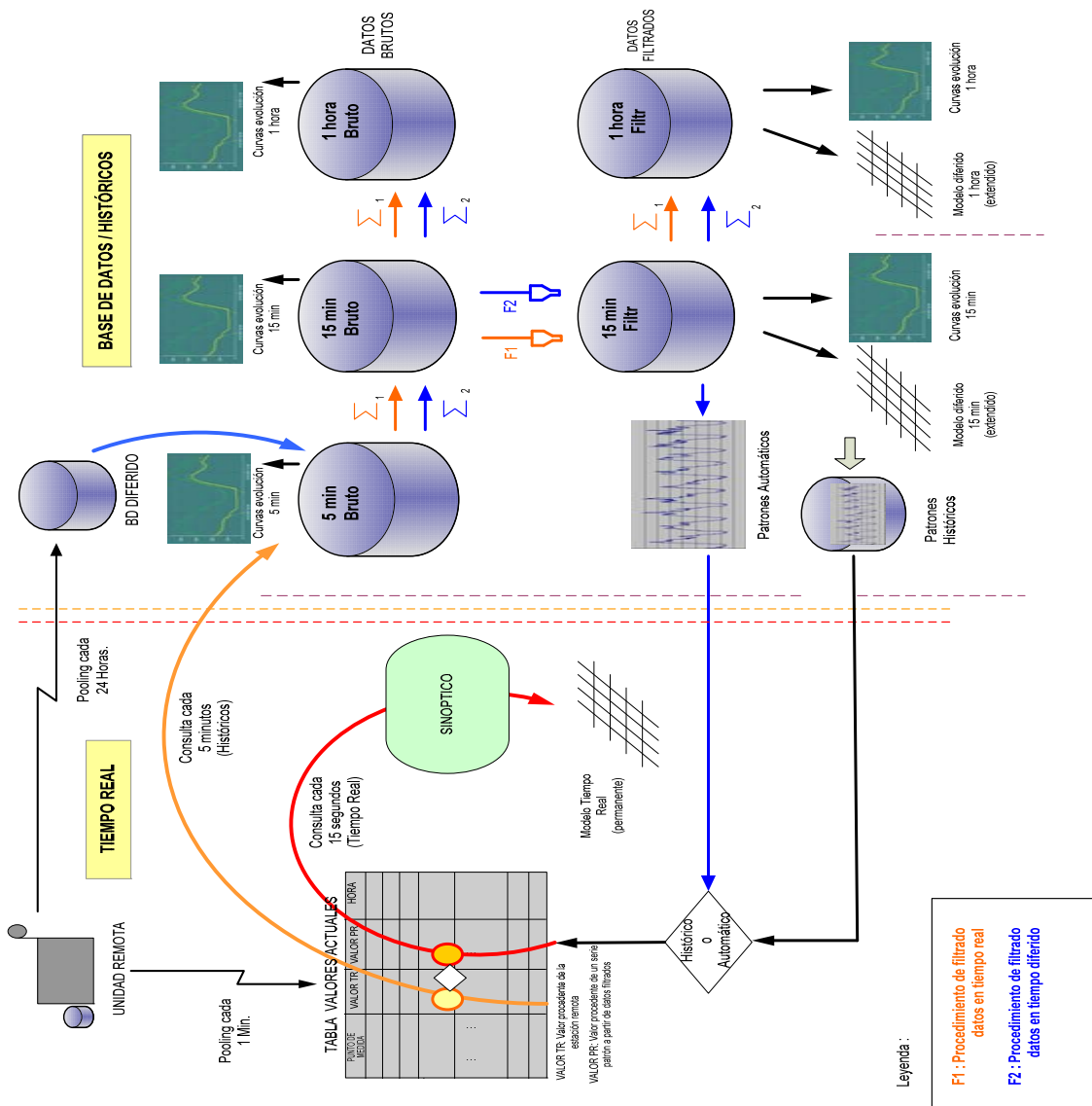


Figura. 7.2. Esquema de almacenamiento y gestión de las medidas de campo.

Toda la secuencia de acciones y lógica de tratamiento de la información de campo que se pueden ver en la Fig. 7.2 están definidas en una serie de procesos ubicados en el servidor y gestionados desde el sistema de información.

A grandes rasgos las tareas que se definen durante el procesado y almacenamiento de la información de campo serán las siguientes:

- Integración de las lecturas en Tiempo Real (Scan) con las lecturas en Tiempo Diferido (remotas con autonomía) en una única base tiempos.
- Módulo de sincronización de señales (para lecturas asíncronas y síncronas con frecuencia de muestreo que el periodo de sincronización).
- Módulo para la gestión de fallos de lectura en datos brutos.
- Módulo de filtrado para la restitución de huecos o valores anómalos
- Confeción de patrones de señal en base a las últimas lecturas, tras el proceso de filtrado.
- Anticipación de los valores de las señales diferidas a partir de los patrones, para el refresco de pantallas en tiempo real.

7.11 INTEGRACIÓN DE LA PLATAFORMA SCA-Red CON EPANET 2.0

En el siguiente apartado se van a describir los procedimientos seguidos a la hora de simular el comportamiento real de una red de abastecimiento de agua a través de un simulador hidráulico, que parámetros intervienen y la problemática en el uso de herramientas de simulación hidráulica como EPANET, así como la fiabilidad de los datos a la hora de obtener resultados precisos que se asemejen a la comportamiento real del sistema hidráulico.

7.11.1 Asignación de datos de campo en el modelo hidráulico.

La correcta definición de los parámetros hidráulicos es una cuestión importante que debe ser considerada con detalle. Para definir un escenario de simulación hidráulica en periodo extendido se requiere declarar: la conectividad de la red, los parámetros que definen las características físicas de todos los componentes, las demandas base de todos los nudos y las curvas de demanda de los nudos de consumo, el nivel inicial de los depósitos y las reglas de control de la operación en función del tiempo y la presión.

Por otra parte, también hay que definir otro tipo de parámetros, como unidades, la fórmula aplicada para la pérdida de carga, intervalo de simulación. Generalmente los valores para las demandas, los niveles en depósitos o las reglas control están condicionadas para el día que se

quiere analizar, mientras que los demás datos como, conectividad o propiedades físicas de los componentes no son alterables, excepto para tareas de planificación.

Por otra parte EPANET permite otras opciones como declarar curvas de nivel para los depósitos a la hora de ajustar las trayectorias de los niveles o declarar curvas de velocidades en las bombas para definir su régimen de operación.

Para hacer coincidir los resultados de un modelo hidráulico con los datos reales de comportamiento de la red de distribución, algunos parámetros previos deben ser considerados como fijos y otros variables conforme a los datos reales. SCA-Red tiene en cuenta como datos fijos: la conectividad de la red, los parámetros físicos de los componentes hidráulicos, las demandas base de los nudos y las reglas de control para regular las presiones en determinados puntos de la red. Mientras que los niveles de los depósitos, los patrones de demanda y las reglas de control deben ser ajustados para cada periodo de simulación.

Durante la carga de las curvas de demanda en el modelo, se tiene en cuenta una base de tiempos de una hora a partir de la lectura de los caudales inyectados procedentes del SCADA. No todas las medidas de caudal se tienen en cuenta a la hora de determinar los caudales inyectados a las zonas de demanda. Por esta razón, se realizará un análisis previo de las señales para determinar cuales tienen mayor influencia sobre las zonas de demanda y en consecuencia den mejores resultados en la simulación del modelo. Debe tenerse en cuenta que la base de tiempo de las curvas de demanda deben ajustarse a la base de tiempo empleado para la simulación del periodo extendido.

En algunas ocasiones, puede ocurrir que no se disponga de un medidor de caudal a la salida de los depósitos de las plantas de tratamiento, como consecuencia, el valor del caudal de inyección se obtendrá a partir de la diferencia de nivel en los depósitos. Dependiendo de la base de tiempo a tener en cuenta (15 min o 1 hora), los resultados obtenidos pueden introducir ciertos errores y cambios repentinos de caudal en el caso de depósitos de grandes dimensiones. Por esta razón SCA-Red dispone de un algoritmo de interpolación mediante curvas splines para suavizar los caudales de entrada/salida de los depósitos.

En lo referente a los niveles de los depósitos se consideran dos opciones a la hora de asignar los parámetros al modelo: por una parte forzar el nivel inicial de los depósitos a partir de los datos reales, o forzar los niveles de los depósitos para todo el periodo de simulación declarando los depósitos como embalses y asignándoles una curva patrón con las alturas. Tanto para el instante actual como para los instantes de simulación pasados cualquier opción es válida. Para simulaciones futuras el nivel inicial será forzado, pero para simulaciones de instantes de tiempo pasados serán convertidos en embalses y se fijará la altura para reproducir con más precisión la realidad.

Sin embargo cuando se definen nuevas reglas de control para simulaciones de escenarios pasados, el nivel inicial de los depósitos es forzado pero el simulador determinará las trayectorias de los niveles conforme a las ecuaciones hidráulicas. Por esta razón, hay que tener en cuenta que si el modelo hidráulico esta perfectamente calibrado, ambas simulaciones darán

los mismos resultados para las consignas de control reales. Ejecutando ambas propuestas permitirán al usuario comprobar la bondad de la calibración del modelo que se está utilizando.

Finalmente las reglas de control por tiempo serán aplicadas directamente al modelo, intentando reproducir el comportamiento real de los dispositivos de control más importantes de la red de distribución. En las reglas de control se tienen en cuenta las válvulas y las bombas que son controladas remotamente y pueden ser forzadas en una base de tiempo de 1 hora o 15 min.

Generalmente las válvulas de control son modeladas como VR, siendo su estado identificado por el porcentaje de apertura. Otro tipo de válvula que suelen ser simuladas son las VRP, donde su estado se simula forzando la presión aguas abajo o las VLQ donde la consigna viene determinada por el caudal de paso.

Referente a la reglas de control para las bombas de velocidad fija, existen varios criterios que pueden tenerse en cuenta. Los estados on/off medidos por el SCADA pueden ser forzados directamente como estados de la bomba en los instantes en los que sucedieron. Sin embargo, siguiendo el esquema general, las reglas de control de bombas deben ser forzados para los instantes en los que se almacenan en la base de datos (1 hora, 15 min), mientras que en la realidad algunas bombas se pueden activar/parar varias veces en una hora.

Cuando el caudal que aporta la bomba está registrado, SCA-Red resuelve este problema calculando el estado equivalente de la bomba para cada instante de tiempo para producir el mismo volumen de agua para ese intervalo de tiempo y compensar el exceso o déficit de volumen del intervalo anterior. Las reglas de control para bombas de velocidad variable no son tenidas en cuenta por el momento.

7.11.2 Interoperabilidad con el fichero EPANET

La segunda cuestión a tratar a la hora de hacer coincidir el modelo predefinido con el comportamiento real de la red, es como forzar los datos descritos previamente en el modelo. La toolkit de EPANET permite la lectura del fichero de entrada (modelo hidráulico), cambiando algunos parámetros, ejecutarlo y obtener los resultados de la simulación. En particular, el nivel inicial de los depósitos y los patrones de demanda se pueden redefinir de esta manera. Sin embargo, en otros casos la toolkit tiene limitadas algunas funcionalidades: los depósitos no se pueden convertir en embalses, el tipo de las válvulas no pueden cambiarse, y sobre todo el número de reglas de control no puede ampliarse y deben definirse de antemano.

Para simulaciones en tiempo real, las funcionalidades que aporta la toolkit son suficientes. No ocurre lo mismo para la declaración de leyes de control y curvas patrón que tienen que declararse de antemano en el fichero de entrada, actualizándose para el primer instante de simulación en cada incremento de tiempo.

Sin embargo para simulaciones en periodo extendido, como situaciones pasadas o futuras, las limitaciones existentes en la toolkit han sido cubiertas reescribiendo el fichero de entrada. Con este propósito, el fichero de entrada del modelo se toma como plantilla, es tratado y almacenado

en memoria, los siguientes nuevos ficheros son generados en función de las consultas realizadas por el usuario y posteriormente ejecutados utilizando la toolkit de EPANET.

7.11.3 Filtrado de datos

La última cuestión a tener en cuenta a la hora de cargar los datos de campo en el modelo hidráulico es la fiabilidad de los mismos. La fiabilidad de los datos procedentes del SCADA depende de la precisión con la que el sistema de adquisición de datos procesa la información y del sistema de comunicaciones con las estaciones remotas.

A menudo, algunos medidores suelen producir fallos, siendo los más críticos los caudales y los niveles de los depósitos, (cerrar una válvula por error no es tan grave debido a la enorme cantidad de válvulas disponibles en el modelo). Para hacer frente a este problema, los datos de campo son previamente filtrados antes de ser forzados en el modelo. Mientras la tabla de datos históricos de 5 min. , almacena los datos en bruto, las tablas de históricos de 15 min. y 1 hora se duplican, en datos brutos y datos filtrados.

El filtrado de datos se desarrolla en dos etapas: marcando los valores promediados que se consideran no válidos y posteriormente reconstruyendo estos valores.

En lo que respecta a la primera etapa, las siguientes anomalías son tenidas en cuenta:

- Valores que no han sido registrados en la base de datos, por cualquier razón.
- Valores que están fuera del rango establecido por la medida física.
- Valores que permanecen constantes durante un número de muestras consecutivas, lo que puede indicar un problema con el medidor.

No siempre estas anomalías pueden inducir a rechazar el valor de campo. Antes de eso, la anomalía es comparada con los valores registrados de los medidores cercanos y los valores de señales relacionadas. A su vez, el modelo hidráulico puede ser ejecutado para confirmar que el estado local de la red resultante de estas señales anómalas no es coherente.

En la segunda etapa, los datos anómalos detectados son sustituidos por nuevos valores de acuerdo a la siguiente estrategia:

- Si la secuencia de valores no válidos es corta (menos de 2 horas), se utiliza una interpolación lineal para juntar los datos de la secuencia anómala.
- Si la secuencia de valores anómalos es superior a 2 horas pero menor de 24 horas, se utiliza un modelo de previsión para obtener los valores de estas señales.
- Si la secuencia tiene mayor duración, cada valor no válido se reemplaza por el promedio de los valores históricos registrados para los mismos instantes del día.

La gestión de los datos históricos brutos y filtrados se lleva a cabo en tablas diferentes dentro de la base de datos, con el objetivo de que si el proceso de filtrado falla siempre se podrá aplicar otra técnica de filtrado distinta y siempre se conservarán los datos brutos.

7.12 ARQUITECTURA DISTRIBUIDA DE LA PLATAFORMA

A medida que avanzamos en la descripción de las capacidades de la plataforma, las tareas que desempeña aumentan en complejidad. En los primeros intentos de desarrollo haciendo uso de lenguajes propietarios de algunos paquetes SCADA no tuvieron éxito. Por esta razón, finalmente se decidió desarrollar la plataforma utilizando distintos lenguajes de programación de propósito general (VB, SVG, JavaScript,..) con el objetivo de que SCA-Red fuese independiente de cualquier sistema SCADA propietario y pudiese adaptarse a las necesidades de la empresa.

Desde los inicios de su desarrollo siempre se ha buscado que se adaptase a los cambios tecnológicos conforme pasaban los años, por lo que se adoptó desde un principio una arquitectura distribuida cliente-servidor.

En ese sentido, la parte del servidor se encarga de desarrollar las tareas críticas que serán compartidas a todos los usuarios. Por otro lado, los diferentes usuarios que utilizan la plataforma pueden realizar diferentes simulaciones consultando de forma concurrente la misma base de datos.

7.12.1 Capa servidor

La capa servidor de la plataforma SCA-Red puede ser instalada en un servidor central, el cual puede estar conectado directamente a un PLC (Programmable Logic Controller) mediante una tarjeta de E/S o una red Ethernet. Las comunicaciones de datos entre SCA-Red y el sistema SCADA se realiza a través del protocolo OPC (OPC Foundation, 2001). En este caso, la parte servidor de SCA-Red mantiene un seguimiento de las variables monitorizadas via OPC, actualizando sus valores al cambio (comunicación asíncrona)

Las principales tareas que desempeña la parte servidor de SCA-Red se resumen a continuación:

- Establecer los protocolos de comunicaciones con el sistema SCADA a través del protocolo OPC.
- Realizar un seguimiento del estado de las variables monitorizadas y almacenar los valores registrados en una tabla dentro de la base de datos de la plataforma SCA-Red.
- Actualización de los valores procedentes del SCADA en una tabla 5 min.
- Actualización de las tablas de históricos con una base de tiempos de 15 min y 1 hora, al promediar los valores registrados de la tabla de base de tiempo de 5 min.

- Filtrado de los datos históricos brutos de las tablas anteriores para obtener valores mas fiables y actualizar las tablas de back-up. El filtrado de datos se puede llevar a cabo en varias etapas debido a la distinta naturaleza de las señales que son tratadas en una red de distribución de agua.
- Calcular las variables que no son medidas directamente, como caudales en depósitos, estado de bombas y balance de caudales en zonas de demanda, cuyos resultados también se alojan en las tablas de históricos.
- Gestionar las unidades y factores de conversión entre los datos registrados y los almacenados en las tablas de históricos.
- Mantener actualizado un modelo predefinido para utilizarse como plantilla de la mejor representación de la realidad para cada instante de tiempo.
- Atender las distintas consultas de datos realizadas por los usuarios de la plataforma.

7.12.2 Capa cliente

La parte cliente de la plataforma SCA-Red puede ser implantada en un ordenador personal de uso cotidiano. Entre las funcionalidades de las que esta encargada la parte cliente se puede resumir en las siguientes tareas:

- Inicializar la interfaz y otros estados iniciales al inicio de la ejecución de cualquier módulo que forma parte de la plataforma.
- Inicialización y sincronización de las estructuras de datos que establecen la correspondencia entre las variables del modelo hidráulico y las variables de campo declaradas en la base de datos de SCA-Red y las señales SCADA (Tags).
- Lectura de los parámetros que definen el modelo hidráulico y prepararlo para ser utilizado en cualquier tipo de simulación.
- Definir una interfaz de consulta de datos históricos.
- Lanzar peticiones de consulta al servidor y gestionar los datos devueltos.
- Construir un modelo hidráulico actualizado en tiempo real y para cada consulta de datos históricos.
- Visualizar los datos reales y simulados bajo un determinado modo de operación desde paneles sinópticos.
- Exportar ficheros de EPANET con los datos del escenario que se este observando en un determinado momento.
- Gestionar los diferentes modelos generados por el usuario bajo un entorno local y de forma independiente al sistema SCADA.

En los proximos apartados, se dará una descripción con mas detalle de todas partes funcionales de las que esta compuesta la arquitectura de la plataforma.

7.12.3 Arquitectura hardware

La arquitectura hardware desarrollada en la plataforma SCA-Red se muestra en la Fig. 7.3. En primer lugar, en el nivel físico se encuentra el PLC. Seguidamente como capa intermedia (o lógica) nos encontramos el servidor del sistema SCADA y el bloque que constituye la parte servidor de la plataforma SCA-Red. Finalmente en la capa de presentación, también denominada capa cliente, se compone de los terminales de operación que constituyen la interfaz de usuario de la plataforma de SCA-Red. Entre las distintas capas representadas en la arquitectura hardware de la plataforma, el protocolo TCP/IP es el empleado en el nivel de comunicaciones.

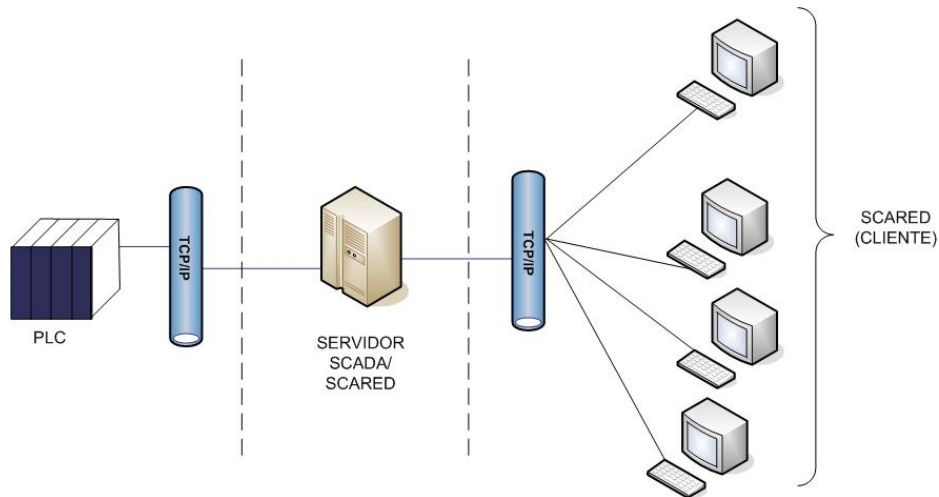


Figura. 7.3. Esquema de la arquitectura hardware.

7.12.4 Arquitectura software

La Fig. 7.4 muestra todos los componentes que configuran la arquitectura software de la plataforma así como el flujo de información entre ellos.

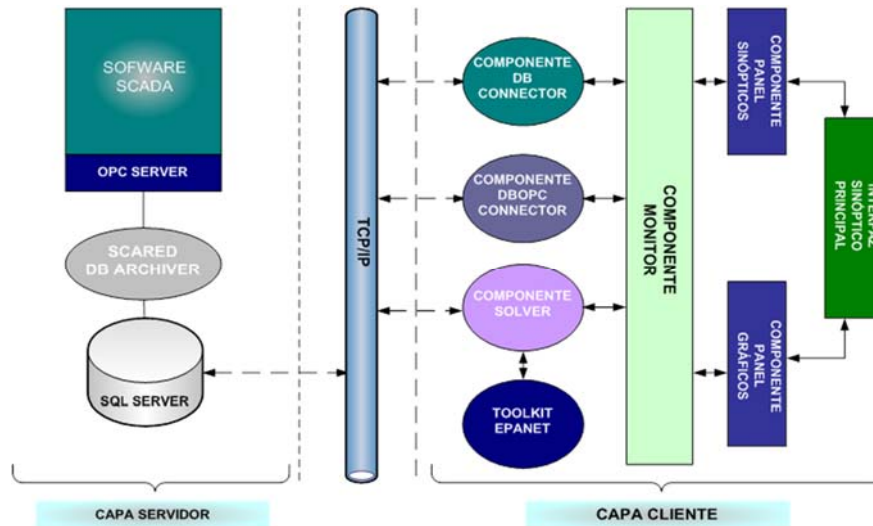


Figura. 7.4. Esquema de la arquitectura software.

Dentro de la arquitectura software se pueden identificar dos capas:

- **Capa servidor:** Esta capa está constituida por el software SCADA y la base de datos donde se almacenan toda la información de los valores históricos de los puntos de medida que son monitorizados. Además, se implementa un proceso con una interfaz abierta que establece la lógica entre las variables SCADA y la base de datos de las variables de campo. El protocolo de comunicaciones empleados en esta capa son drivers OPC (OPC Foundation, 2001) para la comunicación con el sistema SCADA y drivers OLEDB para la conexión con la base de datos históricos (Wells, 2001). El componente DB Archiver establece la sincronización entre las variables del sistema SCADA y la base de datos de la plataforma SCA-Red (Fig. 7.4).
- **Capa cliente:** En esta capa se pueden encontrar los componentes que constituyen la parte cliente de SCA-Red.

La descripción de cada uno de los componentes se detalla a continuación:

- **DB Connector:** Permite la sincronización entre las variables ubicadas en las tablas de la base de datos y las interfaces de usuario con el objetivo de realizar consultas de escenarios pasados.
- **DBOPC Connector:** Establece la correspondencia entre los puntos teledados en tiempo real procedentes del SCADA y las variables referenciadas en las tablas de tiempo real en la base de datos de la plataforma SCA-Red.
- **Solver:** Establece la correspondencia entre los datos reales y los predefinidos en el modelo permitiendo mostrar los datos no teledados a parte de otras funcionalidades.
- **Toolkit EPANET:** Librería de funciones que realiza los cálculos del simulador hidráulico.
- **Monitor:** Realiza la gestión de la procedencia de los datos y su representación correspondiente en las variables referenciadas en los sinópticos.
- **Panel sinópticos:** Contiene los sinópticos de las estaciones remotas distribuidas por red de abastecimiento.
- **Panel gráficos:** Genera la representación gráfica de las series temporales para las variables seleccionadas desde los paneles sinópticos. Este componente permite comparar los valores medidos por el SCADA con los valores obtenidos por EPANET.
- **Sinóptico principal:** Pantalla principal que muestra los sinópticos generales de la red de abastecimiento y las distintas opciones para operar sobre cada elemento de la red hidráulica representados en dichos sinópticos.

Finalmente para la comunicación entre la capa cliente y la capa servidor se emplea el protocolo TCP/IP.

7.12.5 Diagramas de secuencia

Para una aplicación que trabaje en tiempo real y de forma concurrente dentro de una arquitectura distribuida es necesario definir un diagrama de secuencia para establecer el orden de prioridades de los diferentes eventos de ejecución, este proceso es fundamental para evitar posibles inestabilidades del sistema. Durante el desarrollo de la plataforma SCA-Red estas cuestiones han sido tomadas en cuenta minuciosamente. A modo de ejemplo, la Fig. 7.5 representa un diagrama de secuencia en UML (Booch et al. 1999) seguido por la plataforma SCA-Red durante el proceso de monitorización y simulación en tiempo real, para ello realiza llamadas a las funciones de la toolkit de EPANET para realizar los cálculos hidráulicos y posteriormente se muestran los resultados de la simulación sobre el panel sinóptico principal con una frecuencia de refresco establecida por defecto de 10 secs.

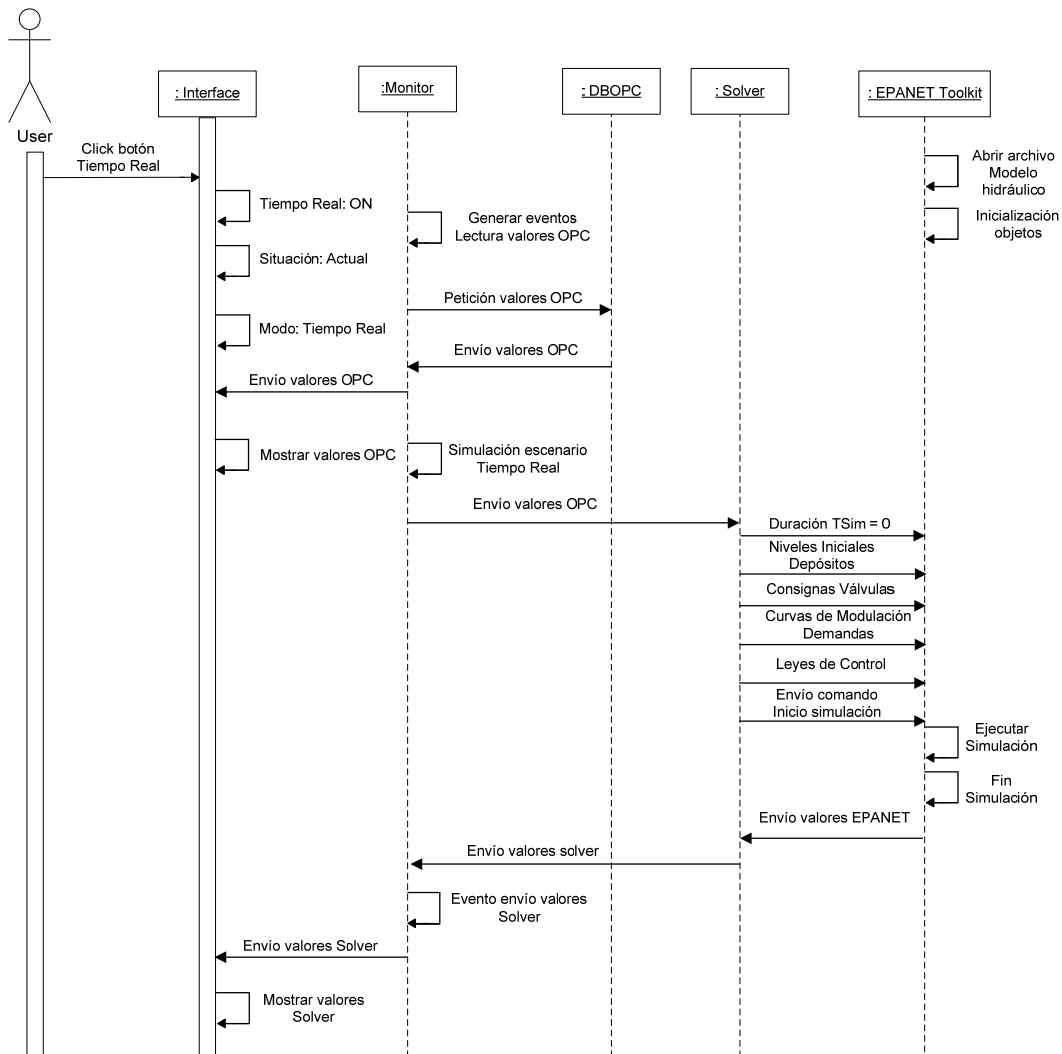


Figura. 7.5. Diagrama de secuencia UML para escenarios en tiempo real

7.13 INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS DE OPTIMIZACIÓN PROPUESTOS EN LA PLATAFORMA SCA-Red

Con el objetivo de integrar los modelos de previsión de demanda y los modelos de optimización formulados en el presente trabajo se plantean dos modos de operación en el proceso de integración de dichos modelos en la plataforma SCA-Red.

Por una parte se plantea una optimización del régimen de operación basado en la consulta de escenarios pasados donde se intentará optimizar el régimen de operación de las estaciones de bombeo y la regulación de las válvulas donde todos los parámetros hidráulicos son conocidos y forzados con el objetivo de evaluar las posibles mejoras en el modo de operación de la red de abastecimiento. Por otro lado se plantea un esquema de optimización para un periodo futuro y tiempo real donde intervendrá el modelo de previsión de demanda y se tendrán que determinar las consignas de control óptimas para un periodo de optimización a 24 horas.

7.13.1 Optimización de escenarios pasados

En líneas generales, el proceso de optimización de un escenario pasado se llevará a cabo en las siguientes fases:

- 1- Seleccionar el periodo temporal pasado del escenario que se desea optimizar, generalmente de 24 horas.
- 2- Lectura de los niveles de los depósitos iniciales y finales, estado de las bombas, de los grupos de bombeo, consignas de las válvulas, consumos para el periodo de consulta seleccionado y estructura de las tarifas aplicadas durante dicho periodo.
- 3- Previamente se comprobará que para el escenario elegido, los datos históricos leídos no presenten ninguna anomalía (ausencia de información, ni valores fuera de rango). El análisis de la fiabilidad de los datos seleccionados se realizará desde el módulo SCA-Red AD.
- 4- Los datos anteriores serán impuestos y alimentarán al optimizador. En la primera fase de la optimización se intentará optimizar el régimen de operación de los sistemas de bombeo, a partir de los estados de las bombas leídos, en una segunda fase, se intentará determinar las consignas óptimas de regulación de las válvulas para satisfacer los caudales de inyección desde los depósitos determinados en la primera fase de optimización.

- 5- Una vez ejecutado el proceso de optimización, los resultados obtenidos serán evaluados por el modelo de simulación hidráulica (arquitectura ANN) hasta determinar la mejor estrategia de control aplicable para el intervalo de operación seleccionado, realizando una comparación con las estrategias de control reales aplicadas durante el escenario elegido. De este modo, se pueden evaluar los costes reales y óptimos durante dicho periodo seleccionado.

La optimización de escenarios pasados puede realizarse para secuencias de operación de 24h consecutivas, de esta forma pueden generarse informes comparativos de los costes energéticos del modo de operación aplicados en la situación real con los resultados generados por el optimizador durante periodos semanales o mensuales.

En la Fig. 7.6 se muestra el esquema de integración en la plataforma SCA-Red del modulo de optimización para el control operacional de escenarios pasados.

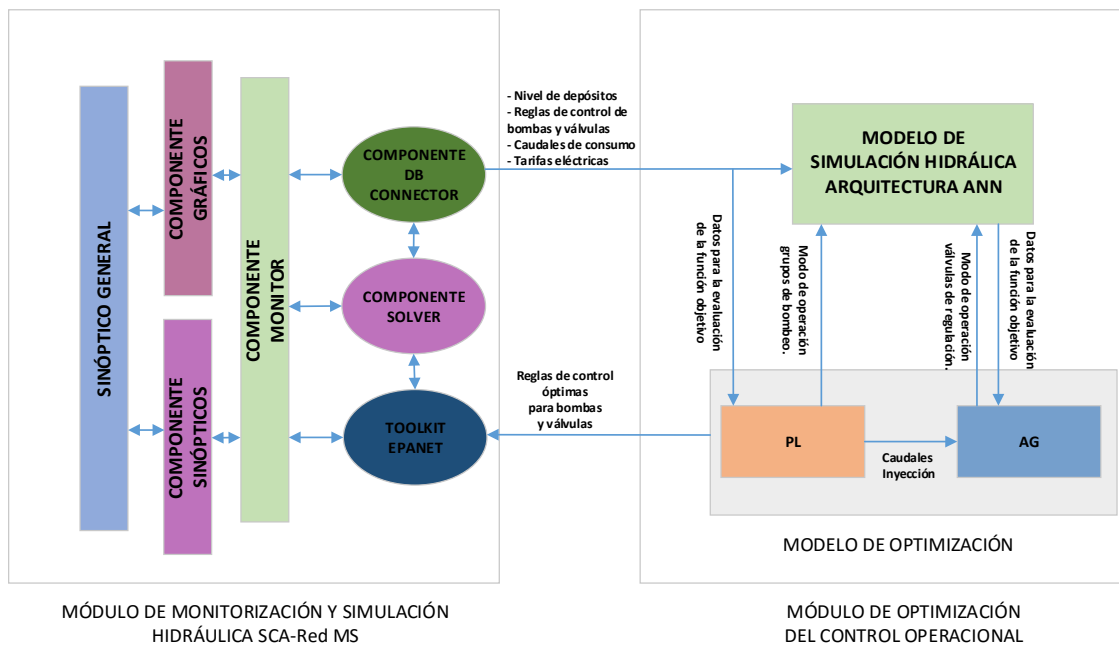


Figura. 7.6. Esquema de optimización de escenarios pasados.

La manera con la que interactuará un operador a la hora de lanzar un proceso de optimización de un escenario pasado con la plataforma SCA-Red se realizará siguiendo los siguientes pasos:

- 1 – Desde el módulo SCA-Red MS se seleccionará el periodo temporal del escenario pasado. El componente *DB-Connector* será el encargado de traer toda la información correspondiente a los niveles iniciales y finales de los depósitos, reglas de control de bombas y válvulas tanto del modelo hidráulico que gestiona el módulo SCA-Red MS

como de las variables consideradas en la arquitectura ANN, consumo de caudales y tarifas eléctricas para el escenario elegido.

2 - Posteriormente dentro del módulo de optimización, el proceso de optimización del régimen de operación de los sistemas de bombeo recibirá la información correspondiente a los niveles de los depósitos, curvas de demanda y tarifas eléctricas obtenidas del punto anterior y lanzará el proceso de optimización. Como resultado se obtendrán unas reglas de operación óptimas para los grupos de bombeo y unos caudales de inyección a la red para las condiciones establecidas por el escenario seleccionado. El estado de bombas de los grupos de bombeo formará parte de un subconjunto de entradas de la arquitectura ANN, mientras que los caudales de inyección formarán parte de las restricciones a cumplir por el segundo proceso de optimización para determinar el modo de regulación óptimo de las válvulas para distribuir dichos caudales a la red con el fin de satisfacer la demanda establecida.

3 – El segundo proceso de optimización generará diferentes combinaciones de reglas de control de las válvulas que formarán parte de las entradas de la arquitectura ANN. Cada combinación de reglas de control serán evaluadas por la arquitectura ANN y el proceso de optimización determinará si cumplen las restricciones establecidas (presión en nudos críticos y caudales de inyección).

4 – Finalmente si se cumplen todas las restricciones establecidas para el escenario pasado elegido se obtendrán unas reglas de control óptimas para las bombas y las válvulas que minimicen el coste energético. Dichas reglas de control se importarán sobre el modelo de simulación hidráulica integrado en el módulo SCA-Red MS. Los resultados obtenidos tras la simulación (*componente Solver*) serán gestionados por el componente *Monitor*. Dicho componente será el encargado de gestionar las acciones realizadas por el operador a la hora de representar gráficos comparativos (*componente gráficos*) del escenario elegido con los resultados de la optimización, así como la visualización numérica de los datos sobre los paneles sinópticos de las estaciones remotas (*componente sinópticos*) y sinópticos principales (*componente sinóptico general*). Por otra parte, el operador podrá evaluar los costes energéticos de ambos escenarios, analizando las posibles desviaciones para cada instante de tiempo del escenario elegido.

7.13.2 Optimización de escenarios futuros y tiempo real

Para abordar el proceso de optimización de escenarios futuros y en tiempo real a diferencia de la optimización de escenarios pasados, es necesario estimar los consumos de agua mediante un modelo de previsión de demanda para un periodo de optimización a 24 horas. Las distintas fases de ejecución que intervienen en el proceso de optimización se describen a continuación conforme al esquema mostrado en la Fig. 7.7:

- 1- Lectura de los datos necesarios para realizar el proceso de optimización de la red de abastecimiento. Para ello los niveles actuales de los depósitos, estado de las bombas de las estaciones de bombeo existentes en la red de abastecimiento, y consignas de operación de las válvulas se leerán a través del componente *DBOPC Connector* del módulo SCA-Red MS, los consumos de caudales de las últimas horas y las tarifas eléctricas correspondientes al periodo de optimización se leerán a través del componente *DB Connector*. Para el escenario de optimización a tiempo futuro se forzará el nivel final de los depósitos.
- 2- Una vez realizada la lectura actualizada de los consumos de agua, estos datos alimentarán al modelo de previsión de demanda, para calcular los consumos para las próximas 24 horas.
- 3- Tanto las curvas de demanda previstas generadas en el punto 2 como los datos del estado de la red obtenidos en el punto 1 (estado de bombas, niveles de depósitos) serán enviados al proceso de optimización del régimen de operación de las estaciones de bombeo (PL) mientras que a la arquitectura ANN y al proceso de optimización de la regulación de las válvulas (GA) se le enviarán además los datos de las consignas de válvulas.
- 4- El optimizador proporcionará las estrategias de control para las próximas 24h a través de los resultados obtenidos de la simulación hidráulica realizada por la arquitectura ANN, proporcionando los datos necesarios para la validación de la función objetivo, hasta obtener las soluciones mas óptimas.
- 5- De los resultados obtenidos en el punto 4 se seleccionará la mejor estrategia operacional para las próximas 24 horas. Las reglas de control óptimas se enviarán al módulo SCA-Red MS y se cargarán en el modelo de simulación hidráulica para comparar los resultados con el régimen de operación real.
- 6- Para el escenario de optimización en tiempo real se aplicarán las consignas de control de la primera hora, entre las 24 horas previstas en el punto anterior.
- 7- Para las próximas horas del periodo de operación, se repetirán los pasos del 1 al 6 de forma continuada, implementando la 1ª hora de las estrategias de operación obtenidas para el escenario en tiempo real.

En el proceso de optimización de escenarios futuros conforme transcurre el tiempo se van comparando las reglas de control óptimas con el régimen de operación real de la red a través de los paneles sinópticos y los gráficos de evolución. Concluido el periodo se pueden evaluar los costes unitarios previstos con los costes unitarios del modo de operación real. Llegados a este punto se puede volver a lanzar el proceso de optimización forzando los niveles finales de los depósitos pero en este caso el escenario de optimización se trataría como un escenario pasado como en el descrito en el apartado 7.13.1.

En el proceso de optimización en tiempo real, los costes energéticos no son comparables en cada hora debido a que se lanza el proceso de optimización en base a los niveles de depósito y las consignas de bombas y válvulas reales del instante actual no optimizado. En este caso el objetivo es comparar la viabilidad de aplicar un control óptimo frente al modo de operación real de la red en ese momento.

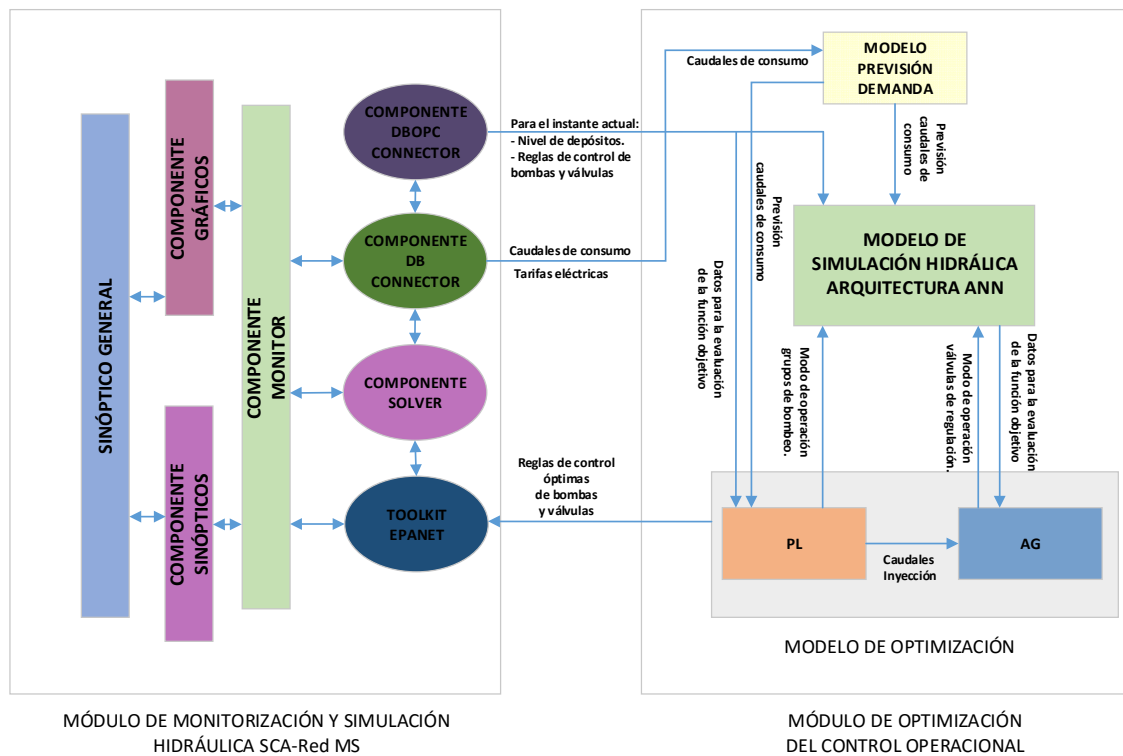


Figura. 7.7. Esquema de optimización de escenarios futuros y tiempo real.

