Detecció i identificació de falles en una xarxa de distribució d'aigües

Toni Escobet i Angela Nebot
Dept. ESAII (UPC) Dept. LSI (UPC)

Índex

1. Objectiu del treball

L'objectiu d'aquest treball és detectar les falles o els canvis de l'estructura que es produeixen en una xarxa de distribució d'aigües mitjançant l'ús del FIRFMS. FIR va ser utilitzat per primera vegada com una metodologia de Fault Monitoring System per [Albornoz, 1996]. Des de llavors, s'han millorat considerablement les fases de detecció i identificació de falles amb la incorporació de les tècniques de l'envoltat (enveloping) i la mesura d'acceptabilitat (acceptability measure). Aquestes millores s'expliquen en detall a [Escobet et al., 1999a; 1999b]. L'objectiu principal d'aquest treball és, doncs, estudiar el comportament del nou FIRFMS per a la detecció i identificació de falles en la xarxa de distribució d'aigües que es presentarà més endavant.

Aquest document no només pretén mostrar els resultats obtinguts sinó que inclou totes les proves realitzades per tal de poder fer un seguiment exhaustiu de tal manera que quedi constància de tot el procés de desenvolupament.

L'article està dividit en quatre parts:

- Simulació de la xarxa d'aigües, en el que es descriu la xarxa utilitzada i el simulador que s'ha fet servir.
- Modelització de la xarxa, on es detallen els passos que s'han seguit per tal d'aconseguir un bon model de la xarxa amb FIR.
- Detecció de la falla o del canvi de l'estructura de la xarxa. En aquest apartat és on es mostren els resultats aconseguits.
- Conclusions.

Finalment en els annexes s'inclou el codi dels programes de simulació fets amb EPANETES de la xarxa d'aigües en un estat de funcionament normal i reproduint diferents falles del sistema, a més del codi de FIRFMS per a detectar i identificar les falles.

2. Sistema de distribució d'aigües

2.1. Descripció de la xarxa d'aigües

La xarxa d'aigües proposada per aquest treball és força reduïda doncs com s'ha comentat anteriorment l'objectiu és estudiar el comportament del nou FIRFMS. Per aquest motiu no ens interessa que el número de variables del sistema sigui excessivament elevat doncs volem que es pugui fer l'anàlisi d'una manera ràpida.

La xarxa simplificada es mostra a la figura 1 i està constituïda per 5 nusos (10, 11, 12, 21 i 22) que representen els punts on hi ha demandes d'aigua. La xarxa ha de ser capaç de subministrar les demandes d'aquests nusos. Per tal de fer-ho, la xarxa disposa d'un dipòsit (D2) i d'una font inesgotable (D1). Aquesta última està per sota del nivell de la xarxa. Per poder extreure l'aigua del dipòsit D1 i subministrar-la a la xarxa, s'utilitza una bomba B1 que està controlada pel nivell d'aigua del dipòsit D2.

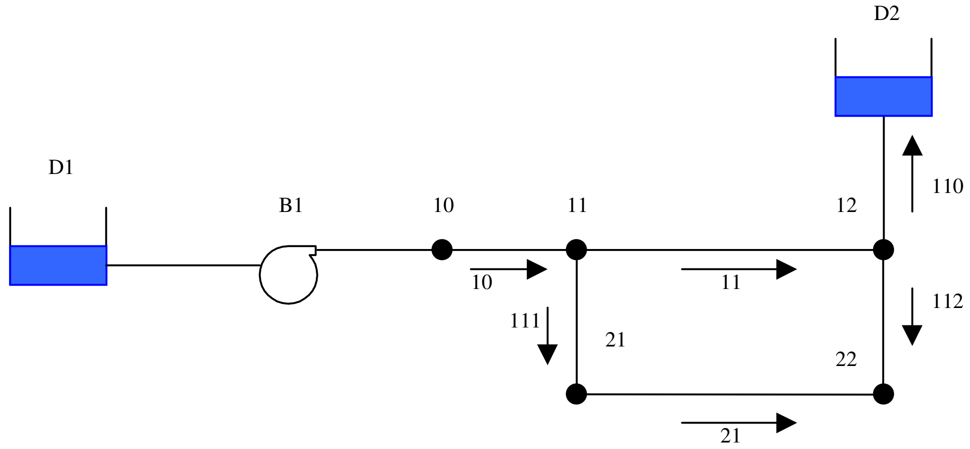

Fig. 1 Xarxa d'aigües

Per la simulació de la xarxa, s'ha considerat que tots els nusos tenen unes demandes concretes i que son periòdiques cada 12 hores.

Una mostra de la demanda en un nus es mostra a la figura 2.

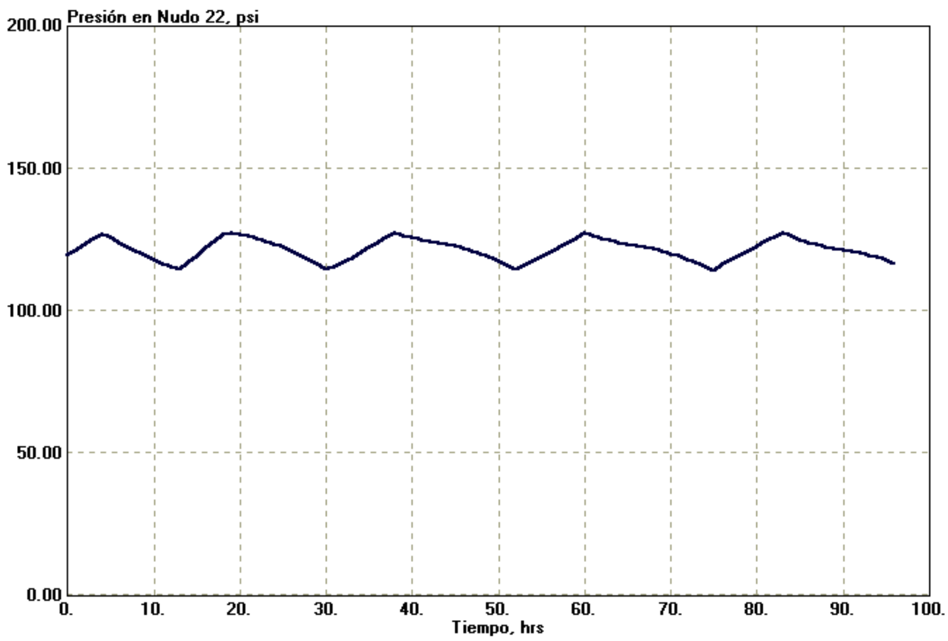

Fig. 2 Pressió de l'aigua al node 22

2.2. Simulació de la xarxa d'aigües

La simulació de la xarxa d'aigües està feta sobre el programa EPANET 1.1e, versió castellana traduïda pel grup de mecànica de fluids de la universitat Politècnica de València [Epanet1.1].

EPANET és un programa que fa una simulació en mode extens del comportament hidràulic i de l'evolució de la qualitat de l'aigua en sistemes de distribució d'aigua potable. Permet seguir, entre altres coses, l'evolució del flux de l'aigua en les canonades, la pressió en els nusos de demanda o el nivell en els dipòsits.