CAPÍTULO 8. CASO DE ESTUDIO: APLICACIÓN DE LA RED DE ABASTECIMIENTO DE AGUA A VALENCIA Y SU AREA METROPOLITANA

8.1 INTRODUCCIÓN

El presente capítulo tiene como objetivo aplicar todos los modelos planteados en los capítulos anteriores a un caso real, el modelo arterial de la red de distribución de agua a Valencia y su área metropolitana. Para este caso de estudio, a partir de este modelo hidráulico se generará un metamodelo basado en una arquitectura ANN que se utilizará como sustituto del simulador hidráulico, finalmente el metamodelo se conectará con un optimizador híbrido desarrollado en dos etapas, la primera etapa se encargará de reducir los costes energéticos de las estaciones de bombeo dando como resultado las consignas óptimas del estado de bombas para un periodo de operación de 24 horas, en este primer bloque se ha desarrollado un algoritmo aplicando programación lineal. En el segundo bloque de optimización basado en AG se optimizará la regulación de las válvulas para satisfacer la demanda de los distintos sectores en los que se divide la red de abastecimiento.

8.2 DESCRIPCIÓN DE LA RED HIDRÁULICA

La ciudad de Valencia y su área metropolitana se ubican en la costa este de España, la ciudad es abastecida por el río Turia. Esta zona está densamente poblada por 1,5 millones de habitantes, distribuidos en 44 poblaciones.

La red que abastece a la ciudad de Valencia se estableció por primera vez en el año 1900 y ha ido creciendo en círculos y hacia la parte este desde entonces. La primera fuente de agua potable fue la planta de tratamiento de La Presa, que extrae agua del río Turia. Su trazado ha ido mejorando con el tiempo. La capacidad actual de la planta es de 2,2 m³/s, y recientemente se ha ampliado con un metro cúbico adicional por segundo.

En la actualidad, la Red de Valencia está incluida en un sistema de distribución más grande que comprende todas las redes de un total de 44 pueblos. Esta entidad fue denominada Sistema Básico Metropolitano (SBM), y uno de sus principales objetivos era poder abastecer a todas las poblaciones con aguas superficiales.

De esta forma, durante los años 80, con el aumento del consumo de agua, el aumento de los nitratos de aguas subterráneas, y la necesidad de garantizar el suministro a la ciudad y su área metropolitana (SBM), obligó a las autoridades a proyectar la planta de tratamiento de Picassent, que toma agua del río Júcar por medio de un canal de transferencia. Este canal descarga el caudal restante a la planta de tratamiento de La Presa, donde se mezcla con el agua del río Turia, contribuyendo así a aumentar las fuentes alternativas para el sistema global. Como consecuencia de ello, toda la zona metropolitana se suministra actualmente con aguas superficiales.

Cuando el agua llega a la ciudad, su presión debe reducirse, sobre todo en las horas nocturnas, realizándose de forma escalonada, utilizando para ello un conjunto de válvulas que se

maniobran diariamente. Además, dichas válvulas permiten también discernir qué porcentaje del caudal total de alimentación será tomado desde cada planta, lo que tiene una importancia notable en la regulación del sistema y el análisis de los costes diarios de explotación.

Finalmente, indicar que la red está sometida a unas variaciones diarias de la demanda, que no son iguales para todas las zonas, por ejemplo, es distinta para la zona centro que para los pueblos limítrofes, lo que ha llevado a diferenciar hasta un total de 8 zonas de demanda para caracterizar el comportamiento de la red.

La Fig. 8.1 muestra un detalle de la red de Valencia correspondiente a la zona de la ciudad. Los diámetros más grandes se resaltan en rojo y con una línea más gruesa. Los diámetros más pequeños son los de color azul. En esta figura, es fácil comprobar que las tuberías principales de La Presa se conectan a la red de la ciudad por el oeste y el noroeste, y las tuberías principales de Picassent lo hacen por el suroeste.

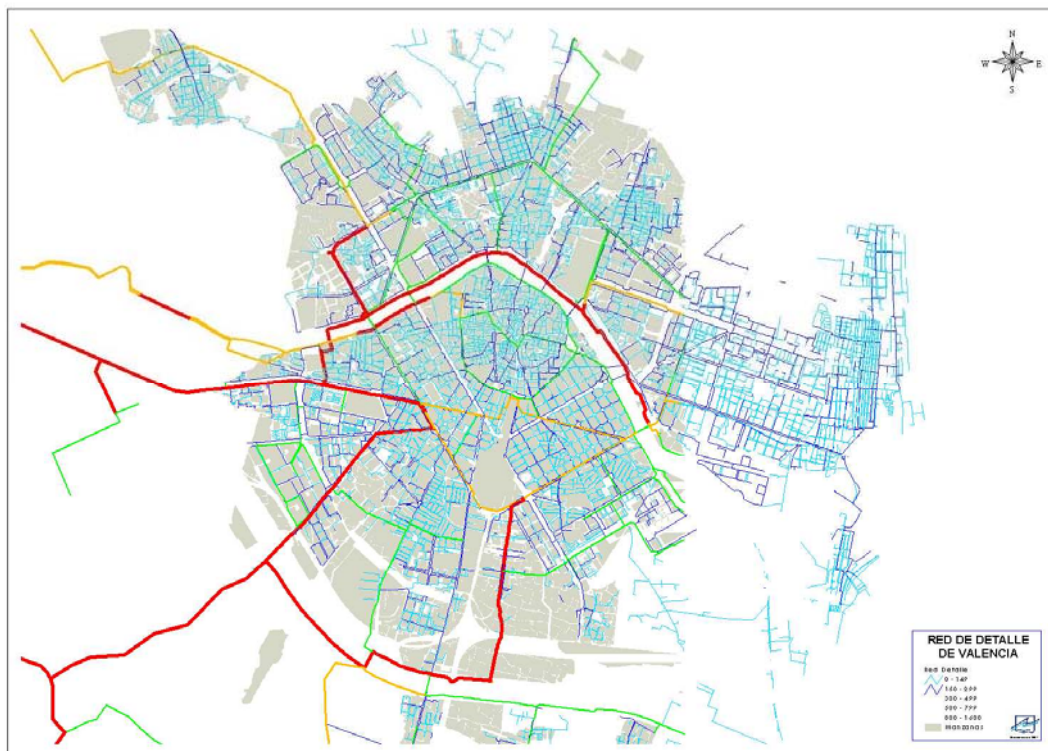


Figura. 8.1. Esquema de la red de detall de Valencia.

Como se ve en la misma figura, el sistema de distribución de Valencia es bastante denso (contiene alrededor de 30.000 tuberías) y, consecuentemente, no es fácil administrar el correspondiente volumen de información. Afortunadamente, es posible realizar varias simplificaciones con el fin de reducir esta información sin perder los datos relevantes para describir la realidad, como se demuestra a continuación.

8.3 PROCESO GENERAL PARA LA CONFECCIÓN DE DIFERENTES MODELOS.

Un modelo de la red de distribución de agua a la ciudad de Valencia y su área metropolitana ha sido desarrollado con el fin de realizar el entrenamiento de la arquitectura ANN, la cual sustituirá al simulador hidráulico EPANET a la hora de realizar el proceso de optimización.

El modelo ha tratado de ser lo más realista posible. Para ello, se ha construido un modelo de detalle en una primera instancia, usando la información SIG disponible por la empresa Aguas de Valencia, dando lugar a una red con alrededor de 26.287 nudos.

Seguidamente, este modelo se ha reducido para la calibración a un modelo más simplificado que contiene 4.286 nodos, utilizando para ello algunas herramientas desarrolladas en el entorno GISRed. Este modelo estratégico se ha constituido finalmente por 20 bombas y 69 válvulas de control.

La información del sistema SCADA se utilizó para ajustar el comportamiento de las válvulas, los elementos más importantes que causan las pérdidas de carga en la red. Por último, los resultados de la calibración fueron trasladados al modelo de detalle.

En la siguiente etapa, el modelo calibrado aún fue reducido a un modelo más simplificado de 724 nudos, dicho modelo fue utilizado para entrenar la arquitectura ANN propuesta. Para ello, sólo 10 válvulas y las bombas ubicadas en las estaciones de bombeo de las plantas de tratamiento fueron consideradas como dispositivos de control, los únicos que son susceptibles de ser regulados desde un punto de vista práctico, con el fin de minimizar los costes y para controlar las presiones, la calidad del agua, fugas o cualquier otro objetivo.

8.3.1 Confección del modelo de detalle a partir del SIG

El modelo de detalle se ha construido a través de la experiencia adquirida por el grupo REDHISP en los últimos años, y con la asistencia del departamento técnico de Aguas de Valencia. Los diferentes pasos seguidos fueron:

- a) **Importación de datos SIG:** La información inicial, como trazado de tuberías y propiedades de elementos hidráulicos, han sido capturados a partir de la base de datos del SIG, utilizando GISRed. El procedimiento de captura comprende dos fases:
 - Creación y verificación de la conectividad interna de la red.
 - Incorporación de las propiedades de los elementos de la red dentro de las tablas de la base de datos.
- b) **Ampliación de la red:** Los elementos incluidos en la base de datos del SIG no definen completamente el sistema de la red de distribución. En consecuencia fue necesario añadir información complementaria, como tuberías principales y depósitos, con sus propiedades hidráulicas y físicas.

- c) **Incorporación de válvulas de regulación:** En la red de Valencia existen aproximadamente 32 válvulas de regulación, que permiten controlar y operar la red de forma regular. Finalmente las posiciones más habituales de las válvulas durante la operación diaria han sido obtenidas a partir de la base de datos SCADA, dicha información posteriormente ha sido preprocesada por la plataforma SCA-Red.
- d) **Incorporación de las plantas de tratamiento:** Representan la fuente de alimentación al sistema, y las estaciones de bombeo principales. Todas las bombas, embalses y válvulas de control de los subsistemas fueron incluidas también. Las figuras 8.2 y 8.3 muestran un esquema de detalle de cada planta de tratamiento.

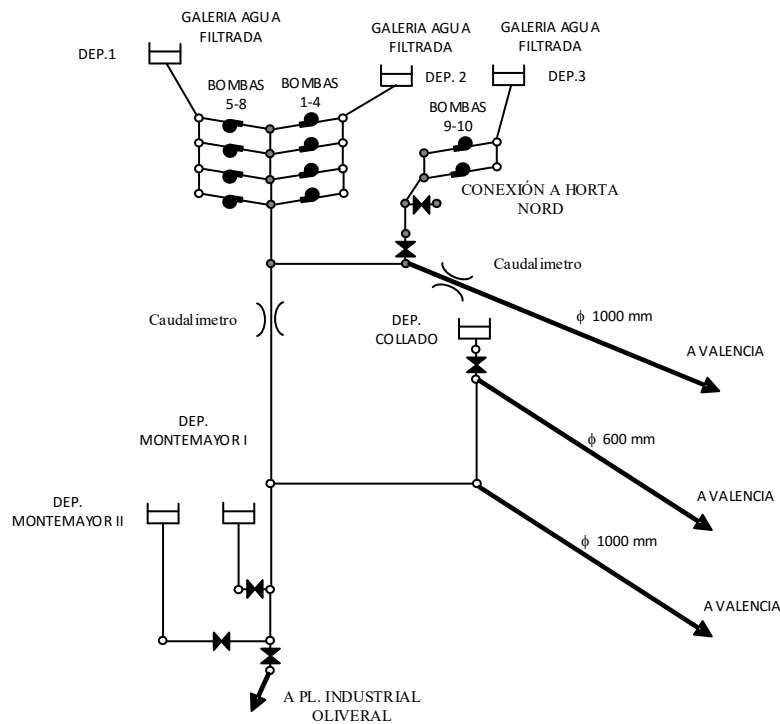


Figura. 8.2. Esquema de la planta de tratamiento de La Presa.

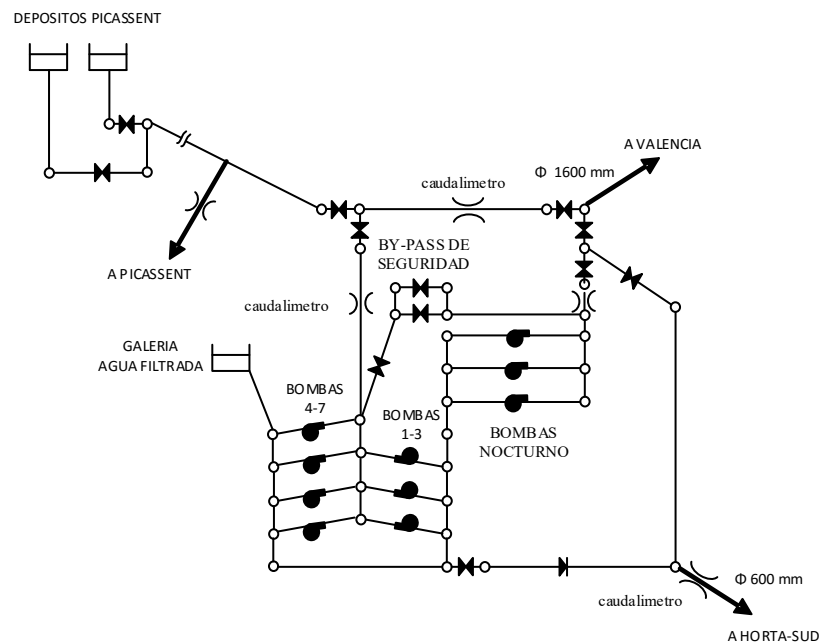


Figura. 8.3. Esquema de planta de tratamiento de Picassent

- e) **Carga de demandas:** el propósito de esta etapa es cargar todos los nudos en el modelo conforme a la distribución espacial de los abonados. El procedimiento seguido ha consistido en identificar los nudos que deberían ser cargados, teniendo en cuenta el diámetro de las tuberías (igual o menores a 200 mm) y entonces determinar la demandas en cada nudo usando los datos de facturación de un bimestre significativo, mediante un mapa de la ciudad y las herramientas SIG apropiadas. La eficiencia hidráulica también fue tomada en cuenta considerando un factor de demanda.

Seguidamente, los patrones de demanda han sido identificados a partir de las medidas de los caudalímetros ubicados en las plantas de tratamiento y posteriormente aplicados en los nudos correctamente.

- f) **Interpolación de cotas en los nudos del modelo:** Finalmente las cotas de los nudos han sido calculadas empleando el método interpolación de distancias inversas ponderadas, sobre un conjunto de 51,000 puntos disponibles en el área metropolitana, usando herramientas SIG de análisis espacial.

- g) **Estimación de los valores de rugosidad iniciales:** Uno de los parámetros de la red que el simulador hidráulico EPANET necesita saber con el fin de resolver las ecuaciones hidráulicas es la rugosidad de cada tubería en la red. Este parámetro depende de muchos factores, tales como el material de la tubería, la edad, las características del agua en las tuberías, etc. En consecuencia, resulta bastante complejo determinar cuál es el valor más adecuado para esta variable de acuerdo con todos estos factores. Con el fin de llegar a una primera aproximación de la rugosidad de cada tubería, una curva de rugosidad vs. diámetro nominal - edad fue confeccionada. Con esta curva fue posible calcular la rugosidad de cada tubería de acuerdo a su diámetro y su edad. Por último, durante el proceso de calibración, desarrollado como se describe a continuación, estas rugosidades fueron actualizadas con el fin de ajustar la respuesta del modelo a los valores medidos.

h) **Calibración del modelo de detalle:** el proceso de calibración del modelo de detalle no se ha desarrollado directamente. Como paso previo, un proceso completo de calibración fue realizado sobre el modelo estratégico y una vez llegada a una respuesta adecuada del mismo, todas las modificaciones (rugosidad de las tuberías, cotas de nudos, curvas de modulación, etc.) fueron aplicadas de nuevo al modelo de detalle. Por último, algunos parámetros básicos, como la rugosidad de las tuberías secundarias y distribución de las tuberías en el modelo de detalle fueron ajustados, como último punto en el proceso de calibración.

La Fig. 8.4 muestra el modelo de detalle de 26.000 nudos obtenido:

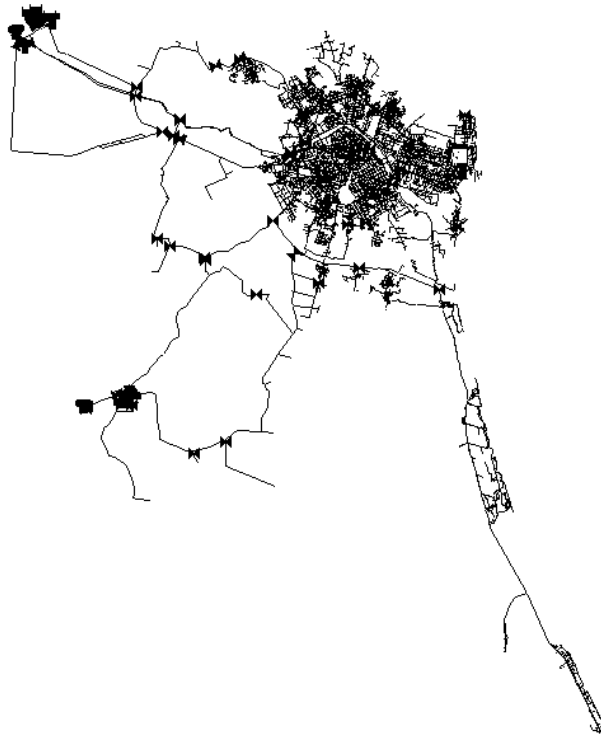


Figura. 8.4. Modelo de detalle de 26.000 nudos.

8.3.2 Confección y calibración del modelo estratégico

El objetivo principal del modelo estratégico fue obtener un modelo más pequeño y más práctico, que permitiese reducir la cantidad de información y el tiempo de cálculo con fines de calibración.

a) **Simplificación del modelo de detalle:** El procedimiento seguido con el fin de obtener un modelo estratégico se ha basado en la simplificación del modelo de detalle mediante la eliminación de diámetros por debajo de 200 mm, y manteniendo el resto de los elementos del sistema. Al igual que en los pasos anteriores, se utilizaron herramientas SIG durante la simplificación para comprobar el sentido y la conectividad de la red durante el proceso de simplificación. Con el fin de volver a asignar las demandas en los nudos conservados, se ha

aplicado el mismo procedimiento utilizado que en el modelo de detalle. Por último, el nuevo modelo obtenido se validó con el simulador hidráulico EPANET. La Fig. 8.7 muestra el esquema del modelo estratégico final.

b) Calibración del modelo estratégico: El procedimiento de calibración ha permitido ajustar varios parámetros como la rugosidad de las tuberías, las leyes de control o las curvas de modulación, con el fin de acercarse a los resultados del modelo real. Magnitudes como caudales, niveles de depósito y presiones fueron comparadas en esos puntos medidos por telemetría, y capturadas de la base de datos SCADA. Concretamente, presiones sobre 40 puntos, la mayoría de ellos nudos aguas arriba y aguas abajo de las válvulas de control, y los caudales en 10 tuberías principales fueron ajustadas durante el proceso de calibración.

En lo que se refiere a la rugosidad, diferentes valores fueron asignados inicialmente conforme a la edad y el material de las tuberías, las curvas de modulación también fueron ajustadas con el fin de satisfacer la demanda global. Las principales variables que fueron utilizadas para calibrar el modelo fueron las pérdidas de carga en las válvulas. A pesar que todas las válvulas de control son operadas de forma remota desde la sala de control, con el fin de facilitar el procedimiento de calibración, se han contemplado diferentes tipos de comportamiento para las mismas: VRP, VSP, VLQ, VRC, VR en función de los criterios hidráulicos. De esta forma una de las tres variables por válvula (caudal, presión aguas arriba o presión aguas abajo) podrían ser forzadas, siendo las otras dos ajustadas, cuando las medidas están disponibles. Finalmente, contrastando las tres variables por válvula con la posición de la misma obtenida del SCADA en cada hora, se calculó el comportamiento real de cada válvula.

Las siguientes figuras muestran los resultados en varios nudos y tuberías del modelo calibrado. En general, la bondad del ajuste obtenido fue bastante aceptable, por lo que se puede concluir que el procedimiento de calibración se realizó con éxito. La Fig. 8.5 muestra varios nudos de calibración, la presión simulada se muestra mediante una línea roja y las magnitudes medidas con cuadrados verdes. Como se ve, los valores calculados y medidos coinciden en un alto porcentaje y el modelo se puede considerar que está bien calibrado. La Fig. 8.6 muestra los caudales simulados en algunas tuberías principales. En este caso el ajuste parece ser peor, pero debe tenerse en cuenta que valores de caudal son mucho más complejos de ajustar que las presiones, por lo que los resultados obtenidos están dentro de un rango aceptable.

Capítulo 8. Caso de estudio: Aplicación de la red de abastecimiento de agua a Valencia y su área metropolitana.

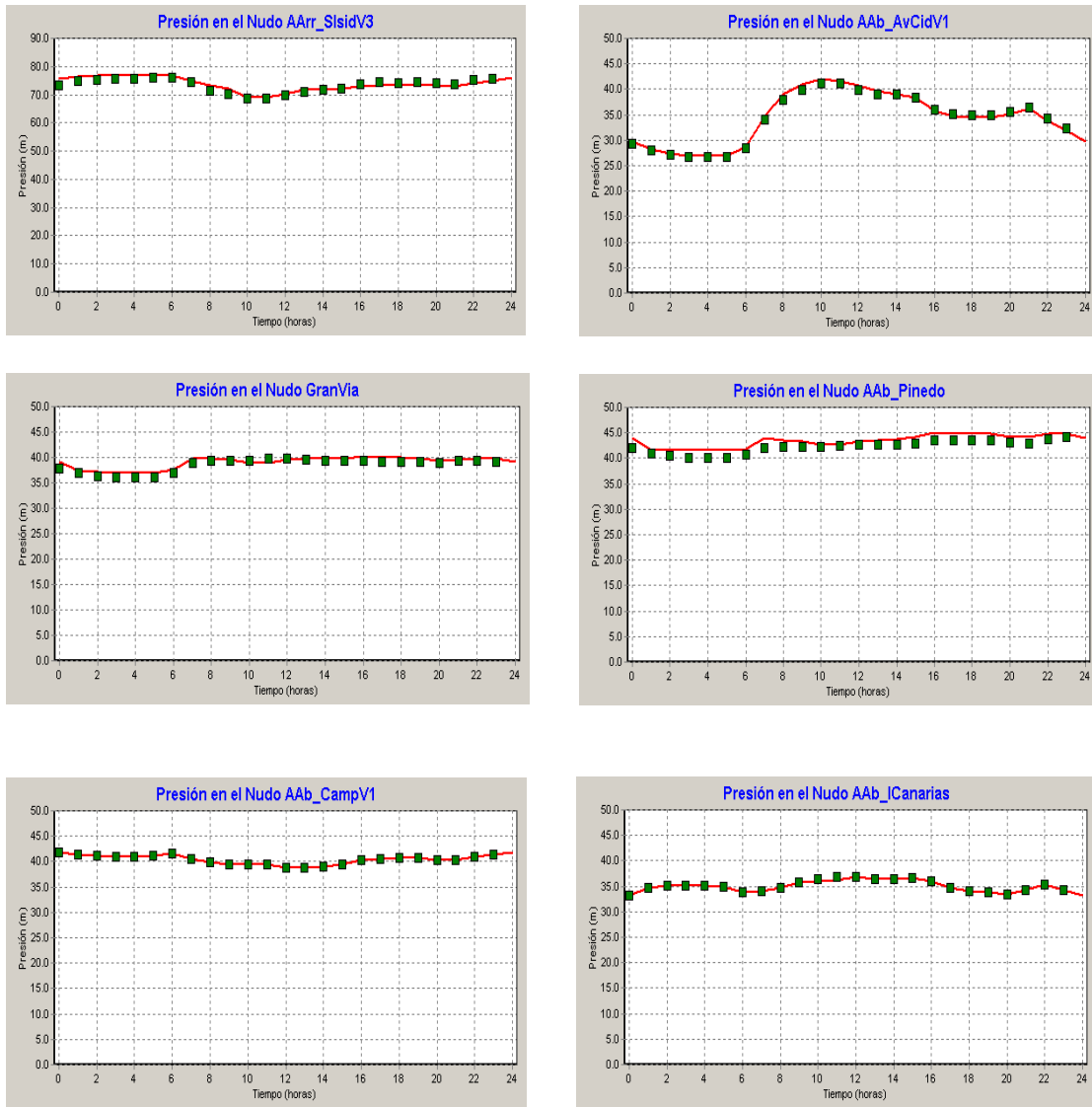


Figura. 8.5. Curvas de presión de nudos representativos

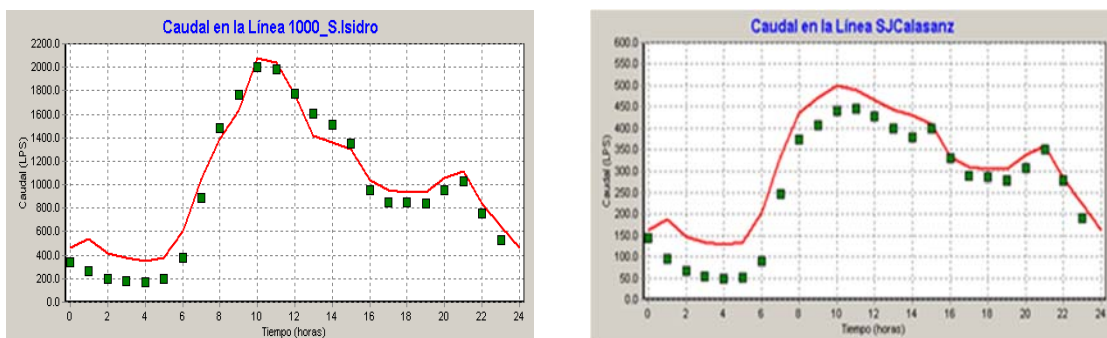


Figura. 8.6. Curvas de caudal en tuberías principales.

- c) **Actualización del modelo de detalle:** A la hora de tener un modelo de detalle calibrado para su uso futuro en la verificación de los resultados de la arquitectura ANN, con el objetivo de simular el comportamiento lo mas próximo posible a la realidad, los resultados del modelo estratégico calibrado (perdidas en válvulas, rugosidad en tuberías y curvas de modulación) fueron trasladados de nuevo a los elementos correspondientes del modelo de detalle. La rugosidad de las tuberías restantes fueron asumidas en función del diámetro, edad y factores asignados a las tuberías del modelo estratégico dentro de su misma zona. Las curvas de modulación de los nudos restantes del modelo de detalle fueron asignadas de acuerdo a la zona de ubicación.

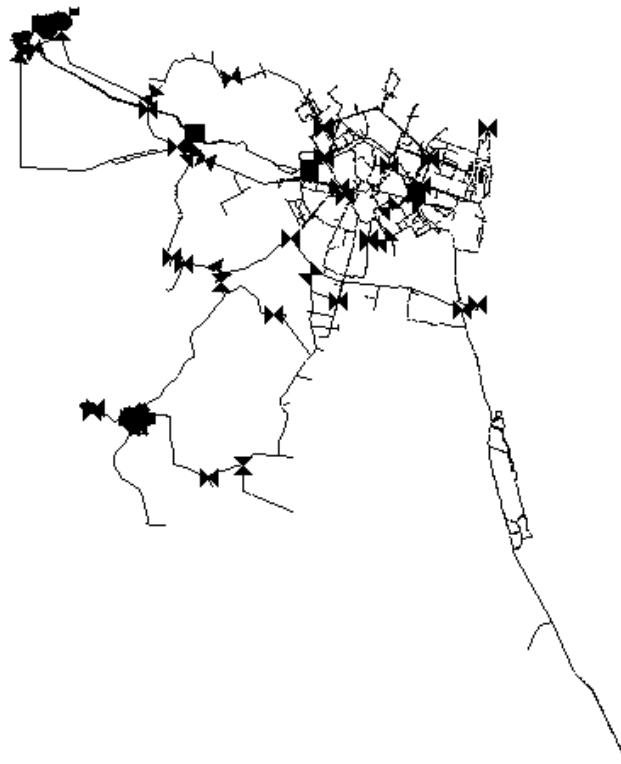


Figura. 8.7. Modelo estratégico de la red de Valencia (5000 nudos).

8.3.3 Confección del modelo hidráulico para el entrenamiento de la ANN

Con el objetivo de entrenar la arquitectura ANN era conveniente trabajar con un modelo reducido por dos razones:

- a) El tiempo de cálculo necesario para generar los patrones de entrenamiento y de test.
- b) La facilidad para entender como la arquitectura ANN se aproxima al comportamiento de la red hidráulica y evalúa como seleccionar las variables más sensibles con el fin de obtener los mejores resultados. Así, el modelo estratégico previamente calibrado, se

simplificó a un modelo hidráulico de 724 nudos. En la Fig. 8.8 se muestra el modelo arterial de la red de distribución de agua que se ha utilizado para realizar el entrenamiento de la ANN.

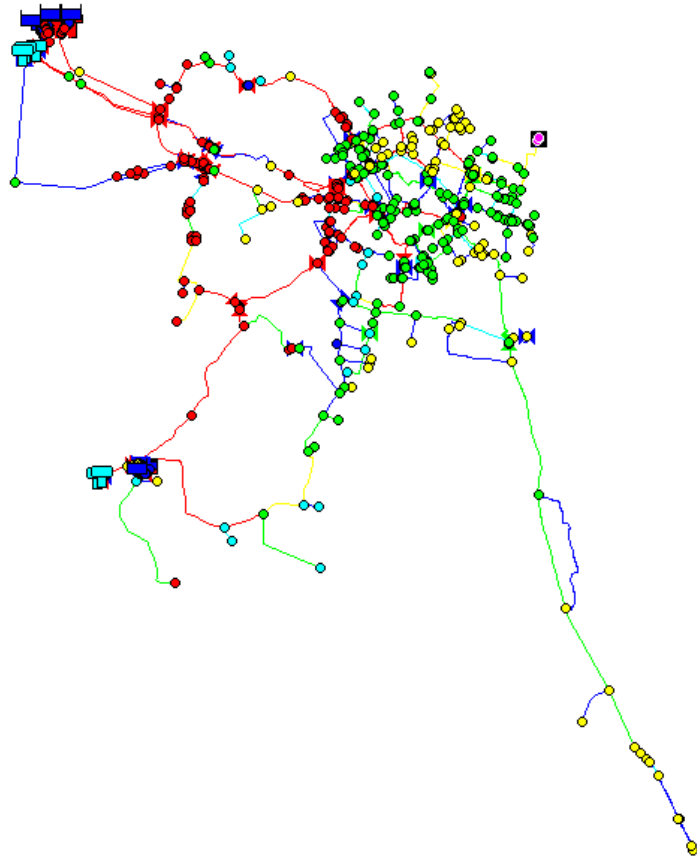


Figura. 8.8. Esquema de la red de distribución utilizada para el entrenamiento de la ANN.

En la Tabla 8.1 se contabilizan de forma resumida los elementos que constituyen el modelo de dicha red. Posteriormente en el apartado siguiente se describen los elementos de la misma que van a formar parte en el diseño de la arquitectura de la ANN.

Número de Nudos Caudal	724
Número de Embalses	4
Número de Depósitos	5
Número de Tuberías	772
Número de Bombas	20
Número de Válvulas	63

Tabla 8.1. Resumen de los elementos de la red de Valencia.

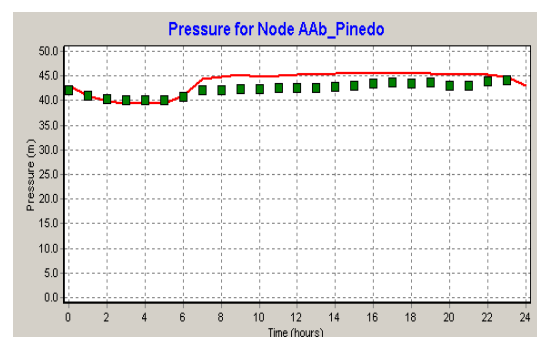
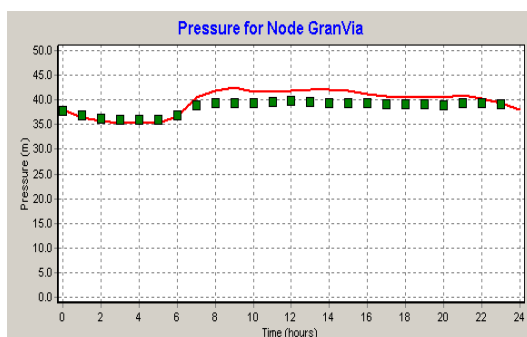
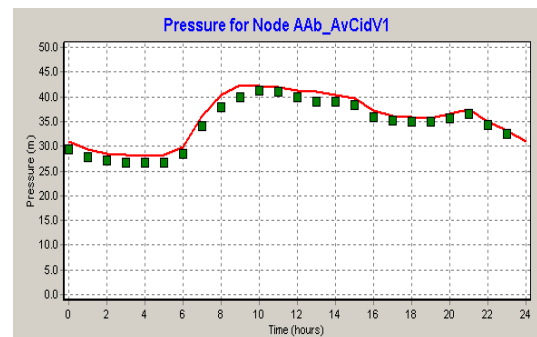
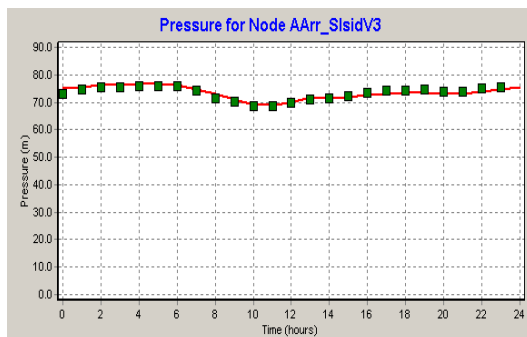
El modelo arterial de la Fig. 8.8, fue obtenido mediante la simplificación del modelo previamente calibrado. La mayoría de las tuberías inferiores de 300 mm fueron eliminadas, así como aquellas válvulas sobre las que rara vez se efectuaban maniobras. Las nuevas demandas en los nudos del modelo reducido fueron reasignadas utilizando los datos de facturación. Se han conservado los mismos patrones de demanda agrupados por zonas, así como las leyes de control, con el fin de validar el modelo mediante una simulación hidráulica utilizando EPANET.

Finalmente las variables (demandas y reglas de control) se cambiaron de forma realista para generar los conjuntos de datos de entrenamiento y test.

Las Figs. 8.9 y 8.10 muestran, como en el modelo estratégico, ciertos nudos de calibración y tuberías críticas, han sido utilizados con el fin de ajustar los diferentes parámetros de la red. Como era de esperar, el proceso de entrenamiento ha sido más difícil de calibrar debido a sus particulares características que han tenido que tenerse en cuenta.

En primer lugar, el número de elementos (tuberías y nudos) es menor que en el modelo estratégico, por lo que los caudales en tuberías y la demanda en los nudos serán bastante diferentes. En consecuencia, las pérdidas de carga calculadas y las trayectorias de los caudales no coinciden exactamente con los valores medidos lo que produce que las magnitudes hidráulicas varíen de un modelo a otro. Es por ello, que hay diferencias significativas entre los valores calculados y medidos, siempre dentro de un rango admisible, que no ocurrían en el modelo estratégico.

Sin embargo, el comportamiento de la red en general, en referencia a la distribución de caudales en tuberías y las presiones en los nudos se aproxima a las medidas reales.



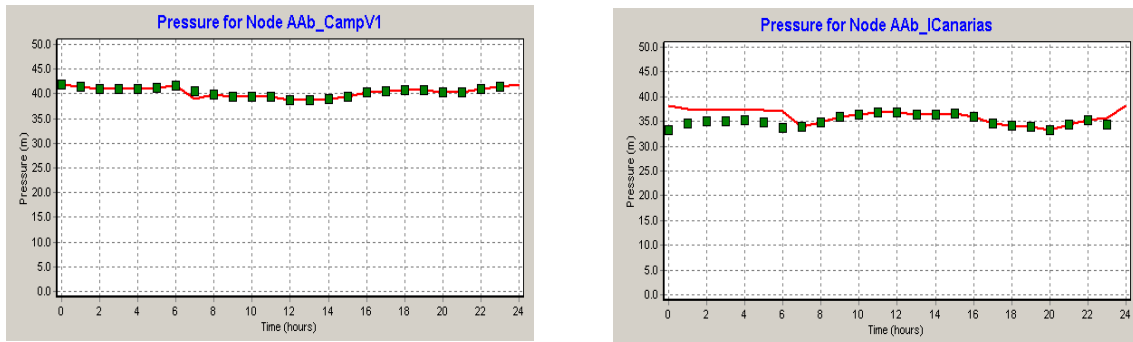


Figura. 8.9. Gráficos de calibración de presiones en nudos críticos.

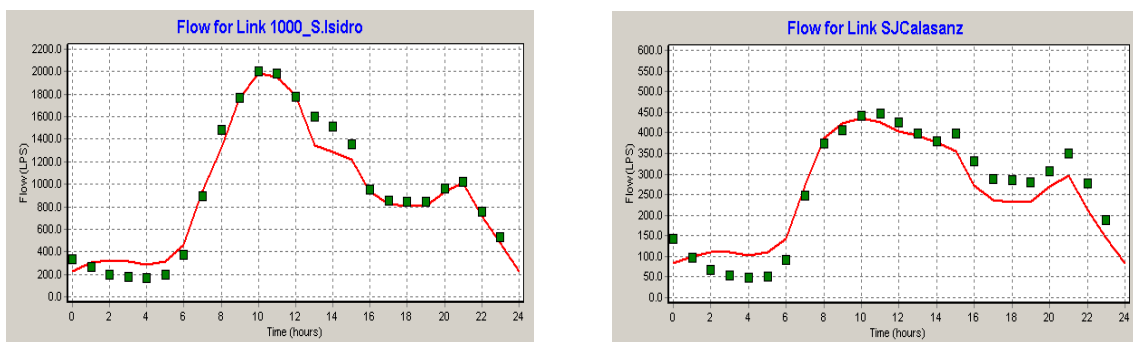


Figura. 8.10. Caudales en tuberías principales.

8.3.4 Régimen de operación de la red de Valencia

El funcionamiento de la red de Valencia es bastante complicado debido a su particular configuración, y al gran número de factores a tenerse en cuenta, como la operación de las plantas de tratamiento, los caudales diurnos y nocturnos, y la regulación de las válvulas, etc.

En cuanto a la operación de la red, resulta de gran importancia el hecho de que el agua se proporciona a partir de dos embalses principales, alimentados desde los depósitos de las plantas de tratamiento a través de las estaciones de bombeo. La cota de los embalses está aproximadamente en 100 m, mientras que la cota de los nudos de demanda varía entre 0 y 30 m.

Por lo tanto, es necesario mantener las presiones mediante el control de una serie de válvulas de regulación situadas estratégicamente. Debido a que la altura piezométrica en las plantas es alta, algunas de las válvulas mencionadas producen una importante pérdida de carga.

Como conclusión, gracias al rango de operación de las válvulas, es posible mantener la presión en la red dentro de unos límites durante el periodo de 24 horas, independientemente de la demanda total. Por otro lado, operando dichas válvulas, también es posible regular el volumen total de agua suministrada por cada planta.

8.3.4.1 Objetivos principales

Como se ha descrito antes, los dispositivos de regulación permiten un completo control y la regulación de la red de Valencia. Por tanto, es posible operar el sistema con el fin de conseguir los siguientes objetivos de manera simultánea:

- **Obtener una distribución de caudales más económica:** En resumen, suministrar agua desde la planta de Picassent tienen menores costes económicos, por lo que hoy en día, la regulación de la red intenta inyectar tanta agua como sea posible de esta planta.
- **Reducir las presiones durante la noche.** Generalmente las presiones aumentan durante horas nocturnas, debido a la reducción de las demandas, y por tanto las pérdidas de carga. Por esa razón, el porcentaje de fugas es alto durante este período. Un método para reducir estas pérdidas es mediante la reducción de las presiones que actúan sobre las válvulas. En el caso de la red de Valencia, este es uno de los principales objetivos de la regulación.
- **Obtener una presión constante de servicio:** La empresa debe garantizar una presión mínima de 25m en todos los nudos de consumo de la red. Lógicamente, y en función del patrón de demanda, las pérdidas de carga en tuberías varían de hora en hora, de acuerdo con los flujos de caudal, por lo que el esquema de regulación se construyó con el fin de evitar estas variaciones, tratando de conseguir presiones constantes, sin tener en cuenta el caudal demandado por el sistema. Obviamente esta presión contante también depende de los períodos nocturnos y diurnos.

Como consecuencia de esta política, existen tres escenarios diferentes de comportamiento de la red, relacionados con las trayectorias seguidas por los caudales desde las plantas hasta los abonados: periodo nocturno desde las 0 a.m – 6 a.m, periodo diurno 7 a.m – 15 p.m y de 16 p.m a 23 p.m. como muestra la Fig. 8.11.

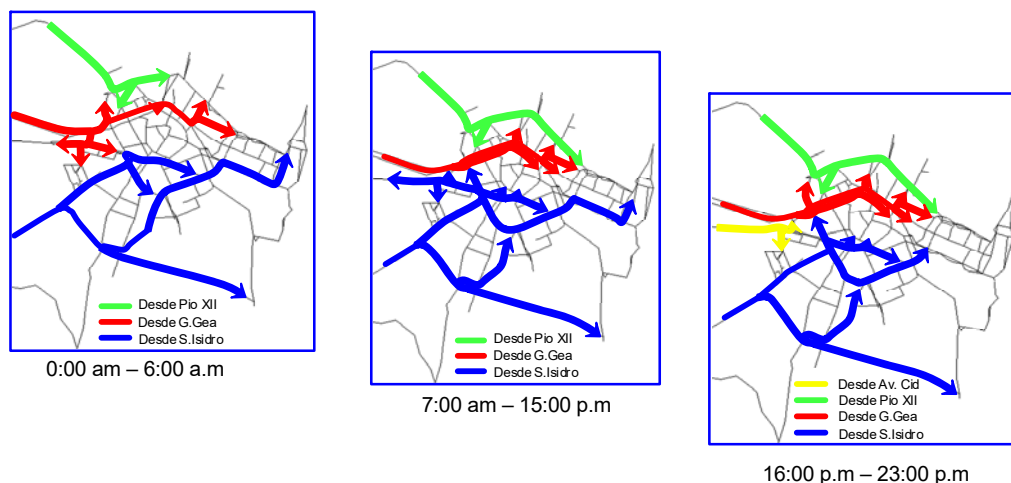


Figura. 8.11. Diferentes esquemas de operación de la red de Valencia.

Con la distribución de caudales representada en la Fig. 8.11 se alcanzan los objetivos mencionados, dando lugar hoy en día a una solución aceptable al problema de la regulación de la red.

Sin embargo, a partir del análisis de los resultados del modelo, pueden encontrarse algunos puntos críticos, tales como, la entrada de La Presa por Alquería Nova, las válvulas en Avda. del Cid, San Isidro, Campanar, Blasco Ibáñez, etc. Estos puntos muestran una gran influencia en el comportamiento de la red y deben ser tenidos en cuenta en futuros análisis del sistema.

De la misma forma, se realizó una simulación del suministro por parte de una sola planta, lo que dio como resultado que el sistema no responde ante el fallo de una planta sin una importante reducción de presiones. Del mismo análisis se concluyó que se tendría que considerar las consecuencias de un aumento importante en las demandas, las cuales no pueden ser suministradas por el sistema actual.

8.3.4.2 Tratamiento de la información SCADA

La plataforma SCARed es la encargada de gestionar la información procedente del SCADA, alojarla en sus correspondientes tablas de históricos dentro de su modelo de base de datos y adecuarla a los intervalos de tiempo necesarios para que posteriormente esos datos sean cargados en el modelo de simulación hidráulica de la red sobre el que se desea realizar el análisis en cuestión.

Existe un procedimiento dentro de la base de datos que permite exportar dos tipos de resultados:

- 1.- **Series históricas:** Estas series se componen de los valores medios obtenidos para cualquier intervalo de agrupación seleccionado (desde frecuencias de 1 min hasta frecuencias diarias) o sobre las variables seleccionadas.
- 2.- **Valores promedio:** Esta opción genera una serie de 24 valores correspondientes a la media horaria durante un período determinado de las variables seleccionadas. Además del valor medio, se calcula la desviación estándar de la variable, posteriormente se crean unas bandas ($\text{media} \pm \text{desviación estándar}$) y se representan gráficamente de forma conjunta con la media sobre una hoja de cálculo, como se puede ver en la Fig. 8.12.

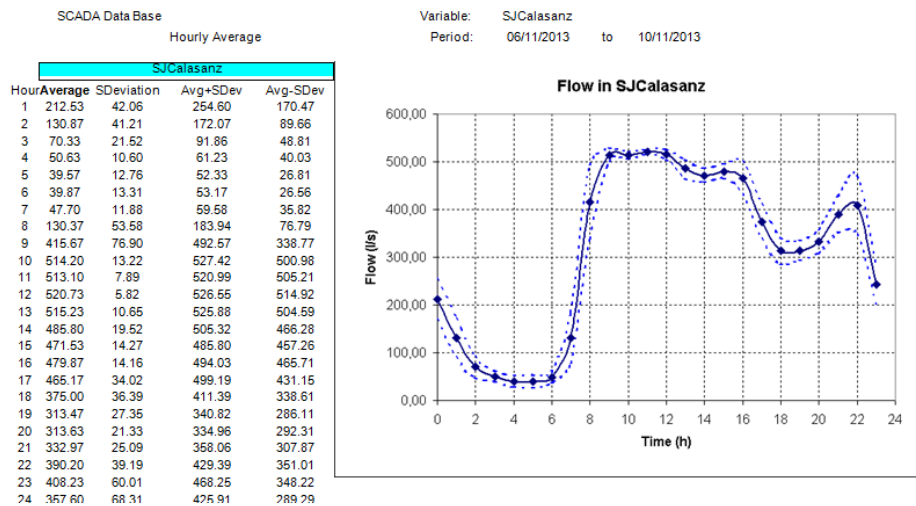


Figura. 8.12. Promedio horario del caudalímetro SJCalasanz.

SCA-Red proporciona todos los datos necesarios para alcanzar los siguientes objetivos:

1. **Obtención de la curva de modulación de la demanda total:** Las magnitudes medidas en las plantas de tratamiento han permitido determinar el caudal inyectado a la red en cada hora durante todo el año. La curva de modulación de la demanda total se ha calculado como una media horaria del caudal inyectado, estos datos han sido normalizados posteriormente para ser asignados a los nudos de consumo. La curva de modulación de la demanda total del sistema se muestra en la Fig. 8.13.

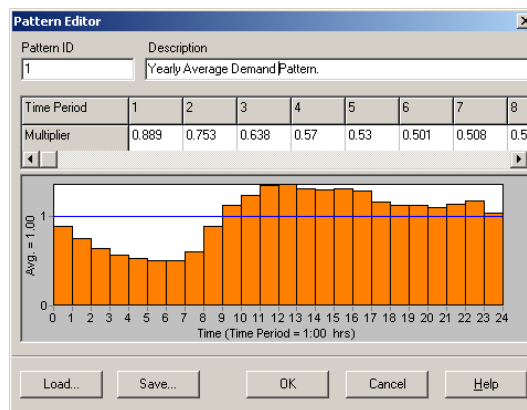


Figura. 8.13. Curva de modulación de la demanda total sobre el editor de patrones EPANET.

2. **Declaración de leyes de control:** Se han definido dos tipos de leyes de control, por una parte las relacionadas con las válvulas y por otro lado, las relacionadas con las plantas de tratamiento, concretamente las que afectan al régimen de operación de las bombas. Por una parte, un conjunto de consignas horarias han sido calculadas para cada válvula (generalmente presiones aguas abajo de la válvula correspondiente). Por otro lado, se han definido las leyes de control de las bombas con el fin de obtener una curva de niveles de depósito para que coincidan con los valores medidos.

3. Generación de archivos de calibración: Finalmente han sido generados tres archivos de calibración (presiones, caudales y alturas piezométricas) para verificar la respuesta del modelo. Estos archivos contienen más de 40 puntos donde se comprueban las presiones y las alturas piezométricas, y más de 10 tuberías donde se comprueba el caudal en la red.

Toda la información que se acaba de comentar se utilizó para calibrar correctamente el modelo, obviamente con cierta incertidumbre pero dentro de unos rangos de resultado aceptables.

8.4 ARQUITECTURA ANN EMPLEADA PARA LA SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRAULICO DE LA RED DE ABASTECIMIENTO

Conforme a los elementos de la red descritos en la Tabla 8.1, en la Fig. 8.14 se muestra la arquitectura ANN empleada para simular el comportamiento dinámico de la red de abastecimiento, en aquellas variables que intervienen en la regulación del sistema y el análisis de los costes energéticos de la operación.

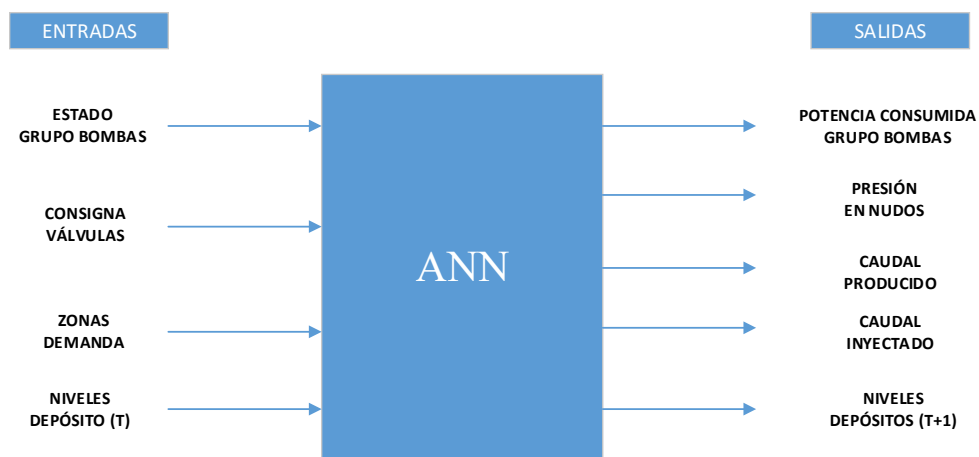


Figura. 8.14. Esquema de la arquitectura ANN empleada.

Conforme al esquema anterior, la configuración de entradas/salidas y nodos en la capa oculta se detalla en la siguiente tabla.

ENTRADAS	24
NODOS EN LA CAPA OCULTA	100
SALIDAS	18

Tabla 8.2. Resumen configuración arquitectura ANN.

8.4.1 Variables de entrada de la arquitectura ANN

A nivel de detalle, cada grupo de variables de entrada que configuran la arquitectura ANN se desglosa en más variables, que pasaremos a detallar a continuación:

- **Estado grupo bombas**

Por cada planta de tratamiento se tendrán en cuenta los estados de las bombas, agrupados por grupos de bombeo, tal configuración se asemeja a como operan las bombas en el sistema real,

de esta forma a nivel global se contabilizan el número de bombas activas por grupo. El número de grupos de bombeo dispuesto en cada planta se muestra en la Tabla 8.3.

Num Entrada	Id Variable	Tipo Entrada (1/0)
1	PresaGb1	Grupo de bombeo Presa
2	PresaGb2	Grupo de bombeo Presa
3	PresaGb3	Grupo de bombeo Presa
4	PresaGb4	Grupo de bombeo Presa
5	PicGb1	Grupo de bombeo Picassent
6	PicGb2	Grupo de bombeo Picassent

Tabla 8.3. Variables de entrada ANN para los grupos de bombeo.

▪ Consignas de válvula

A la hora regular las presiones en determinados puntos de la red, se determinarán las válvulas sobre las que se tendrán que establecer las leyes de control con las consignas de presión y/o apertura/cierre. En la Tabla 8.4 se enumeran las válvulas que formarán parte de las entradas de la arquitectura ANN.

Num Entrada	Id Variable	Tipo Entrada (m)
7	SIsidroV3	Consigna Válvula
8	SIsidroV2	Consigna Válvula
9	SOnofreV2	Consigna Válvula
10	NIIV3	Consigna Válvula
11	FeriaMuestras	Consigna Válvula
12	CampV1	Consigna Válvula
13	CampV2	Consigna Válvula
14	AvCidV1	Consigna Válvula (1=Abierta;0=Cerrada)
15	TresForques	Consigna Válvula
16	GAvilés	Consigna Válvula

Tabla 8.4. Variables de entrada ANN para las consignas de válvula.

▪ Zonas de demanda

Otro conjunto de variables de entrada de la arquitectura ANN propuesta serán las zonas de demanda que determinan la demanda total de toda la red de abastecimiento.

Num Entrada	Id Variable	Tipo Entrada (l/s)
17	Valencia	Zona de demanda
18	Pueblos	Zona de demanda
19	Pinedo	Zona de demanda
20	GCanaria	Zona de demanda
21	HortaNord	Zona de demanda
22	TavBlanques	Zona de demanda

Tabla 8.5. Variables de entrada para las zonas de demanda.

▪ **Niveles de depósito**

Finalmente tendremos como variables de entrada los niveles de depósitos de cada una de las plantas de tratamiento en el instante t .

Num Entrada	Id Variable	Tipo Entrada (m)
23	Montemayor1	Nivel de depósito
24	Picassent1	Nivel de depósito

Tabla 8.6. Variables de entrada ANN para los niveles de depósito en el instante t .

8.4.2 Variables de salida de la arquitectura ANN

▪ **Potencia consumida por los grupos de bombeo**

El primer grupo de 6 salidas de la arquitectura ANN corresponde a la potencia total consumida por los 6 grupos de bombeo distribuidos en las dos plantas de tratamiento existentes en la red de abastecimiento del presente caso de estudio: 4 grupos de bombeo para la planta de tratamiento de La Presa, y 2 grupos de bombeo para la planta de tratamiento de Picassent.

Num salida	Id Variable	Tipo salida (kW)
1	PotPresaGb1	Potencia consumida
2	PotPresaGb2	Potencia consumida
3	PotPresaGb3	Potencia consumida
4	PotPresaGb4	Potencia consumida
5	PotPicGb1	Potencia consumida
6	PotPicGb2	Potencia consumida

Tabla 8.7. Variables de salida ANN para la potencia consumida por los grupos de bombeo.

▪ **Presión en nudos críticos**

Las siguientes 4 variables de salida corresponderán a la presión en los nudos críticos que habría que controlar dentro de un rango de presiones en la red de distribución.

Num salida	Id Variable	Tipo salida (m)
7	GranVia	Presión
8	Pinedo	Presión
9	TavBlanques	Presión
10	GranCanaria	Presión

Tabla 8.8. Variables de salida ANN para la presión en nudos críticos

▪ **Caudales de producción**

A partir de una combinación de estado de bombas distribuidas por los grupos de bombeo que configuran las entradas de la arquitectura ANN, se obtendrán como salida unos caudales de producción por cada planta de tratamiento. Para la planta de La Presa, los caudales de producción serán QBombeoPresa y QBombeoHN y para la planta de Picassent, QGalPicassent.

Num salida	Id Variable	Tipo salida (l/s)
11	QBombeoPresa	Caudal
12	QBombeoHN	Caudal
13	QGalPicassent	Presión

Tabla 8.9. Variables de salida ANN de los caudales de producción de las plantas.

▪ **Caudales de inyección de salida de depósito.**

A fin de satisfacer la demanda a la ciudad de Valencia han de considerarse los siguientes caudales de inyección procedente del depósito de planta de La Presa (DemManises) y los caudales de inyección DemPicassent y DemHortaSud procedentes del depósito y directamente desde la planta de Picassent respectivamente.

Num salida	Id Variable	Tipo salida (l/s)
14	DemManises	Caudal
15	DemPicassent	Caudal
16	DemHortaSud	Caudal

Tabla 8.10. Variables de salida ANN para los caudales de inyección desde depósitos.

▪ **Niveles de depósito**

Finalmente como variables de salida tendremos los niveles de depósitos de cada una de las plantas de tratamiento para el instante $t+1$ de simulación.

Num Entrada	Id Variable	Tipo Entrada (m)
23	Montemayor1	Nivel de depósito
24	Picassent1	Nivel de depósito

Tabla 8.11. Variables de salida de los niveles de depósitos en $t+1$

8.4.3 Parámetros empleados para la generación de patrones de entrenamiento de la ANN

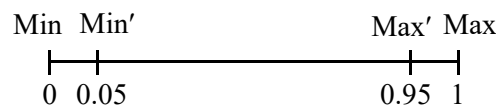
Para el proceso de generación de patrones necesarios para realizar el proceso de entrenamiento se ha utilizado el simulador hidráulico EPANET para la generación de valores sintéticos.

Los rangos definidos para cada una de las variables de entrada se muestran a continuación:

- Para cada grupo de bombeo se ha considerado el intervalo $[0, \max(\#Bombas_k)]$ donde $\max(\#Bombas_k)$ es el número máximo de bombas por grupo de bombeo k .
- Para las consignas de válvulas, el rango definido ha sido $[\bar{P}_i - 4\sigma, \bar{P}_i + 4\sigma]$ donde \bar{P}_i es el promedio horario de la presión aguas abajo para cada consigna de válvula siendo i el número de válvulas consideradas en la arquitectura ANN ($i=1, \dots, 10$), para los días laborales del año 2013 y σ la desviación típica (excepto para la válvula AvCid que fue prefijada).
- Para las zonas de demanda se ha considerado el intervalo $[\bar{D}_j - 20\%, \bar{D}_j + 20\%]$, donde \bar{D}_j representa el valor medio horario observado de la demanda j ($j=1, \dots, 6$) para el año 2013.
- Para el nivel de los depósitos se ha tenido en cuenta el siguiente intervalo $[\bar{Z}_l - \sigma, \bar{Z}_l + \sigma]$ donde \bar{Z}_l representa el nivel medio del nivel inicial observado para los días laborables durante el año 2013 y σ la desviación típica.

Una vez los patrones han sido generados, se procede a normalizar los valores de dichos patrones. Primero se recorren todos los valores para encontrar los valores mínimo y máximo para cada variable, a continuación se normalizan linealmente de tal manera que:

- El valor mínimo (m) de cada variable es mapeado al valor normalizado de 0.05
- El valor máximo (M) de cada variable es mapeado al valor normalizado de 0.95.



Por lo tanto, el rango de valores utilizado durante el proceso de entrenamiento y test queda determinado por $[\text{Min}', \text{Max}']$, donde:

$$\text{Min}' = \text{Min} + 0.05(\text{Max} - \text{Min})$$

$$\text{Max}' = \text{Max} - 0.05(\text{Max} - \text{Min})$$

Estas consideraciones también son válidas para las variables que toman valores enteros, como el caso del número de bombas activas en los grupos de bombeo de las plantas de tratamiento. Para este caso, la normalización y la desnormalización se puede realizar teniendo en cuenta solo el valor de Min y Max.

Si x es un valor desnormalizado para una variable, el valor normalizado vendrá dado por:

$$x' = \frac{x - Min}{Max - Min}$$

De forma inversa, para obtener el valor desnormalizado a partir del normalizado se realizaría mediante la siguiente expresión:

$$x = Min + x'(Max - Min)$$

El conjunto casos analizados para validar el proceso de entrenamiento en paralelo se muestran en la Tabla 8.12.

Casos de entrenamiento	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Num. Patrones de entrenamiento	1000	2500	4000
Num. Patrones de Test.	400	800	1000

Tabla 8.12. Casos de entrenamiento

8.4.4 Análisis de resultados de la paralelización del proceso de entrenamiento

Dada la complejidad de la arquitectura de la ANN propuesta para este caso de estudio, se ha optado por realizar el proceso de entrenamiento sobre un sistema de varios procesadores con el objetivo de reducir los tiempos de cálculo, debido a que sobre un sistema monoprocesador el tiempo de procesamiento resultaba bastante lento si se quería obtener errores aceptables del orden del 1% o 2%.

En los sucesivos párrafos se detallan los resultados obtenidos tras la evaluación de los distintos casos de entrenamiento descritos en la Tabla 8.12, manteniendo en todo momento la configuración de la arquitectura de la ANN.

Tras el proceso de entrenamiento en paralelo realizado para 31000 iteraciones (epochs) variando el número de procesadores en cada ocasión, se obtuvieron las tasas de tiempo que se muestran gráficamente a continuación, diferenciando los tiempos correspondientes al entrenamiento propiamente dicho por parte de los nodos esclavos (Fig. 8.15), de los tiempos de comunicación (Fig. 8.16), y del tiempo total (Fig. 8.17).

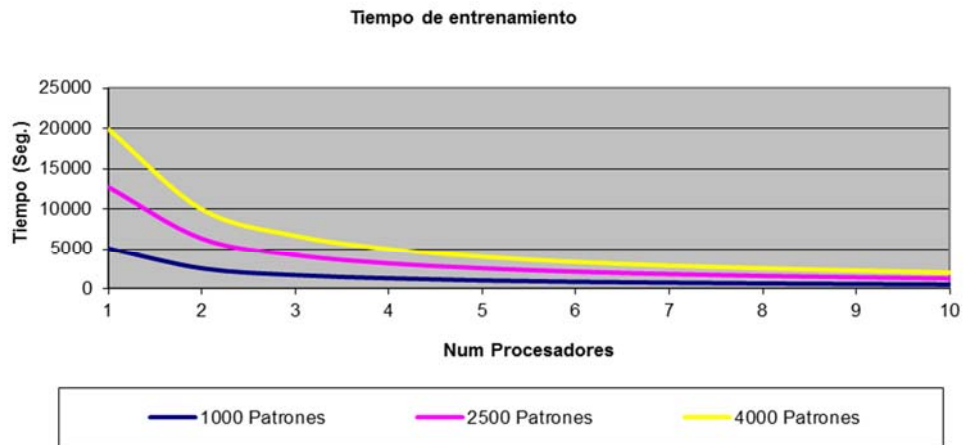


Figura. 8.15. Tiempo de entrenamiento por número de procesadores.

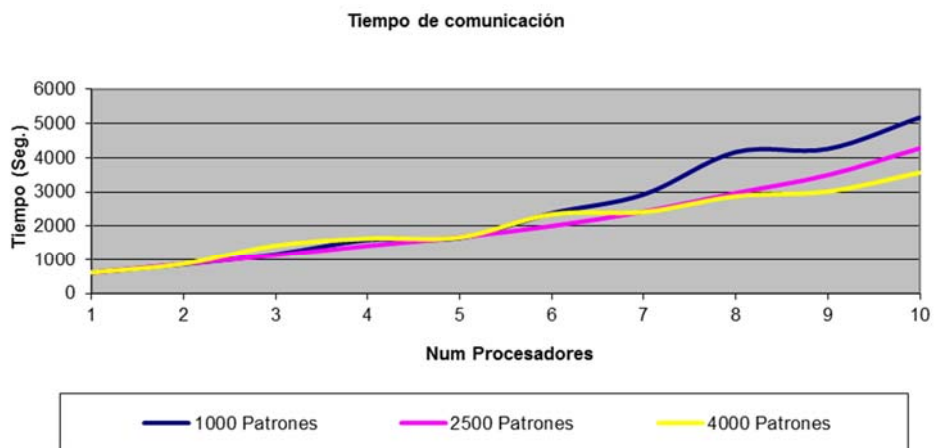


Figura. 8.16. Tiempos de comunicación.

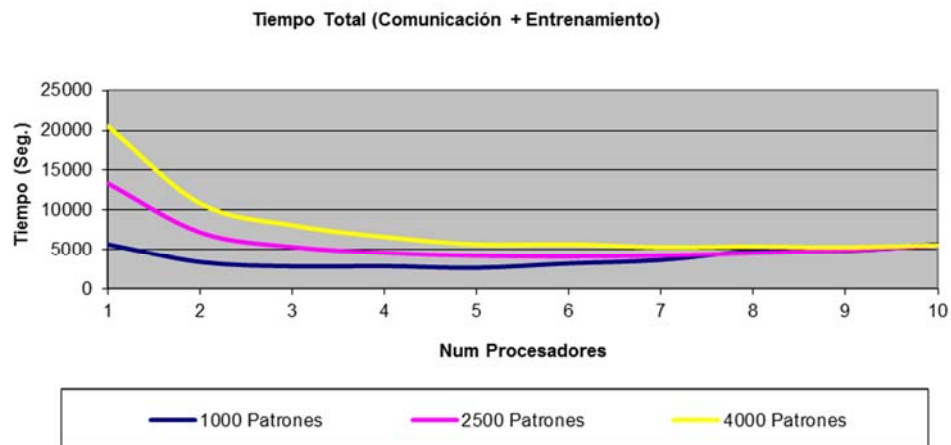


Figura. 8.17. Tiempo total (incluyendo tiempo de comunicación).

Para justificar estos tiempos, en la gráfica siguiente (Fig. 8.18) se muestra una imagen 3D de los tiempos de ocupación de cada uno de los nodos cuando se utilizaban 10 procesadores, en un instante determinado del proceso de entrenamiento.

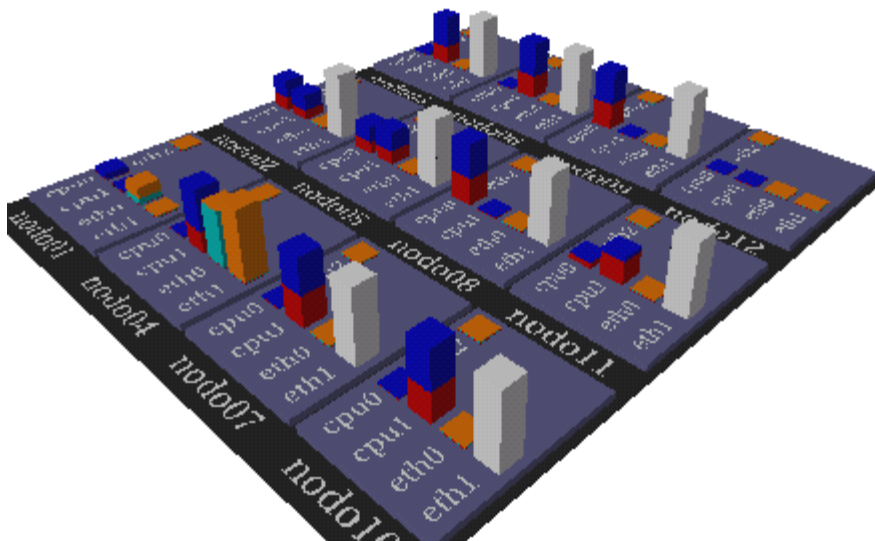


Figura. 8.18. Comunicación entre procesadores.

A partir de los tiempos mostrados en figuras anteriores, se han obtenido los parámetros de *speed-up* y *eficiencia*, con el objetivo de evaluar el rendimiento del sistema paralelo. Los resultados se muestran en las gráficas siguientes.

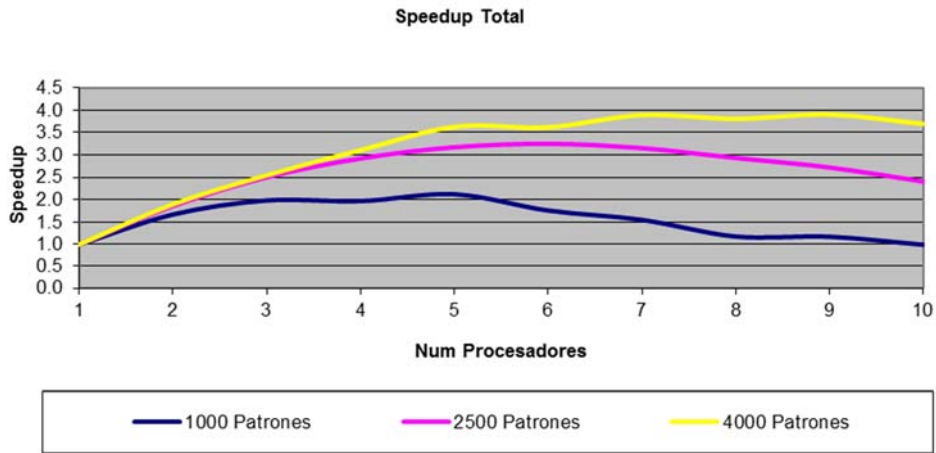


Figura. 8.19. Speedup para el tiempo total de procesamiento.

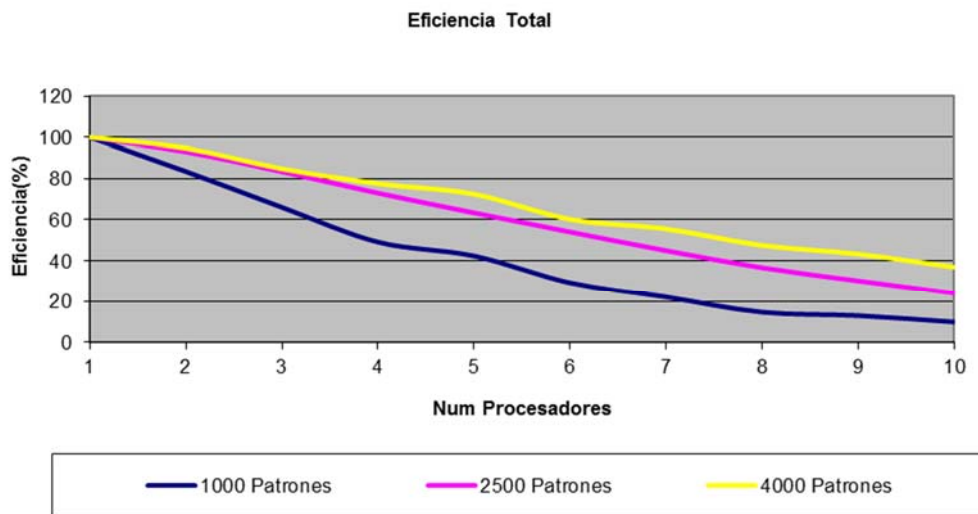


Figura. 8.20. Eficiencia para el tiempo de procesamiento

• **Cálculo del número de procesadores óptimo en función del número de patrones de entrenamiento.**

Como ya se ha comentado, el tamaño de la población de patrones afecta a la eficiencia del procesado en paralelo. Para determinar el número de procesadores óptimo, primero tendremos que definir las expresiones matemáticas que permiten obtener de forma aproximada los tiempos de cálculo.

Sea T_{sec} , el tiempo empleado para realizar el entrenamiento de la arquitectura ANN en un procesador del sistema paralelo y T_p el tiempo empleado para realizar el mismo entrenamiento en un sistema paralelo con p procesadores:

$$T_p = T_{calc} + T_{com}$$

, donde:

- T_{calc} : Tiempo empleado por el procesador que más tarda durante el proceso de entrenamiento de la arquitectura ANN en paralelo.
- T_{com} : Tiempo consumido en el envío y la recepción de los datos necesarios para realizar los cálculos del entrenamiento en paralelo.

Si llamamos M al número total de patrones de entrenamiento para un caso determinado, el tiempo de cálculo secuencial puede escribirse como:

$$T_{sec} = a_2 M$$

En el caso del T_p , supondremos que el tiempo de distribución de los datos entre los distintos procesadores que configuran la arquitectura del sistema es despreciable frente el tiempo de cálculo de entrenamiento de la ANN.

Conforme a la expresión del tiempo secuencial, si no hubiera ningún tipo de overhead, el tiempo de procesamiento en paralelo T_p sería:

$$T_p = a_2 \frac{M}{p}$$

donde:

p : Número de procesadores utilizado.

a_2 : Constante a determinar.

Por su parte, el tiempo de comunicación T_{com} lo podemos expresar como:

$$T_{com} = a_1 p + a_o$$

, donde a_1 y a_0 son constantes a determinar, y p el número de procesadores utilizado en cada momento.

En consecuencia el tiempo total de cálculo paralelo T_p se puede expresar como:

$$T_p = T_{calc} + T_{com} = a_1 p + a_2 \frac{M}{p} + a_0$$

Sustituyendo las expresiones anteriores en la definición del *speedup* resulta:

$$Speedup = \frac{T_{sec}}{T_p}$$

$$Speed-up = \frac{T_{sec}}{T_p} = \frac{a_2 M}{a_0 + a_1 p + a_2 \frac{M}{p}} = \frac{a_2 M p}{a_0 p + a_1 p^2 + a_2 M}$$

Llegados a este punto, lo que se intenta obtener es el número de procesadores que maximice la función de *speedup*. Para ello se iguala a 0 la derivada del *speedup* y se calcula la raíz de la ecuación correspondiente.

$$\frac{dSpeedup}{dp} = 0 \Rightarrow (a_0 + a_1 p^2 + a_2 M) a_2 M - a_2 M p (2a_1 p) = 0$$

Simplificando se llega a la siguiente expresión:

$$a_1 p^2 = a_2 M$$

, donde:

$$p = \sqrt{\frac{a_2 M}{a_1}}$$

En la práctica, los valores de los coeficientes a_2, a_1, a_0 se obtienen en cada caso, a partir de los tiempos evaluados correspondientes, los cuales dependerán de las características del *cluster* empleado, así como de la propia arquitectura de la ANN.

Así por ejemplo, siendo $M = 4000$ el número total patrones de entrenamiento para un caso, utilizando 10 procesadores se obtiene un tiempo de procesamiento para 31000 epochs de 1994 segundos, con lo que $a_2 = 4.98$.

Por su parte, los valores de los coeficientes a_1 y a_0 los deberemos obtener a partir de la expresión del tiempo de comunicación T_{com} . Para ello, a partir de los resultados obtenidos para el tiempo de comunicación en los casos de entrenamiento analizados, se obtiene la recta de tendencia que mejor ajusta al conjunto de valores experimentales, resultando:

$$f(p) = 313.81p + 317.56$$

donde:

$$a_1 = 313.81 \text{ y } a_0 = 317.56$$

Una vez obtenido el valor de los coeficientes a_2 , a_1 , a_0 , solo queda obtener el número óptimo de procesadores en función del número de patrones de entrenamiento que se esté analizando en cada momento. A continuación se muestran los resultados que se obtienen por vía analítica a partir de los coeficientes anteriores:

- Para $M = 1000 \Rightarrow p = 4.11 \cong 4$.
- Para $M = 2500 \Rightarrow p = 6.30 \cong 6$.
- Para $M = 4000 \Rightarrow p = 7.97 \cong 8$.

Finalmente para determinar el speedup máximo que podemos alcanzar solo queda sustituir la expresión que define el número de procesadores óptimo, en la propia expresión del *speedup*.

Si despreciamos el término a_0 , esta quedaría de la siguiente manera:

$$Speedup = \frac{T_{sec}}{T_p} = \frac{a_2 M}{a_0 + a_1 p + a_2 \frac{M}{p}} \cong \frac{a_2 M p}{a_1 p^2 + a_2 M} =$$

$$\frac{a_2 M \sqrt{M} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}}{a_1 \frac{a_2}{a_1} M + a_2 M} = \frac{\sqrt{M} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}}{2} \cong \frac{p}{2}$$

, representando una aproximación del valor máximo, y nos viene a decir que el speedup máximo alcanzable es del orden de la mitad del número de procesadores óptimo.

Según esto, para el caso que se está analizando, los valores máximos del speedup para los tres tamaños de población propuestos serían 2, 3 y 4 respectivamente, cuando los valores máximos experimentales obtenidos son:

- Para $M = 1000 \Rightarrow \text{Speedup} = 1.99$.
- Para $M = 2500 \Rightarrow \text{Speedup} = 3.15$.
- Para $M = 4000 \Rightarrow \text{Speedup} = 3.98$.

Por lo tanto, se puede comprobar sobre la Fig. 8.19 que muestra los resultados experimentales. Así pues, los resultados experimentales cumplen el razonamiento teórico que acabamos de demostrar.

Finalmente se puede concluir que la implementación paralela es escalable debido a que, variando el volumen de datos y variando el número de procesadores, se obtienen mejores tasas de tiempo hasta un cierto límite, el cual es determinable a partir de las expresiones anteriores.

8.4.5 Análisis de resultados de la simulación de la arquitectura ANN.

En el siguiente apartado se muestra la verificación de los resultados obtenidos por la arquitectura ANN aplicada frente a los resultados obtenidos por el simulador hidráulico EPANET.

Los siguientes gráficos muestran una comparativa de presiones para los cuatro nudos críticos evaluados por la ANN (Fig. 8.21). Las presiones varían entre un rango de 20 a 30 m, que es más de lo que variarían para la solución óptima (se han variado las consignas de la válvula en un rango (valor medio $\pm 4\sigma$) dentro del intervalo de tiempo de simulación para la generación de patrones).

Excepcionalmente, la presión puede aumentar hasta los 70 m en el caso del nudo GranVia, 85 m en el nudo Pinedo, 65 m en el nudo TavBlanques y 75 m en el nudo GranCanaria cada 24 patrones, estas presiones no deben ser permitidas por las condiciones de contorno durante el proceso de optimización. A pesar del amplio rango de variación, la arquitectura ANN propuesta ha aproximado con precisión todos los valores de presión. Los gráficos de la Fig. 8.21 muestran los resultados para los primeros 200 patrones de test.

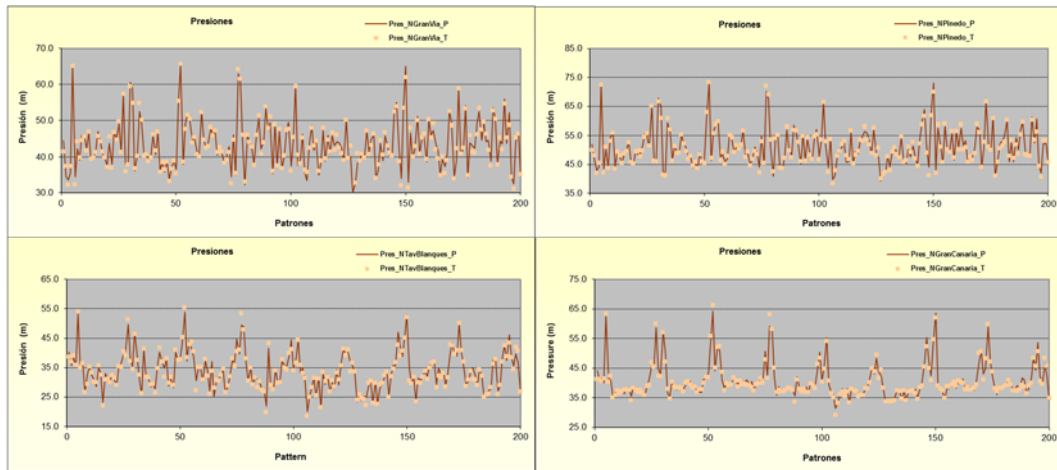


Figura. 8.21. Presiones en nudos criticos en el instante t.

Los siguientes gráficos muestran un resultado comparativo de la potencia consumida por las bombas en cada grupo de bombeo. El consumo medio por bomba en la planta de Picassent es de alrededor de 250 kW, mientras que el consumo medio por bomba en la planta de La Presa varía entre 200kW y 375 kW, dependiendo de cada grupo. A partir de los gráficos de la Fig. 8.22 y 8.23 se deduce que la potencia total es proporcional al número de bombas activas, lo que significa que la altura y el punto de eficiencia no varían con el número de bombas activas. Por lo tanto, se puede concluir que la potencia es proporcional al caudal bombeado, como se supuso en la primera formulación del problema de optimización para la minimización de costes energéticos. Sin embargo, para mantener la estructura del optimizador, las potencias consumidas por los grupos de bombeo se han considerado directamente como salidas de la arquitectura ANN.

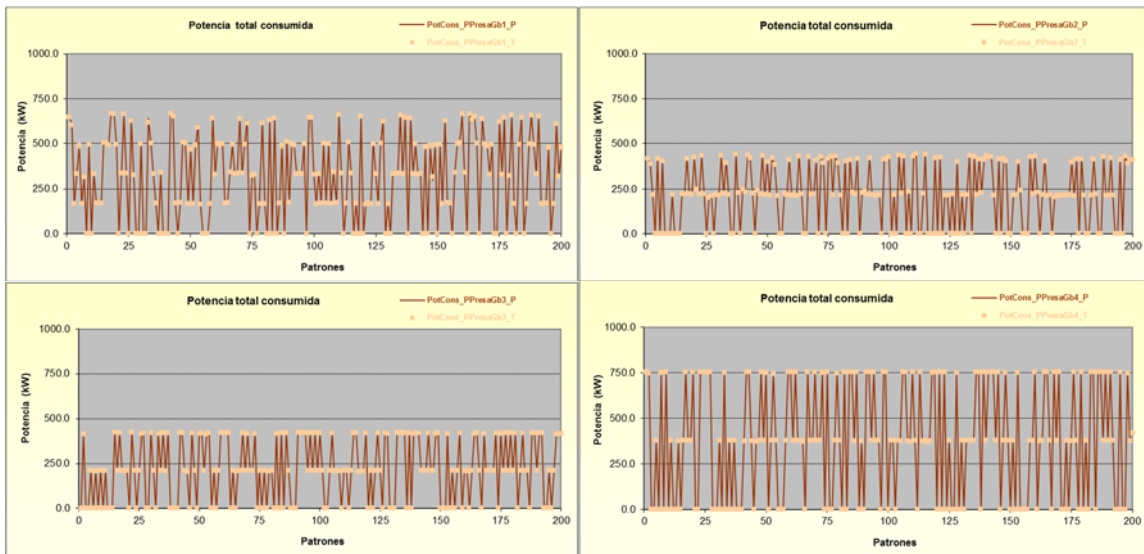


Figura. 8.22. Potencia total consumida por cada grupo de bombeo de la planta de La Presa en el instante t.

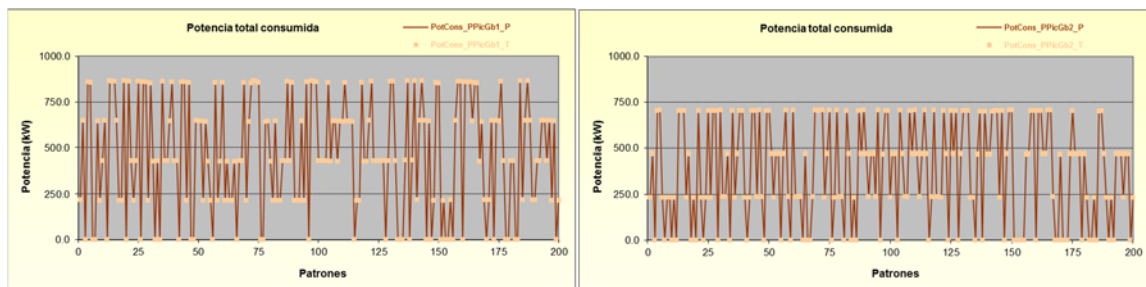


Figura. 8.23. Potencia total consumida por los grupos de bombeo de la planta de Picassent en el instante t

Los gráficos de la Fig. 8.24 muestran una comparativa entre el valor calculado y el valor previsto de la evolución del nivel de un depósito de la planta de La Presa (Montemayor) y de un depósito de la planta de Picassent. La variación total para ambos es de 7 m (el doble de la variación normal), esto se debe a que no se ha limitado los niveles de los depósitos. Por otra parte, todos los niveles han sido incrementados en 20 m para evitar mensajes de error en EPANET. En este caso también se puede concluir que los resultados de la predicción han sido bastante buenos.

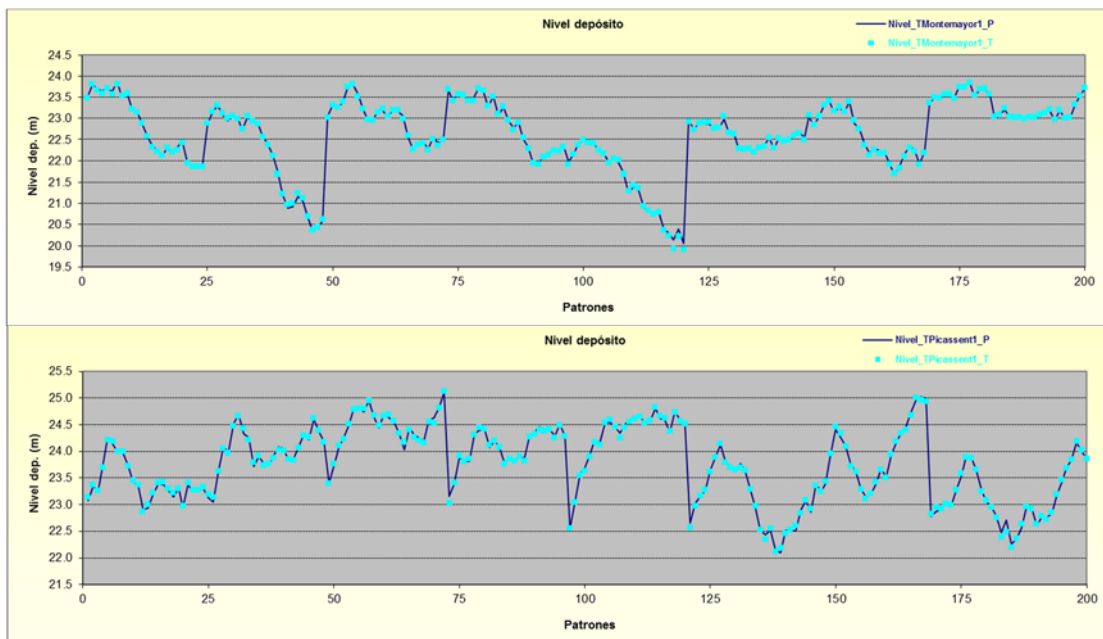


Figura. 8.24. Niveles en depósitos para el instante $t+1$.