La simulació del sistema està feta durant un temps de 96 hores i s'ha optat per que la pressió del node 22 sigui la sortida del sistema i que tots els altres nodes juntament amb el nivell del dipòsit D2 i el cabal de la bomba B1 siguin les entrades del sistema. El codi del programa de simulació de la xarxa es pot veure a l’annex 1.

3. Modelització de la xarxa d'aigües

Per modelitzar la xarxa d'aigües, s'ha utilitzat la metodologia del raonament inductiu difús (FIR) introduïda per Klir [Klir, 1985], i desenvolupada en els seus inicis per Cellier i els seus estudiants amb el nom de SAPS [Cellier, 1987], que està formada per quatre funcions bàsiques anomenades: *fuzzification* (codificació difusa), *qualitative modeling* (identificació qualitativa), *qualitative simulation* (predicció difusa) i *defuzzification* (regeneració difusa).

El criteri adoptat per aconseguir un bon model de la xarxa d'aigües, és en primer lloc, buscar el model i comparar els resultats aconseguits entre diferents combinacions, tant a nivell de nombre de variables d'entrada, com en la profunditat de la finestra de dades. El més adient per la metodologia utilitzada, és intentar reduir el màxim possible aquests dos paràmetres, ja que tots dos afecten exponencialment al temps de còmput de la modelització.

3.1. Model 1

La primera prova realitzada, consisteix en considerar que les entrades al sistema només son la bomba i el dipòsit 2, i la sortida el node 22. Al saber que la simulació del sistema té una periodicitat de 12 h, donem una profunditat de la màscara de 12 hores. La simulació de la xarxa és de 96 hores, per tant, podem utilitzem les primeres 72 hores per la cerca del model i les darreres 24 h per la verificació i, així poder aconseguir una mesura de la bonança del model.

La màscara òptima obtinguda per aquest primer cas, és:

	D2	B1	P22		
mask =	0	0	0	t-12	
	0	0	0	t-11	
	0	0	0	t-10	
	0	0	0	t-9	
	0	0	0	t-8	
	0	0	0	t-7	**(màscara 1)**
	0	0	0	t-6	
	0	0	0	t-5	
	0	0	0	t-4	
	0	-1	0	t-3	
	0	0	0	t-2	
	0	0	0	t-1	
	-2	0	1	t	

La interpretació de la màscara és que la pressió en el node 22 en un cert instant de temps dependrà del nivell del dipòsit D2 en el mateix instant de temps i del cabal que proporciona la bomba B1 a la xarxa 3 hores abans.

La qualitat d'aquesta màscara és de 0.7489. La qualitat s'obté a partir de l'entropia de Shannon, amb una cerca exhaustiva sobre totes les màscares possibles i ens dóna una idea de la quantitat d'informació que conté la màscara. La que tingui la qualitat màxima és l'escollida com a òptima.

El resultat de la predicció (verificació) feta sobre les últimes 24 hores no utilitzades en la identificació de la màscara, és la que es mostra a la figura 3.

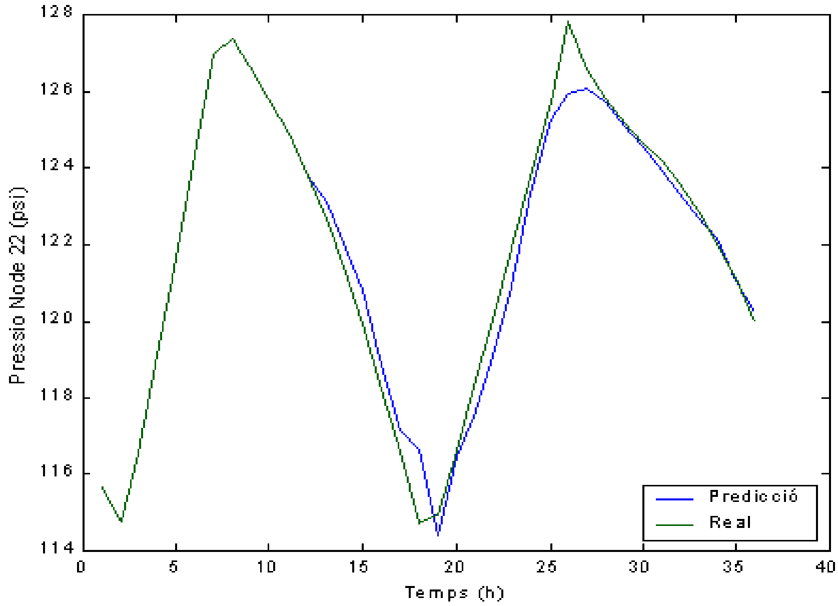

Fig. 3 Predicció del conjunt de test realitzada amb la màscara 1

La mesura utilitzada per poder determinar si un model és millor que un altre és l'error quadràtic mig en percentatge (MSE) sobre tots els punts de verificació. Aquesta mesura es descriu en la equació següent:

$$MSE = \frac{E\left[(y(t)-\hat{y}(t))^2\right]}{y_{\mathrm{var}}} \cdot 100\% \qquad \text{(equació 1)}$$

a on y_{var} representa la variància de $y(t)$. L'error obtingut en les últimes 24 hores (figura 3) és de 2.6531%.

3.2. Model 2

La segona prova plantejada és considerar com a entrades al sistema les pressions de tots els nusos (10, 11, 12 i 21), el cabal de la bomba B1 i el nivell del dipòsit D2, en total 6 entrades, i una sortida, la pressió en el node 22 on la cerca de la màscara pel mètode de provar totes les possibles màscares tarda un parell d'hores i dona com a resultat, la màscara òptima:

%	P10	P11	P12	P21	D2	B1	P22		
mask =	0	0	0	0	0	0	0	t-12	
	0	0	0	0	0	0	0	t-11	
	0	0	0	0	0	0	0	t-10	
	0	0	0	0	0	0	0	t-9	
	0	0	0	0	0	0	0	t-8	
	0	0	0	0	0	0	0	t-7	
	0	0	0	0	0	0	0	t-6	**(màscara 2)**
	0	0	0	0	0	0	0	t-5	
	0	0	0	0	0	0	0	t-4	
	0	0	0	0	0	0	0	t-3	
	0	0	0	0	0	0	0	t-2	
	0	0	0	0	0	0	0	t-1	
	0	0	-1	0	0	-2	1	t	

que depèn de la pressió en el node 12 i de la bomba 1 en el mateix instant de temps. La qualitat d'aquesta màscara és de 0.8099.