A continuación la Fig. 8.25 muestra los gráficos comparativos de los caudales de las tuberías principales de las salidas de cada planta de tratamiento. En la Fig. 8.25, el gráfico superior corresponde al caudal producido desde la planta de La Presa, en este gráfico se muestra el caudal producido, impulsado por las bombas de la 1 a la 8 de la planta de La Presa y su variación depende básicamente del número de bombas activas. El gráfico central corresponde al caudal de producción bombeado por las bombas 9 y 10 de la planta de La Presa y depende del número de bombas activas para cada período (o patrón). El gráfico inferior se corresponde con

el caudal total producido por la planta de Picassent. Dependiendo del número de bombas activas (Bombas 1-7) y el consumo de L'Horta Sud, que se suministra directamente desde las galerías de agua filtrada sin impulsión. El ajuste de los valores previstos a partir de la arquitectura ANN (línea continua) y los valores calculados a partir de EPANET (marcadores) es bastante bueno. Este caudal debe limitarse durante el proceso de optimización, debido a las limitaciones en la capacidad de tratamiento definidas para cada planta.

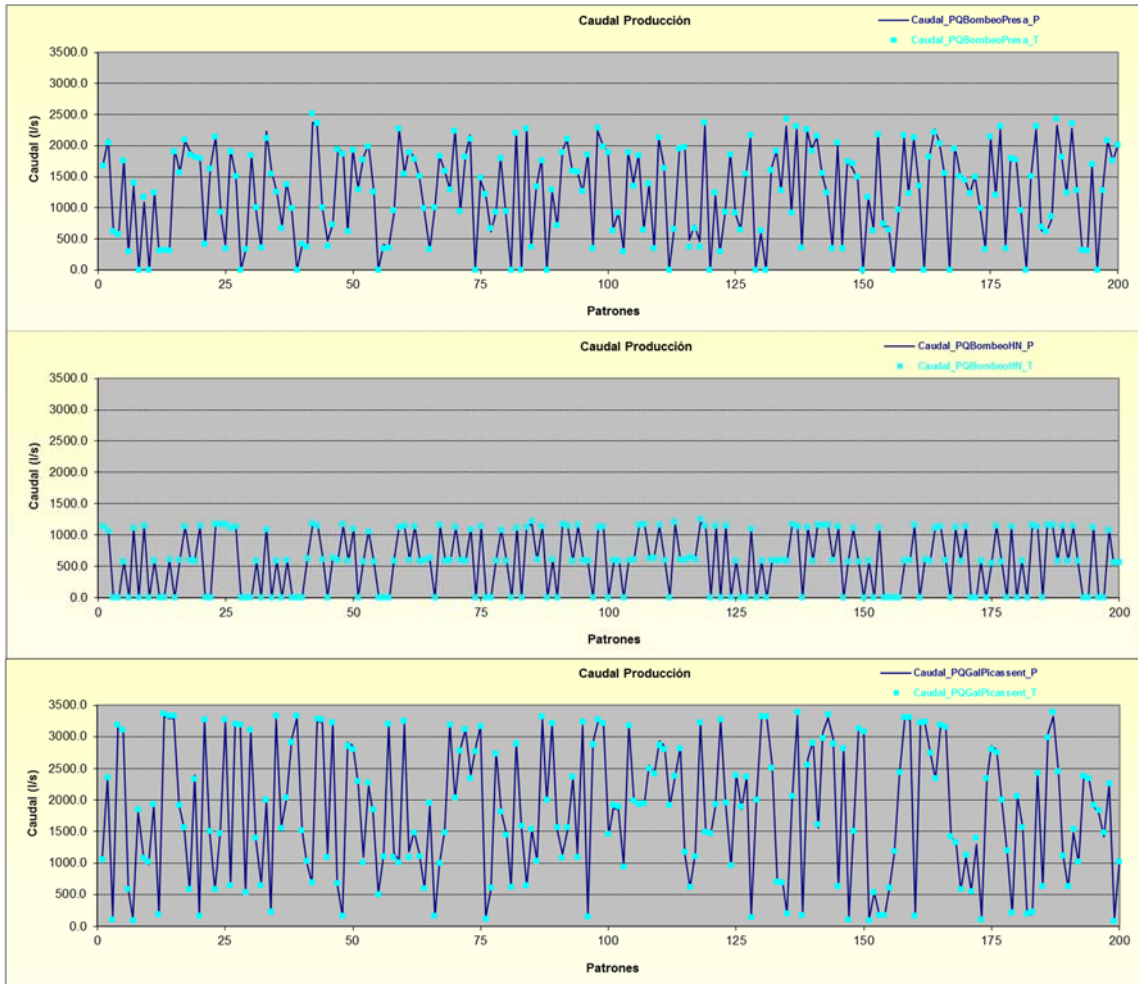


Figura. 8.25. Caudales producidos para la planta de La Presa y Picassent en el instante t

Finalmente en la Fig. 8.26, se muestran los gráficos para los caudales de inyección a la red desde cada depósito para cada planta de tratamiento. Desde la planta de La Presa, el caudal de inyección representado por DemManises y desde la planta de Picassent, el caudal de inyección representado por DemPicassent. En el caso del caudal de inyección de DemHortaSud sale directamente desde la planta, pero no es un caudal bombeado pero si tiene tratamiento. Los caudales de inyección de DemManises y DemPicassent constituyen la demanda a Valencia.

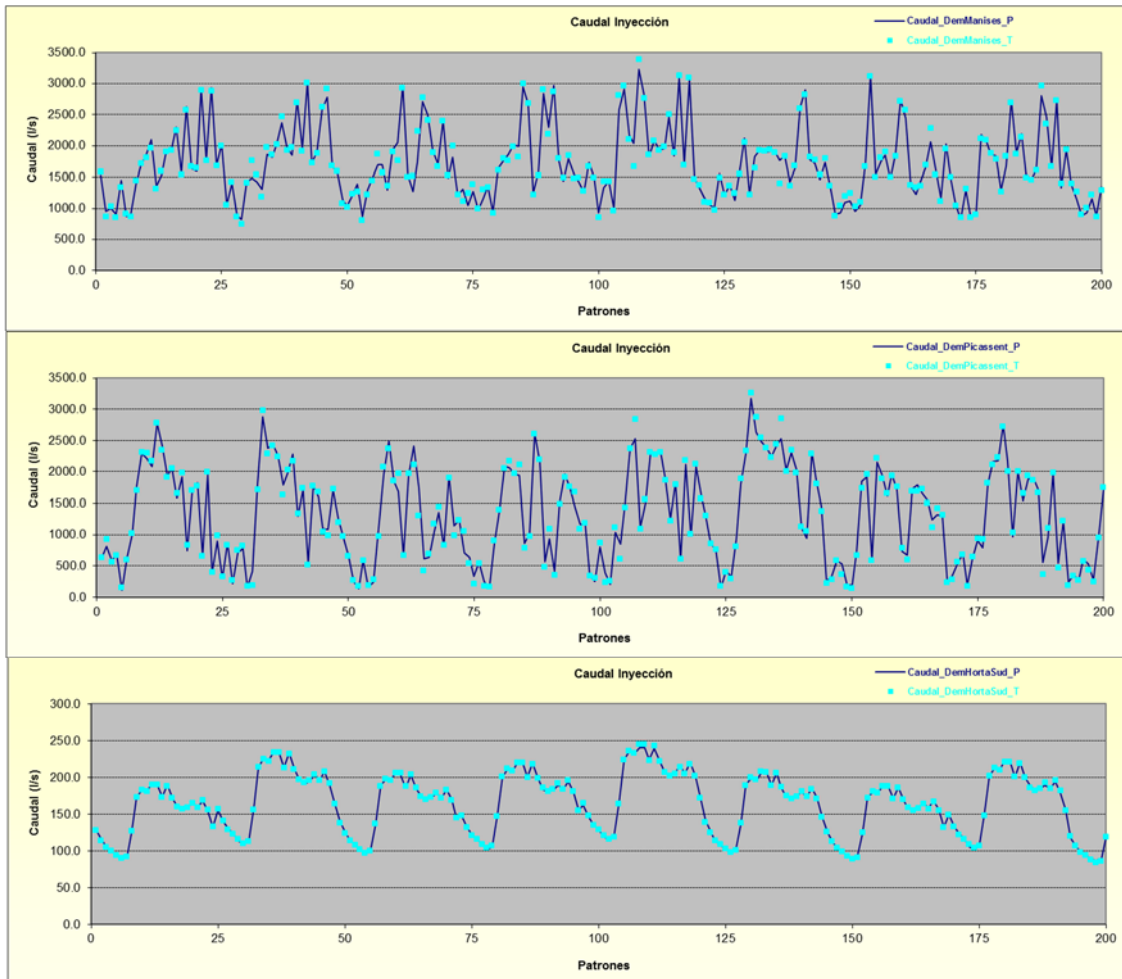


Figura. 8.26. Caudales de inyección desde depósitos en el instante t .

• **Validación de los resultados de la Arquitectura ANN empleada**

Los resultados obtenidos tras el proceso de entrenamiento de la arquitectura ANN para predecir la potencia consumida por las bombas, los caudales de bombeo, los caudales de inyección, la presión en los nudos críticos y el nivel final en los depósitos se resumen en la Tabla 8.13, usando solo los datos de test. La salida fue evaluada usando el coeficiente de determinación R^2 , el error cuadrático medio (RMSE), el error medio absoluto (MAE) y el error medio absoluto porcentual (MAPE).

De los resultados, se observa que la arquitectura ANN propuesta fue capaz de predecir las salidas con gran precisión.

Variable	Unid.	R ²	RMSE(%)	MAE	MAPE(%)
Potencia Grupo PresaGb1	kW	0.99	0.54	0.003	1.04
Potencia Grupo PresaGb2	kW	0.99	0.58	0.004	2.89
Potencia Grupo PresaGb3	kW	1	0.23	0.001	0.79
Potencia Grupo PresaGb4	kW	0.99	0.39	0.001	1.03
Potencia Grupo PicGb1	kW	0.99	0.26	0.002	0.57
Potencia Grupo PicGb2	kW	1	0.09	0.0007	0.29
Presión Nudo GranVia	m.c.a	0.96	2.68	0.02	5.98
Presión Nudo Pinedo	m.c.a	0.96	2.51	0.02	5.36
Presión Nudo TavBlanques	m.c.a	0.95	2.99	0.02	5.38
Presión Nudo GranCanaria	m.c.a	0.96	2.43	0.018	4.69
Caudal Prod. QBombPresa	l/s	0.99	1.18	0.008	2.49
Caudal Prod. QBombHN	l/s	0.99	0.65	0.004	1.99
Caudal Prod. QGalPicassent	l/s	0.97	0.91	0.007	2.21
Caudal Iny. DemManises	l/s	0.98	2.93	0.02	6.82
Caudal Iny. DemPicassent	l/s	0.99	2.45	0.02	7.21
Caudal Iny. DemHortaSud	l/s	0.99	0.76	0.005	1.52
Nivel Final Montemayor	m	0.99	0.52	0.003	0.73
Nivel Final Picassent	m	0.99	0.66	0.064	1.16

Tabla 8.13. Resultados de la validación de la arquitectura ANN.

8.5 PREVISIÓN DE LAS ZONAS DE DEMANDA

La red de distribución de Valencia se ha dividido en 6 zonas de demanda (DMA) conforme a las entradas de la arquitectura ANN descritas en el apartado 8.4.1.

En particular se ha observado que las zonas de demanda representan a diferentes sectores de Valencia por dimensión y número de habitantes. Por ejemplo, la DMA1 (Valencia) cubre principalmente a la ciudad con una densidad de población de 800.000 habitantes, la DMA2 (Pueblos) cubre las poblaciones que rodean a la ciudad, con una densidad de población de 300.000 habitantes, la DMA5 (HNord) cubre la zona agrícola y algunas poblaciones, mientras que la DMA4 (GCanaria) y DMA6 (TavBlanques) representan a pequeños barrios alrededor de la ciudad, finalmente la DMA3 (Pinedo) representa a la zona costera.

8.5.1 Análisis de los resultados del modelo de previsión de demanda aplicado

Para la calibración del modelo de previsión de demanda se han utilizado los datos procedentes del SCADA correspondientes a los caudales medios medidos durante el año 2013. Los datos han sido promediados a partir de una frecuencia de 5 min.

En las tablas 8.14 y 8.15 se muestran los coeficientes de determinación R^2 para cada una de las zonas de demanda para la previsión a una hora y para las próximas 24 horas, tenidas en cuenta en la arquitectura ANN, pero que no han sido consideradas en el modelo de optimización hasta el momento.

+1h	Valencia	Pueblos	Pinedo	GranCanaria	HortaNord	TavBlanques
R^2	0.96	0.70	0.94	0.89	0.79	0.94

Tabla 8.14. Coeficientes de determinación para la previsión a 1h.

+24h	Valencia	Pueblos	Pinedo	GranCanaria	HortaNord	TavBlanques
R^2	0.93	0.60	0.84	0.83	0.76	0.90

Tabla 8.15. Coeficientes de determinación para la previsión a 24h.

En las siguientes figuras se muestran los gráficos comparativos entre el valor del caudal medido para cada una de las zonas de demanda con la previsión a 1h y las próximas 24h. Para la representación de los datos se ha escogido un día de la primera semana de junio de 2013 correspondiente al bloque 4 de la estructura de tarifa eléctrica. Como se puede apreciar para la demanda a Valencia (Fig. 8.27) el ajuste de las previsiones es bastante bueno tanto para la previsión a 1h como a 24h, considerándose esta demanda 2/3 de la demanda total del sistema. Por otra parte la previsión de la demanda de los pueblos (Fig. 8.28) tiene poca desviación durante las primeras horas del día mientras que conforme avanza el tiempo tiene cierta variabilidad respecto al caudal medido. Para la previsión de la demanda de Pinedo (Fig. 8.29) se ajusta bastante bien hasta las 14h de la tarde presentando mayor variabilidad para la previsión para las próximas 24h. En el caso de la demanda de GranCanaria (Fig. 8.31) también se puede comprobar los buenos resultados de la previsión en comparación a los caudales medidos para ese intervalo. Para la demanda de HortaNord se puede apreciar las desviaciones entre el caudal medido y las previsiones entre las horas comprendidas desde las 0h a las 8h y desde las 18h a las 20h, dicha desviación se debe a la puesta en funcionamiento de los grupos de bombeo de la planta de La Presa. Finalmente, para la previsión de demanda de TavBlanques (Fig. 8.32) como en el caso de la demanda de Pinedo presenta poca variabilidad respecto al caudal medido hasta las 14h, a partir de esa hora hasta el final del día a diferencia de la demanda de Pinedo, para esta zona de demanda los valores previstos están por debajo del caudal medido.

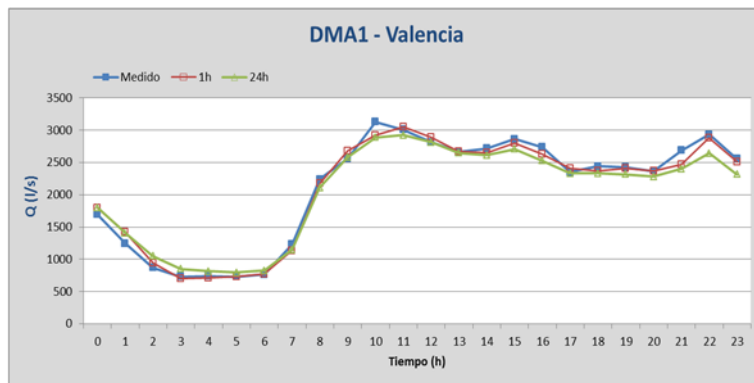


Figura. 8.27. Gráfico comparativo entre el caudal medido y la previsión de las proximas 1h y 24h de la zona de demanda Valencia

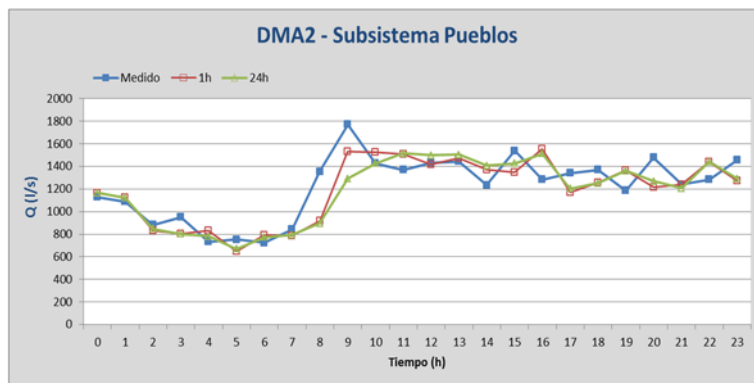


Figura. 8.28. Gráfico comparativo entre el caudal medido y la previsión de las proximas 1h y 24h de la zona de demanda Pueblos

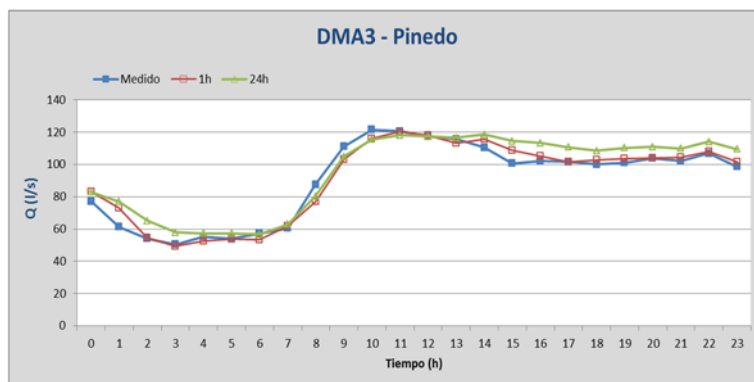


Figura. 8.29. Gráfico comparativo entre el caudal medido y la previsión de las proximas 1h y 24h de la zona de demanda Pinedo.

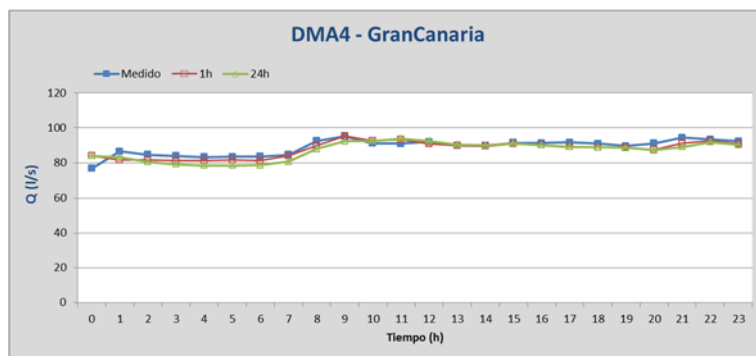


Figura. 8.30. Gráfico comparativo entre el caudal medido y la previsión de las proximas 1h y 24h de la zona de demanda GranCanaria.

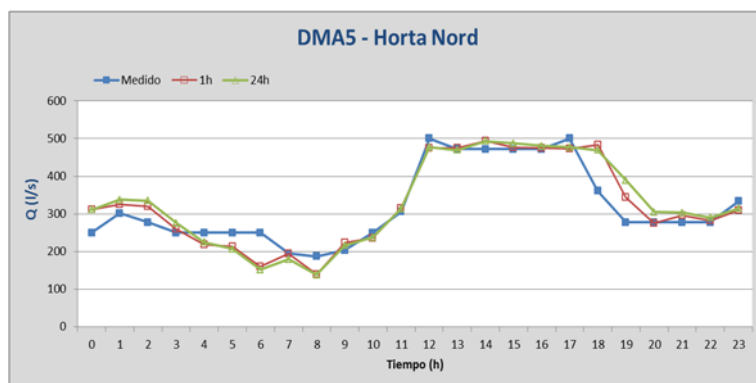


Figura. 8.31. Gráfico comparativo entre el caudal medido y la previsión de las proximas 1h y 24h de la zona de demanda HortaNord.

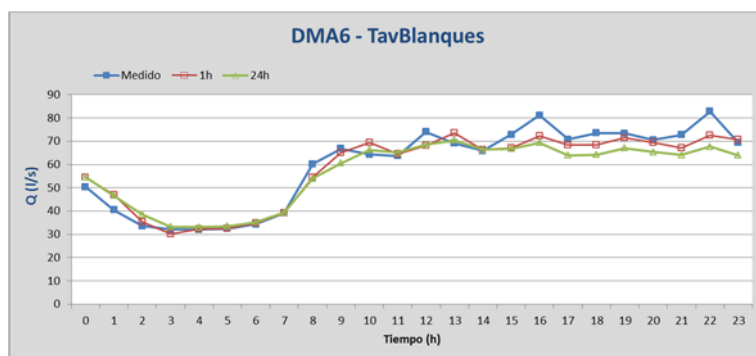


Figura. 8.32. Gráfico comparativo entre el caudal medido y la previsión de las proximas 1h y 24h de la zona de demanda TavBlanques.

8.6 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

El principal reto del régimen de operación de la red de abastecimiento a Valencia y su área metropolitana es regular adecuadamente alrededor de 10 válvulas de control con el fin de mantener todas las presiones en la red en un rango establecido durante las 24 horas, independientemente de la demanda total o de la cantidad de agua suministrada por cada planta de tratamiento. La operación de las válvulas determina también la cantidad de agua producida por cada planta en cada hora. Por otra parte, cada planta tiene algunas restricciones sobre la capacidad de producción, capacidad de bombeo, capacidad de almacenamiento y capacidad de transporte, de tal manera que en la actualidad no es posible suministrar toda la demanda sólo desde una planta.

Por otro lado, los costes de producción y de bombeo son diferentes para cada planta, siendo más barato producir agua desde la planta de Picassent que desde la planta de La Presa.

Por lo tanto, se plantea un problema de regulación complejo: producir la demanda diaria a un coste mínimo, mientras se mantienen las presiones controladas en la red durante todo el periodo de operación (las pérdidas de carga totales desde el origen hasta el punto final de la red varían en más de 30 m del día a la noche, dependiendo de la demanda, por lo que es necesaria una regulación).

El proceso de optimización se desarrollará en dos bloques: En el primer bloque se aplicará una optimización para minimizar los costes energéticos de las plantas de tratamiento a fin de obtener una programación óptima del régimen de operación de las bombas, y en un segundo bloque otro proceso de optimización definirá las consignas de operación óptimas de las válvulas de la red de distribución en base a los caudales de inyección obtenidos por el algoritmo de optimización definido en el primer bloque. Los resultados generados por los dos modelos de optimización serán evaluados por la arquitectura ANN propuesta para este caso de estudio con el objetivo de obtener la mejor política de operación que cumpla con todas las restricciones definidas.

En los siguientes apartados se describirán los datos de entrada así como los umbrales establecidos para cada una de las restricciones definidas en cada modelo de optimización.

8.6.1 Optimización de los costes de energéticos en las estaciones de bombeo de las plantas de tratamiento

A la hora de resolver el problema lineal utilizando una hoja de cálculo Excel, la formulación definida en el apartado 6.3 ha sido simplificada. En realidad, la formulación previa podía haber sido resuelta para $x_{p,k,t}$, considerando el estado de cada una de las bombas como variables enteras. Sin embargo la capacidad del solver de Excel esta limitado en el uso de este tipo de

variables, dando lugar a la resolución de un problema demasiado complejo. Por esta razón, se asume que todas las bombas son similares y se trabajará con la definición de variables continuas $x_{k,t}$, considerándolas a partir de este punto como la fracción del tiempo de la capacidad total de bombeo de la planta k cuando entran en funcionamiento en el instante t . La capacidad total de bombeo de la planta k se denotará ahora como QP_k , y se calculará como la suma de la capacidad de todas las bombas en una planta.

Finalmente, se debe tener en cuenta que en la planta de Picassent, el caudal a L'HortaSud Q_{HS} no es bombeado pero si tratado.

Por lo tanto, la función objetivo para el caso de la red de Valencia se reformula de la siguiente manera:

$$\text{Min} \sum_{k=1}^2 \sum_{t=1}^{24} [x_{k,t} * QP_k * (c_k + c'_k) + Q_{HS} * c_2] * p_{k,t}$$

8.6.1.1 Variables de decisión

- **Número de bombas en operación**

El grupo de variables de decisión están relacionadas con el número de bombas con estados on/off (0/1) agrupadas en grupos de bombeo con curvas comportamiento similares. Han sido definidos un total de 6 grupos de bombeo, 4 para la estación de bombeo de la planta de La Presa, y 2 para la estación de bombeo de la planta de Picassent, con los siguientes límites:

Num. Entrada	Id Variable	Descripción	Límite Inferior	Límite Superior
1	PresaGb1	Núm. bombas activas Grupo 1 La Presa	0	4
2	PresaGb2	Núm. bombas activas Grupo 2 La Presa	0	2
3	PresaGb3	Núm. bombas activas Grupo 3 La Presa	0	2
4	PresaGb4	Núm. bombas activas Grupo 4 La Presa	0	2
5	PicGb1	Núm. bombas activas Grupo 1 Picassent	0	4
6	PicGb2	Núm. bombas activas Grupo 2 Picassent	0	3

Tabla 8.16. Rango del número de bombas por grupo de bombeo

Debe tenerse en cuenta que el número máximo de bombas en funcionamiento están limitadas por el caudal máximo de producción y la potencia máxima soportada por cada planta. Para la

planta de La Presa, una bomba del grupo PresaGb1 permanece en stand by, y otra bomba de cada grupo, PresaGb2 y PresaGb3 también permanece en stand by, por lo que un máximo de 6 bombas de un total de 8 bombas de estos grupos pueden entrar en operación; respecto a las bombas del grupo PresaGb4 pueden entrar en funcionamiento simultáneamente. Para la planta de Picassent, una de las 7 bombas englobadas en los grupos PicGb1 y PicGb2 permanece en stand by, por lo que el número total máximo de bombas en funcionamiento en esta planta es de 6 bombas.

Sin embargo, no se necesitará limitar el número máximo de bombas en funcionamiento, debido a que se limitarán automáticamente después de imponer los límites correspondientes para los caudales de producción y potencia máxima consumida por los sistemas de bombeo para cada planta, como se verá más adelante.

8.6.1.2 Restricciones del problema

Conforme a las restricciones definidas en el modelo de optimización del apartado 6.3, a continuación se definen los parámetros de cada restricción aplicados al presente caso de estudio.

- **Costes de bombeo por planta**

El coste total de la producción de agua se dividirá entre los costes de tratamiento hasta los depósitos de agua tratada, y los costes de bombeo hasta los depósitos de almacenamiento. Dichos costes serán formulados en la función objetivo del problema de optimización propuesto.

El coste por m^3 considerado para todas las bombas de una planta se calculará como la media del coste por m^3 para todas las bombas de la planta descritos en la siguiente tabla:

Planta de tratamiento	LaPresa, 1	Picassent, 2
Costes medios de bombeo (kWh/m^3), c'_k	0.177	0.140

Tabla 8.17. Coste de bombeo por planta.

- **Costes de tratamiento por planta**

La fracción del coste de tratamiento que corresponde al consumo eléctrico se ha obtenido de los informes de gestión de las plantas de tratamiento, obteniéndose las siguientes cifras promedio para el año 2013.

Planta de tratamiento	LaPresa, 1	Picassent, 2
Costes medios de tratamiento (kWh/m^3), c_k	0.090	0.014

Tabla 8.18. Costes de tratamiento por planta.

La gran diferencia de este coste se debe al hecho de que la planta de tratamiento de Picassent funciona por gravedad mientras que en la planta de La Presa es necesario elevar el agua a unos 10 metros desde la entrada hasta la altura de la línea de tratamiento. Por otro lado, el coste de los productos químicos no se considera en este término, porque se suponen similares para ambas plantas.

En referencia a los consumos energéticos de las bombas, vendrán determinados por la potencia consumida por cada bomba en cada instante, dichas potencias forman parte del conjunto de variables de salida de la arquitectura ANN. Debe tenerse en cuenta además que los costes de tratamiento para la planta de La Presa son más altos, el consumo de energía por metro cúbico bombeado también es mayor, debido a que la altura media para planta de La Presa es de 50 m, mientras que la altura media para la planta de Picassent es 40,7 m. También la curva de eficiencia de las bombas juega un papel importante en esta diferencia. Como consecuencia de ello, es más barato producir agua desde la planta de Picassent que desde la planta de La Presa, aproximadamente un 50% menos. Las cifras actuales se estiman en 0,323 kWh/m³ para la planta de La Presa frente a 0,164 kWh/m³ para la planta de Picassent, pero que no se considerarán directamente en el modelo. Estos ratios son más altos que los obtenidos por EPANET para las curvas de comportamiento establecidas.

- **Caudales de bombeo por planta**

El caudal total de bombeo de cada planta se calcula a partir de la suma de caudales de bombeo de todas las bombas en cada planta de tratamiento. Para el presente caso de estudio los caudales máximos de bombeo se resumen en la siguiente tabla:

Planta de tratamiento	LaPresa, 1	Picassent, 2
Caudal máximo bombeo (m ³ /s), QP_k	3.546	3.115

Tabla 8.19. Caudal máximo de bombeo por planta.

- **Potencia máxima por planta**

La potencia máxima permitida en la planta de La Presa en la práctica es de 3000 kW y la de la planta de Picassent es de 1450 kW, por esta razón no es posible tener todas las bombas en marcha simultáneamente. Esta restricción fuerza a tener en stand-by al menos una bomba del grupo PresaGb4 o dos bombas de algún otro grupo de la planta de La Presa, y una bomba de algún grupo de la planta de Picassent, limitando de esta manera el número total de bombas activas y el máximo caudal de producción. En resumen, la potencia máxima consumida permitida para esta restricción se resume en la siguiente tabla:

Planta de tratamiento	LaPresa, 1	Picassent, 2
Potencia máxima (kW), $W_{max,k}$	3000	1450

Tabla 8.20. Potencia máxima por planta.

• Tarifas electricas

La estructura de tarifas eléctricas para la planta de La Presa y Picassent se resume en la Tabla 8.21. Los precios de las diferentes tarifas, en €/kWh, corresponden al año 2013 y son las tarifas que se aplicarán durante el proceso de optimización. Para el caso de estudio no se han tenido en cuenta los costes asociados al término de potencia.

€/kwh	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Manises	0.118317	0.099855	0.096490	0.085190	0.080127	0.068897
Picassent	0.131375	0.109780	0.102496	0.088785	0.082854	0.070725

ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN 1ª	JUN 2ª	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
P2	P2	P4	P5	P5	P4	P2	P2		P4	P5	P4	P2
P1	P1	P4	P5	P5	P3	P1	P1		P3	P5	P4	P1
P2	P2	P3			P4	P2	P2				P3	P2
P1	P1	P3			P4	P1	P1		P4		P3	P1
P2	P2	P4				P2	P2				P4	P2

Tabla 8.21. Estructura de tarifas correspondiente al año 2013.

De la tabla anterior se concluye que hay un total de 5 bloques en la estructura de tarifas a lo largo del año.

- Bloque 1: ENE, FEB, DIC, JUN 2ª
- Bloque 2: MAR, NOV
- Bloque 3: ABR, MAY, OCT
- Bloque 4: JUN 1ª
- Bloque 5: AGO

De esta forma, se pueden plantear cinco problemas diferentes de optimización a lo largo del año, asumiendo una demanda total durante un periodo de 24 horas igual para todos los días del año. En otro caso, un problema de optimización debería formularse para cada día.

Por el momento, a la hora de utilizar una estructura de tarifas en concreto para evaluar el proceso de optimización, se ha escogido la tarifa de **Bloque 4** para la 1ª quincena de junio de 2013.

Los precios de las tarifas aplicados a este bloque se pueden ver en la siguiente tabla:

HORA	JUN 1ª, SEP	c€/Kwh	
		MANISES	PICASSENT
0:00 AM	P6	6.89	7.07
1:00 AM		6.89	7.07
2:00 AM		6.89	7.07
3:00 AM		6.89	7.07
4:00 AM		6.89	7.07
5:00 AM		6.89	7.07
6:00 AM		6.89	7.07
7:00 AM	6.89	7.07	
8:00 AM	P4	8.52	8.88
9:00 AM	P3	9.65	10.25
10:00 AM		9.65	10.25
11:00 AM		9.65	10.25
12:00 PM		9.65	10.25
1:00 PM		9.65	10.25
2:00 PM	9.65	10.25	
3:00 PM	P4	8.52	8.88
4:00 PM		8.52	8.88
5:00 PM		8.52	8.88
6:00 PM		8.52	8.88
7:00 PM		8.52	8.88
8:00 PM		8.52	8.88
9:00 PM		8.52	8.88
10:00 PM		8.52	8.88
11:00 PM		8.52	8.88

Tabla 8.22. Tarifas del bloque 4 para el año 2013.

De la tabla 8.22 se puede comentar que el periodo **P6** corresponde a la franja valle de la tarifa eléctrica para las horas de 0h hasta las 7h, el periodo llano **P4** corresponde a las 8h y a la franja horaria entre las 15h hasta el final del día, y el periodo punta **P3** corresponde a las horas entre las 9h y las 14h.

8.6.1.3 Parámetros del modelo hidráulico

Con el objetivo de aplicar el problema de optimización a este caso de estudio, algunos parámetros deben establecerse en el modelo hidráulico. Estos se refieren a los parámetros físicos; la sección de los depósitos, los niveles iniciales, la demanda total, el caudal bombeado por los grupos de bombeo y los costes de bombeo de cada grupo.

- *Secciones de depósitos*

La mayoría de los parámetros físicos de la red hidráulica están embebidos en los factores de ponderación de la arquitectura ANN, dado que el modelo hidráulico de la red se utilizó para entrenarla. Sin embargo, de acuerdo con la formulación del problema lineal, las secciones de los depósitos son todavía necesarias, si se va a verificar el balance de caudales. Las correspondientes secciones totales de los depósitos en cada planta son las siguientes:

S_1 (La Presa) = 21.226 m ²	(4,24 m x 21226 m ² = 90.000 m ³)
S_2 (Picassent) = 20.000 m ²	(5.0 m x 20000 m ² = 100.000 m ³)

Sabiendo las secciones de los depósitos y las variaciones de nivel en los mismos, se puede calcular el caudal total inyectado al sistema en cada instante de tiempo (que es distinto al caudal total producido en cada instante).

- *Niveles iniciales en depósitos*

Otra cuestión importante a tener en cuenta son los niveles iniciales en los depósitos que se asumirán al inicio del periodo de optimización, dichos niveles se tendrán que restaurar al final del periodo de optimización. Se han tenido en cuenta el promedio de los valores observados durante los días laborables del año 2013. De acuerdo con la Fig. 8.33 y 8.34, si el periodo de optimización empezase a las 6 a.m, los niveles iniciales a tenerse en cuenta serían:

$z_{0,1}$ (La Presa) = 3,80 m
$z_{0,2}$ (Picassent) = 4,60 m

$z_{0,1}$ (La Presa) = 23,80 m
$z_{0,2}$ (Picassent) = 24,60 m

Sin embargo, si se fuerzan los niveles a los valores máximos, $z_{0,1} = 4,24$ m and $z_{0,2} = 5$ m, probablemente se obtendrá un mayor ahorro en el coste.

Hay que tener en cuenta, que en el modelo hidráulico de la red Valencia, las cotas de solera de los depósitos se han reducido en 20 m y en consecuencia los niveles de los depósitos se han incrementado en 20 m. A continuación se muestran los niveles medios durante 24 horas para cada uno de los depósitos de La Presa (Manises) y Picassent

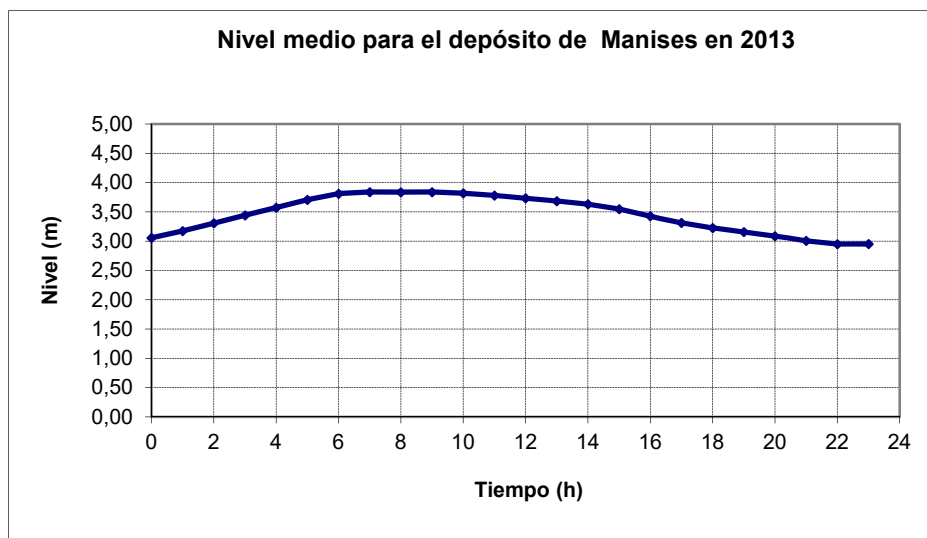


Figura. 8.33. Nivel medio durante el año 2013 para el depósito de La Presa (Manises)

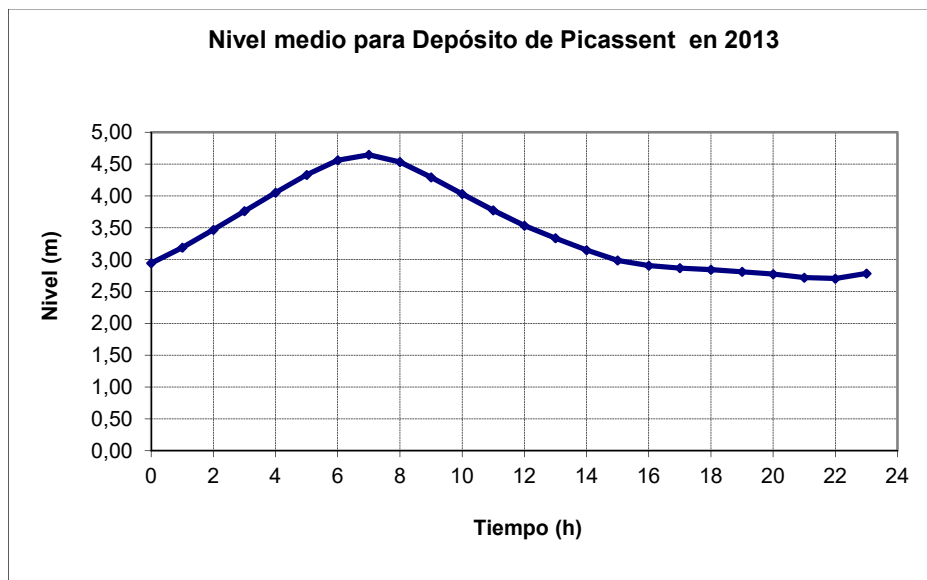


Figura. 8.34. Nivel medio durante el año 2013 para el depósito de Picassent.

Finalmente se ha considerado como nivel inicial, mínimo y máximo de los depósitos los valores que aparecen en la tabla siguiente:

Depósitos	LaPresa, 1	Picassent, 2
Nivel mínimo (m), $z_{k,min}$	2.5	2.5
Nivel máximo (m), $z_{k,max}$	4.24	5.0
Nivel inicial (m), $z_{k,0}$	3.0	3.0

Tabla 8.23. Niveles mínimo, máximo e inicial de los depósitos de cada planta de tratamiento.

• **Demanda total de la red**

Las curvas de demanda que se han tenido en cuenta en el presente modelo de optimización son las que se muestran en la Fig. 8.35. La *Demanda Total* se calcula a partir de suma de todas las demás curvas de demanda. Por otra parte, la suma de los caudales de inyección a la red debe ser igual a la curva de demanda denominada *Demanda Valencia*, que se calcula por diferencia de de la curva de la *Demanda Total* y todas las demandas restantes.

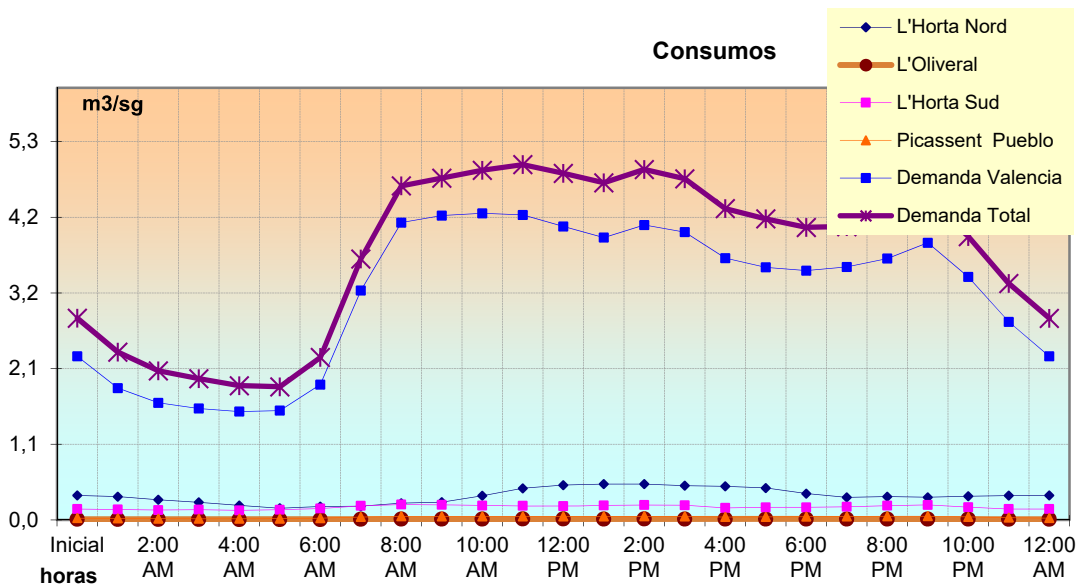


Figura. 8.35. Demanda total y demanda de subsectores de la red

• **Caudal bombeado por grupo de bombeo**

A la hora de alimentar las entradas de la arquitectura ANN con el resultado de las consignas de operación de los grupos de bombeo generadas por el optimizador, es necesario discretizar las fracciones de tiempo de la capacidad máxima de producción por planta cuando entran en funcionamiento las bombas por cada grupo de bombeo, para ello se han tenido en cuenta los siguientes caudales de bombeo por bomba como se describe en la Tabla 8.24.