La predicció obtinguda per verificar el model (dades del conjunt de test) es mostra en la figura 4

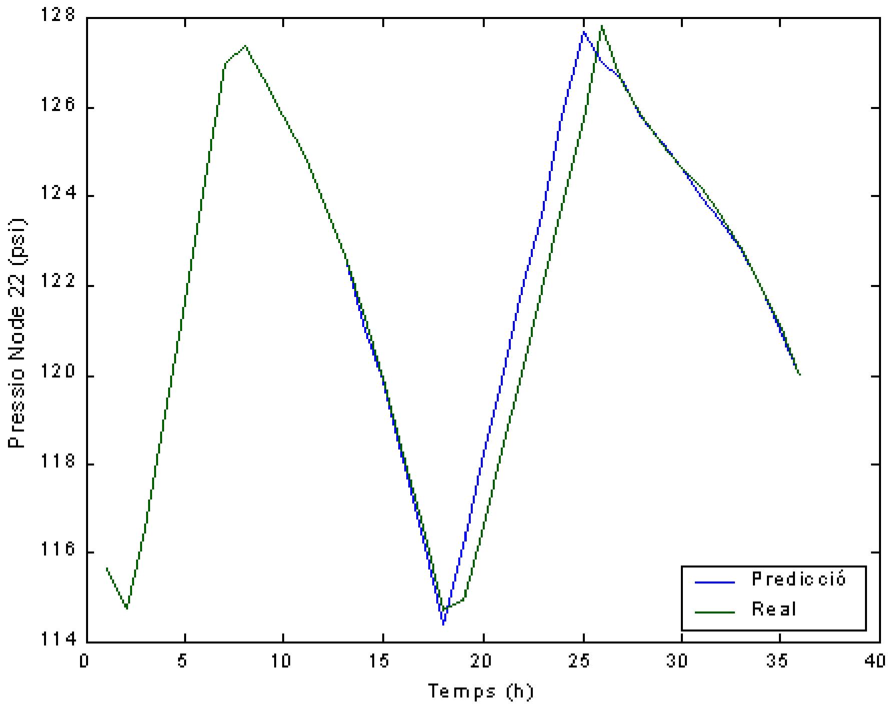

Fig. 4 Predicció del conjunt de test realitzada amb la màscara 2

i s'obté un error quadràtic mig de 4.0435%, força més alt que en la primera prova.

En aquest punt es va decidir estudiar el comportament de les màscares sub-òptimes de més complexitat, que utilitzen més variables d'entrada, trobades en els dos primers apartats (3.1 i 3.2). Aquestes proves es detallen en els apartats 3.3 i 3.4.

3.3. Model 3

La màscara subòptima aconseguida en el model 1 (apartat 3.1) és:

	D2	B1	P22		
mask =	0	0	0	t-12	
	0	0	0	t-11	
	0	0	0	t-10	
	0	0	0	t-9	
	0	-1	0	t-8	
	0	0	0	t-7	**(màscara 3)**
	0	0	0	t-6	
	0	0	0	t-5	
	0	0	0	t-4	
	0	-2	0	t-3	
	0	0	0	t-2	
	0	0	0	t-1	
	-3	0	1	t	

i té una qualitat de 0.5492, molt més petita que la que s'ha aconseguit amb la màscara òptima (0.7489).

El resultat de la simulació amb les dades de la verificació es mostra a la figura 5 a on visualment es pot veure que la predicció del senyal es força dolenta.

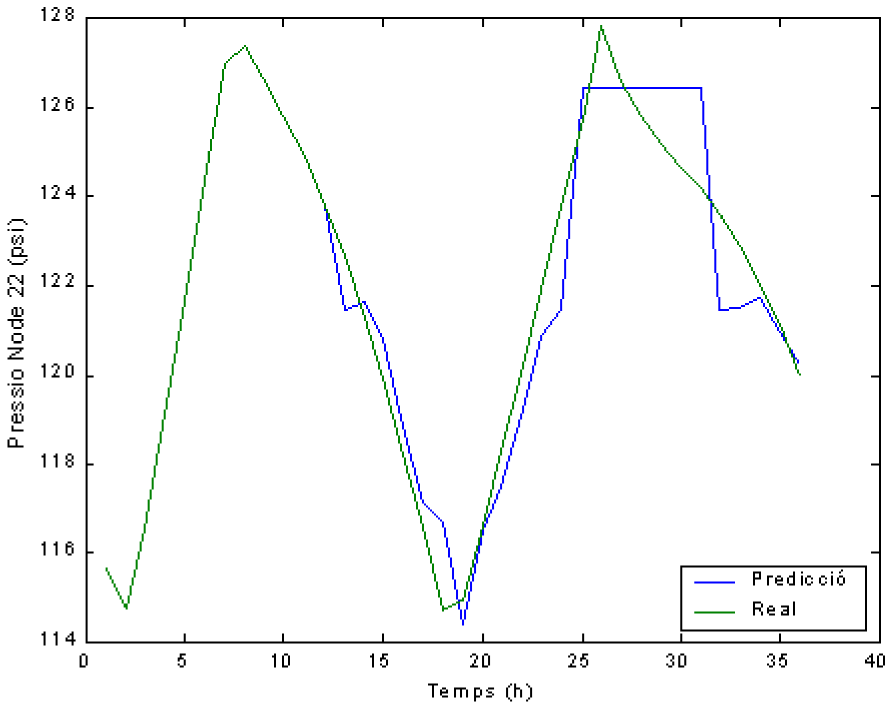

Fig. 5 Predicció del conjunt de test realitzada amb la màscara 3

L'error quadràtic mig és de 6.2112%, que és molt més gran que en el cas anterior (Model1), que era de 2.6531%.

3.4. Model 4

La màscara sub-òptima aconseguida en la cerca del model 2 (apartat 3.2) és:

%	P10	P11	P12	P21	D2	B1	P22	
mask =	0	0	0	0	0	0	0	t-12
	0	0	0	0	0	-1	0	t-11
	0	0	0	0	0	0	0	t-10
	0	0	0	0	0	0	0	t-9
	0	0	0	0	0	0	0	t-8
	0	0	0	0	0	0	0	t-7
	0	0	0	0	0	0	0	t-6
	0	0	0	0	0	0	0	t-5
	0	0	0	0	0	0	0	t-4
	0	0	0	0	0	0	0	t-3
	0	0	0	0	0	0	0	t-2
	0	0	0	0	0	0	0	t-1
	0	0	0	-2	0	-3	1	t

(màscara 4)

on la pressió P22 depèn de la pressió en el node 21 i del cabal de la bomba B1 en el mateix instant de temps, i de B1 onze hores abans. La qualitat d'aquesta màscara és de 0.5609.

Com es pot observar en la figura 6, la predicció obtinguda amb aquesta màscara, és molt més dolenta que en el cas anterior.

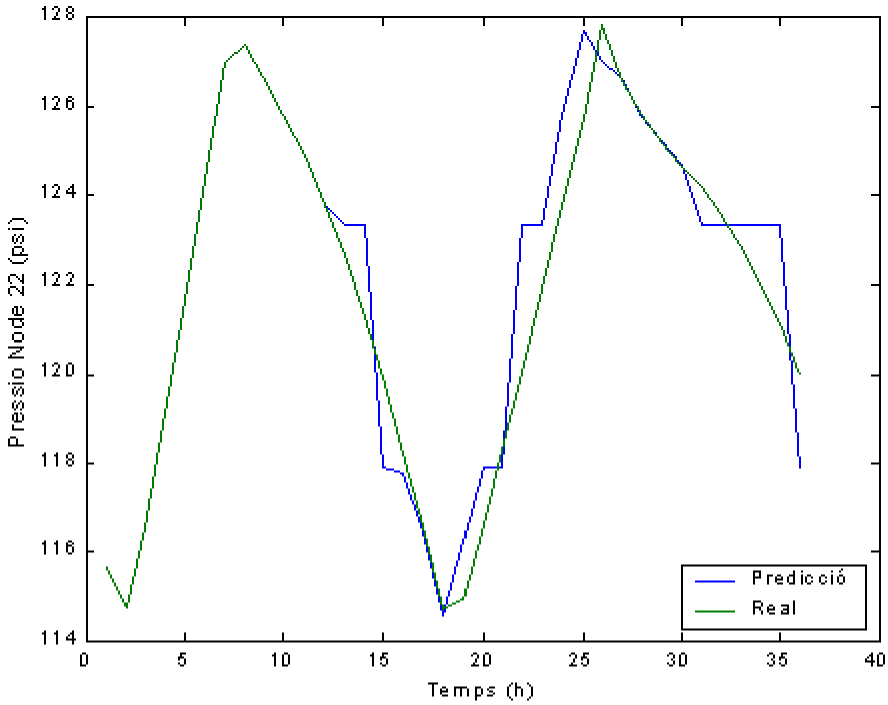

Fig. 6 Predicció del conjunt de test realitzada amb la màscara 4

L'error quadràtic mig és de 8.0207%.