Grupo de bombeo	PresaGb1	PresaGb2	PresaGb3	PresaGb4	PicGb1	PicGb2
Caudal medio (l/s)	271.64	314.08	331.83	582.77	411.72	488.68

Tabla 8.24. Caudal de bombeo para cada grupo de bombas.

El régimen de operación de los grupos de bombeo discretizado alimentará a las entradas correspondientes de la arquitectura ANN con el objetivo de optimizar la reglas de control de la operación de las válvulas mediante el modelo de optimización descrito en el apartado 8.6.2.

- **Costes de bombeo por grupo de bombas**

Los costes energéticos por m³ de cada grupo de bombeo han sido obtenidos mediante el modelo hidráulico y son los que se detallan a continuación.

Grupo de bombeo	PresaGb1	PresaGb2	PresaGb3	PresaGb4	PicGb1	PicGb2
Coste medio (kWh/m ³)	0.168	0.190	0.180	0.180	0.148	0.130

Tabla 8.25. Costes de bombeo para cada grupo de bombas.

8.6.2 Optimización del régimen de operación de las válvulas

A partir de los resultados obtenidos por el optimizador para el régimen de operación de las bombas en las estaciones de bombeo de las plantas de tratamiento, las consignas óptimas del estado de bombas se tomarán como entrada en la arquitectura ANN. Por otra parte los caudales de inyección resultantes de este modelo de optimización formarán parte de las restricciones a cumplir.

El presente modelo de optimización tiene por objetivo obtener las reglas de control óptimas del régimen de operación de las válvulas que permitan distribuir los caudales de inyección a la red.

Por tanto se tendrán que definir una serie de parámetros que configurarán el AG. Por otra parte se tendrá que definir las variables de decisión y una serie de restricciones a fin de que se cumpla la función objetivo a minimizar.

8.6.2.1 Variables de decisión

- **Consigna de válvulas**

En este modelo de optimización las variables de decisión estarán constituidas por las consignas de las 10 válvulas de operación consideradas en el modelo de Valencia de 500 nudos. Nueve de estas válvulas son reductoras de presión (VRP), mientras que la válvula llamada AvCid se

considerará una válvula de regulación Abierta/Cerrada (de hecho, es una tubería contigua). Los límites establecidos para estas válvulas se presentan en la Tabla 8.26:

Num Entrada	Id variable	Descripción	Límite Inferior (m)	Límite Superior (m)
7	SlsidroV3	Válvula VRP	15	80
8	SlsidroV2	Válvula VRP	15	60
9	SOnofreV2	Válvula VRP	15	40
10	NIIIV3	Válvula VRP	0	70
11	FeriaMuestras	Válvula VRP	5	40
12	CampV1	Válvula VRP	20	60
13	CampV2	Válvula VRP	20	60
14	AvCid	Válvula VR	0 = cerrada	1 = Abierta
15	TresForques	Válvula VRP	20	60
16	GAviles	Válvula VRP	25	50

Tabla 8.26.Limites de consigna de válvulas.

Por lo tanto, el problema de optimización propuesto se tendrá que resolver para un periodo de optimización de 24 horas a partir de los valores de las 10 variables de decisión, lo que dará lugar a un total de 240 variables de decision.

8.6.2.2 Restricciones del problema

Las restricciones deben ser formuladas tanto para las variables de decisión como para las variables de salida de la arquitectura ANN. A continuación se describen las variables de decisión y cuales han sido los límites establecidos para el problema de optimización.

- **Consigna de presión en válvulas**

En la Tabla 8.26 se ha definido los rangos de presión en los que puede operar cada una de las válvulas que se han tenido en cuenta a la hora de resolver el problema.

- **Presiones en puntos críticos**

Por otra parte, un total de 4 puntos críticos de presión han sido considerados en el modelo hidráulico de Valencia de 500 nudos, los cuales forman parte del conjunto de variables de salida de la arquitectura ANN. Los límites establecidos para estas presiones serán los siguientes (Tabla 8.27), de acuerdo a los valores garantizados por contrato y las presiones máximas que la red puede soportar sin averías

Num. Salida	Id variable	Descripción	Límite Inferior (m)	Límite Superior (m)
7	Gran Vía	Punto de presión	35	55
8	Pinedo	Punto de presión	40	61
9	TavBlanques	Punto de presión	25	50
10	Gran Canaria	Punto de presión	35	50

Tabla 8.27. Rango de presiones en nudos críticos.

- **Caudales de inyección**

Los límites definidos para los caudales de inyección procedentes de los depósitos de cada planta de tratamiento serán los obtenidos tras el proceso de optimización del régimen de operación de los sistemas de bombeo. Los valores resultantes se muestran en la Fig. 8.44 y en la Fig 8.45

8.6.2.3 Parámetros del algoritmo genético

En este apartado se van a detallar los parámetros definidos en el AG: parámetros de entrada y factores de ponderación de las penalizaciones de las restricciones definidas para el problema de optimización del régimen de operación de las válvulas.

- **Parámetros de entrada AG**

Los valores de los parámetros de entrada definidos para el AG (tras diversas pruebas de optimización), conforme a los definidos por la librería OptiGA (Anexo 3) han sido los siguientes:

Parámetro	Valor
Población	50
Número de generaciones	1000
Probabilidad de mutación	0.002
Probabilidad de cruzamiento	0.765
Método de selección	Ruleta de coste
Semilla	0.37654
Criterio de parada	Num. generaciones

Tabla 8.28. Parámetros de entrada AG.

- **Factores de ponderación de las penalizaciones**

La definición de los factores de ponderación de las penalizaciones aplicados a este problema de optimización es una tarea difícil. Una mala definición de estos factores puede provocar que una solución óptima sea descartada de la población inicial, o por otro lado, puede ocurrir, que el algoritmo de optimización tenga una convergencia prematura hacia soluciones que no sean óptimas.

Tras diversos ensayos y ajustes de estos factores de ponderación, los que han sido adoptados para resolver el presente problema de optimización han sido los siguientes:

Penalización	Factor
Presión inferior a la mínima (λ_1)	100
Presión superior a la máxima (λ_2)	100
Caudal de inyección superior al óptimo (λ_3)	2000

Tabla 8.29. Factores de ponderación de las penalizaciones.

8.7 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

8.7.1 Resultados de la optimización del régimen de operación de los grupos de bombeo

Para resolver el problema de optimización propuesto del régimen de operación de los grupos de bombeo de las plantas de tratamiento se han planteado dos escenarios: un escenario actual correspondiente al régimen de operación de un día medio de los días laborables del año 2013 y a partir de este escenario se intentará optimizar la operación de los grupos de bombeo. En el escenario actual todos los parámetros hidráulicos estarán forzados, niveles iniciales de depósitos, zonas de demanda, caudales de inyección a la red determinados por la demanda a Valencia y los caudales de bombeo de cada planta de tratamiento. A partir del escenario actual se evaluarán los costes energéticos resultantes y se lanzará el proceso de optimización. Para el escenario de optimización se determinará la distribución de caudales de producción desde cada planta que resulte más económica, obteniendo como resultado, los niveles en los depósitos, los caudales de inyección a la red a partir de una demanda preestablecida (*Demanda Valencia*) y un régimen de operación óptimo de los grupos de bombeo.

• *Reglas de operación de los grupos de bombeo*

De las tablas 8.30 y 8.31 se pueden extraer las reglas de operación de los grupos de bombeo para la situación actual y la solución optimizada respectivamente. Como se muestra en las siguientes figuras, se ha reducido el número de horas de funcionamiento de las bombas en el periodo de tarifa punta (de 9 a 14h) en la solución optimizada (únicamente funcionan en durante ese periodo las bombas del grupo PicGb2 de la planta de Picassent y la bomba 9 del grupo PresGb4 de la planta de La Presa). Por otra parte, se ha intentado reducir el número de arranque y paro de bombas (haciendo continuado las horas de funcionamiento) y desplazar el régimen de funcionamiento a periodos de tarifa llano y valle.

		Horas Bomba	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Grupos																										
PresGb1	BPresa5																									
	BPresa6																									
	BPresa7																									
	BPresa8																									
PresGb2	BPresa1																									
	BPresa2																									
PresGb3	BPresa3																									
	BPresa4																									
PresGb4	BPresa9																									
	BPresa10																									
PicGb1	BPic1																									
	BPic2																									
	BPic6																									
	BPic7																									
PicGb2	BPic3																									
	BPic4																									
	BPic5																									

Tabla 8.30. Reglas de operación de los grupos de bombeo para la situación actual durante el periodo de 24 horas.

		Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Grupos																										
PresGb1	BPresa5																									
	BPresa6																									
	BPresa7																									
	BPresa8																									
PresGb2	BPresa1																									
	BPresa2																									
PresGb3	BPresa3																									
	BPresa4																									
PresGb4	BPresa9																									
	BPresa10																									
PicGb1	BPic1																									
	BPic2																									
	BPic6																									
	BPic7																									
PicGb2	BPic3																									
	BPic4																									
	BPic5																									

Tabla 8.31. Reglas de operación óptima de los grupos de bombeo durante el periodo de 24 horas.

• *Caudales de producción*

Para los caudales de producción de cada planta de tratamiento, en el caso de la planta de la Presa (Fig. 8.36) se puede apreciar que durante el periodo tarifario valle (0h a 7h) no hay mucha variación entre la situación actual (serie de color azul) y la solución optimizada (serie de color rojo), entre las 7h y las 8h coincidiendo con la franja tarifaria llano, empieza a disminuir el caudal de producción y ya en la franja de tarifa punta (9h a 14h), es cuando la solución optimizada se limita al caudal mínimo de producción impuesto en la planta de La Presa. A partir de las 15h hasta el final del periodo de optimización (periodo de tarifa llano) el máximo caudal de producción es de 1.6 m³/s, mostrándose poca diferencia con respecto a la situación actual entre las 15h y las 18h, y estando por debajo desde las 19h hasta el final del periodo de optimización.



Figura. 8.36. Caudal de producción para la Planta de La Presa (act: azul)/ (opt: rojo).

En el caso del caudal de producción de la planta de Picassent (Fig. 8.37), durante el periodo de tarifa valle (0h a 7h) y la primera franja de tarifa llano (8h) se mantiene en torno a los 2.7 m³/s de manera uniforme en la solución optimizada con respecto a la situación actual que se mantiene por debajo hasta llegar un mínimo en torno a 1.5 m³/s. Durante el periodo de tarifa punta (9h a 14h) se mantiene en torno a 1.6 m³/s, con poca desviación respecto a la situación actual. Finalmente, a partir de las 15h hasta el final del periodo en la solución optimizada, el caudal de producción fluctua de forma similar con respecto a las primeras horas del día (periodo valle) con una diferencia máxima de 1.2 m³/s con respecto a la situación actual.

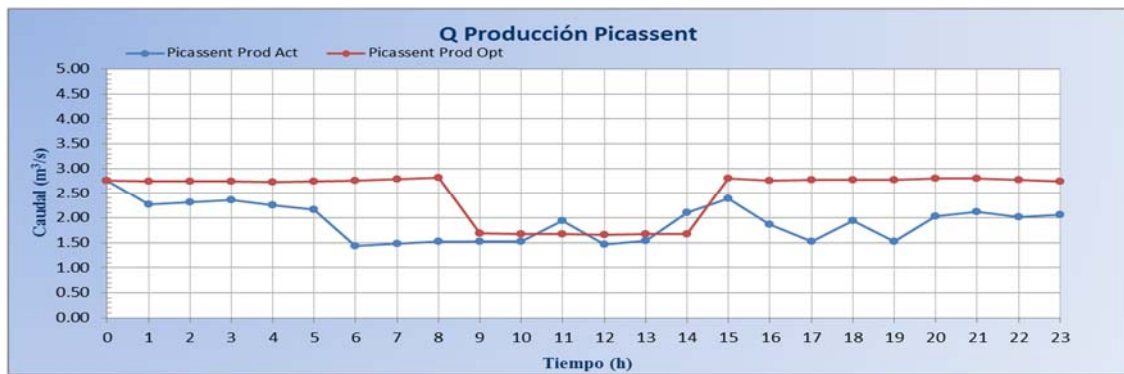


Figura. 8.37. Caudal de producción para la Planta de La Presa (act: azul)/ (opt: rojo).

• *Caudales de bombeo*

Para los caudales de bombeo de cada planta de tratamiento, en el caso de la planta de La Presa se puede apreciar que tanto para la situación actual como para la solución óptima durante el periodo de tarifa punta, el caudal de bombeo desciende con respecto al periodo valle. Cuando finaliza el periodo de tarifa punta, vuelve a incrementarse para la solución óptima (coincidiendo con el periodo llano hasta finalizar el día) manteniéndose en el caso de la situación actual. En la Fig. 8.38 se muestra una comparativa de los caudales de bombeo para la planta de La Presa para la situación actual y para la solución óptima frente a los costes de tarifa eléctrica distribuidos entre los distintos periodos del día.

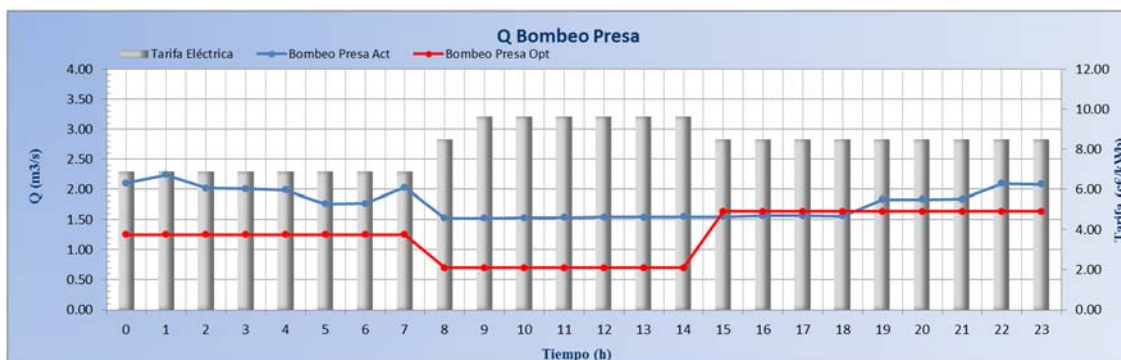


Figura. 8.38. Caudales de bombeo (act: azul / opt: rojo) frente al coste de tarifa eléctrica para la planta de La Presa.

En la Fig. 8.39 se muestra la comparativa de los caudales de bombeo vistos en la Fig. 8.38 junto a los costes energéticos de la situación actual frente a la solución óptima. Se puede comprobar que el coste energético de la solución óptima ha disminuido durante el periodo de tarifa punta y valle, no mostrándose mucha diferencia durante el segunda franja del periodo llano (excepto entre las 19h y las 21h donde se aprecia una leve disminución, y entre las 22h y las 23h en mayor proporción).

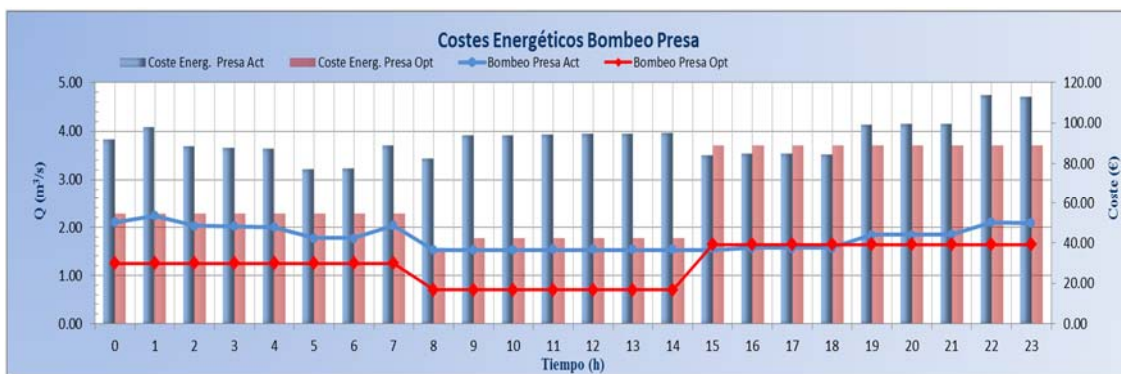


Figura. 8.39. Caudales de bombeo (act: azul / opt: rojo) frente a los costes energéticos para la planta de La Presa.

Para los caudales de bombeo de la planta de Picassent, en la Fig. 8.40 se puede ver la comparativa de los caudales de bombeo de la situación inicial frente a la solución óptima. En la solución óptima, se puede apreciar como durante las primeras horas del día se mantiene un caudal constante, pero en mayor proporción que la situación actual (coincidiendo con las horas del periodo valle) hasta llegar a la franja horaria del periodo punta, donde disminuye el caudal en aproximadamente $1.1 \text{ m}^3/\text{s}$. Al finalizar el periodo punta, este caudal vuelve a incrementarse en esa proporción hasta finalizar el periodo (coincidiendo con el periodo llano). En la Fig. 8.40 también se muestra como influye el coste de la tarifa eléctrica en cada periodo con respecto al caudal de bombeo.

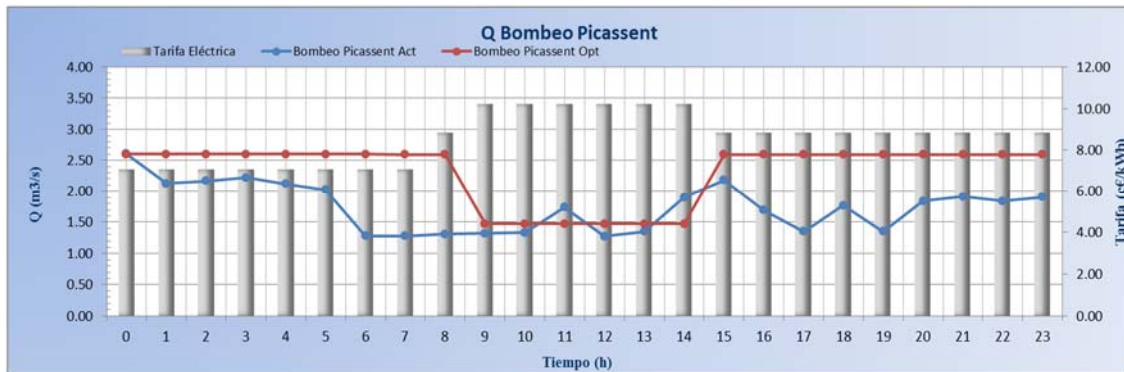


Figura. 8.40. Caudales de bombeo (act: azul / opt: rojo) frente al coste de tarifa eléctrica para la planta de Picassent.

En la Fig. 8.41 se muestra la comparativa de los caudales de bombeo vistos en la Fig. 8.40 superpuestos con los costes energéticos de la situación actual frente a la solución óptima. Se puede comprobar que el coste energético de la solución óptima ha aumentado durante todas las horas del día, pero en mayor proporción en las horas valle y llano. El aumento de los costes energéticos de la solución óptima se debe a que en este escenario se produce más agua desde esta planta que desde la planta de La Presa.

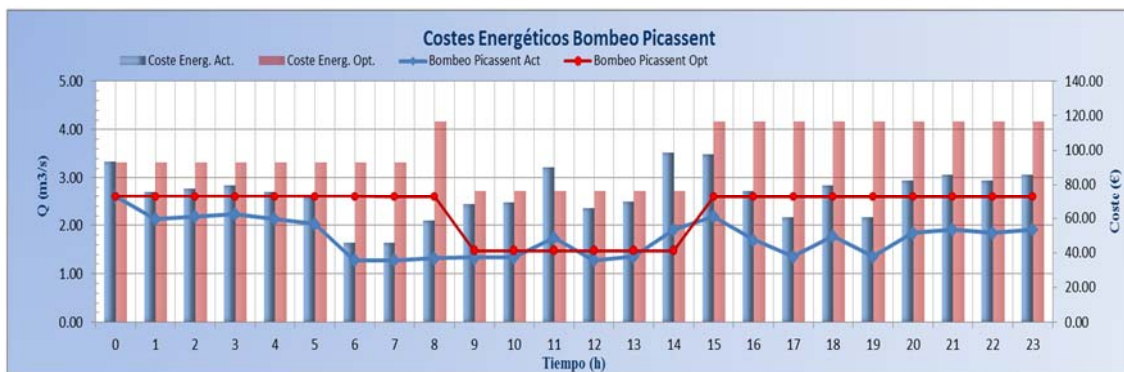


Figura. 8.41. Caudales de bombeo (act: azul / opt: rojo) frente a los costes energéticos para la planta de Picassent.

• *Niveles de depósitos*

En las siguientes figuras se muestra la evolución de los niveles en los depósitos para cada planta de tratamiento para los dos escenarios propuestos. Para el depósito de Montemayor1 (Presa) se puede apreciar (Fig. 8.42) como durante el periodo de las horas valle se llena el depósito en mayor proporción para la solución óptima con respecto a la situación actual, llegando al nivel máximo a las 8h (primera franja de tarifa llano). En el escenario de optimización, a partir de las 9h hasta las 14h coincidiendo con el periodo punta, el depósito empieza a aportar agua a Valencia disminuyendo el régimen de bombeo en esa planta comparándolo con la situación de partida donde están en funcionamiento más grupos de bombeo. A partir de las 15h, el depósito empieza a recuperar el nivel coincidiendo con las horas de periodo de tarifa llano.

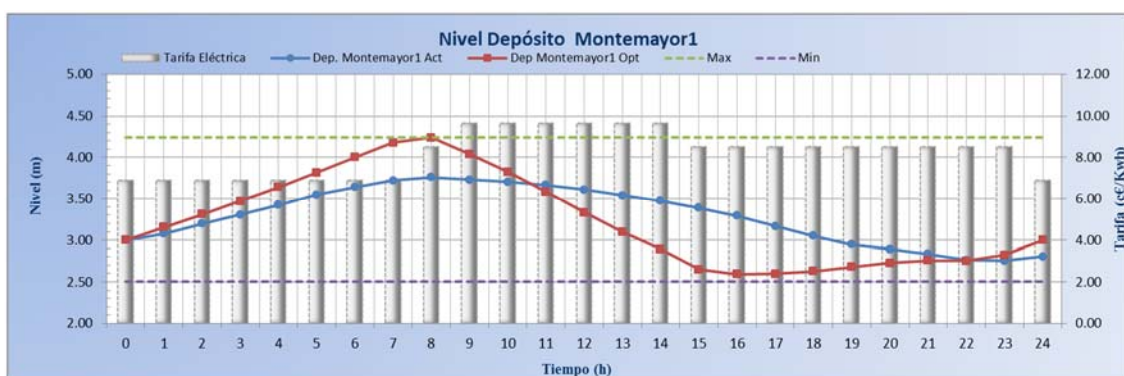


Figura. 8.42. Evolución del nivel del depósito Montemayor1 (act: azul/opt: rojo) respecto al periodo tarifario de 24 horas.

En referencia al depósito de Picassent (Fig. 8.43) vemos que en la solución óptima, el llenado del depósito en horas valle (0h a 7h) es mas moderado que en la situación inicial, manteniéndose el nivel durante la primera hora de la franja de tarifa llano (8h) y punta (9h). Durante el periodo de tarifa punta, empieza a inyectar agua a la red hasta la primera hora de la tarifa llano. A partir de las 15h en ambos escenarios se mantiene el nivel del depósito de manera uniforme como consecuencia de poner el sistema de bombeo en operación.

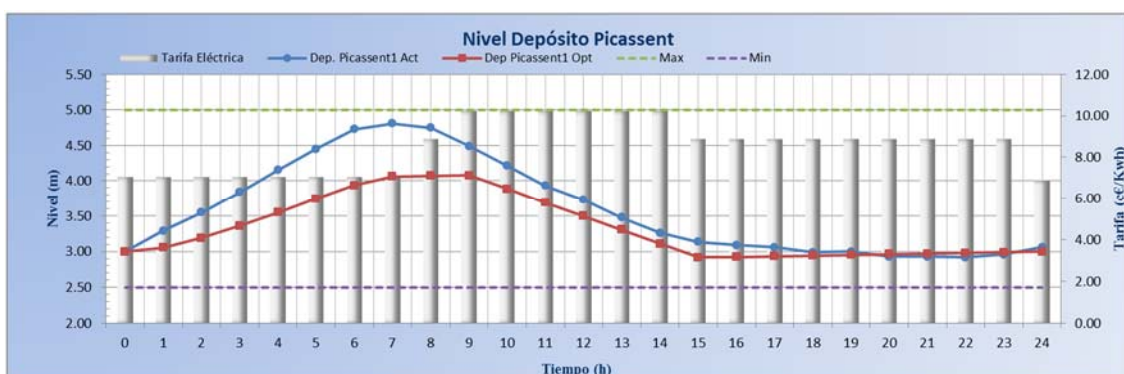


Figura. 8.43. Evolución del nivel de depósito Picassent1 (act: azul / opt: rojo) respecto al periodo tarifario de 24 horas.

• **Caudales de inyección desde depósitos.**

Las Fig. 8.44 y 8.45 muestran los caudales de inyección procedentes de los depósitos de la planta de La Presa (Montemayor1) y la planta de Picassent (Picassent1). Para la situación actual los caudales de inyección están forzados a fin de satisfacer la demanda a Valencia. En el caso de la solución óptima, el requisito es satisfacer la demanda para obtener la solución más económica. Por lo tanto, a partir de los resultados obtenidos se puede comprobar que se debe inyectar mas agua desde Picassent que desde la planta de La Presa. En el caso de la planta de La Presa durante las 6 primeras horas del día no se inyecta agua, mientras que en la planta de Picassent se aumenta el caudal de inyección durante esas horas respecto a la situación actual. Por otra parte, a partir de las 7h coincidiendo con la apertura de la válvula de AvCid se inyecta un caudal constante hasta el final del periodo de optimización.

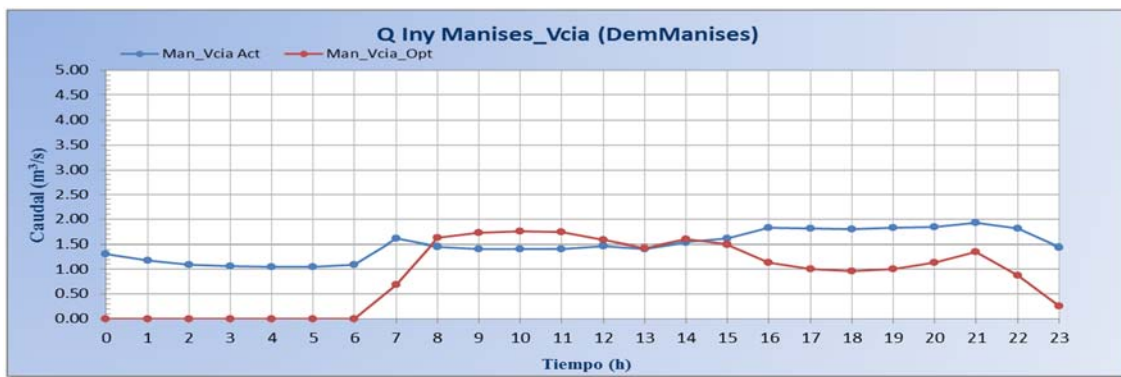


Figura. 8.44. Caudal de inyección (act: azul /opt: rojo) desde el depósito de Montemayor1 (DEMManises).

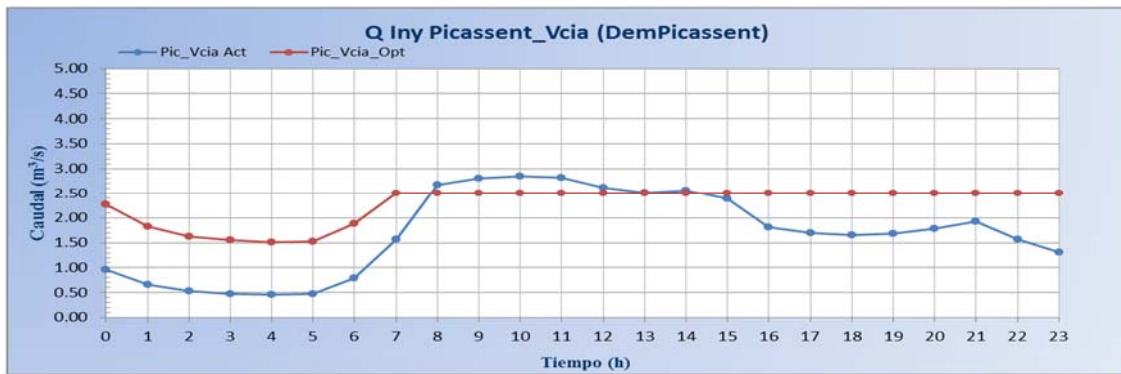


Figura. 8.45. Caudal de inyección (act: azul /opt: rojo) desde el depósito de Picassent1 (DEMPicassent).

8.7.2 Evaluación de los costes energéticos

En este punto se van a detallar la distribución de costes energéticos de la situación actual con respecto a la solución optimizada. También se realizará una comparativa de los resultados obtenidos por un lado de la situación actual frente a la solución optimizada. Dado que en todo momento se está trabajando con variables continuas, es necesario discretizar las soluciones en los dos escenarios de operación, con el objetivo de alimentar las variables de entrada de la arquitectura ANN correspondientes al estado de las bombas de los grupos de bombeo de cada planta de tratamiento.

- **Análisis de los costes energéticos para la situación actual propuesta**

Tras evaluar los distintos parámetros de operación que configuran la situación actual se obtiene como resultado un coste energético de **5326 €/día**, de los cuales **4003 €/día** corresponden a los costes de bombeo y **1323 €/día** a los costes de producción. Los detalles de la distribución de los costes para cada planta de tratamiento se muestran en la Tabla 8.32.

Producción	1125 €/día	Producción	198 €/día
La Presa	0.73 c€/m ³	Picassent	0.12 c€/m ³
Bombeo	2213 €/día	Bombeo	1790 €/día
La Presa	1.44 c€/m ³	Picassent	1.19 c€/m ³
Total	3338 €/día	Total	1988 €/día
La Presa	2.18 c€/m ³	Picassent	1.20 c€/m ³

Tabla 8.32. Costes de producción, bombeo y totales en la planta de La Presa y Picassent.

Al discretizar los resultados obtenidos (estado de bombas), obtenemos un coste energético diario total de **5349 €/día**, de los cuales **4026€/día** corresponden a costes de bombeo y **1323 €/día** a costes de producción. Comparando los resultados se puede observar que hay una diferencia de **23€/día** respecto a la solución discreta en los costes de bombeo, lo que representa una desviación del 0.4% respecto al coste total.

La distribución total del volumen de producción para la situación actual es de **319335 m³/día** siendo de **153302 m³/día (48%)** para la planta de La Presa y de **166033 m³/día (52%)** para la planta de Picassent. El coste total unitario de producción da como resultado **1.67 c€/m³**, siendo de **2.18 c€/m³** el coste unitario de producción para la planta de La Presa y **1.20 c€/m³** para la planta de Picassent.

Los porcentajes de la distribución de los costes energéticos en cada planta se muestran en la Tabla 8.33.

Planta de tratamiento	Coste energético	% s/total
La Presa	3338 €/día	63%
Picassent	1988 €/día	37%
Total día	5326 €/día	

Tabla 8.33. Distribución de costes energéticos por planta para la situación actual.

La distribución de los volúmenes bombeados por cada planta de tratamiento conforme a la estructura de la tarifa del bloque 4 para el año 2013 dan como resultado un **50.4%** para la planta de La Presa y un **49.6%** para la planta de Picassent. En la Tabla 8.34 se muestran los porcentajes de los volúmenes de bombeo totales correspondientes a cada franja tarifaria para cada planta de tratamiento. Se puede apreciar que para la distribución de la demanda propuesta en este escenario es necesario bombear en todos los periodos de tarifa, concentrándose la mayor parte del caudal de bombeo en periodos llano y valle en la misma proporción aproximadamente.

Tarifa	Bombeo La Presa		Bombeo Picassent	
	m ³	%	m ³	%
Punta	33197	21.65	32049	21.28
Llano	62826	40.98	61630	40.91
Valle	57279	37.36	56954	37.81

Tabla 8.34. Distribución de volumen bombeado por planta por periodo tarifario para la situación actual.

Conforme a los volúmenes de inyección desde los depósitos a Valencia, la distribución da como resultado un **46.6%** desde el depósito de la planta de La Presa y un **53.4%** desde el depósito de la planta de Picassent. La distribución de los volúmenes de inyección procedentes de cada planta se muestra en la Tabla 8.35.

Tarifa	Inyección La Presa		Inyección Picassent	
	m ³	%	m ³	%
Punta	31132	35	58186	65
Llano	62404	48	66633	52
Valle	34011	61	21304	39

Tabla 8.35. Distribución del volumen inyectado por planta por periodo tarifario para la situación actual.

- **Análisis de los costes energéticos para la solución óptima**

Tras el proceso de optimización de la situación actual propuesta se ha obtenido un coste energético diario de **4932 €/día**, siendo los costes de bombeo de **3896 €/día**, comparándolos con los costes iniciales se obtiene un ahorro energético diario del **7.3%**. En la Tabla 8.36 se muestran los costes óptimos de producción, bombeo y totales para las dos plantas de tratamiento.

Producción	781€/día	Producción	255 €/día
La Presa	0.73 c€/m ³	Picassent	0.12 c€/m ³
Bombeo	1536€/día	Bombeo	2360€/día
La Presa	1.44c€/m ³	Picassent	1.18 c€/m ³
Total	2318 €/día	Total	2615 €/día
La Presa	2.17 c€/m ³	Picassent	1.21 c€/m ³

Tabla 8.36. Costes óptimos de producción, bombeo y totales en la planta de La Presa y Picassent.

Al discretizar los resultados de la optimización obtenemos unos costes energéticos diarios de **4952 €/día** y unos costes de bombeo de **3915 €/día**, mostrándose una diferencia entorno a **20€/día** respecto a la solución óptima utilizando variable continua.

La distribución total del volumen de producción para el escenario de optimización es de **322332 m³/día** siendo de **106763 m³/día** (33.1%) para la planta de La Presa y de **215568 m³/día** (66.9%) para la planta de Picassent. El coste total unitario de producción da como resultado **1.53 c€/m³**, siendo **2.17 c€/m³** el coste unitario de producción para la planta de La Presa y **1.21 c€/m³** para la planta de Picassent. Por tanto, se ha obtenido un ahorro en el coste unitario total de **0.14 c€/m³**.

La diferencia del volumen total de producción de la situación óptima frente a la situación de partida se debe a que los niveles finales en los depósitos en la solución de partida no recuperan el nivel inicial, para el caso del depósito de La Presa el nivel final es de **2.8 m** y para el caso de Picassent es de **3.06 m** dando como resultado los 3000 m³ aproximadamente de diferencia.

El porcentaje de la distribución de los costes energéticos de cada planta para la solución óptima se muestra en la Tabla 8.37. Se pueden comparar con los resultados obtenidos de la Tabla 8.33, en el caso de La Presa se ha reducido un 16% consecuencia de la reducción del tiempo de funcionamiento de los grupos de bombeo en dicha planta, por el contrario, dicho porcentaje es el que se ha visto incrementado en la planta de Picassent.

Planta de tratamiento	Coste energético	% s/total
La Presa	2318 €/día	47%
Picassent	2615 €/día	53%
Total día	4932 €/día	

Tabla 8.37. Distribución de costes energéticos por planta para la solución óptima.

La distribución de los volúmenes bombeados por cada planta de tratamiento conforme a la estructura de la tarifa del bloque 4 para el año 2013 dan como resultado un **34.8%** para la planta de La Presa y un **65.2 %** para la planta de Picassent. Como se ha comentado antes, la diferencia de porcentajes respecto a la situación actual coincide con la diferencia de los porcentajes en los costes energéticos, es decir, se ha reducido en un **16 %** aproximadamente el volumen bombeado en la planta de La Presa, incrementándose en ese porcentaje en la planta de Picassent. En la

Tabla 8.38 se muestran los porcentajes de los volúmenes de bombeo totales correspondientes a cada franja tarifaria de cada planta de tratamiento para la solución óptima. Se puede apreciar que conforme a la distribución de la demanda propuesta en este escenario es necesario bombear en todas las franjas tarifarias concentrándose en este caso la mayor parte del bombeo durante el periodo llano.

En el caso de la planta de La Presa, durante el periodo de tarifa punta se ha reducido el volumen bombeado en un **7.05 %**, para el periodo de tarifa llano se ha incrementado en un **11.16 %** y para el periodo valle se ha reducido en un **3.66 %**. Para el caso de la planta de Picassent, durante el periodo punta ha habido una reducción del volumen bombeado del orden del **5.39 %**, mientras que para el periodo llano ha habido un incremento del **5.78%**, finalmente para el periodo valle apenas ha tenido variación suponiendo una reducción del **0.39 %**.

Tarifa	Bombeo La Presa		Bombeo Picassent	
	m ³	%	m ³	%
Punta	15120	14.16	31805	15.89
Llano	55665	52.14	93455	46.69
Valle	35979	33.70	74909	37.42

Tabla 8.38. Distribución de volumen bombeado por planta por periodo tarifario para la situación óptima.

En la Tabla 8.39 se muestran los resultados de la distribución de los volúmenes de inyección desde los depósitos a Valencia, obteniéndose un **28.1 %** de caudal inyectado desde el depósito de La Presa y un **71.9 %** desde el depósitos de la planta de Picassent.

Para este escenario, en la planta de La Presa se ha incrementado el volumen inyectado en un **5 %** durante el periodo punta, se ha reducido un **18 %** y un **57 %** durante el periodo llano y valle respectivamente. Por otro lado, para la planta de Picassent la distribución de porcentajes ha producido de forma inversa, un reducción del **5 %** en periodo punta, un incremento del **18 %** y **57 %** durante el periodo llano y valle respectivamente.

Tarifa	Inyección La Presa		Inyección Picassent	
	m ³	%	m ³	%
Punta	35319	40	54000	60
Llano	39037	30	90000	70
Valle	2465	4	52851	96

Tabla 8.39. Distribución del volumen inyectado por planta por periodo tarifario para la situación óptima.

8.7.3 Resultados de la optimización del régimen de operación de las válvulas

- *Consignas de operación de las válvulas*

Por otra parte, en las figuras 8.46 y 8.47 se muestran los resultados del régimen de operación de las válvulas en la red de distribución para el escenario de partida (serie act) y la solución optimizada (serie opt). Para cada una de las válvulas se muestran el rango de presiones máximo y mínimo en los que puede operar. Se puede apreciar que se han incrementado las presiones aguas abajo de las válvulas *SIsidroV3*, *SIsidroV2*, *CampV2* y *Tres Forques* respecto al modo de operación propuesto en la situación inicial, mientras que se han reducido las presiones aguas abajo de *SOnofreV2*, *NIIIV3* y *GAvilés* pero en menor proporción excepto en la válvula de *GAvilés* donde la presión se ha reducido más a primeras y últimas horas del día coincidiendo con las horas del periodo valle y llano respectivamente. Las primeras válvulas mencionadas controlan la cantidad de caudal inyectado desde Picassent, de modo que a eso se debe el incremento de presión en dichas válvulas.

El segundo conjunto de válvulas controlan el caudal inyectado desde la planta de La Presa, por esa razón, a la hora de inyectar más agua desde Picassent era necesario reducir las presiones en estas válvulas. Por otra parte, las válvulas *FeriaMuestras* y *CampVI* aparentemente presentan cambios en las consignas de presión aguas abajo ya que su influencia es menor en la regulación y su modo de operación no es tan crítico como en las válvulas anteriormente mencionadas.

Finalmente, es importante comentar que la válvula *AvCid*, se mantiene abierta desde las 7h hasta el final del periodo de optimización. El modo de operación de esta válvula fue prefijado de antemano porque tiene gran influencia en el control del caudal inyectado desde la planta de Picassent.

Capítulo 8. Caso de estudio: Aplicación de la red de abastecimiento de agua a Valencia y su área metropolitana.

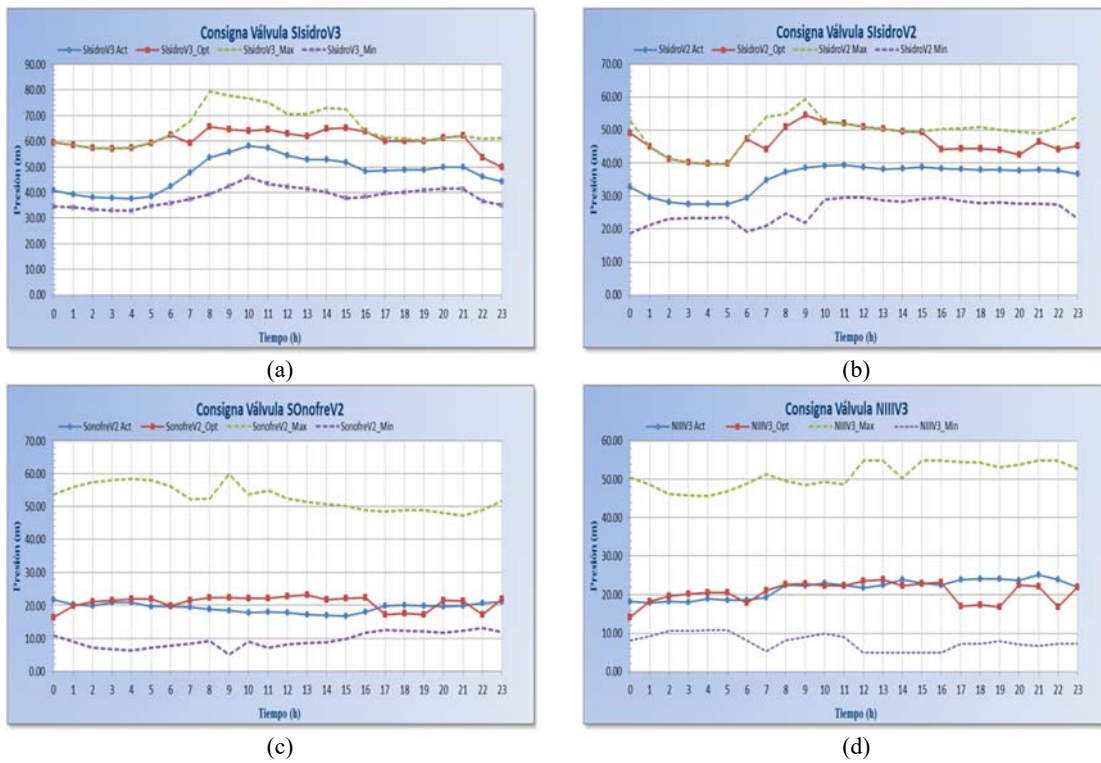


Figura. 8.46. Comparativa de consignas de válvulas situación actual (azul) y la solución óptima (rojo): (a) SanIsidroV3, (b) SIsidroV2, (c) SONofreV2, (d) NIIV3.