3.5. Model 5

Utilitzant el coneixement que tenim del sistema sabem que l'activació de la bomba B1 està lligada per una norma de control al nivell del dipòsit D2. Aquesta regla de control diu que la bomba s'activarà quan el nivell de l'aigua del dipòsit D2 estigui per sota de 110 ft, i es pararà quan arribi a 140 ft.

Òbviament les dues variables estan directament relacionades i es pot considerar que proporcionen informació redundant, és a dir, que una de les dues és una variable irrellevant i la podem eliminar. En aquest cas, busquem el model sense la variable d'entrada de la bomba. Al mateix temps intentem reduir la profunditat de la màscara per tal d'escurçar el temps de càlcul, tenint en compte que la majoria de dependències temporals obtingudes en les anteriors màscares es troben en les darreres tres files, és a dir que la sortida en l'instant actual depèn majoritàriament dels valors de certes variables del sistema com a màxim 3 hores abans.

La nova màscara òptima és:

%	P10	P11	P12	P21	D2	P22		
Mask =	0	0	0	0	0	0	t-5	
	0	0	0	0	0	0	t-4	
	0	0	0	0	0	0	t-3	
	0	0	0	0	0	0	t-2	**(màscara 5)**
	0	0	0	0	0	0	t-1	
	0	0	0	-1	0	1	t	

de complexitat 2 (només una variable d'entrada i una de sortida) i té una qualitat de 0.7596. El resultat de la predicció sobre el conjunt de test es mostra a la figura 7 i té un error quadràtic mig de 4.4833%.

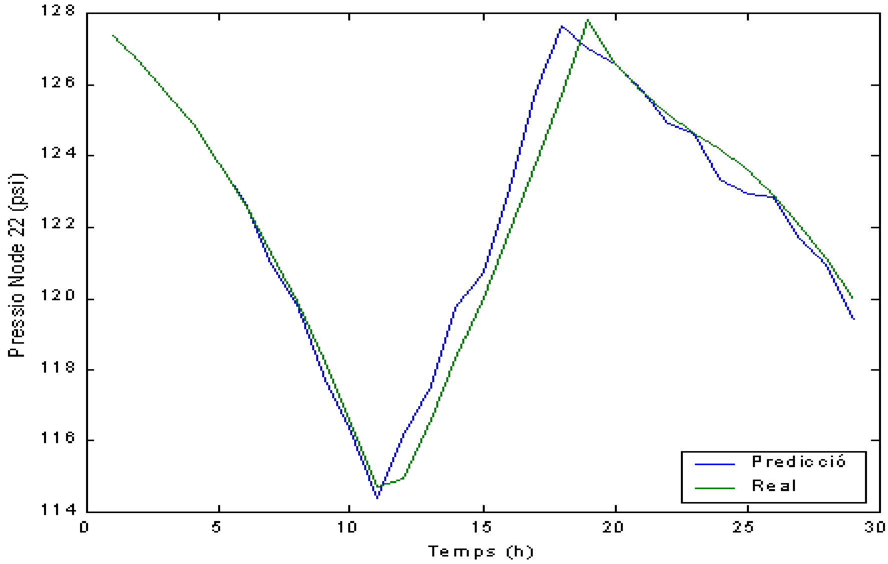

Fig. 7 Predicció del conjunt de test realitzada amb la màscara 5

Fem la mateixa prova, però utilitzant la màscara sub-òptima de complexitat 3, que és:

	P10	P11	P12	P21	D2	P22	
mask =	0	0	0	0	-1	0	
	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	**(màscara 6)**
	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	
	0	0	-2	0	0	1	

amb una qualitat de 0.7512, que té un valor molt proper a la qualitat de la màscara òptima. El resultat de la predicció es pot veure a la figura 8 i té un error quadràtic mig de 0.5756%.

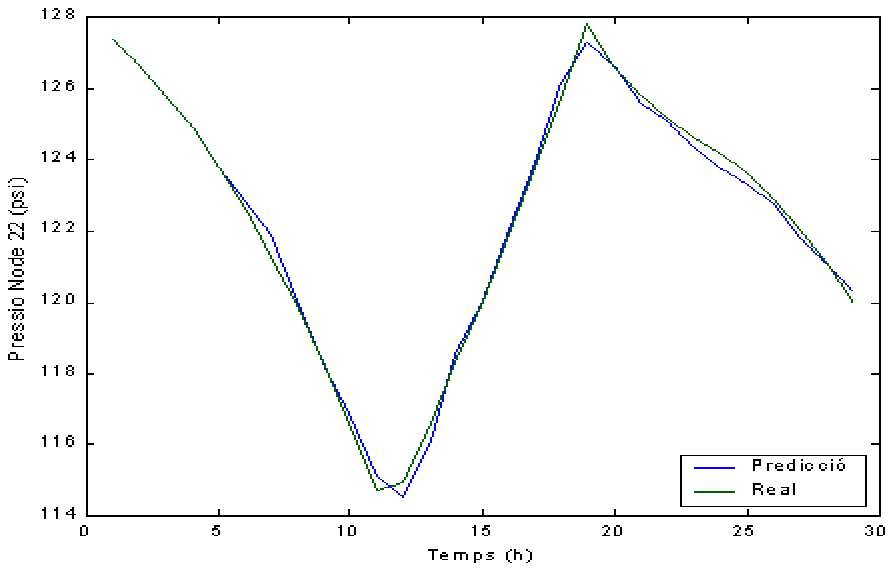

Fig. 8 Predicció del conjunt de test realitzada amb la màscara 6

3.6. Model 6

En tots aquests últims casos (menys l'últim) l'error de predicció en la verificació a augmentat respecte els models anteriors, això pot ser degut a que les dades utilitzades per a identificar el sistema no reflecteixen tots els possibles comportaments d'aquest. Per tant es decideix augmentar la quantitat de mostres del sistema. Refem la simulació de la xarxa d'aigües, prenem més mostres (192 hores) i utilitzem les primeres 140 hores per la cerca del model i es fa la verificació sobre les últimes 24 hores.

La primera prova (igual que en el model 1), és considerant que les entrades al sistema només són el cabal a la bomba B1 i el nivell en el dipòsit D2, i la sortida la pressió en el node 22.

La màscara òptima és:

	D2	B1	P22		
mask =	0	0	0	t-12	
	0	0	0	t-11	
	0	0	0	t-10	
	0	0	0	t-9	
	0	0	0	t-8	
	0	0	0	t-7	
	0	0	0	t-6	**(màscara 7)**
	0	0	0	t-5	
	0	0	0	t-4	
	0	0	0	t-3	
	0	0	0	t-2	
	0	0	0	t-1	
	-1	0	1	t	

de complexitat molt baixa, però amb una qualitat molt alta de 0.9041. El resultat de la predicció és mostra a la figura 9.

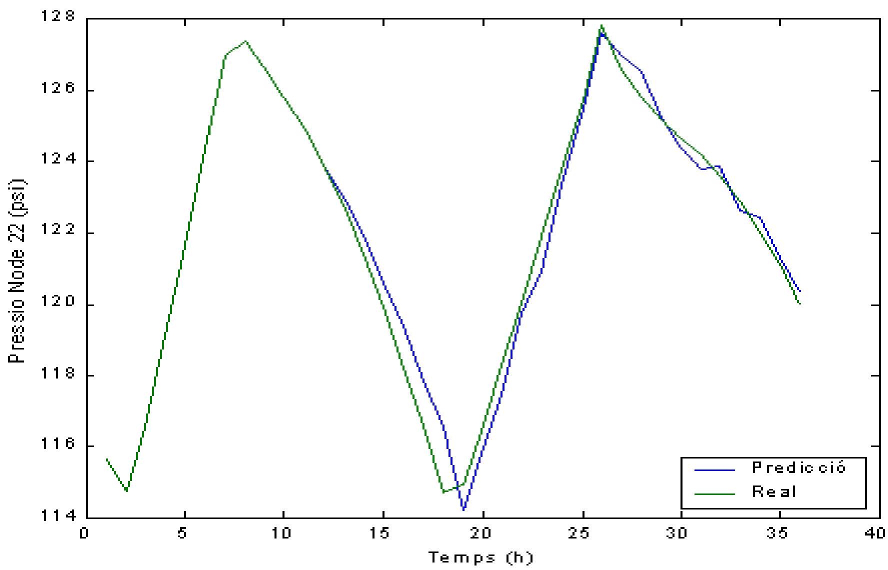

Fig. 9 Predicció del conjunt de test realitzada amb la màscara 7

s'obté un error quadràtic percentual de 2.1259%. La reducció de l'error és molt petit respecte el del model 1.

Si prenem una màscara subòptima, de complexitat 3,

	D2	B1	P22		
mask =	0	0	0	t-12	
	0	0	0	t-11	
	0	-1	0	t-10	
	0	0	0	t-9	
	0	0	0	t-8	
	0	0	0	t-7	
	0	0	0	t-6	**(màscara 8)**
	0	0	0	t-5	
	0	0	0	t-4	
	0	0	0	t-3	
	0	0	0	t-2	
	0	0	0	t-1	
	-2	0	1	t	

amb una qualitat de 0.9034 (molt similar a la de complexitat 2) el resultat de la simulació millora una mica tal com es mostra a la figura 10. Ara l'error MSE és de 1.6383%.

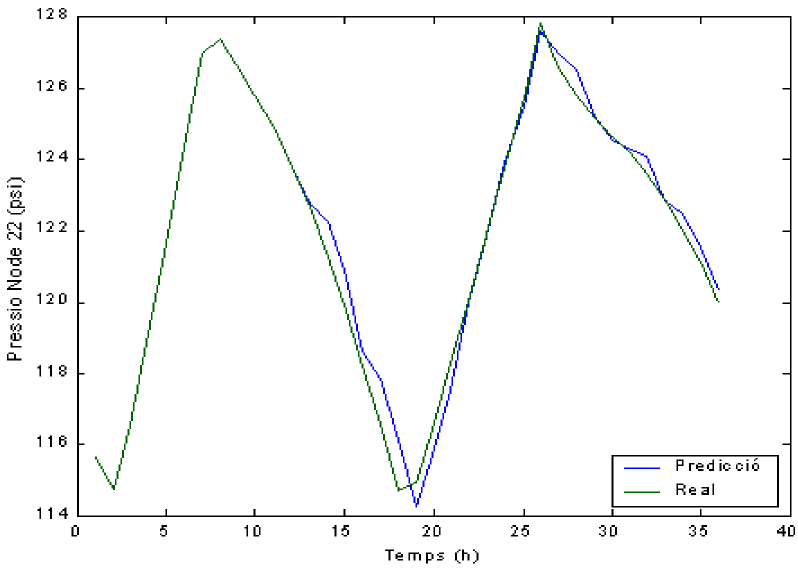

Fig. 10 Predicció del conjunt de test realitzada amb la màscara 8

Si fem la mateixa prova, amb la màscara de complexitat 4:

	D2	B1	P22		
mask =	0	0	0	t-12	
	0	-1	0	t-11	
	0	0	0	t-10	
	0	-2	0	t-9	
	0	0	0	t-8	
	0	0	0	t-7	**(màscara 9)**
	0	0	0	t-6	
	0	0	0	t-5	
	0	0	0	t-4	
	0	0	0	t-3	
	0	0	0	t-2	
	0	0	0	t-1	
	-3	0	1	t	

que té una qualitat de 0.6880 obtenim la predicció de la figura 11 amb un error quadràtic mig de 1.7411%, molt similar a l'error obtingut amb la màscara 8 que tenia una complexitat de 3.

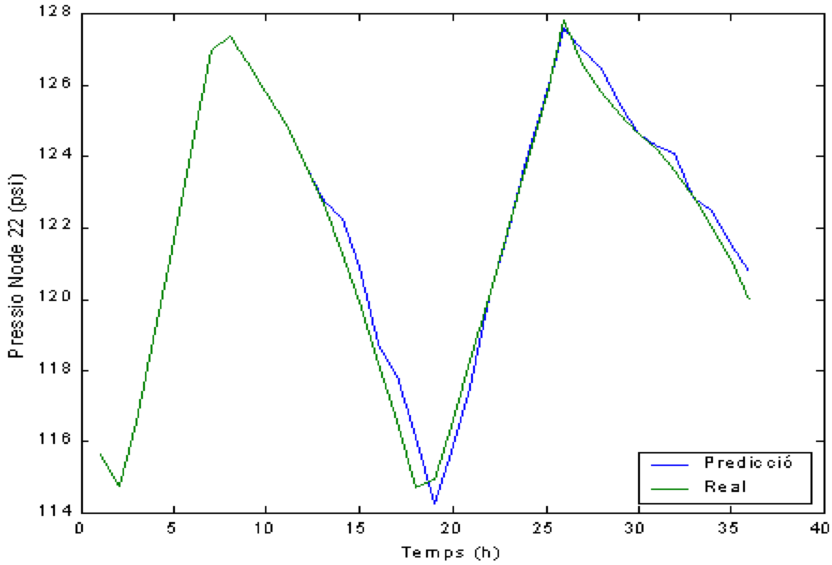

Fig. 11 Predicció del conjunt de test realitzada amb la màscara 9

3.7. Model 7

La segona prova (igual que en el model 2), és considerar que les entrades al sistema són les pressions en els nusos 10, 11, 12 i 21 i el nivell en el dipòsit D2, i la sortida la pressió en el node 22.