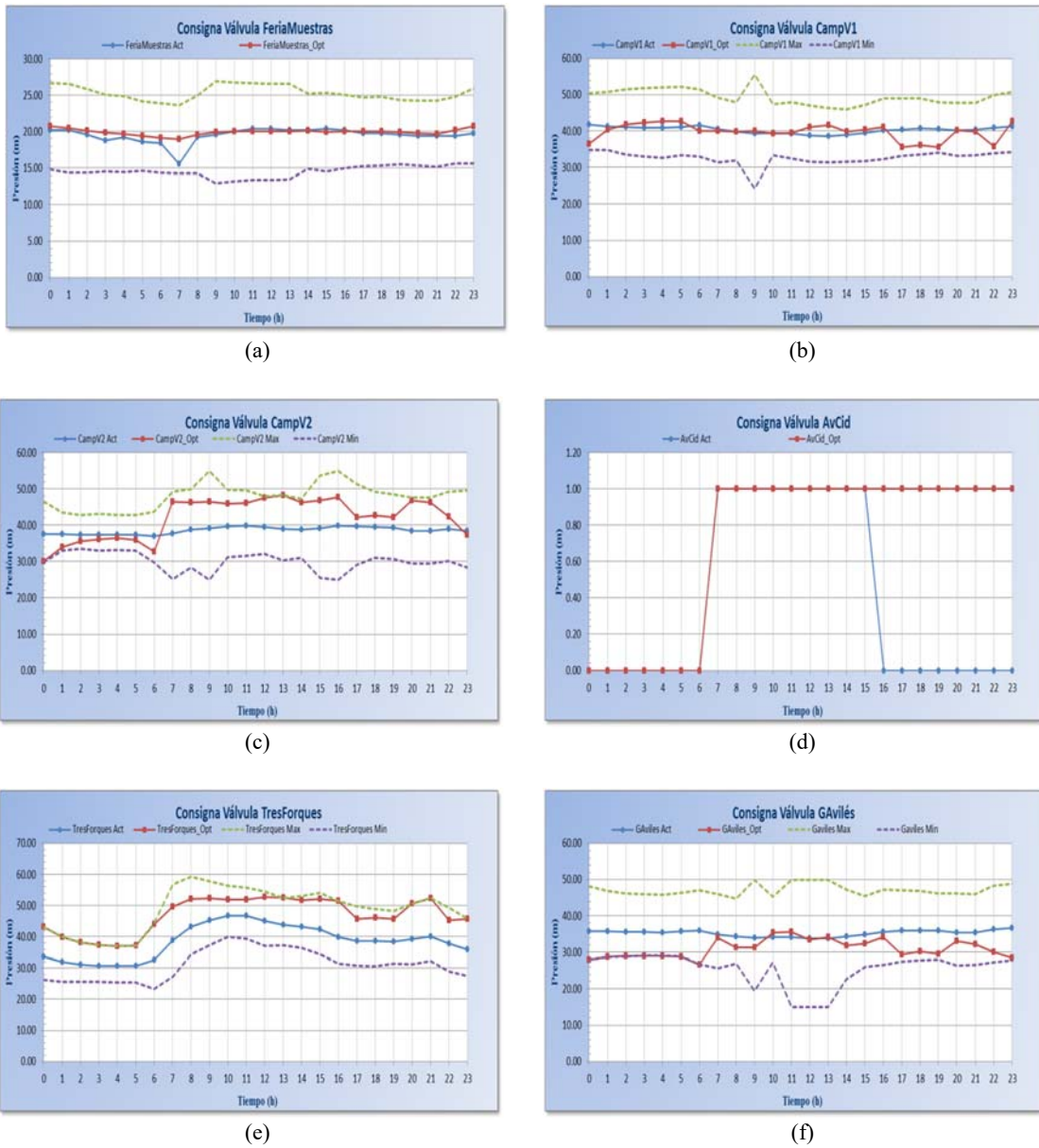


Figura. 8.47. Comparativa de consignas de válvulas situación actual (azul) y la solución óptima (rojo): (a) FeriaMuestras, (b) CampV1, (c) CampV2, (d) AvCid, (e) TresForques, (f) GAvilés.

• **Presión en los nudos críticos**

Finalmente, la presión en los nudos críticos en la solución optimizada se mantiene dentro de los límites establecidos. Se puede apreciar un incremento en las presiones del nudo GranVía y del nudo Pinedo en la solución optimizada debido a la influencia de estos puntos de presión con la planta de Picassent, siendo esta la que inyecta más agua a la red de distribución en la solución óptima. Por otra parte, el nudo de TavBlanques solo sufre un incremento de presiones en el periodo de tarifa punta, mientras que el nudo GranCanaria incrementa las presiones a primeras horas del día coincidiendo con las horas valle de la tarifa eléctrica. Como se muestra en la Fig 8.48, se puede apreciar como afectan las presiones en los nudos con respecto al caudal de inyección de los depósitos de cada planta de tratamiento.

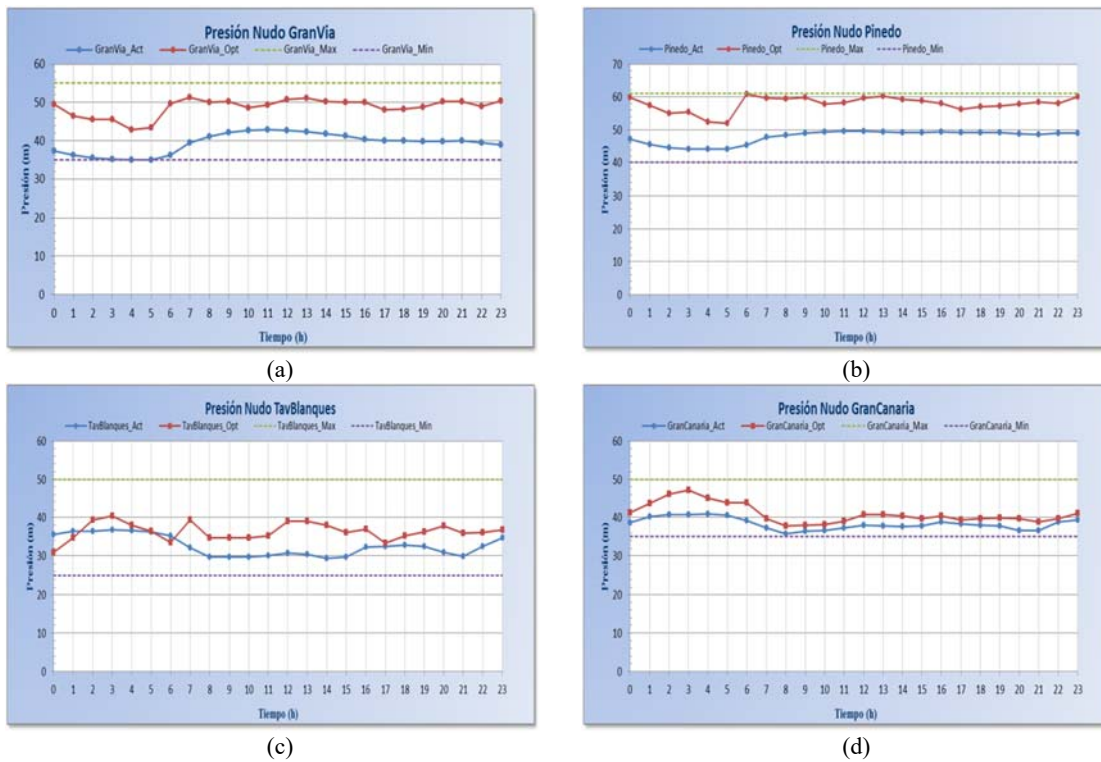


Figura. 8.48. Presiones en nudos críticos en la situación actual (azul) y solución óptima (rojo): (a) GranVía, (b) Pinedo, (c) TavBlanques, (d) GranCanaria.

8.7.4 Tiempos de cálculo consumidos durante el proceso de optimización

En este apartado cabe diferenciar los tiempos de cálculo consumidos durante el proceso de optimización empleando la arquitectura ANN propuesta frente al uso de un modelo hidráulico simplificado. El proceso de optimización se ha limitado a 1000 evaluaciones de la función objetivo (Tabla 8.28), suficientes para obtener una solución de consignas de operación óptimas para el caso de estudio propuesto. Haciendo uso de la arquitectura ANN se ha consumido un tiempo de cálculo total de 1163 segs. mientras que empleando el modelo hidráulico simplificado se ha tenido un coste de tiempo de cálculo de 6035 segs., ambos procesos se han realizado sobre una configuración computacional Intel Core I5 480M 2.66Ghz 4GB RAM Windows 64 bits.

Finalmente se puede concluir que se ha obtenido una mejora del 81% en el tiempo de cálculo a la hora de obtener una solución óptima durante el proceso de optimización frente al uso de un modelo hidráulico simplificado.

CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

9.1 CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos del presente trabajo se pueden destacar las siguientes conclusiones:

La metodología planteada en la presente tesis ha sido aplicada con éxito a un caso real de cierta complejidad, considerando las variables hidráulicas que intervienen en el proceso de optimización y simulación, de acuerdo con la arquitectura ANN propuesta.

Durante el diseño de las diferentes arquitecturas ANN propuestas, se han ido planteando distintos escenarios de entrenamiento. Posteriormente para cada escenario, se ha evaluado su tasa de error en la predicción, variando en número de E/S y nodos en la capa oculta. Cada escenario intentaba cubrir los modos de simulación realizados por el propio simulador hidráulico. El objetivo era obtener una configuración que pudiese realizar simulaciones hidráulicas en periodo extendido, considerando incluso las reglas de control. Para confeccionar los patrones de entrenamiento se han generado valores sintéticos sometiendo el modelo hidráulico a diversos escenarios de operación. Inicialmente se realizó el entrenamiento sobre una de las redes más referenciadas en la literatura, conocida como AnyTown (Anexo 2). Vistos los resultados obtenidos se ha adaptado la configuración de la arquitectura ANN para el caso de estudio de la red de Valencia, obteniéndose un RMSE de 1.6 % en la predicción de los resultados.

Por otra parte, se ha implementado un módulo de previsión de demanda formulado por (Alvisi et al. 2007) para predecir los consumos de los distintos sectores de demanda identificados en la red de Valencia, los cuales forman parte de las variables de entrada de la arquitectura ANN y del optimizador del régimen de funcionamiento de las estaciones de bombeo, dando unos resultados bastante precisos para el día analizado, concretamente el 5 de junio de 2013, para los consumos del municipio de Valencia. Se han observado sin embargo ciertas desviaciones para los caudales inyectados a l'Horta Nord dado que éstos dependen del régimen de funcionamiento de la estación de bombeo de la planta de tratamiento de La Presa. Asimismo, las desviaciones han sido algo mayores para los consumos de los pueblos del área metropolitana, debido a la alta variabilidad en los patrones de consumo de las distintas poblaciones, en parte por su opción de tomar el agua de pozos propios o de la red en alta, alimentando depósitos intermedios. Finalmente, en el caso de Pinedo, las discrepancias son achacables a la dependencia estacional de los consumos en esta zona turística.

Finalmente, tras aplicar los algoritmos desarrollados para minimizar los costes energéticos para el escenario de operación elegido, utilizando las mismas restricciones del modo real de operación, han proporcionado un ahorro energético del **7.3 %**. Ello justifica la viabilidad e interés por aplicar la metodología desarrollada en la presente tesis al caso de estudio propuesto.

Finalmente destacar la utilización de la plataforma SCA-Red, desarrollada por el doctorando en paralelo a la presente tesis, como marco idóneo para disponer en todo momento de un modelo de simulación hidráulica siempre actualizado y calibrado, el cual ha sido empleado para generar los patrones de entrenamiento de la arquitectura ANN propuesta en el presente trabajo, así como para contrastar los resultados obtenidos durante el proceso de optimización, obteniendo una mejora del 81% en el tiempo de cálculo para obtener una solución óptima frente al uso del modelo hidráulico simplificado.

9.2 APORTACIONES ORIGINALES

Como aportaciones originales realizadas en el presente trabajo cabe destacar las siguientes:

Desde el punto de vista de la optimización de la operación:

- Se han definido diferentes arquitecturas ANN que permiten simular el comportamiento hidráulico de una red de abastecimiento de agua, en sustitución del simulador hidráulico EPANET. El principal logro ha sido aplicar un modelo de arquitectura ANN en régimen dinámico con reglas de control a un caso real de cierta complejidad.
- Para la calibración de la arquitectura ANN empleada se ha implementado un algoritmo paralelo para agilizar los tiempos de cálculo. Con este avance se ha conseguido obtener un modelo de arquitectura ANN correctamente calibrado en un intervalo de tiempo razonable, al objeto de validar las soluciones propuestas durante el proceso de optimización en tiempo real. La implementación del algoritmo paralelo es escalable, lo que permite gestionar mayores volúmenes de información mediante el incremento del número de procesadores. Ello permite aumentar la configuración de la arquitectura ANN, caso de tener que adaptarse a posibles cambios en la red hidráulica. De esta manera el proceso de entrenamiento se realizaría en el mismo tiempo estimado que la arquitectura ANN inicial.
- Desarrollo de un modelo de optimización híbrido que permite por una parte optimizar el régimen de operación de los sistemas de bombeo en tiempo real y por otra parte optimizar las consignas de regulación de las válvulas de la red de distribución, para satisfacer las restricciones de presión. La complejidad de este modelo se deriva del gran volumen de variables que ha habido que tener en cuenta para resolver el problema de optimización en el caso de estudio real, con la exigencia añadida de hacerlo con reducidos tiempos de respuesta.

Desde el punto de vista del control de la operación diaria en las redes de abastecimiento, la plataforma SCA-Red constituye un DSS durante la operación diaria de una red de abastecimiento, aplicable a cualquier sistema real. Entre las mejoras que aporta esta plataforma se enumeran las siguientes:

- Integración de un modelo de simulación hidráulica utilizando el simulador EPANET como núcleo de cálculo.
- Monitorización del estado de todos los elementos de la red en una plataforma complementaria al sistema SCADA, lo que permite disponer de un sistema funcionando en paralelo que no interfiera en ningún momento con el sistema de control.
- Interfaces de monitorización similares a los propios paneles sinópticos implementados por el sistema SCADA real, lo que facilita la curva de aprendizaje en el uso de la plataforma por parte de los operadores.
- Gestión de múltiples sinópticos de estaciones remotas sobre un sinóptico principal. Generalmente los sistemas SCADA solo muestran en todo momento la visualización del sinóptico general sobre una gran pantalla, accediendo a los sinópticos de las estaciones remotas desde monitores auxiliares, pero estos no permiten simultanear la visualización de sinópticos de estaciones remotas distintas.
- Funcionamiento independiente de cualquier sistema SCADA propietario. Actualmente la plataforma SCA-Red trabaja con sistemas Siemens, Schneider, Omron y NI Labview entre otros.
- Visualización de los datos en tiempo real en múltiples plataformas (aplicaciones de escritorio, web y dispositivos móviles).
- Mantenimiento de una base de datos propia con la información histórica de todas las variables hidráulicas manejadas por el sistema SCADA, con múltiples frecuencias de muestreo compatibles con las definidas en el propio modelo hidráulico, permitiendo que la carga de la información en el mismo sea inmediata sin aplicar ninguna transformación. La alta disponibilidad de la información histórica de los datos de campo permite que las simulaciones en tiempo real sean casi instantáneas (10 seg).
- Evaluación del efecto de una posible orden de control antes ser aplicada, simulándola al momento sobre el modelo en tiempo real.
- Realización de balances hídricos en tiempo real y detección de los déficits al instante.
- Optimización de la explotación del sistema a corto plazo, en base al estado actual del mismo y las previsiones de demanda, a fin de reducir fugas y costes energéticos, etc.

- Reproducción de escenarios pasados para cotejar los resultados con las variables medidas, y así mantener el modelo siempre calibrado.
- Formación de operadores de salas de control, mediante la simulación de maniobras.
- Seguimiento de variables de campo no teledadas, pero integradas en el modelo hidráulico.
- Ayuda en la planificación de intervenciones en la red que dejen fuera de servicio elementos relevantes, tales como depósitos o estaciones de bombeo.
- Disposición al instante de un modelo ajustado para el análisis y planificación de situaciones de emergencia, nuevos servicios a corto-medio plazo, etc.
- En definitiva, la mejora de la calidad del servicio al usuario a través de todas las prestaciones referidas.

Finalmente cabe añadir que la plataforma SCA-Red ha sido implantada con éxito y actualmente esta en producción en los centros de control de Aguas de Valencia, Aguas de Málaga y Acequia Real del Júcar.

9.3 TRABAJOS FUTUROS

Siguiendo la línea de investigación iniciada en el presente trabajo, se plantea el desarrollo de nuevos métodos y funcionalidades que aporten posibles mejoras en los modos de control operacional de una red de abastecimiento de agua.

Desde el punto de vista de la optimización de la operación de redes de abastecimiento de agua:

- La integración de los parámetros asociados a los modelos de optimización (variables de decisión, restricciones, ...) planteados en la presente tesis en un sistema gestor de base de datos. De esta manera se puede llevar un seguimiento de los escenarios de optimización que se vayan llevando a cabo y realizar un análisis comparativo de los mismos, con el objetivo de mantener un histórico de escenarios que ayuden a evaluar el modo de operación real de la red.
- La definición de un modelo de datos para la integración del modelo de previsión de demanda propuesto en la base de datos de la plataforma SCA-Red, con el objetivo de mantener calibrado y actualizado el modelo de previsión con las últimas lecturas de los caudales consumidos.

- El planteamiento de nuevos modelos de decisión para la regulación automática de las válvulas de control. Una opción sería entrenar una arquitectura ANN de modo inverso, de forma que las entradas sean las presiones requeridas en los puntos críticos para unas demandas dadas, y un determinado reparto del caudal entre las diversas fuentes, y las salidas sean las consignas de las válvulas a aplicar para conseguir dicho objetivo. Ello permitiría ajustar la posición de las válvulas de forma directa, como alternativa al uso de los AG.
- La investigación de otros modelos de optimización que puedan mejorar la operación diaria de las redes de abastecimiento de agua, más eficientes y más universales. En particular sería deseable en el futuro ampliar los objetivos de la optimización, mediante la formulación de un problema multiobjetivo, donde la minimización del coste energético pueda estar supeditada a otros objetivos más prioritarios, como garantizar la prestación del servicio, garantizar la calidad del agua, priorizar el mantenimiento de unas reservas en los depósitos, etc.
- El desarrollo e implementación de sectores energéticos para evaluar dónde se consume la energía aportada al sistema, y detectar posibles ineficiencias.

Desde el punto de vista de la integración de modelos hidráulicos con sistemas SCADA en tiempo real se sugiere centrar los trabajos futuros en los siguientes aspectos:

- Integrar el módulo de optimización desarrollado en el presente trabajo con el módulo de simulación hidráulica de la plataforma SCA-Red. Hasta el momento los resultados del módulo de optimización son importados de forma manual en el modelo hidráulico que gestiona la plataforma.
- Implementar pantallas específicas para gestionar los distintos escenarios óptimos y realizar un seguimiento del comportamiento real del sistema frente al comportamiento óptimo
- Implementar un gestor de modelos hidráulicos para llevar un seguimiento temporal de los cambios producidos en la red hidráulica.
- Mejorar las interfaces de los paneles sinópticos, para detectar las anomalías en los puntos críticos de la red de manera inmediata.
- Diseñar un gestor de escenarios que permita analizar distintos modos de operación a partir de las consignas establecidas por el operador de la sala de control.
- Incorporar nuevos métodos de filtrado de los datos de campo en la plataforma para asegurar la calidad de los datos.

9.4 PUBLICACIONES ASOCIADAS AL DESARROLLO DE LA TESIS

Martínez, F.; Bou, V.; Conejos, P.; Díaz, J. (2013). Conexión SCADA-Modelo para la simulación en tiempo real del sistema de abastecimiento de agua a Valencia y su área metropolitana. III Jornadas de Ingeniería del Agua (JIA 2013). Vol.2. pp. 107 - 114. Marcombo Ediciones Técnicas.

Martínez, F.; Bartolín, H.; Domene, J.; Pérez, J.; Bou, V.; Ferrer, J.A.; Rodríguez, M.; Oliver, V. (2010). La gestión informatizada del agua inyectada y registrada en la red sectorizada de Málaga. XXX Jornadas Técnicas de la Asociación Española de Abastecimientos y Saneamiento (AEAS). Sevilla. Páginas 165 – 177. 9-11 Junio 2010.

Martínez, F., Hernández, V., Alonso, J. M., Rao, Z., and Alvisi, S. (2007). Optimizing the operation of the Valencia water-distribution network. *Journal of Hydroinformatics*, 9:(1), pp. 65-78.

Bou, V., Martínez, F., Conejos, P. (2006). SCA-Red, a general purpose SCADA application for taking decisions in real time with the aid of a hydraulic model. 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium. WDSA. Cincinnati (Ohio).

Martínez, F.; Bartolín, H.; Bou, V. (2005). Integración GIS-SCADA para la gestión técnica de abastecimientos de agua con la ayuda de modelos. X Salón Internacional de Agua, Energía y Medio Ambiente, CANAGUA. Las Palmas de Gran Canaria, Noviembre 2005.

Martínez, F.; Hernández, V.; Bartolín, H.; Bou, V. (2005). CALNET Project: Building and updating water distribution models from GIS+CIS+O&M+SCADA. 8th International Conference on Computing and Control for the Water Industry (CCWI 2005). University of Exeter (UK), Septiembre 2005.

Martínez, F.; Bou, V.; Hernández, V.; Alvarruiz, F.; Alonso, J.M. (2005). ANN Architectures for simulating water distribution networks. CCWI 2005, Exeter, UK. *Water Management for the 21st Century*, Vol. One, pp 251-256.

Martínez F., Bou V., Bartolín H., Alonso J. M., Alvarruiz F., Guerrero D., Hernández V., Llopis J. D., Ramos E. (2004). Simulation of control strategies in water distribution systems, using SCADA in conjunction with calibrated models obtained from GIS. 6th International Conference on Hydroinformatics. Singapur, Junio 2004.

Martínez, F.; Bartolín, H.; Bou, V.; Hernández, V.; Alvarruiz, F.; Alonso, J.M. (2004). Integración SIG-SCADA para la explotación de redes de abastecimiento con la ayuda de modelos. AEAS, Madrid 2004.

9.5 CONTRATOS DERIVADOS DEL DESARROLLO DE LA TESIS

TITULO: POTABLE WATER DISTRIBUTION MANAGEMENT (EVK1-CT-2000-00084)

ENTIDAD FINANCIADORA: V PROGRAMA MARCO DE LA UNION EUROPEA

DURACIÓN DESDE: 01/01/2001 **HASTA:** 01/04/2004

TITULO: CALIBRACION Y EXPLOTACION DE MODELOS HIDRAULICOS DE REDES DE ABASTECIMIENTO (REN2000-0380-P4-03)

ENTIDAD FINANCIADORA: MINISTERIO DE CIENCIA Y TECNOLOGIA

DURACIÓN DESDE: 07/11/2001 **HASTA:** 07/11/2003

TITULO: CONEXIÓN DE UN SIMULADOR HIDRAULICO EN TIEMPO REAL CON EL SISTEMA SCADA DEL TELEMANDO DEL ABASTECIMIENTO DE VALENCIA

ENTIDAD FINANCIADORA: EMPRESA MIXTA VALENCIANA DE AGUAS, S.A.

DURACIÓN DESDE: 01/09/2003 **HASTA:** 01/03/2004

TITULO: GESTION INFORMATIZADA DE LAS FUGAS EN LA RED DE AGUA POTABLE DE MALAGA MEDIANTE LA INTEGRACION GIS-SCADA

ENTIDAD FINANCIADORA: EMPRESA MUNICIPAL AGUAS DE MALAGA, S.A.

DURACIÓN DESDE: 13/12/2006 **HASTA:** 13/12/2008

TITULO: DESARROLLO DE UN SISTEMA DE APOYO A LA TOMA DE DECISIONES PARA EL TELEMANDO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DE AGUA EN ALTA DE LA ACEQUIA REAL DEL JUCAR

ENTIDAD FINANCIADORA: EMPRESA MIXTA METROPOLITANA, S.A.

DURACIÓN DESDE: 15/10/2009 **HASTA:** 15/06/2010

TITULO: IMPLANTACIÓN DE LA APLICACIÓN SCA-RED AL SISTEMA METROPOLITANO DE AGUA EN ALTA DE VALENCIA. CAPTURA Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACION. CONSULTA GRÁFICA SOBRE SINOPTICO

ENTIDAD FINANCIADORA: EMPRESA MIXTA METROPOLITANA, S.A.

DURACIÓN DESDE: 15/02/2010 **HASTA:** 15/08/2010

TITULO: IMPLANTACION DE LA APLICACION SCARED AL SISTEMA METROPOLITANO DE AGUA EN ALTA DE VALENCIA

ENTIDAD FINANCIADORA: EMPRESA MIXTA METROPOLITANA, S.A.

DURACIÓN DESDE: 11/04/2011 **HASTA:** 11/04/2012

BIBLIOGRAFIA

Alcocer-Yamanaka, V.H., Tzatchkov, V., Garcia-Bartual, R., Buchberger, S., Arreguin-Cortes, F.I. and Leon-Rodriguez, T. (2008) Stochastic modeling of residential drinking water demand using the Neyman-Scott scheme. *Ingenieria Hidráulica En Mexico* 23(3), pp. 105-121.

Alvisi, S., Franchini, M. and Marinelli, A. (2003) A stochastic model for representing drinking water demand at residential level. *Water Resources Management* 17(3), 197-222.

Alvisi, S., Franchini, M. and Marinelli, A. (2007) A short-term, pattern-based model for water-demand forecasting. *Journal of Hydroinformatics* 9(1), 39-50.

Bakker, M., Vreeburg, J.H.G., van Schagen, K.M. and Rietveld, L.C. (2013). A fully adaptive forecasting model for short-term drinking water demand. *Environmental Modelling & Software* 48, 141-151.

Bartolín, H., Martínez, F., Cortés, J.A. (2006). Bringing up to date WDS models by querying. An EPANET-based GIS geodatabase. 8th Annual Int. Symposium on WDSA. ASCE Conference, Cincinnati.

Becker, S. And LeCun, Y. (1988) The Feasibility of Applying Numerical Optimization Techniques to Backpropagation. *Connectionist Models Summer School*. Morgan-Kaufman.

Bou, V., Martínez, F., Conejos, P. (2006). SCA-Red, a general purpose SCADA application for taking decisions in real time with the aid of a hydraulic model. 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium. WDSA. Cincinnati (Ohio).

Boulos, P.F.; Wu Z.; Orr C.H.; Moore M.; Hsiung P.; Thomas D. (2000). Optimal pump operation of water distribution systems using genetic algorithm, H2ONET – Users Guide. MW Software INC.

Box, G.E.P., Jenkins, G.M. and Reinsel, G.C. (1994). *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, Pearson Education, Delhi.

Broad, D., Dandy, G., and Maier, H. (2005). Water distribution system optimization using metamodels. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(3):172-180.

Broad, D., Maier, H., and Dandy, G. (2010). Optimal operation of complex water distribution systems using metamodels. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(4):433-443.

Booch G., Rumbaugh J. y Jacobson I. (1999). *The Unified Modelling Language. User Guide*. Addison Wesley

- Buchberger, S.G. and Wells, G.J. (1996). Intensity, duration, and frequency of residential water demands. *Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE* 122(1), 11-19.
- Buchberger, S.G. and Wu, L. (1995) Model for instantaneous residential water demands. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce* 121(3), 232-246.
- Cabrera, E., Izquierdo J. y Andreu M. (1996). Introducción al Análisis Dinámico de Redes. En *Ingeniería Hidráulica aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua*. Unidad docente de Mecánica de Fluidos, Universidad Politécnica de Valencia (Spain)
- Cameron R. W, Barret R. J., Cazottes N., Jarrige P. A., Tocqueville L., Link SCADA With Network Analysis System: What, Why and How?, *Proceedings of the Third International Conference on Hydroinformatics*, ISBN: 9054109831, Copenhagen, Denmark, 1998.
- Cater, J.P. (1987). Successfully Using Peak Learning Rates of 10 (and greater) in Backpropagation Networks with the Heuristic Learning Algorithm. *IEEE International Conference on Neural Networks*, pags. 645-651. San Diego, CA.
- Coulbeck, B.; Orr, C.H.; Brdys, M. (1988). Real-time optimized control of water distribution systems. *International Conference on Control*. April, pp. 634-640.
- Coulbeck, B.; Orr, C.H. (1993). Essential considerations in the computer control of water distribution systems, *Reliability Engineering & System Safety*, 42:(1), pp. 55-64.
- DeJong, K.A. and Spears, W.M. An Analysis of the Interacting Roles of Population Size and Crossover in Genetic Algorithms. *Proc. First Workshop Parallel Problem Solving from Nature*, Springer-Verlag, Berlin, 1990. pp. 38-47.
- Estivill-Castro, V. (2000). Hybrid Genetic Algorithms Are Better for Spatial Clustering. *Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence*, pages 424-434.
- Fahlman, S, E. (1988). An Empirical Study of Learning Speed in Backpropagation. Technical Report CMU-CS-88-162, Carnegie-Mellon University, Computer Science.
- Falkenauer, Emanuel. (1999). *Evolutionary Algorithms: Applying Genetic Algorithms to Real World Problems*. Springer, New York, Pag 65-88.
- Flynn, M. J. Very high-speed computing systems, *Proc. IEEE*, Vol. 54, pp.1901-1909 1966.
- Franzini, M. A. (1987). Speech Recognition with Backpropagation. *Ninth Annual Conference of IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*.
- Geist, A, Beguelin, A, Dongarra, J. *PVM, A Users' Guide and Tutorial for Network Parallel Computing*, MIT Press 1994.

- Ghiassi, M., Zimbra, D.K. and Saidane, H. (2008) Urban water demand forecasting with a dynamic artificial neural network model. *Journal of Water Resources Planning and Management-Asce* 134(2), 138-146.
- Goldberg, David E. (1989). *Genetic Algorithms - in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- GoodMan, PH. Nevprop Software, 1.16. Reno, NV: University of Nevada; 1996
- Hennessy, J. L., Patterson, D. A. *Organización y Diseño de Computadores: La interfaz Hardware/Software*. McGraw-Hill, 1995.
- Herrera, M., Torgo, L., Izquierdo, J. and Perez-Garcia, R. (2010) Predictive models for forecasting hourly urban water demand. *Journal of Hydrology* 387:(1-2), 141-150.
- Hilera, J. R., Martínez, V. J. (1995) *Redes Neuronales Artificiales. Fundamentos Modelos y Aplicaciones*. Editorial Ra-Ma.
- Hillier, F., Lieberman, G. (2006). *Introduction to Operation Research*. McGraw-Hill. New York.
- Hilton, A. B. C. and Culver, T. B. 2000 Constraint handling for genetic algorithms in optimal remediation design. *Journal Water Resources Planning and Management, ASCE* 126(3), 128-137.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor: The University of Michigan Press
- Hopfield, J.J, (1982). Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 79:(8), pp. 2554–2558.
- Ingeduld P., Maeder C., (2000), *Linking Hydraulic Models to Telemetry Systems*, Proceedings of 4th International Conference on Hydroinformatics, Iowa, USA.
- Jacobs, R.A. (1987) *Increased rates of Convergence Through Learning Rate Adaptation* Technical Report COINS TR 87-117, University of Massachusetts at Amherst, Dept. of Computer Information Science, Amherst, MA.
- Janke, R. J., Haxton, T. M., Boccelli, D., Kramer, A., Matracia, A., Panguluri, S., Uber, J. and Hachett, S. 2010. *How Accurate Is A Hydraulic Model?* U.S. EPA, Office of R&D, Nat. Homeland Security Center. Water Infr. Prot. Division.

- Jamieson, D., Shamir, U., Martínez, F., and Franchini, M. (2007). Conceptual design of a generic, real-time, near-optimal control system for water-distribution networks. *Journal of Hydroinformatics*, 9:(1), pp. 3-14.
- Jowitt, P.W.; Germanopoulos, G. (1992). Optimal Pump Scheduling in Water Supply Network. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 118:(4), pp. 416-422.
- Kang, D. S.; Pasha, M. F. K. and Lansey, K. (2009). Approximate methods for uncertainty analysis of water distribution systems, *Urban Water Journal*, 6:(3), pp. 233 – 249.
- Kohonen, T. (1998). *Self-Organization and Associative Memory*. Springer, Second Edition.
- Kumar, V. Grama, A., Gupta A, Karypis G. *Introduction to Parallel Computing: Design and Analysis of Algorithms*. The Benjamin/Cumming Publishing Com. Inc. 1994.
- Kumar, A. S y Suresh N. (2009) *Operations and Management*. New Age International.
- Lansey, K. E.; Awumah, K. (1994). Optimal Pump Operations Considering Pump Switches. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120:(1), pp. 17-35.
- Nitivattananon, V.; Sadowski, E.C.; Quimpo, R.G. (1996). Optimization of Water Supply System Operation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122:(5), pp. 374-384.
- Maier, H. R. and Dandy, G. C. (2000). Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: a review of modelling issues and applications. *Environmental Modelling & Software*, 15:(1), pp. 101- 124.
- Martínez, F., Hernández, V., Bartolín, H., Bou, V., Alvarruiz, F., Alonso, J.M. (2005). CALNET project: building and updating water distribution models from GIS+ CIS+ O&M+SCADA . CCWI 2005, Exeter, UK. *Water Management for the 21st Century*, Vol. 1, pp 209-214.
- Martínez, F.; Bou, V.; Hernández, V.; Alvarruiz,F.; Alonso, J.M. (2005) . ANN Architectures for simulating water distribution networks”. CCWI 2005, Exeter, UK. *Water Management for the 21st Century*, Vol. One, pp 251-256.
- Martínez, F., Hernández, V., Alonso, J. M., Rao, Z., and Alvisi, S. (2007). Optimizing the operation of the Valencia water-distribution network. *Journal of Hydroinformatics*, 9:(1), pp. 65-78.
- Mays, L.W. (2000), *Water Distribution Systems Handbook*, McGraw-Hill, New York, 2000.
- Meyer, H., Fuchs, F., Klaus, T. (2009). *Manufacturing Execution Systems*. McGraw-Hill Education; First Edition.

- Miller, B.L., Goldberg, D.E. (1995). Genetic algorithms, Selection Schemes and the Varying Effects of Noise, IlliGAL report No. 95009
- OPC Foundation (2001). OPC Data Access Interface Specification 2.05.
- Ormsbee, L., Walski, T., Chase, D., Sharp, W., (1987). Techniques for Improving Energy Efficiency at Water Supply Pumping Stations. ETL 1110-1-86, U.S Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS.
- Ormsbee, L., Lingireddy, S., Pumping System Control Using Genetic Optimization and Neural Networks, (1995). Proceedings of the 7th IFAC/IFORS/IMACS Symposium on Large Scale Systems: Theory and Applications, London, UK, July 11-13.
- Parker, D. B. (1987) Optimal Algorithms for Adaptive Networks: Second Order Backpropagation, Second Order Direct Propagation, and Second Order Hebbian Learning. IEEE International Conference on Neural Networks, pp. 593-600. San Diego, CA,
- Pezeshk, S.; Helweg, O.J. (1996) Adaptive Search Optimization in Reducing Pump Operating Costs. Journal of Water Resources Planning and Management, 122:(1), pp. 57-63.
- Plaut, D. C., Nowlan, S. J., and Hinton, G. E. (1986). Experiments on Learning by Backpropagation. Technical Report CMU-CS-86-126, Carnegie-Mellon University, Computer Science Dept. Pittsburg, PA,
- Pulido-Calvo I. Gutiérrez-Estrada J.C. (2011). Selection and Operation of Pumping Stations of Water Distribution Systems Environmental Research Journal. Nova Science Publishers, pp. 1-20
- Qi, C. and Chang, N.-B. (2011) System dynamics modeling for municipal water demand estimation in an urban region under uncertain economic impacts. Journal of Environmental Management 92(6), pp. 1628-1641.
- Razavi, S., Tolson, B. A., and Burn, D. H. (2012). Review of surrogate modeling in water resources. Water Resources Research, 48:(7).
- Rao, Z. and Alvarruiz, F. (2007). Use of an artificial neural network to capture the domain knowledge of a conventional hydraulic simulation model. Journal of Hydroinformatics, 9(1), pp. 15-24.
- Rao, Z. and Salomons, E. (2007). Development of a real-time, near-optimal control process for water-distribution networks. Journal of Hydroinformatics, 9:(1), pp 25-37.
- Rossmann, L. (2000a). EPANET Users manual. Water Supply and Water Resources Division National Risk Management Research Laboratory Cincinnati, Ohio, USA.

- Rossman, L. (2000b). EPANET 2 Programmers Toolkit. US: Risk Reduction Engineering Laboratory, Office of Research & Development, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, USA.
- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., Williams, R. J., (1986). Learning internal representations by error propagation”, *Parallel distributed processing*, MIT Press, Cambridge, Mass, Vol. 1, pp. 318-362.
- Salomons Z., Optiga: An ActiveX Control for Genetic Algorithms, <http://www.optiwater.com/optiga.html>, 2002.
- Salomons, E., Goryashko, A., Shamir, U., Rao, Z. and Alvisi, S. (2007) Optimizing the operation of the Haifa-A water-distribution network. *Journal of Hydroinformatics* 9:(1), pp. 51-64.
- Snir, M., Dongarra, J., Kowalik, J.S., Huss-Lederman, S., Otto, S.W., Walker, D.W., MPI (1998), *The complete reference*. Second Edition.
- Tarquin, A., Dowdy, J., *Optimal Pump Operation in Water Distribution* (1989), *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, pp. 115-168
- Tiburce, V., Chopard, P., Hamon, J., Elain, C. & Green, A. (1999). Linking SCADA to a hydraulic and water quality simulator at the Centre des Mouvements de L'eau (CEM) in Paris, France. In *Water Industry Systems: Modelling and Optimisation Applications* (ed. D. A. Savic & G. A. Walters), Research Studies Press Ltd, Baldock, UK, pp. 243–258.
- Todini, E. y Pilati S. (1987). A gradient method for the analysis of pipe networks. *International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution*. Leicester Polytechnic, UK, September 8-10.
- Walski, T., Brill, E., Gessler, J., Goulter, I., Jeppson, R., Lansey, K., Lee, H., Liebman, J., Mays, L., Morgan, D., and Ormsbee, L. (1987). Battle of the network models: Epilogue. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 113(2):191-203
- Walski T. M., Chase D. V., Savic D., Grayman W. M., Beckwith S., Koelle E., « *Advanced Water Distribution Modeling And Management* », Haestad Methods, First Edition, 2003.
- Watrous, R. L. (1987) *Learning Algorithms for Connectionist Networks: Applied Gradient Methods for Non-Linear Optimization*. IEEE International Conference on Neural Networks, pags. 619-627. San Diego, CA.
- Wells, G. (2001). *Code-Centric T-SQL Programming with Stored Procedures and Triggers*, APress.

Skworcow, P., Ulanicki, B., AbdelMeguid, H., and Paluszczyszyn, D. (2010). Model predictive control for energy and leakage management in water distribution systems. In Proceedings of the UKACC 8th International Conference on Control, pages 990-995, Coventry, UK.

Zessler, U.; Shamir, U. (1989) Optimal Operation of Water Distribution Systems. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 115, n. 6, pp. 735-752.

Zhou, S., McMahon, T., Walton, A. and Lewis, J. (2002). Forecasting operational demand for an urban water supply zone. Journal of Hydrology 259(1-4), 189-202.

ANEXOS

ANEXO 1. DESCRIPCIÓN DEL FICHERO DE ENTRADA DEL SOFTWARE DE ENTRENAMIENTO NEVPROP 1.16.

▪ PARAMETROS DEL FICHERO DE ENTRADA

Para la descripción de los parámetros y del fichero de entrada a la aplicación utilizaremos un fichero de ejemplo.

La cabecera del fichero está constituida por 16 parámetros, seguido de la definición del número de nodos de entrada, nodos en la capa oculta y nodos a la salida, que constituyen la arquitectura de la red neuronal. Seguidamente se define el rango de salida y las conexiones entre los nodos de cada capa. Finalmente se define el número de patrones de entrenamiento y de tests que se utilizarán para evaluar sus prestaciones, y seguidamente los valores de éstos.

A continuación se muestra un ejemplo de lo que sería un fichero de entrada:

```
#
IBMorDOS 0      UseQuickProp 1   EpochWiseUpdate 1

BestByCindex 0  MinEpochs 200   BeyondBestEpoch 1.5

WeightRange 1.0 HyperErr 0        SigmoidPrimeOffset 0.1
Epsilon 0.01    SplitEpsilon 1    Momentum 0.1
WeightDecay -0.001 ScoreThreshold 0.10

QPMaxFactor 1.75 QPModeSwitchThreshold 0.0

Ninputs 4        Nhidden 3        Noutputs 1
OutputUnitType 2
Connectcalls 2
1 4 5 7
5 7 8 8
NTrainingPatterns 50 NTestingPatterns 50
```

(Patrones de Entrenamiento)

5.000 2.000 3.500 1.000 1

5.900 3.000 4.200 1.500 1

....

6.400 2.700 5.300 1.900 0

6.000 2.700 5.100 1.600 1

.... (Patrones de Test)

5.600 2.900 3.600 1.300 1

6.800 200 5.900 2.300 0

▪ CONSTRUCCIÓN DEL FICHERO

A continuación se dará una descripción sobre la forma de construir un fichero de entrada a Nevprop.

- La zona de datos del fichero empieza después del marcador (#), que indica el principio del fichero. Antes de este carácter delimitador el usuario puede introducir cualquier tipo de comentarios al respecto.
- Nevprop asume que el fichero tiene la extensión “.net”, por lo que el usuario solo tendrá que introducir el nombre del fichero cuando se solicite.
- Primeramente, hay que especificar los 16 parámetros (que se describen en el siguiente apartado). Se han intentado agrupar de manera lógica; la primera fila se utiliza para seleccionar el modo de operación de la aplicación; la segunda fila son los valores de configuración utilizados para determinar la parada del entrenamiento cuando Nevprop se esta ejecutando; las 3 filas siguientes son parámetros utilizados por Quickprop o por Backpropagation; los parámetros de la ultima fila solo son utilizados por Quickprop.
- Seguidamente, se puede definir el número de nodos de entrada, nodos en la capa oculta, y nodos de salida respectivamente.
- A continuación, se puede definir si el rango de salida es -0.5 a 0.5 (Output Unit 1) o de 0 a 1 (OutputUnit 2).