La màscara òptima aconseguida en aquest cas és de complexitat 2,

	P10	P11	P12	P21	D2	P22		
mask =	0	0	0	0	0	0	t-5	
	0	0	0	0	0	0	t-4	
	0	0	0	0	0	0	t-3	**(màscara 10)**
	0	0	0	0	0	0	t-2	
	0	0	0	0	0	0	t-1	
	0	0	-1	0	0	1	t	

i té una qualitat força alta, de 0.8732

El resultat de la predicció es mostra a la figura 12, i té un error quadràtic mig de 2.6125%.

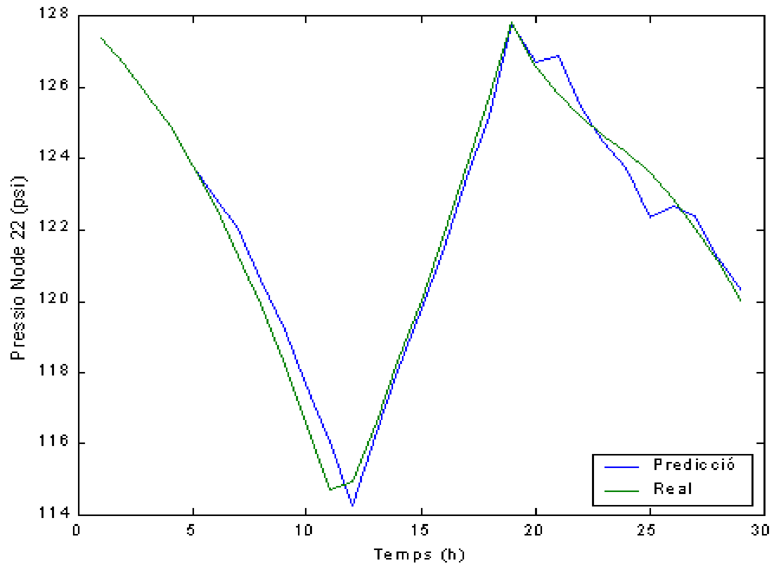

Fig. 12 Predicció del conjunt de test realitzada amb la màscara 10

Si d'aquest mateix cas es prova amb una màscara subòptima de complexitat 3:

	P10	P11	P12	P21	D2	P22		
mask =	0	0	0	0	0	-1	t-5	
	0	0	0	0	0	0	t-4	
	0	0	0	0	0	0	t-3	**(màscara 11)**
	0	0	0	0	0	0	t-2	
	0	0	0	-2	0	0	t-1	
	0	0	0	0	0	1	t	

amb una qualitat de 0.8724 (molt similar a la de la màscara òptima) s'obté la predicció que es mostra en la figura 13, amb un error quadràtic mig de 2.1712%.

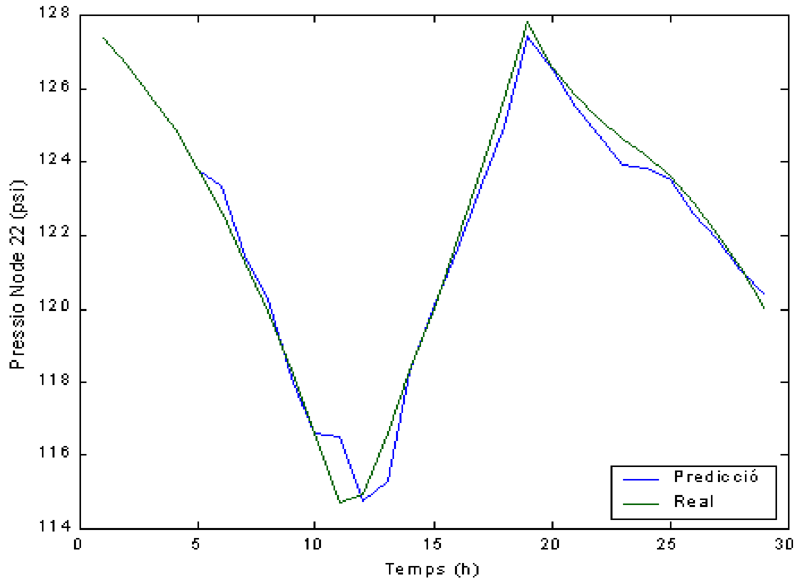

Fig. 13 Predicció del conjunt de test realitzada amb la màscara 11

La màscara de complexitat 4, és:

	P10	P11	P12	P21	D2	P22		
mask =	0	0	-1	0	0	0	t-5	
	0	0	0	0	0	0	t-4	
	0	0	0	0	0	0	t-3	**(màscara 12)**
	0	0	0	0	0	0	t-2	
	0	0	0	-2	0	0	t-1	
	0	0	0	-3	0	1	t	

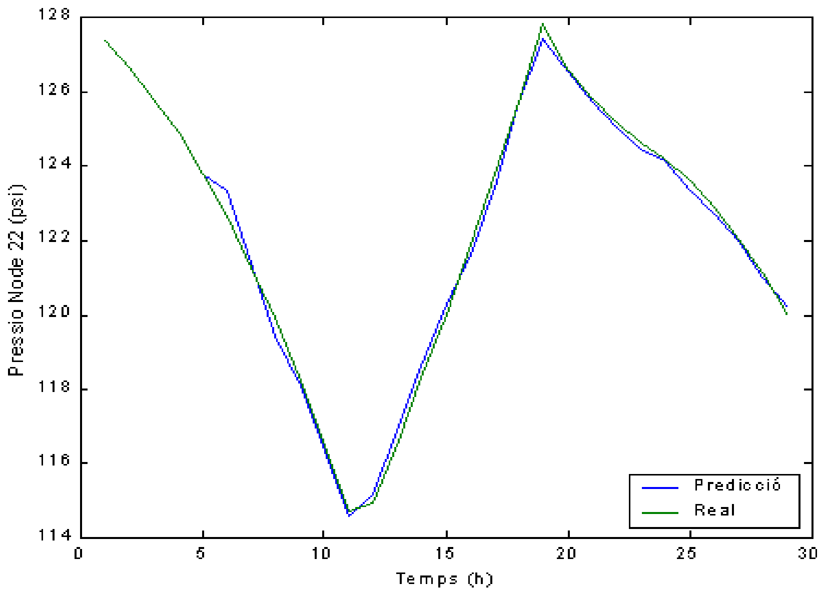

Fig. 14 Predicció del conjunt de test realitzada amb la màscara 12

La màscara 12 té una qualitat de 0.4417 (força més baixa a la de la màscara 11). La predicció de la sortida es mostra a la figura 14, amb un error quadràtic mig de 0.4462%. Curiosament dona una simulació del senyal molt més acurada que en els altres 2 casos tot i que la qualitat de la màscara és molt més petita.

3.8. Valoració dels models

El resum dels errors en la verificació dels diferents models analitzats es pot veure en la taula 1.

Models	Complexitat	Variables d'entrada	Profunditat màscara	nº de dades	Tipus de màscara	Error
1	3	2	12 h	72	Òptima	2,6531
2	3	6	12 h	72	Òptima	4,0435
3	4	2	12 h	72	Sub-òptima	6,2112
4	4	6	12 h	72	Sub-òptima	8,0207
5	3	5	5 h	72	Òptima	4,4833
	4	5	5 h	72	Sub-òptima	0,5756
6	2	2	12 h	140	Òptima	2,1259
	3	2	12 h	140	Sub-òptima	1,6383
	4	2	12 h	140	Sub-òptima	1,7411
7	2	5	5 h	140	Òptima	2,6125
	3	5	5 h	140	Sub-òptima	2,1712
	4	5	5 h	140	Sub-òptima	0,4462

Taula 1 Resum del comportament dels diferents models analitzats

Com es pot veure en l'anterior taula hi ha algunes màscares amb les que s'obtenen uns resultats molt bons, però els millors resultats s'aconsegueixen amb els models 6 i 7. Per tant l'elecció del model a utilitzar la centrarem entre aquests dos últims.

El millor resultat el tenim en l'última fila de la taula dins el model 7 quan s'utilitza una màscara subòptima de complexitat 4. La qualitat d'aquesta màscara és de 0.4417, que és força baixa, i tal com s'ha explicat abans, la qualitat s'obté a partir de l'entropia de Shannon que ens dóna una idea de la quantitat d'informació que conté la màscara. Per aquest motiu es decideix descartar aquesta màscara.

Comparant els resultats dels altres errors de verificació entre els dos models, es pot observar que són més petits en el model 6 que en el 7, amb una diferència molt reduïda que dificulta l'elecció del model. Per poder esbrinar quin dels dos models cal triar, s'ha fet una prova addicional que ha consistit en allargar el temps de verificació del senyal, passant de 24 a 48 hores. En aquesta prova s'observa que l'error de verificació en el model 7 es manté constant mentre que en el model 6 augmenta. Per aquest motiu es tria el model 7 com el que millor representa el comportament normal del sistema.

4. Monitorització de falles

La metodologia del raonament inductiu difús va ser utilitzada per primera vegada per tractar alguns aspectes dels sistemes de monitorització de falles en una tesi doctoral realitzada dins del grup de FIR i que va finalitzar l'any 1996 [Albornoz, 1996]. En aquest treball s'analitzen les diferents fases que constitueixen un FMS (Fault Monitoring System) sota la perspectiva de la metodologia FIR i es desenvolupen alguns aspectes particulars d'aquests sistemes. Concretament, s'introdueix un mètode de detecció de falles basat en la comparació entre les classes del senyal real de sortida i els valors de classe predits d'aquesta variable. El procés consisteix en fer la predicció, durant un espai de temps suficient (finestra de predicció), amb cadascun dels models predeterminats i decidir quin dels models és el que millor caracteritza el nou comportament del sistema, sent capaços, d'aquesta manera, de definir la falla produïda. La millora d'aquest mètode descrita en [Escobet et al., 1999a; 1999b] afegeix el criteri dels *envoltants* per detectar la falla i la *mesura d'acceptabilitat* per determinar quin és el model que caracteritza més bé el sistema.

Les falles o canvis estructurals del sistema en la xarxa de distribució d'aigües que es proposen son dos. Per poder provocar aquestes falles s'afegeixen dos elements a la xarxa, que es mostren a la figura 15. El primer element és una vàlvula (V11) entre els nodes 11 i 12, per poder simular una obstrucció a la canonada que uneix aquest dos nodes. El segon és un node (31) addicional connectat al node 21 mitjançant una vàlvula (V121) , per simular una fuita d'aigua en les canonades que surten d'aquest node.

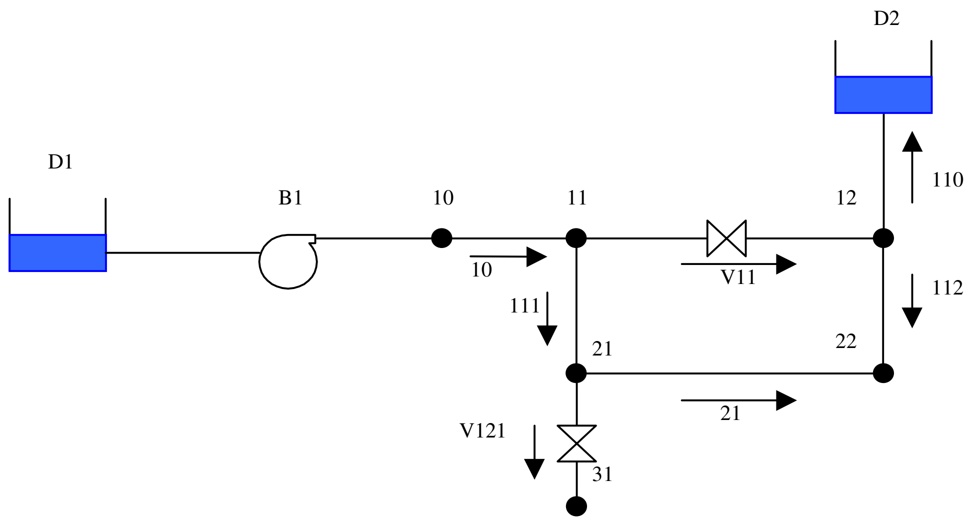

Fig. 15 Modificació de la xarxa original per a la simulació de falles

Amb aquests canvis a l'estructura de la xarxa, podem simular 3 estats diferents:

1. Xarxa 1: Funcionament normal (V11 oberta i V121 tancada)
2. Xarxa 2: Obstrucció de la canonada 11 (V11 tancada i V121 tancada)
3. Xarxa 3: Fuita d'aigua (V11 oberta i V121 oberta)

4.1. Xarxa 1

La xarxa 1 és l'estructura normal (funcionant correctament) de la xarxa de distribució d'aigües analitzada en el capítol 3. L'estructura de la xarxa es recorda en la figura 16, on la vàlvula V11 de la canonada 11 està oberta i la vàlvula V121 de la branca 121 està tancada.

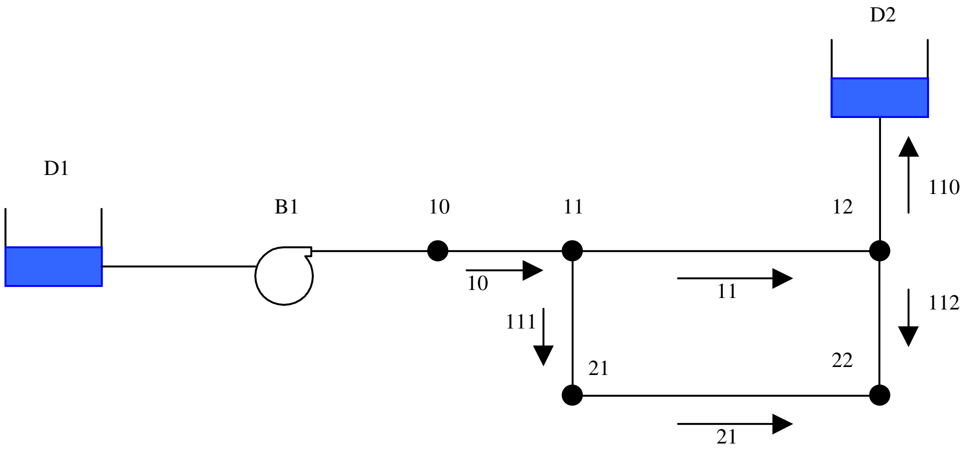

Fig. 16 Estructura de la xarxa en funcionament normal

4.2. Xarxa 2

La segona xarxa que representa una obstrucció en la branca 11 generada pel tancament de la vàlvula V11, és mostra a la figura 17.