- Una vez establecidos los rangos de salida pasamos a especificar las conexiones entre las capas de la red. A modo de ejemplo, si definimos una red de tres capas (entrada-oculta-salida), la cual tiene 4 nodos en la capa de entrada, 3 en la capa oculta y un nodo a la salida. Definiremos el parámetro ConnectCalls como 2, indicando que van a haber dos conjuntos de conexiones, los cuales se describen seguidamente. El primer conjunto conectaría los nodos del 1 al 4 con los nodos del 5 al 7 de la capa oculta, y el segundo conjunto conectaría los nodos del 5 al 7 con el nodo 8 de la capa de salida.

NOTA: Como puede verse la enumeración de los nodos se realiza de manera secuencial independientemente de la ubicación de la capa donde se encuentren.

- Finalmente se definen mediante los parámetros NtrainingPatterns y NtestingPatterns el número de patrones de entrenamiento y de test respectivamente.

NOTA: Sino se dispone de patrones de test solo hay que poner el parámetro NtestingPatterns a 0

▪ DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS

El significado de cada uno de los parámetros utilizados en el fichero de entrada de Nevprop se describe a continuación.

- **IBMorDOS:**

- 1 → Mantiene el nombre corto a la hora de almacenar los ficheros de resultados.
- 0 → Añade el prefijo "Ninput – Nhidden - Nouput" al nombre del fichero.

- **UseQuickProp:**

- 1 → Utiliza el algoritmo Quickprop para la actualización de los pesos.
- 0 → Utiliza el algoritmo Backpropagation (gradiente descendente) para la actualización de los pesos.

- **EpochWiseUpdate:**

- 1 → Actualiza los pesos después de un periodo de acumulación de errores, denominado Epoch. Dicho de otro modo, la actualización se realiza por Epochs.

- 0 → Actualiza los pesos por cada patrón de entrenamiento (solo valido cuando se utiliza el método del gradiente descendente; cuando se utiliza Quickprop el programa fuerza el valor del parámetro a 1).
- **BestByCindex:**
 - 1 → Determina la mejor generalización de los pesos para el mejor valor del índice c durante la presentación de resultados para un conjunto de test determinado.
 - 0 → Determina la mejor generalización para el mejor error RMS obtenido (aplicable tanto en Quickprop como en Backpropagation).
- **MinEpochs:** Número de Epochs que tienen que suceder antes de que se pueda almacenar la mejor generalización de los pesos. Mediante estos parámetros se puede evitar problemas con mínimos locales debido a las pequeñas oscilaciones que se producen durante el proceso de entrenamiento.
- **BeyondBestEpoch:** Define el punto de parada referido al instante (epoch) en el cual se obtuvo la mejor generalización de los pesos.

(Por ejemplo: Si BeyondBestEpoch es igual a 1.5 y la mejor generalización se obtuvo en el Epoch 200, Nevprop no parará el entrenamiento (ni el test) hasta la Epoch 300. Este parámetro permite, como el anterior, evitar los problemas ocasionados por los mínimos locales). Esta opción es aplicable tanto en Quickprop como en Backpropagation.

- **WeightRange:** +/- Rango para la inicialización aleatoria de los pesos.
- **HyperErr:**
 - 1 → Usa la tangente hiperbólica como función de error.
 - 0 → Usa la función sigmoide.
- **SigmoidPrimeOffset:** Añade este factor a la primer derivada de la función sigmoide para eliminar los picos.
- **Epsilon:** Factor de aprendizaje.
- **SplitEpsilon:**
 - 1 → Divide **Epsilon** por el número de nodos de entrada (fan-in).
 - 0 → Usa el valor de Epsilon en su totalidad para cada actualización de pesos.
- **Momentum:** Parámetro del momento utilizado en el método del descenso por gradiente.

- **WeightDecay:** Índice del decaimiento del peso. Proporción negativa que se añade al peso en el estado anterior para su utilización en el estado actual.
- **ScoreThreshold:** Una predicción con acierto es considerada como un bit exacto. Se utiliza solo para la presentación de resultados, no en el entrenamiento.
- **QPMaxFactor:** En Quickprop, limite máximo del salto en el último paso.
- **QPModeSwitchThreshold:** Cuando se este ejecutando el algoritmo Quickprop, se cambiará al método del descenso por gradiente en función +/- este umbral.

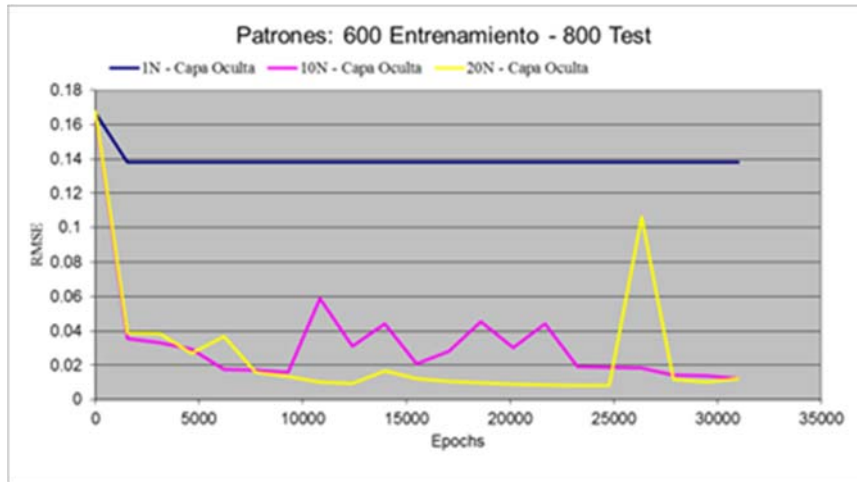
ANEXO 2. CASOS DE ESTUDIO PARA EL ENTRENAMIENTO DE LAS ARQUITECTURAS ANN

- PARÁMETROS PARA LA SIMULACIÓN EN REGIMEN PERMANENTE

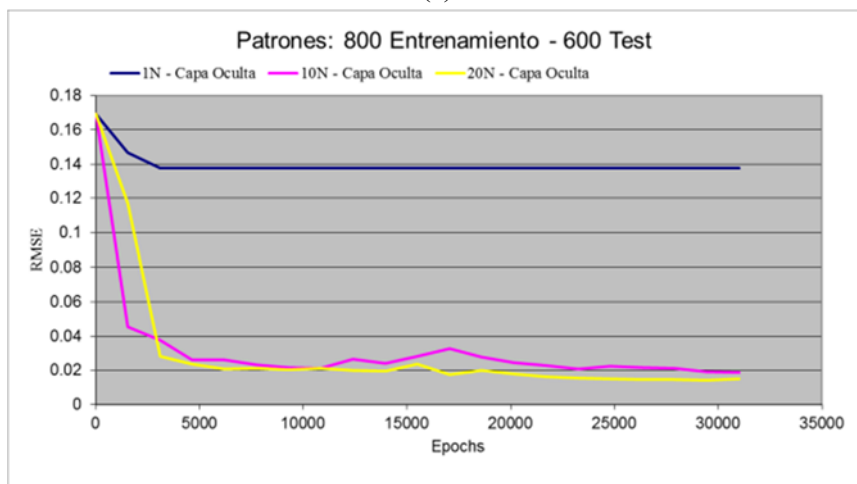
Ejemplo de referencia:	Modelo Any Town (ANN)	
	ESTATICO	
CASOS	1	2
	Estático	Estático +
	Demanda, Bombas	Demanda en nudos
PARAMETROS DEL MODELO		
Cota de Solera	0	0
Limites niveles depósitos	0 - 100	0 - 100
Niv. Inicial depósitos	Rnd (65,5..71,5)	Rnd (65,5..71,5)
Factor multiplicador demanda	Rand (0,5 .. 2)	1
Demanda Nudos en 24h	No	Rnd (0..5)
Estado Bombas en 24 h	Rnd (#HorasBomba)	Rnd (#HorasBomba)
Estado de Tuberías en 24 h	No	No
Opciones de Tiempo	No	No
Intervalo para generación de informes	1h	1h
Estados intermedios	No	No
ENTRADAS		
Demanda Total (t)	EPANET	NO
Nodal Demands (t) - 3 Nudos	NO	EPANET
Tank Levels (t) - 3 Depósitos	EPANET	EPANET
Estado de Bombas (t) - 1 Grupo de Bombas	EPANET	EPANET
Estado de Tuberías (t) - 3 Tuberías	NO	NO
Intervalo de cálculo (t+1)	NO	NO
Limites depósitos - 6 Límites	NO	NO
Repor TimeStep - 1 Instante	NO	NO
Tiempo de Simulación (t)	NO	NO
Opciones de Tiempo - 6 Opciones	NO	NO
SALIDAS		
Presiones (t) - 3 Nudos	EPANET	EPANET
Pot. Bombas (t) - 1 Potencia Total	EPANET	EPANET
Caudal Tuberías (t) - 3 Tuberías	EPANET	EPANET
Niv. Depósitos (t+1) - 3 Depósitos	NO	NO
Estado Tuberías (t+1) - 3 Tuberías	NO	NO
Interv Cálculo (t+1)	NO	NO
Estado Bombas (t+1) - 1 Grupo Bombas	NO	NO
Factibilidad (t)	NO	NO

Tabla A2.1. Parametros ANN para la simulación en régimen permanente.

- Validación de resultados de la simulación ANN en régimen permanente



(a)



(b)

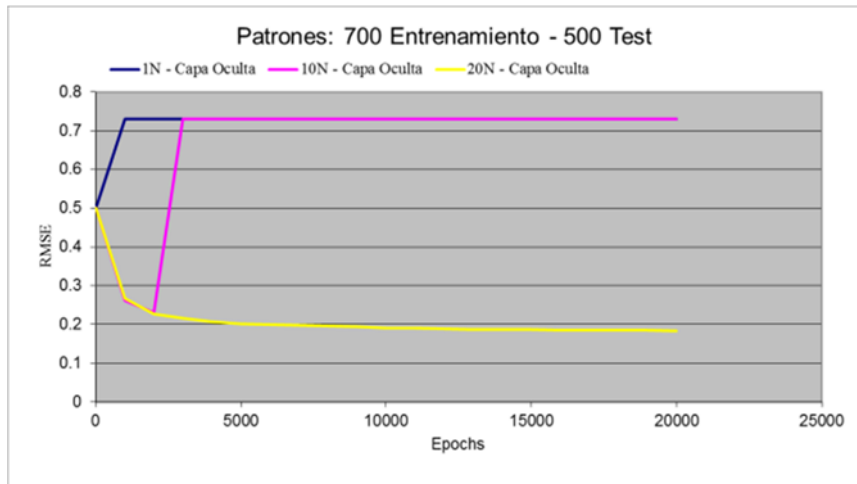
Figura. A2.1. (a) RMSE Caso 1; (b) RMSE Caso 2.

- PARÁMETROS PARA EL ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD

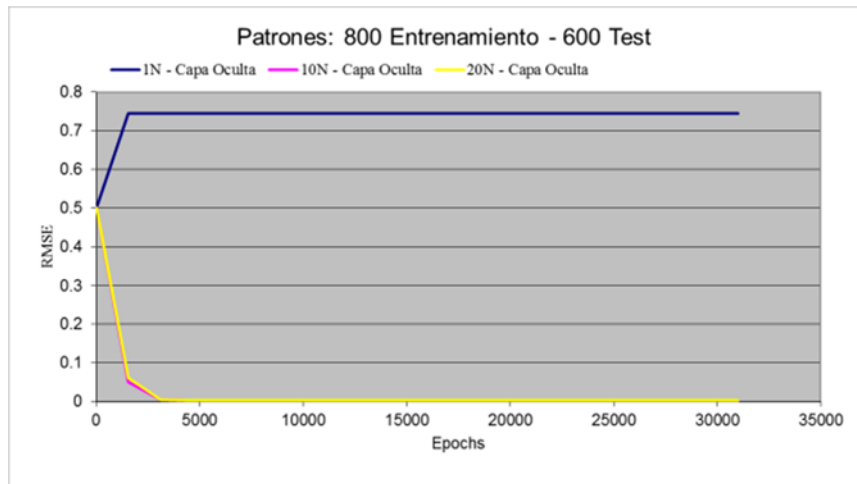
Ejemplo de referencia:	Modelo Any Town (ANN)	
	ESTÁTICO	
CASOS	3	4
	Estático + Factib. Niv. Dep	Estático + Factib. Cierre Tub.
PARAMETROS DEL MODELO		
Cota de Solera	65.5	0
Limites niveles depósitos	1.4 - 6.0	0 - 100
Niv. Inicial depósitos	Rnd (65.5..71.5)	Rnd (65.5..71.5)
Factor multiplicador demanda	Rnd (0.5 .. 2)	Rnd (0.5 .. 2)
Demanda Nudos en 24h	Rnd (0..5)	Rnd (0..5)
Estado Bombas en 24 h	Rnd (#HorasBomba)	Rnd (#HorasBomba)
Estado de Tuberías en 24 h	No	Rnd (#HorasCierre)
Opciones de Tiempo	No	No
Intervalo para generación de informes	1h	1h
Estados intermedios	Yes	No
ENTRADAS		
Demanda Total (t)	EPANET	EPANET
Nodal Demands (t) - 3 Nudos	EPANET	EPANET
Tank Levels (t) - 3 Depósitos	EPANET	EPANET
Estado de Bombas (t) - 1 Grupo de Bombas	EPANET	EPANET
Estado de Tuberías (t) - 3 Tuberías	NO	EPANET
Intervalo de cálculo (t+1)	NO	NO
Limites depósitos - 6 Limites	NO	NO
Repor TimeStep - 1 Instante	NO	NO
Tiempo de Simulación (t)	NO	NO
Opciones de Tiempo - 6 Opciones	NO	NO
SALIDAS		
Presiones (t) - 3 Nudos	NO	NO
Pot. Bombas (t) - 1 Potencia Total	NO	NO
Caudal Tuberías (t) - 3 Tuberías	NO	NO
Niv. Depósitos (t+1) - 3 Depósitos	NO	NO
Estado Tuberías (t+1) - 3 Tuberías	NO	NO
Interv Cálculo (t+1)	NO	NO
Estado Bombas (t+1) - 1 Grupo Bombas	NO	NO
Factibilidad (t)	EPANET	EPANET

Tabla A2.2. Parametros ANN para el análisis de factibilidad en régimen permanente.

- **Validación de resultados de la simulación ANN para el análisis de factibilidad en régimen permanente**



(a)



(b)

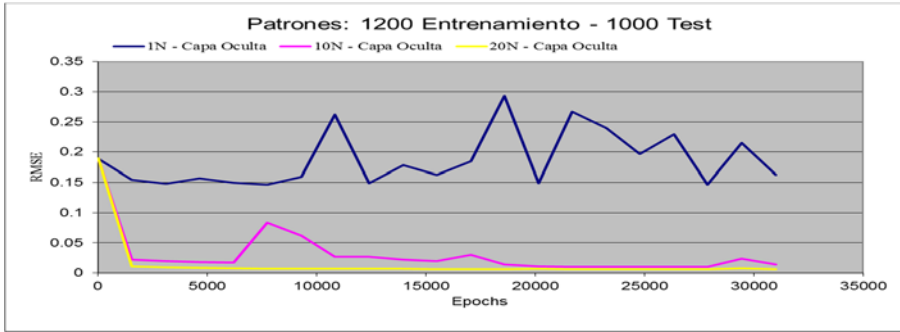
Figura. A2.2. (a) RSME Caso 3; (b) RMSE Caso 4.

- PARÁMETROS PARA LA SIMULACIÓN EN RÉGIMEN DINÁMICO

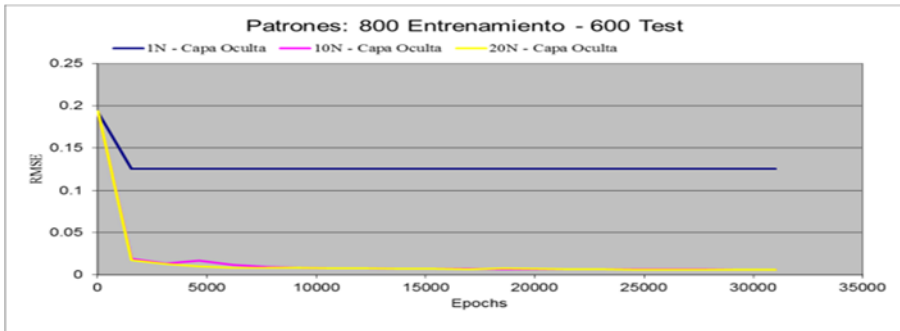
Ejemplo de referencia:	Modelo Any Town (ANN)			
CASOS	DINÁMICOS SIMPLES			
	5	6	7	8
	Dinámico	Dinámico	Dinámico +	Dinámico +
	Niv. Dep.	Niv. Dep.Demandas	Límite en niv. de dep.	Límite en niv. de dep.
			Interv. Informes	Estados intermedios
PARAMETROS DEL MODELO				
Cota de Solera	0	0	65.5	65.5
Límites niveles depósitos	0 - 100	0 - 100	1.4 - 6.0	1.4 - 6.0
Niv. Inicial depósitos	Rnd (65.5..71.5)	Rnd (65.5..71.5)	Rnd (Límites)	Rnd (Límites)
Factor multiplicador demanda	Rnd (0.5 .. 2)	Rnd (0.5 .. 2)	Rnd (0.5 .. 2)	Rnd (0.5 .. 2)
Demanda Nudos en 24h	No	Rnd (0..5)	Rnd (0..5)	Rnd (0..5)
Estado Bombas en 24 h	Rnd (#HorasBomba)	Rnd (#HorasBomba)	Rnd (#HorasBomba)	Rnd (#HorasBomba)
Estado de Tuberías en 24 h	No	No	No	No
Opciones de Tiempo	No	No	No	No
Intervalo para generación de informes	1h	1h	1h	1h
Estados intermedios	No	No	No	Yes
ENTRADAS				
Demanda Total (t)	EPANET	EPANET	EPANET	EPANET
Nodal Demands (t) - 3 Nudos	NO	EPANET	EPANET	EPANET
Tank Levels (t) - 3 Depósitos	EPANET	EPANET	EPANET	EPANET
Estado de Bombas (t) - 1 Grupo de Bombas	EPANET	EPANET	EPANET	EPANET
Estado de Tuberías (t) - 3 Tuberías	NO	NO	NO	NO
Intervalo de cálculo (t+1)	NO	NO	NO	NO
Límites depósitos - 6 Límites	NO	NO	NO	NO
Repor TimeStep - 1 Instante	NO	NO	NO	NO
Tiempo de Simulación (t)	NO	NO	NO	NO
Opciones de Tiempo - 6 Opciones	NO	NO	NO	NO
SALIDAS				
Presiones (t) - 3 Nudos	EPANET	EPANET	EPANET	EPANET
Pot. Bombas (t) - 1 Potencia Total	EPANET	EPANET	EPANET	EPANET
Caudal Tuberías (t) - 3 Tuberías	NO	NO	NO	NO
Niv. Depósitos (t+1) - 3 Depósitos	EPANET	EPANET	EPANET	EPANET
Estado Tuberías (t+1) - 3 Tuberías	NO	NO	NO	NO
Interv Cálculo (t+1)	NO	NO	NO	NO
Estado Bombas (t+1) - 1 Grupo Bombas	NO	NO	NO	NO
Factibilidad (t)	NO	NO	NO	NO

Tabla A2.3. Parametros ANN para la simulación en régimen dinámico.

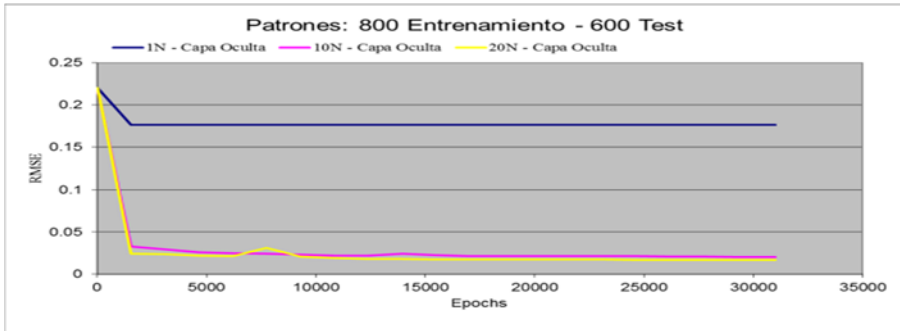
- Validación de resultados de la simulación ANN en régimen dinámico.



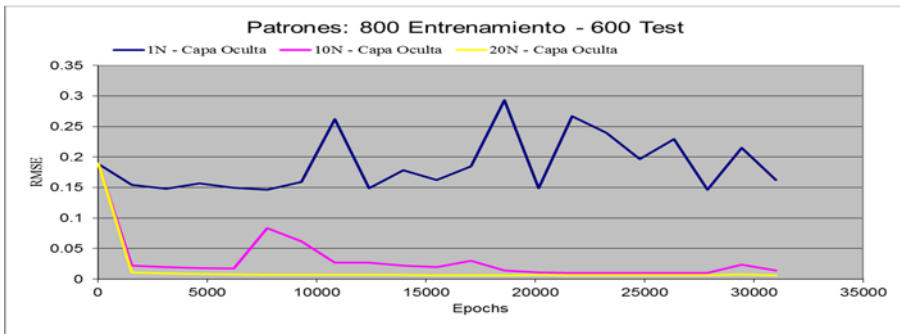
(a)



(b)



(c)



(d)

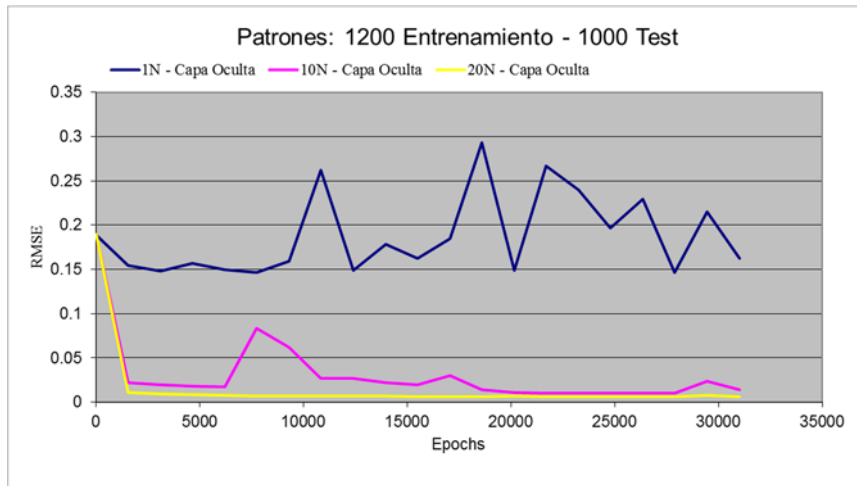
Figura. A2.3. (a) RSME Caso 5; (b) RMSE Caso 6; (c) RMSE Caso 7; (d) RMSE Caso 8.

- PARÁMETROS PARA LA SIMULACIÓN EN RÉGIMEN DINÁMICO CON LEYES DE CONTROL

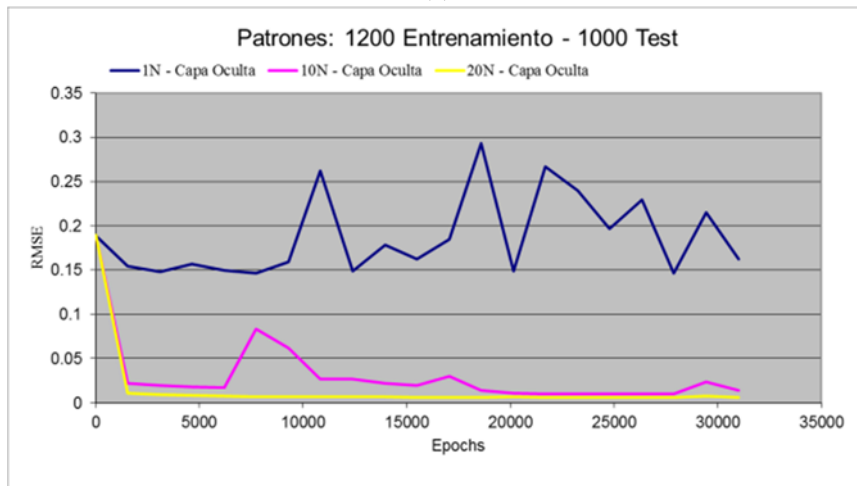
Ejemplo de referencia:	Modelo Any Town (ANN)	
	DINÁMICO CON LEYES DE CONTROL	
CASOS	9	10
	Dinám	Dinámico +
	Limite en n	Var. Interv. de tiempo
	Estados intermedios	
PARAMETROS DEL MODELO		
Cota de Solera	0	0
Limites niveles depósitos	0 - 100	0 - 100
Niv. Inicial depósitos	Rnd (65,5..71,5)	Rnd (65,5..71,5)
Factor multiplicador demanda	Rnd (0.5 .. 2)	Rnd (0.5 .. 2)
Demanda Nudos en 24h	No	No
Estado Bombas en 24 h	Rnd (#HorasBomba)	Rnd (#HorasBomba)
Estado de Tuberías en 24 h	No	Rnd (#HorasCierre)
Opciones de Tiempo	No	No
Intervalo para generación de informes	Cíclico (60,30,12 m)	Cíclico (60,30,12 m)
Estados intermedios	No	No
ENTRADAS		
Demanda Total (t)	EPANET	EPANET
Nodal Demands (t) - 3 Nudos	NO	NO
Tank Levels (t) - 3 Depósitos	EPANET	EPANET
Estado de Bombas (t) - 1 Grupo de Bombas	EPANET	EPANET
Estado de Tuberías (t) - 3 Tuberías	NO	EPANET
Intervalo de cálculo (t+1)	EPANET	EPANET
Limites depósitos - 6 Límites	NO	NO
Repor TimeStep - 1 Instante	NO	NO
Tiempo de Simulación (t)	NO	NO
Opciones de Tiempo - 6 Opciones	NO	NO
SALIDAS		
Presiones (t) - 3 Nudos	EPANET	EPANET
Pot. Bombas (t) - 1 Potencia Total	EPANET	EPANET
Caudal Tuberías (t) - 3 Tuberías	NO	NO
Niv. Depósitos (t+1) - 3 Depósitos	EPANET	EPANET
Estado Tuberías (t+1) - 3 Tuberías	NO	NO
Interv Cálculo (t+1)	NO	NO
Estado Bombas (t+1) - 1 Grupo Bombas	NO	NO
Factibilidad (t)	NO	NO

Tabla A2.4. Parametros ANN para la simulación en régimen dinámico con leyes de control.

- **Validación de resultados de la simulación ANN en régimen dinámico con leyes de control.**



(a)



(b)

Figura. A2.4. (a) RSME Caso 9; (b) RMSE Caso 10.

ANEXO 3. PARÁMETROS LIBRERÍA ALGORITMOS GENÉTICOS OPTIGA

A continuación se muestran las posibilidades que ofrece OptiGA a la hora de seleccionar los parámetros que definen el proceso de optimización.

❖ *Representación*

OptiGA ofrece la posibilidad de representar las variables de decisión, en alfabeto binario, como números enteros o como números reales.

❖ *Selección*

Los métodos de selección de los que dispone optiGA son:

1. Mejor compañero

El primer componente de la pareja es seleccionado por orden de aptitud. El segundo componente es seleccionado de manera aleatoria.

2. Ruleta de coste

La probabilidad de que un cromosoma sea seleccionado se calcula de acuerdo a su aptitud.

3. Torneo

Con este método de selección un pequeño subconjunto de cromosomas es extraído aleatoriamente y aquel que tiene mayor aptitud queda seleccionado

4. Aleatorio

Los dos cromosomas padre son seleccionados aleatoriamente.

❖ *Cruzamiento*

Los métodos implementados por optiGA son:

1. Un punto

Se selecciona de manera aleatoria un punto. La primera parte del primer padre es acoplada con la segunda parte del segundo padre para construir el primer descendiente. El segundo descendiente es construido con la primera parte del segundo padre y la segunda parte del primer padre:

Padre#1: 011101|0101
Padre #2: 100111|0111
Descendiente #1: 011101|0111
Descendiente #2: 100111|0101

Este método se encuentra implementado sólo para genes binarios.

2. Dos puntos

El método de los dos puntos difiere del método de un punto en el hecho que se seleccionan aleatoriamente dos puntos de cruzamiento, procediendo tal como se muestra en el siguiente ejemplo:

```
Padre#1: 011|101|0101
Padre#2: 100|111|0111
Descendiente#1: 011|101|0111
Descendiente#2: 100|111|0101
```

Este método se encuentra implementado sólo para genes binarios

3. Uniforme

En el cruzamiento uniforme, cada bit/gen es seleccionado aleatoriamente, tanto para el primer padre como para el segundo, tal como se muestra a continuación:

```
Padre#1: 0111010101
Padre#2: 1001110111
Descendiente#1: 0111010111
Descendiente#2: 1001110101
```

4. Mezcla

Consiste en combinar linealmente los genes de los padres dos a dos, usando la siguiente ecuación para cada gen:

$$\begin{aligned} \text{Descendiente\#1} &= \text{Padre\#1} - b * (\text{Padre\#1} - \text{Padre\#2}) \\ \text{Descendiente\#2} &= \text{Padre\#2} - b * (\text{Padre\#1} - \text{Padre\#2}) \end{aligned}$$

, donde b es un valor aleatorio entre 0 y 1

Se encuentra implementado solo para valores enteros o reales.

❖ Mutación

Los métodos implementados son los siguientes:

1. Conmutación de bits

Este método simplemente cambia un bit seleccionado aleatoriamente. Por ejemplo:

```
Antes de la mutación: 0111010101
Después de la mutación: 0111000101
```

Se encuentra implementado solo para genes binarios.

2. Aleatorio

La mutación aleatoria cambia un gen seleccionado aleatoriamente por un valor aleatorio dentro de un rango limitado por un valor mínimo y un valor máximo.
Se encuentra implementado para genes reales y enteros.

3. Min-max

Este operador cambia el valor de un gen seleccionado aleatoriamente por el valor máximo o mínimo permitido, seleccionado de manera aleatoria.

Se encuentra implementado para genes reales y enteros.

❖ Modo de finalización

El modo de finalización determina cuándo el proceso de evolución acaba. Los modos de finalización implementados son:

1. Máximo número de generaciones

El proceso termina cuando se llega a un número determinado de generaciones.

2. Tiempo transcurrido

El proceso termina cuando ha transcurrido un cierto tiempo. En caso de que se alcance previamente el máximo número de generaciones, el proceso termina.

3. Sin cambios en la aptitud

El proceso termina si no existe ningún cambio en la aptitud población para un número determinado de generaciones. En caso de alcanzarse el número máximo de generaciones en primer lugar, el proceso termina.

ANEXO 4. FUNCIONALIDADES DE LOS MÓDULOS DE LA PLATAFORMA SCA-RED

A4.1 Módulo SCA-Red MS

El módulo SCA-Red MS está concebido como una aplicación cliente/servidor donde su principal objetivo es la integración de un sistema SCADA con un simulador hidráulico. Mediante este módulo, toda la información que es almacenada por el sistema de SCADA podrá ser integrada en el modelo a fin de ayudar al operador de salas de control en la toma de decisiones.

El módulo no actúa directamente sobre los elementos físicos de la red, pero permite monitorizar el estado de las variables hidráulicas de los puntos teledados del sistema SCADA en tiempo real.

Además, mediante dicha integración es posible también determinar el estado de los puntos no teledados de la red en cualquier consulta. Se contempla tanto la opción de realizar simulaciones en tiempo real, como simular situaciones pasadas o realizar predicciones de estados futuros.

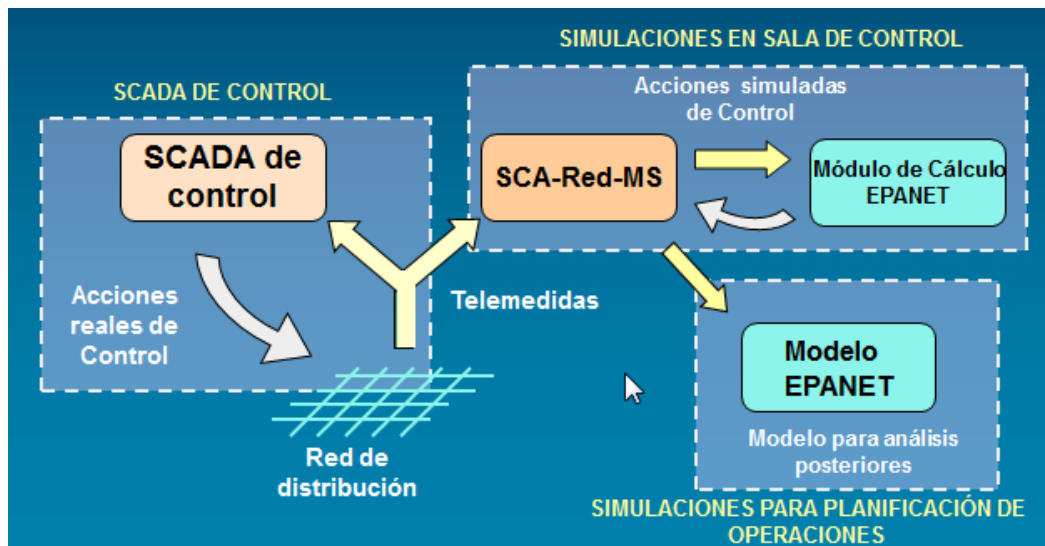


Figura. A4.1 Interacción del módulo SCA-Red-MS con el sistema SCADA.

Las principales características del módulo, desde el punto de vista de la parte cliente, se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Comparativa de los datos medidos en tiempo real con los calculados por el simulador hidráulico a fin de que el operador pueda contrastar la validez del modelo.
- Estimación de los valores de las variables hidráulicas no telemedidas, obteniendo dichos valores de los resultados del modelo. Con ellos se consigue ahorrar el coste de equipamiento de nuevos puntos de medida, poniendo a disposición del operador información adicional, que siempre será útil a la hora de tomar decisiones.
- Congelación de un determinado instante y exportación del escenario a un fichero de EPANET.
- Evaluación de posibles acciones de control a ser tomadas de forma inmediata, mediante la previa simulación para ver el impacto que puede tener dicha acción sobre los demás elementos de la red.
- Reproducción de escenarios pasados que sucedieron en la red, permitiendo a los operadores analizar en detalle la secuencia de sucesos durante una determinada incidencia.
- Alteración de los datos reales sucedidos en escenarios pasados, permitiendo al operador simular acciones de control sobre escenarios que ocurrieron en el pasado. Esta funcionalidad puede ser útil para el entrenamiento de operadores o para encontrar una mejor respuesta ante situaciones similares en el futuro.
- Planificar mejor las acciones a tomar para un futuro próximo (24 horas o más), mediante la estimación de la demanda y la aplicación de leyes de control basadas en modos de operación anteriores.
- Exportación completa del fichero de EPANET, para reproducir cualquiera de los escenarios anteriores, o para hacer cambios no factibles en operaciones de control.

El diagrama de estados de la Fig. A4.2 muestra todas las opciones de control posibles que se pueden realizar. Hasta el momento este módulo no lleva integrado un modelo de previsión de demanda ni un modelo de optimización para las operaciones de control. La integración de los modelos planteados en la presente tesis constituirán un avance importante en las prestaciones de este módulo.

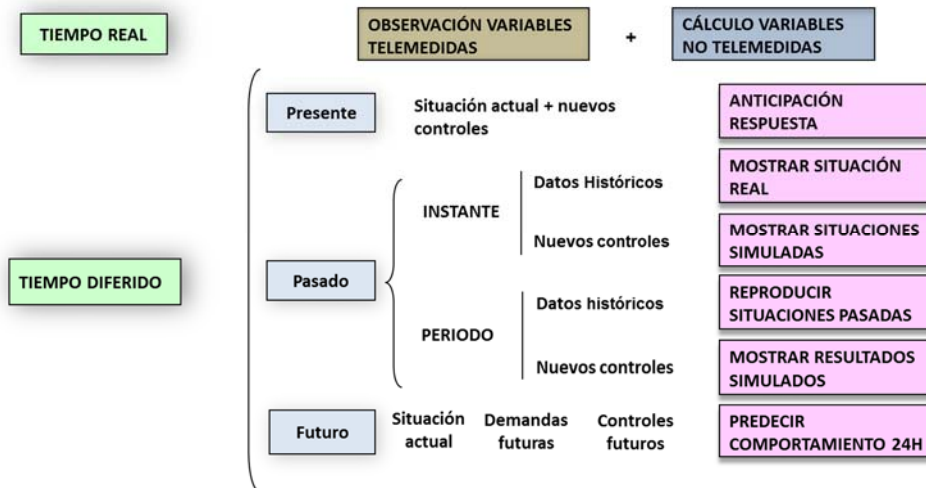


Figura. A4.2. Diagrama de estados de los modos de operación del módulo SCA-Red MS.

Todo el conjunto de estados que se muestran en la Fig. A4.2 pueden llevarse a cabo desde la interfaz de usuario de la que dispone este módulo compuesto por paneles sinópticos generales que representan los distintos sectores en los que esta distribuida la red de abastecimiento de agua. Los paneles sinópticos disponen de zonas sensibles al ratón desde las cuales se pueden acceder a paneles sinópticos de más detalle correspondientes a las estaciones remotas.

Desde la barra de herramientas ubicada en la parte inferior de los paneles sinópticos principales se pueden gestionar todo el conjunto de estados que aparecen en la Fig. A4.2 y que a continuación pasamos a describir:

- *Tiempo Real: ON/OFF.* Mientras está ON, el sinóptico esta sincronizado con las medidas de campo leyendolas directamente desde el PLC o desde el propio SCADA via OPC (OPC Foundation, 2001) y actualizándose cada 10 segundos. A su vez, en cada tiempo de refresco, el modelo hidráulico es actualizado con las condiciones de contorno de la red (demandas, niveles de depósitos y consignas de bombas y válvulas) y los resultados se muestran también en los sinópticos, incluyendo los puntos no telemedidos. También se calculan el balance de caudales de los sectores en tiempo real.

Cuando está en OFF, la monitorización en tiempo real se detiene, mientras que las opciones de tiempo y modos de operación se activan, permitiendo al operador realizar maniobras simuladas para la situación actual (Fig.A4.3).

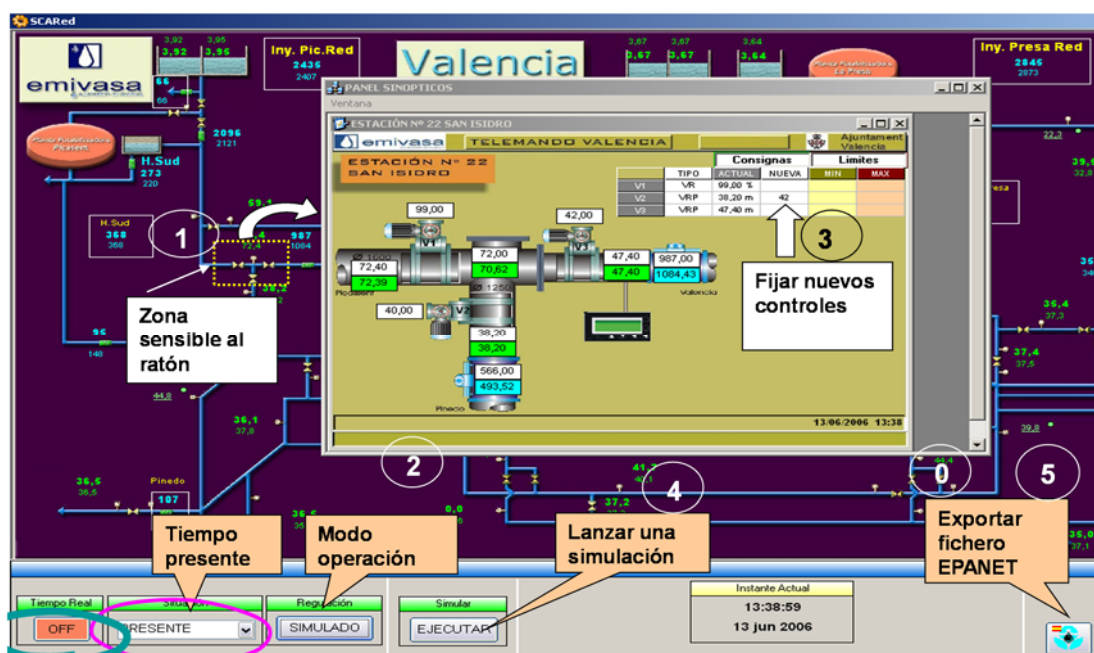


Figura. A4.3. Simulación en tiempo real.

- *Tiempo diferido y modos de operación.* Cuando el modo tiempo real está en OFF, varias opciones posibles se le ofrece al operador, como las opciones de selección de consulta de datos pasados, simulaciones futuras y modos de operación de maniobras simuladas.

En el modo *Tiempo diferido*, tanto en *Tiempo Real* en *OFF* como en la consulta de datos históricos (Fig. A4.4), seleccionando un modo de operación simulado, al operador se le permite seleccionar un elemento hidráulico (válvula o bomba) desde los sinópticos principales y acceder a la estación remota donde está ubicado ese elemento. Desde ahí, el operador podrá definir nuevas consignas para ver el efecto de su aplicación en el estado global de la red de distribución (Fig. A4.3). Una vez definidas las consignas que se desea simular, el paso siguiente es ejecutarlas sobre el modelo hidráulico. Finalmente el resultado del modelo se podrá comparar con los datos de campo desde los distintos sinópticos, tanto los principales como los correspondientes a las estaciones remotas.

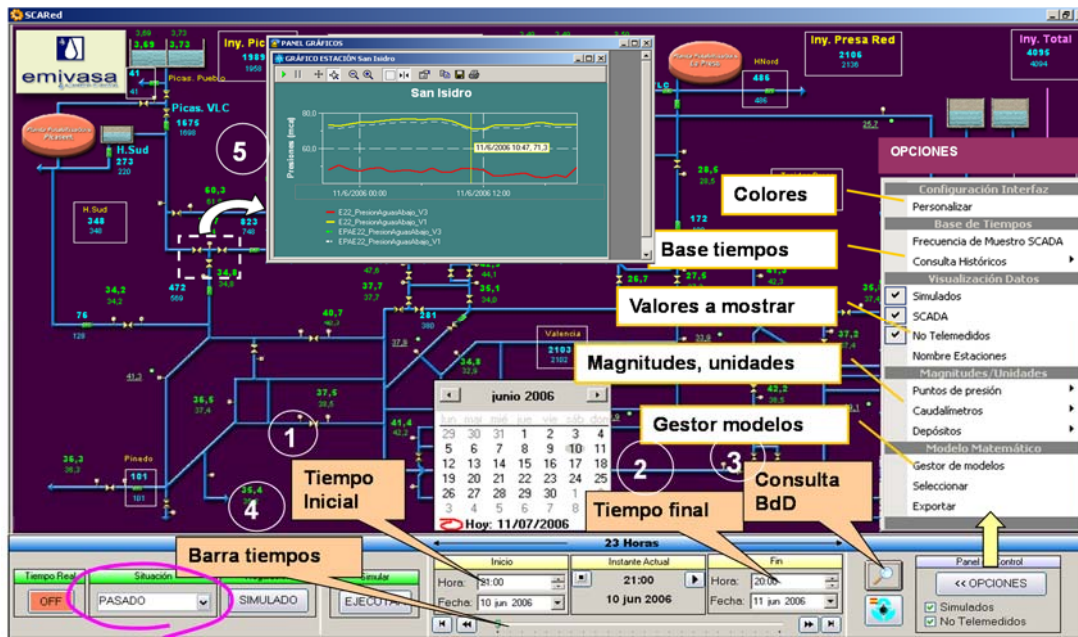


Figura. A4.4. Simulación de situaciones pasadas.

- *Tiempo Futuro y modos de operación:* Cuando el usuario selecciona *Tiempo Futuro* se fija la operación a modo simulado (Fig. A4.5). Por defecto, el periodo de simulación son las 24 horas posteriores al instante actual. Para llevar a cabo una previsión de la demanda y un control óptimo de la operación se requeriría la implementación de un modelo de previsión de demanda y un optimizador de las consignas de control que definiesen todos los parámetros necesarios para llevar a cabo la simulación. Sin embargo, en este momento, SCA-Red no integra ninguno de ambos modelos, como alternativa se toman valores de periodos similares.

Procediendo de esta forma también es posible realizar simulaciones futuras a largo plazo, por ejemplo, simular intervenciones durante el fin de semana en dos meses. Para simulaciones futuras a corto plazo (24 horas, 48 horas) las demandas y las reglas de control se toman como referencia de un día similar de la última semana, mientras que los niveles actuales de los depósitos se toman como punto de partida. Para simulaciones futuras a largo plazo se adopta el mismo criterio como referencia, pero los valores seleccionados para las demandas, las consignas y los niveles iniciales son de un día de referencia similar pero del último año. En ningún caso, el usuario puede escoger otro día como referencia.

Una vez las consignas básicas son definidas, el procedimiento para establecer nuevas consignas y exportar el fichero de EPANET (Fig. A4.6) si es necesario, es similar a los procedimientos que se han descritos en los párrafos anteriores.

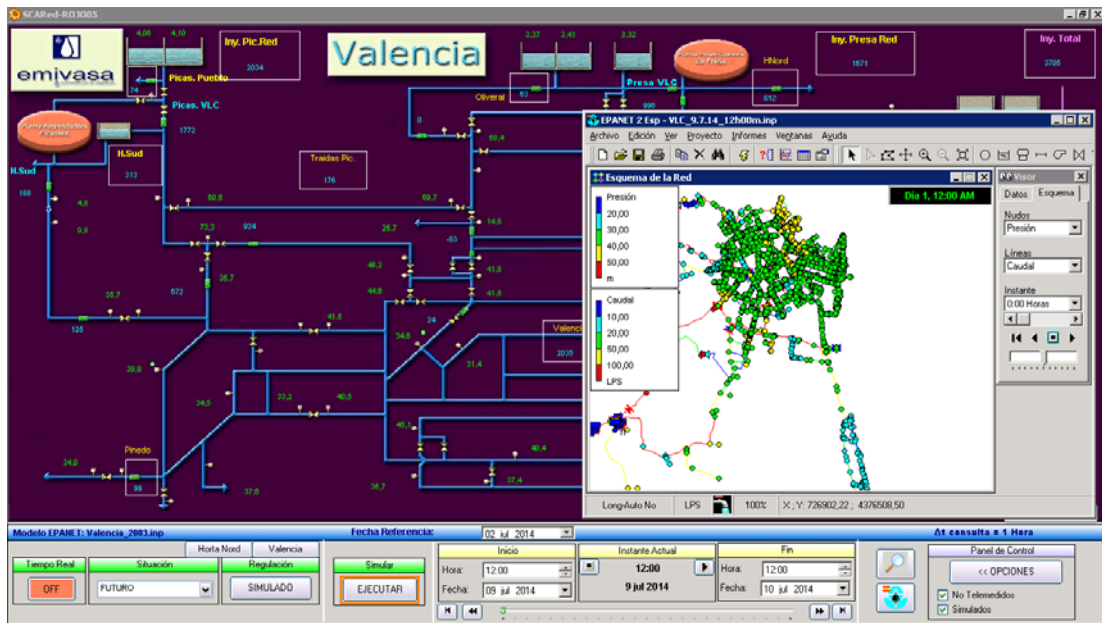


Figura. A4.5. Simulación de situaciones futuras (corto plazo – próximas 24 horas).

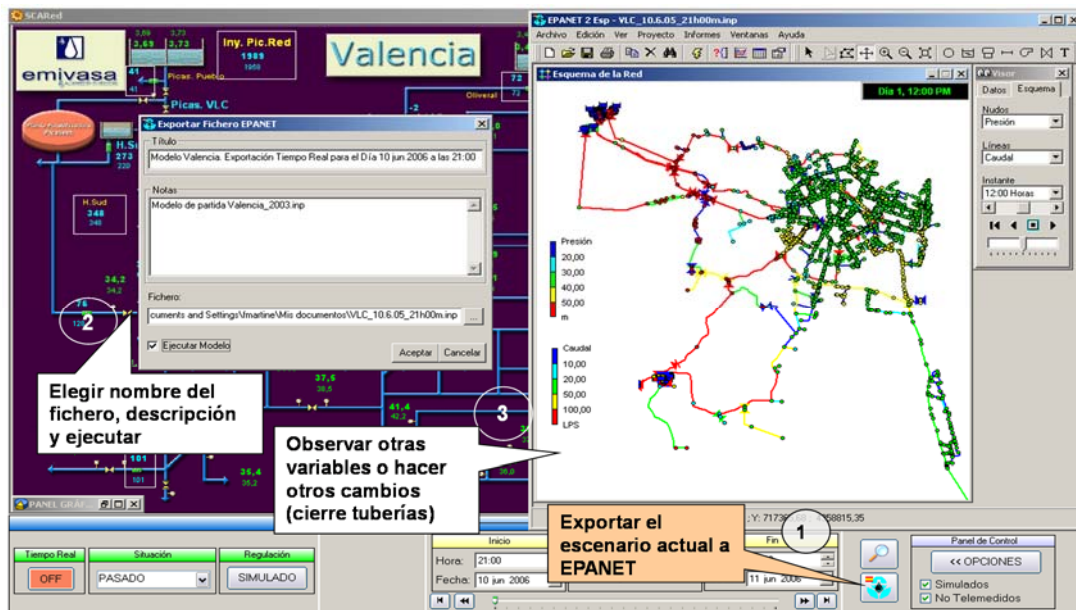


Figura. A4.6. Exportación del modelo matemático correspondiente a los datos de consulta.

Además de los estados de simulación anteriormente descritos, SCA-Red MS permite visualizar tanto en tiempo real como en tiempo diferido el balance de sectores hidrométricos definidos para cada uno de los sistemas y subsistemas de la red de agua, bien en formato alfanumérico (valor – porcentaje, Fig. A4.7) o bien en formato gráfico (grafico de tarta o de líneas, Fig. A4.8 y A4.9 respectivamente).

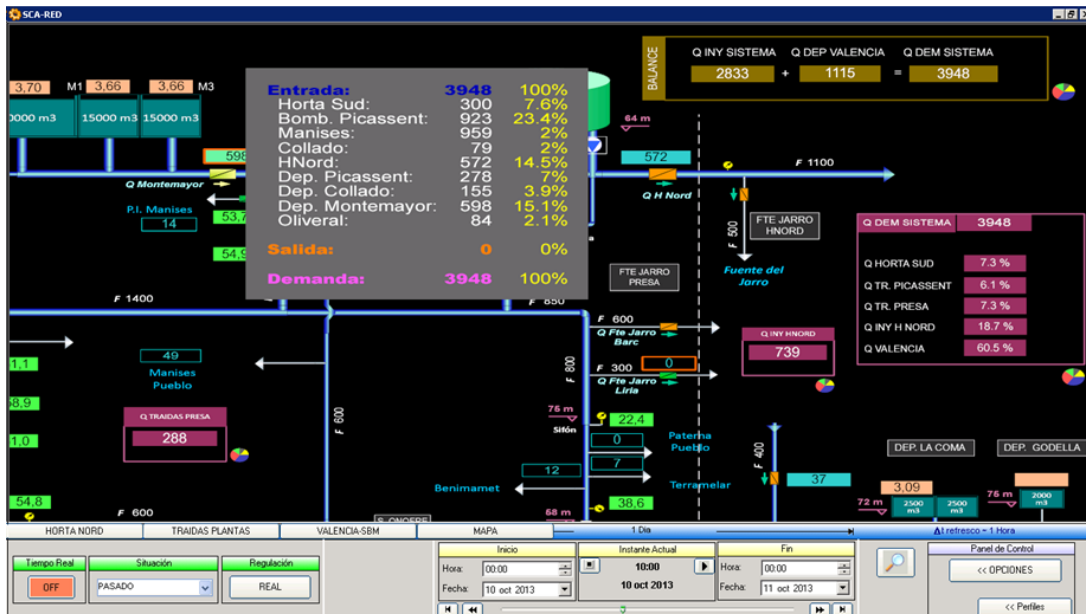


Figura. A4.7. Balance hidrométrico correspondiente a un subsistema.

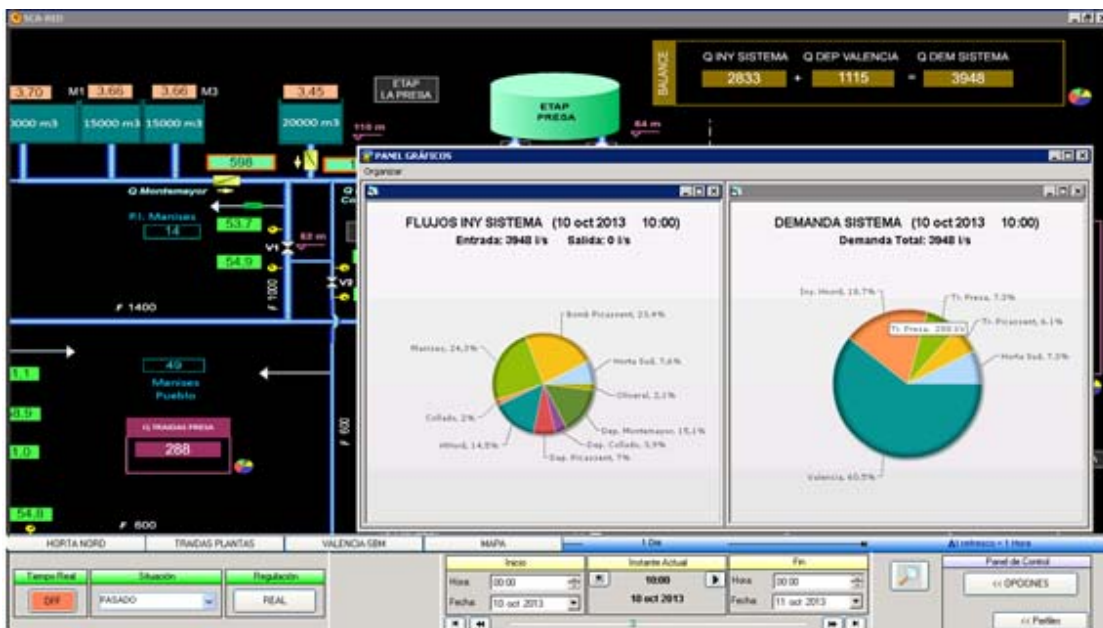


Figura. A4.8. Gráfico comparativo (tarta) de la Inyección total del sistema vs Demanda del sistema.

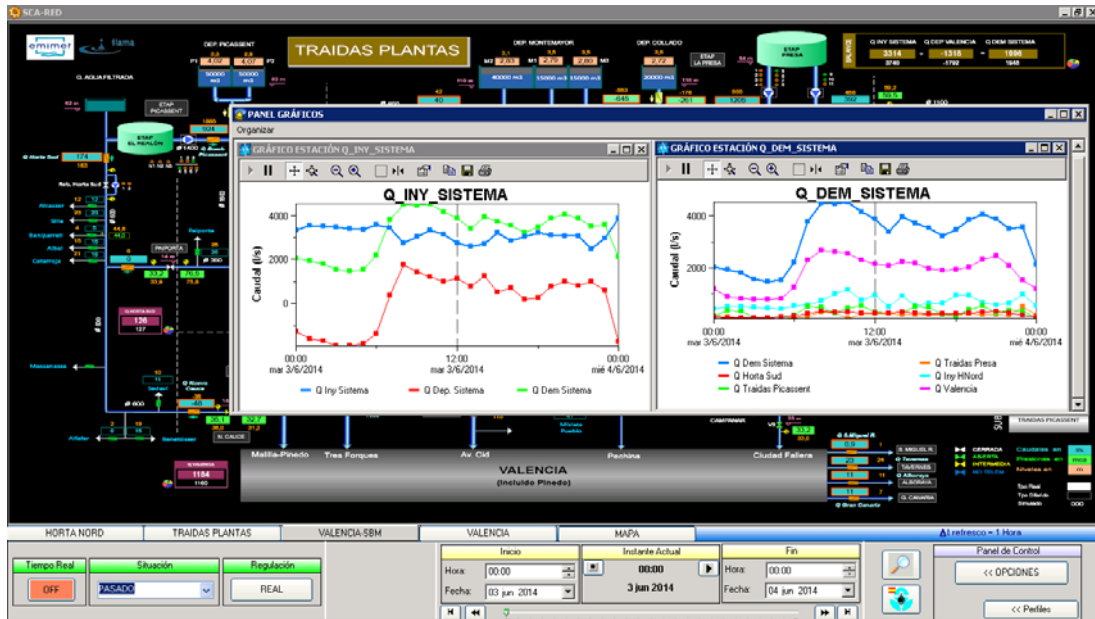


Figura. A4.9. Gráfico comparativo (líneas) de la Inyección total del sistema vs Demanda total del sistema.

También es posible visualizar los puntos de medida gestionados por cada estación remota a través de un fondo geográfico (Google Maps) con la ventaja de tener éstos geolocalizados (Fig. A4.10).

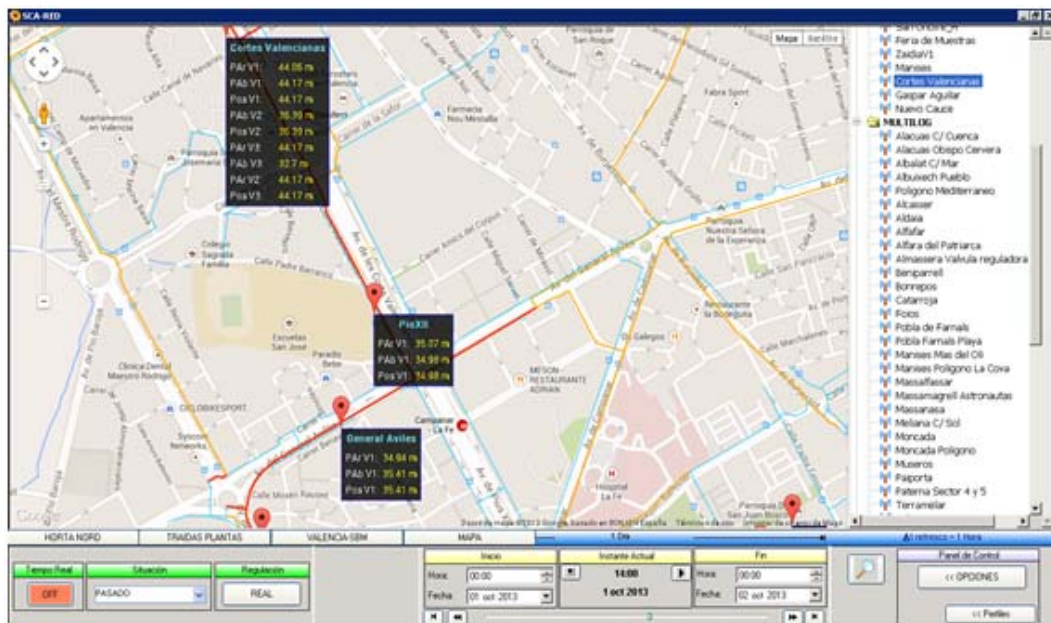


Figura. A4.10. Ubicación de las estaciones remotas y visualización de datos de puntos de medida.

A4.2 Módulo SCA-Red AD

El módulo SCA-Red AD tiene como objetivo permitir al usuario realizar consultas gráficas de las señales, mediante la selección de una serie de parámetros, principalmente de tiempo, y combinarlas para su rápida interpretación a la hora de tomar determinadas decisiones que mejoren el régimen de funcionamiento del abastecimiento.

A continuación se enumeran las funcionalidades más destacables que permite realizar dicho módulo:

- Sistema de navegación a través de pestañas que contienen las gráficas de las distintas series de datos consultadas a lo largo de una sesión.

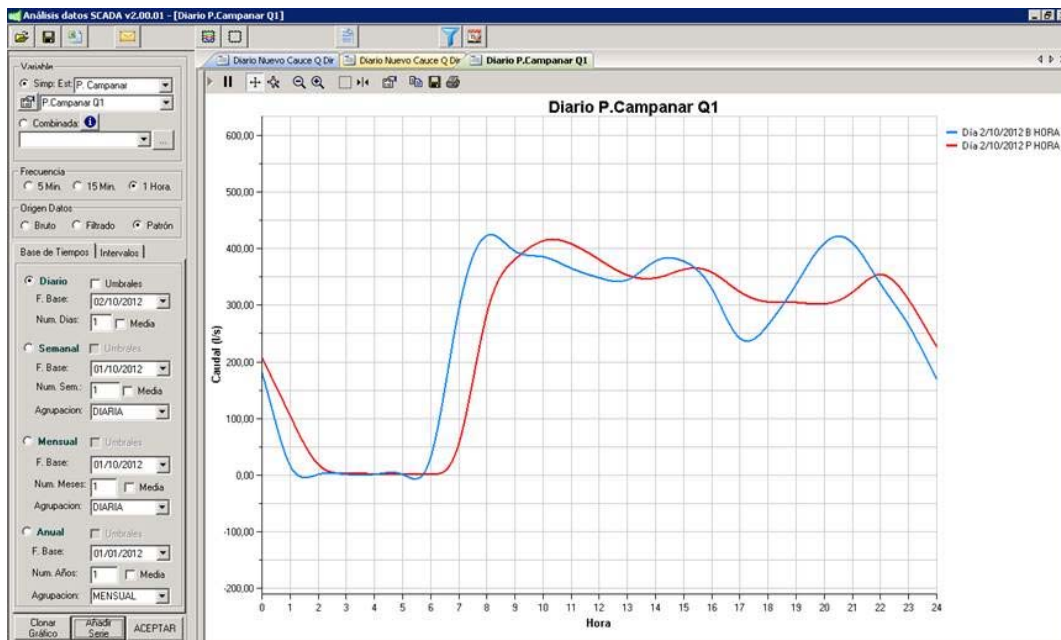


Figura. A4.11. Sistema de navegación del módulo SCA-Red AD.

- Calculadora para la declaración y gestión de variables combinadas.

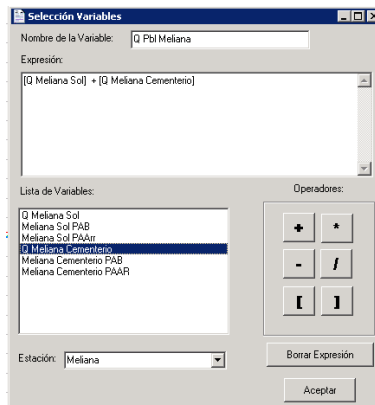


Figura. A4.12. Declaración de una variable combinada.

- Representación gráfica de variables o combinación de ellas a intervalos de tiempo de 5 min, 15 min y 1 hora, de los datos brutos y filtrados.

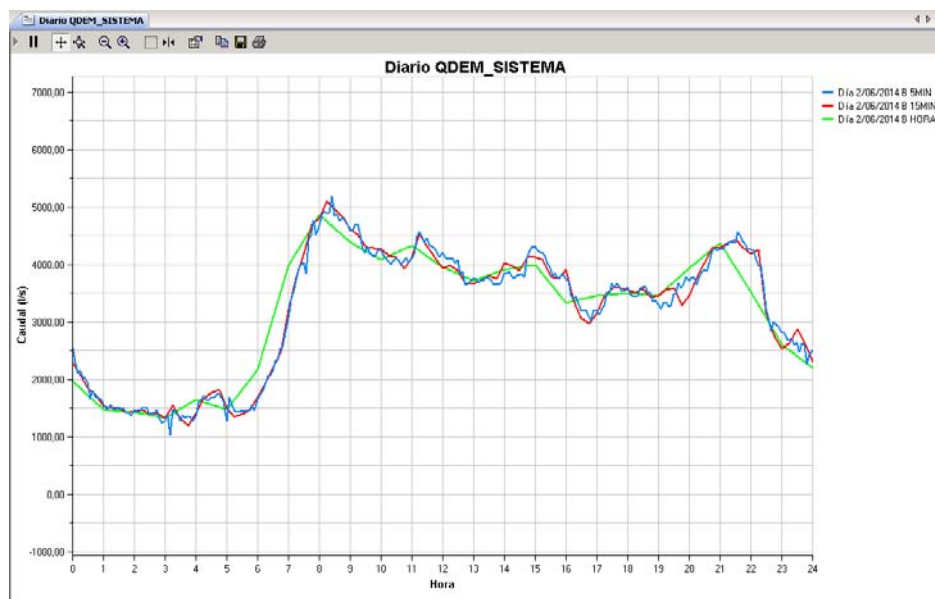
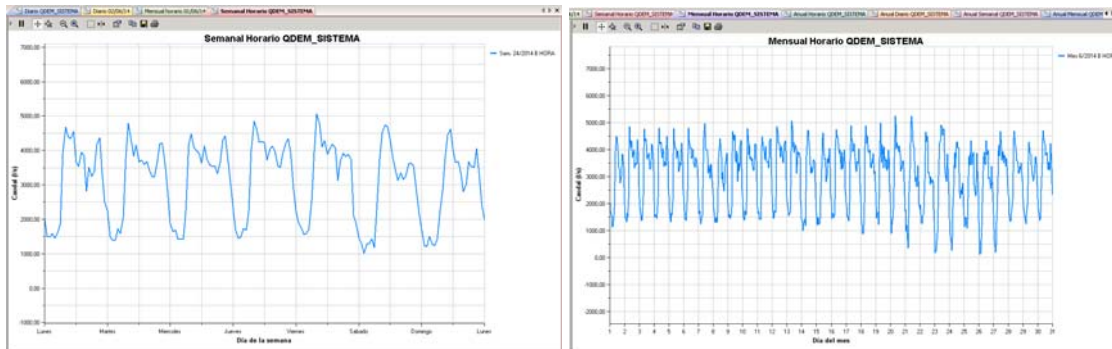


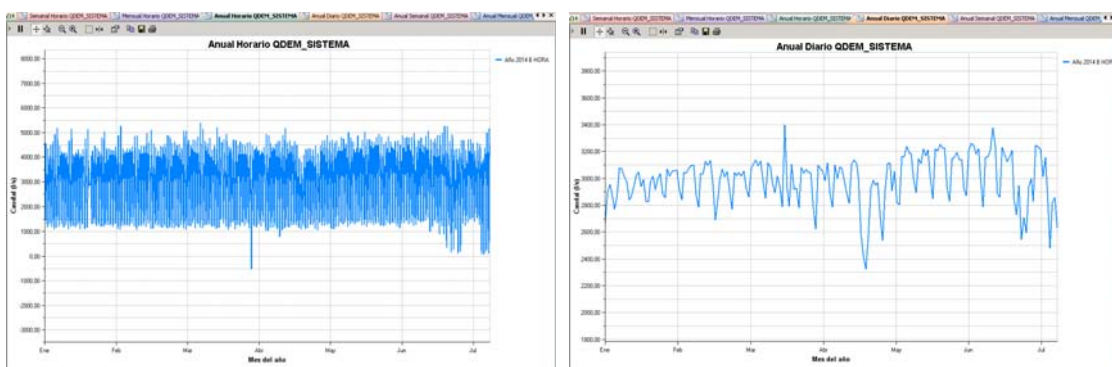
Figura. A4.13. Representación de una variable combinada a intervalos de 5 min., 15min., 1h.

- Representación gráfica superpuesta de una o más variables, o combinaciones de ellas.
- Representación gráfica para distintos intervalos temporales (Fig. A4.14): semanal (con agrupación diaria o horaria), mensual (con agrupación diaria o horaria) y anual (con agrupación diaria y horaria, mensual o semanal).



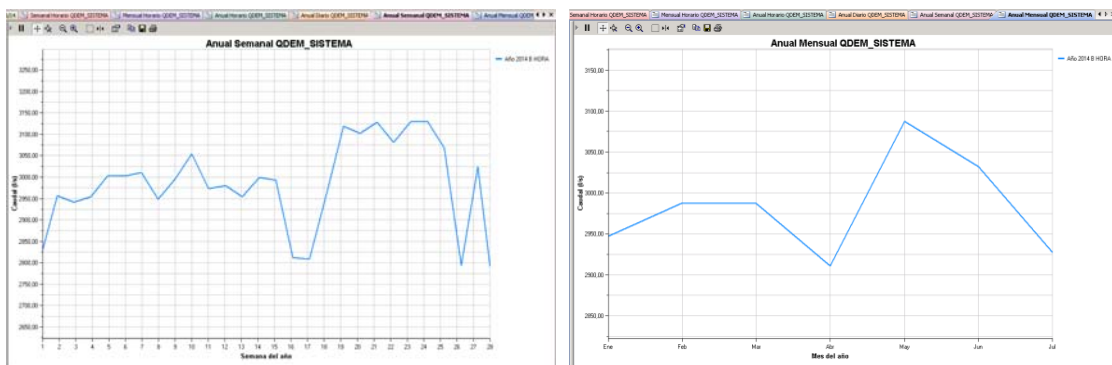
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

Figura. A4.14. Representación gráfica de una señal combinada con diversas bases de tiempo: (a) semanal, (b) horaria, (b) mensual horaria, y anual con agrupación (c) horaria, (d) diaria, (e) semanal, (f) mensual.

- Visualización de curvas patrón y comparación con los datos brutos de una variable combinada.

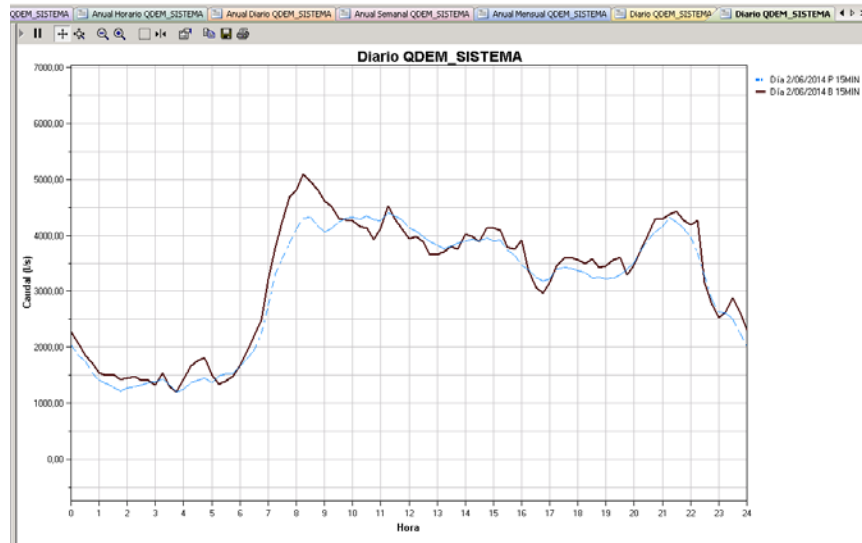


Figura. A4.15. Gráfico comparativo de la serie horaria (marron) con la curva patrón (azul).

- Visualización de valores umbrales para una señal seleccionada, a efectos de detección de anomalías (Fig. A4.16). Se pueden definir hasta cuatro niveles de umbral (HH, HL, LL, LH) y para cada umbral hasta 24 valores posibles, uno por cada hora del día.

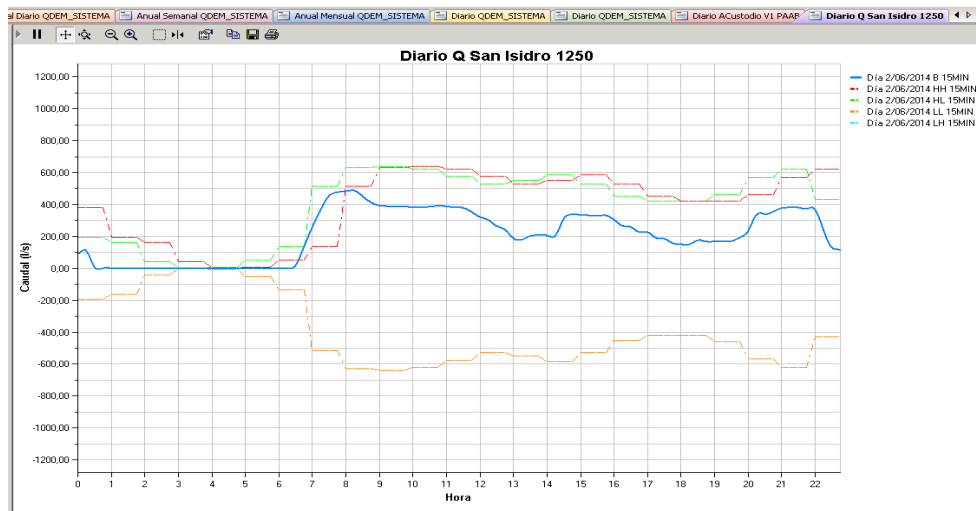


Figura. A4.16. Representación gráfica de umbrales para una señal.

- Solapamiento de señales de distinta magnitud en representación multi-eje.

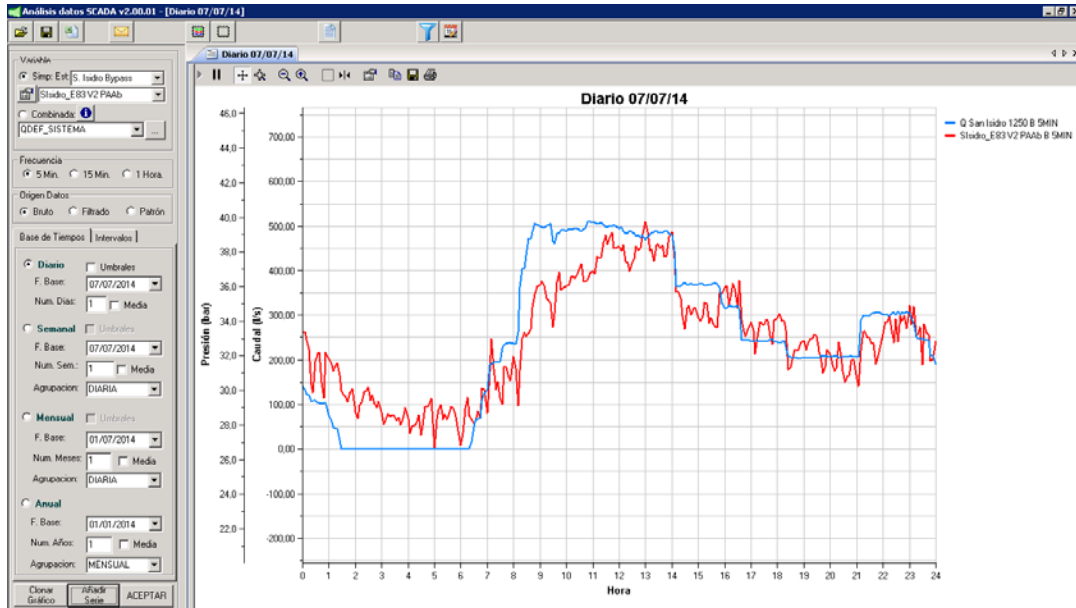


Figura. A4.17. Representación comparativa de caudal/presión.

- Representación en un mismo gráfico del comportamiento de una variable en intervalos temporales diferentes e igual frecuencia.

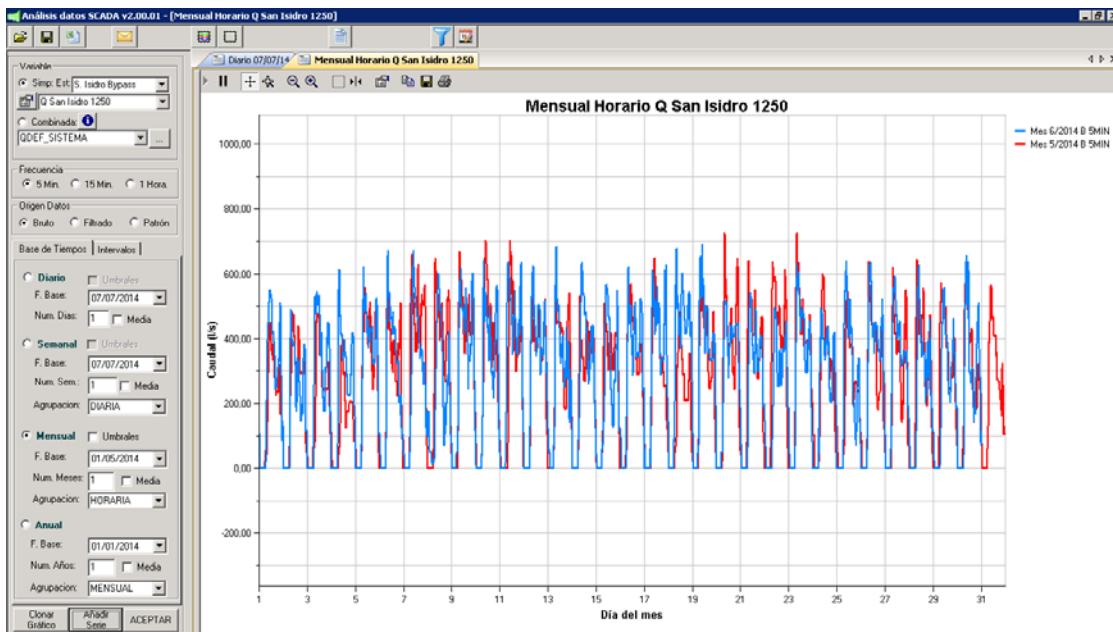


Figura. A4.18. Representación gráfica para una señal de caudal para los meses de Mayo y Junio de 2014.

- Almacenamiento y publicación de las distintas configuraciones de consulta realizadas a nivel de usuario, para su posterior recuperación en diferentes sesiones de ejecución del módulo.

A4.3 Módulo SCA-Red RPT

La plataforma SCA-Red dispone en la actualidad de una nueva extensión derivada del módulo de análisis de datos. Mediante el módulo SCA-Red RPT es posible realizar consultas de los datos históricos y presentarlas en formato de informe. Inicialmente los informes son generados en formato EXCEL, y posteriormente pueden ser exportados a documentos WORD o PDF.

Dentro de este módulo se pueden realizar informes de detalle de las señales declaradas en SCA-Red (simples o combinadas) o bien se pueden realizar informes de balances volumétricos en distintas agrupaciones temporales. En la Fig. A4.19 se muestra el formato del tipo de informe que puede obtenerse a través de este módulo.

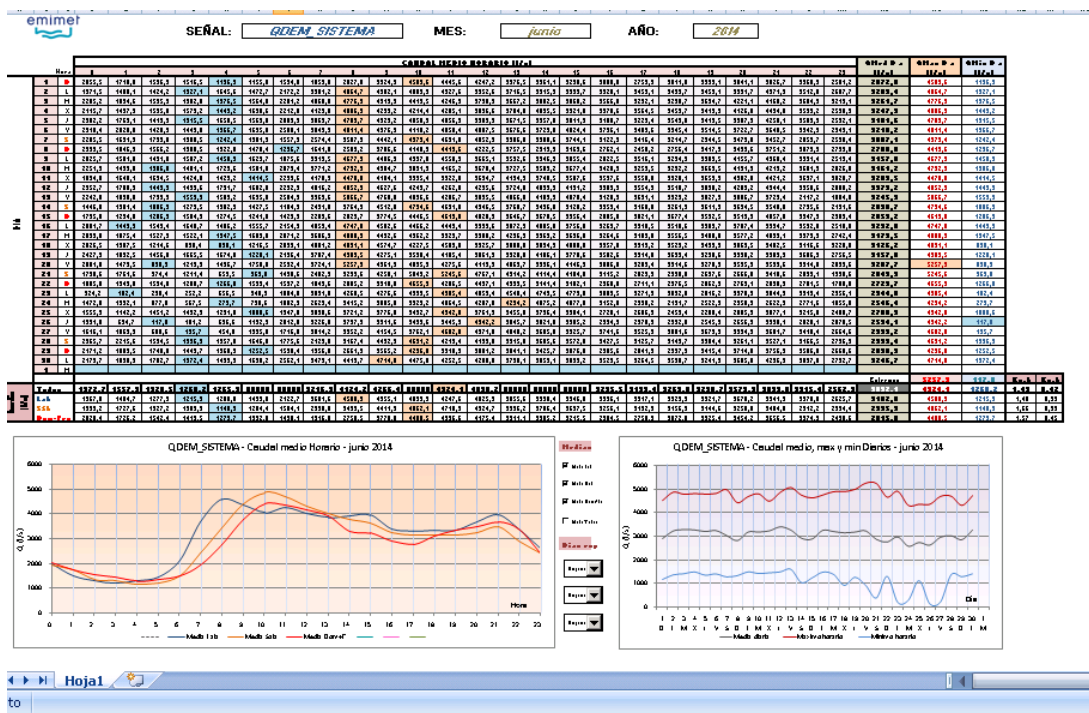
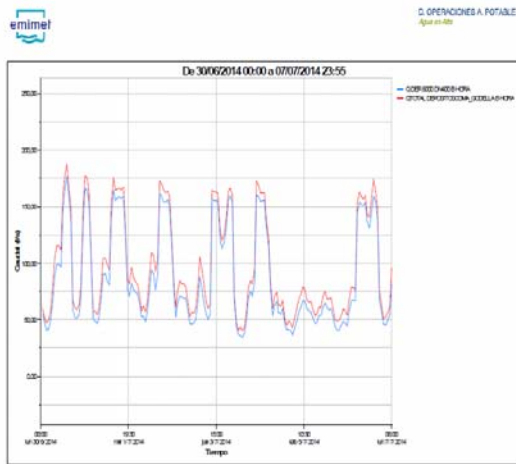


Figura. A4.19. Informe para una señal combinada.

A4.4 Módulo SCA-Red SVC

Este módulo permite mantener en constante actualización los datos en tiempo real y los datos históricos generados por el sistema de control. Asimismo se pueden programar tareas automatizadas para que diariamente se envíen notificaciones a determinados usuarios de las incidencias ocurridas en determinadas señales, en formato alfanumérico (Fig. A4.20b) o bien en formato de serie gráfica (Fig. A4.20a).



(a)

Señal	Fecha	Sincrold.	SCED	Procedencia
Albatat dels Sorells Valencia	Q12/06/2014 00:00	13057	MULTILOG	
Albatat dels Sorells Valencia PAB	12/06/2014 00:00	13068	MULTILOG	
Albatat dels Sorells Valencia PAArr	12/06/2014 00:00	13079	MULTILOG	
Alboraya Les Tendes	Q30/06/2014 18:00	13193	MULTILOG	
Alboraya Les Tendes PAArr	30/06/2014 18:00	13215	MULTILOG	
Albuixech Pueblo	Q04/07/2014 21:00	13261	MULTILOG	
Albuixech Pueblo PAB	04/07/2014 21:00	13272	MULTILOG	
Albuixech Pueblo PAArr	04/07/2014 21:00	13283	MULTILOG	
Aldaia Blasco_Ibañez	Q03/07/2014 14:00	10422	MULTILOG	
Aldaia Blasco_Ibañez PAB	03/07/2014 14:00	10433	MULTILOG	
Aldaia Blasco_Ibañez PAArr	03/07/2014 14:00	10444	MULTILOG	
Alfafar Pueblo	Q30/06/2014 03:00	13295	MULTILOG	
Alfafar Pueblo PAB	30/06/2014 03:00	13306	MULTILOG	
Alfafar Pueblo PAArr	30/06/2014 03:00	13317	MULTILOG	
Almassera Pueblo	Q30/06/2014 14:00	14077	MULTILOG	
Almassera Pueblo PAB	30/06/2014 14:00	14088	MULTILOG	
Almassera Pueblo PAArr	30/06/2014 14:00	14099	MULTILOG	
Pobla de Farnals Pueblo	Q04/07/2014 12:00	13771	MULTILOG	
Pobla de Farnals Pueblo PAB	04/07/2014 12:00	13782	MULTILOG	
Pobla de Farnals Pueblo PAArr	04/07/2014 12:00	13793	MULTILOG	
Paterna Sector 4_5	Q01/07/2014 09:59	14519	MULTILOG	
Paterna Sector 4_5 PAB	01/07/2014 09:59	14530	MULTILOG	
Paterna Sector 4_5 PAArr	01/07/2014 09:59	14541	MULTILOG	
Picassent Barrio_San_Ramon	Q02/07/2014 12:00	10830	MULTILOG	
Picassent Barrio_San_Ramon PAB	02/07/2014 12:00	10841	MULTILOG	
Picassent Barrio_San_Ramon PAArr	02/07/2014 12:00	10852	MULTILOG	
Picassent Picassent_Pueblo	Q30/06/2014 06:00	10864	MULTILOG	
Picassent Picassent Pueblo PAB	30/06/2014 06:00	10875	MULTILOG	

(b)

Figura. A4.20. Informes de tareas programadas: (a) documento, (b) datos alfanuméricos.