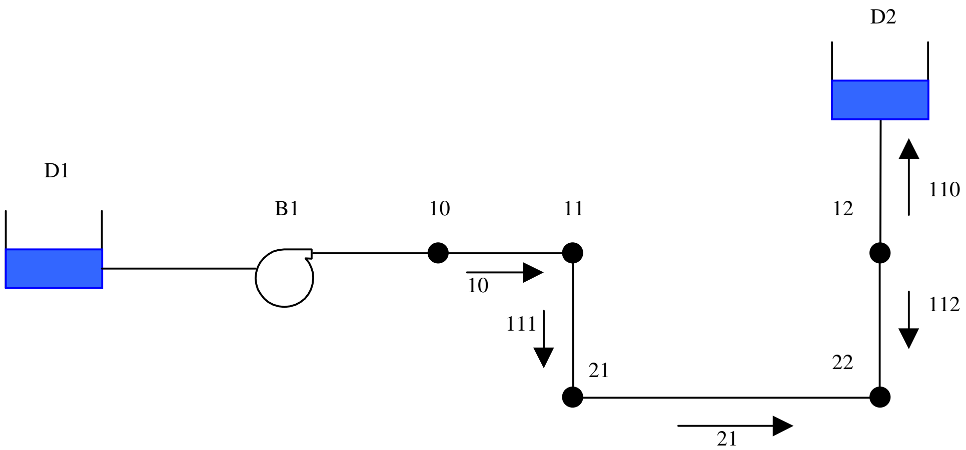

Fig. 17 Estructura de la xarxa quan hi ha una obstrucció en una branca

4.3. Xarxa 3

La tercera xarxa, representa una fuita d'aigua en el node 21. Per simular-ho la vàlvula V11 estarà oberta i la vàlvula V121 també, tal com es mostra en la figura 18.

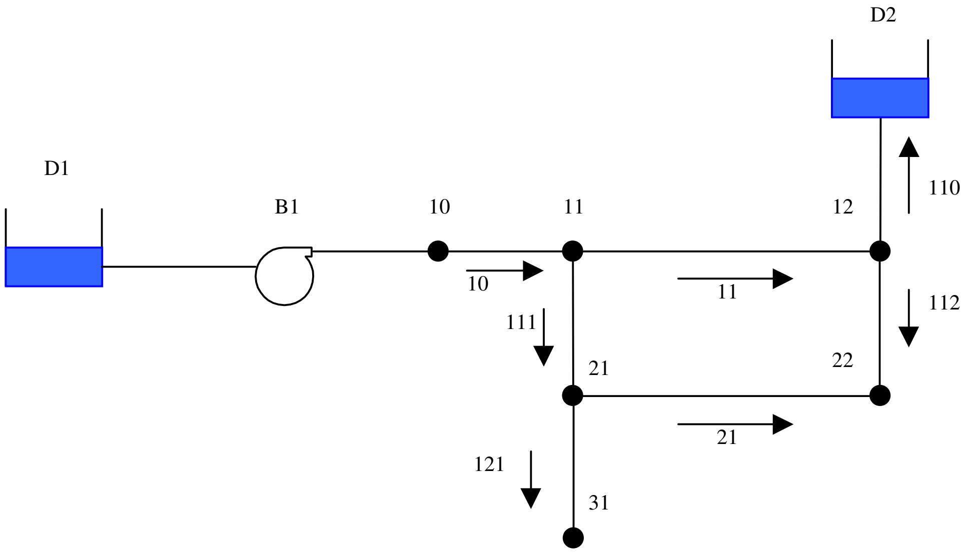

Fig. 18 Estructura de la xarxa quan hi ha una fuita d'aigua

4.4. Models de les xarxes

Una mostra de les respostes del sistema (pressions del node 22), que s'obtenen en les tres xarxes es pot veure en la figura 19.

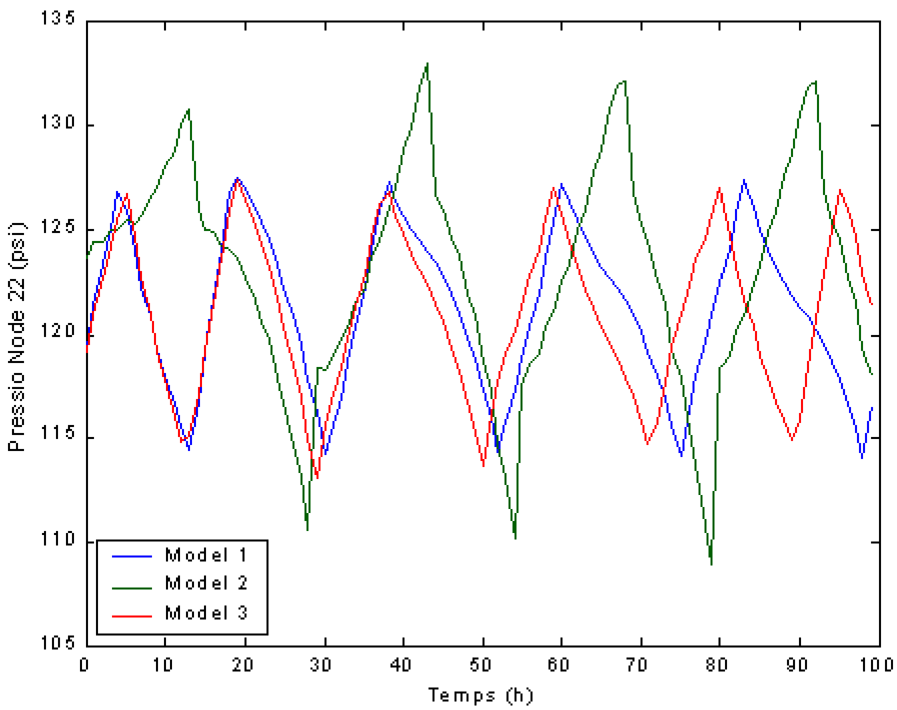

Fig. 19 Senyal de sortida del sistema per a cadascuna de les xarxes

En la figura 19 s'observa que la xarxa 1 (model 1) és molt similar a la 3 (model 3), i que fins que no han passat pràcticament 30 hores de simulació es fa molt difícil d'apreciar visualment el canvi en la freqüència dels senyals. Aquesta similitud entre els senyals pot donar problemes per poder diferenciar els dos comportaments del sistema, comportament normal vs. comportament amb fuita d'aigua. En canvi, el senyal de la xarxa 2 (model 2) és molt diferent respecte els altres dos i, en principi, hauria de ser senzill detectar la falla de la obstrucció d'una canonada.

4.4.1. Model 1

Aquesta xarxa és la que s'ha estat analitzant en l'apartat 3. La màscara que s'ha triat per modelitzar el sistema, és:

	P10	P11	P12	P21	D2	P22	
màscara =	0	0	0	0	0	-1	
	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	**(màscara 1-FMS)**
	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	-2	0	0	
	0	0	0	0	0	1	

i té una qualitat de 0.8724. L'error quadràtic mig de la verificació del model amb 48 hores de simulació (figura 20) és de 2.1937%.

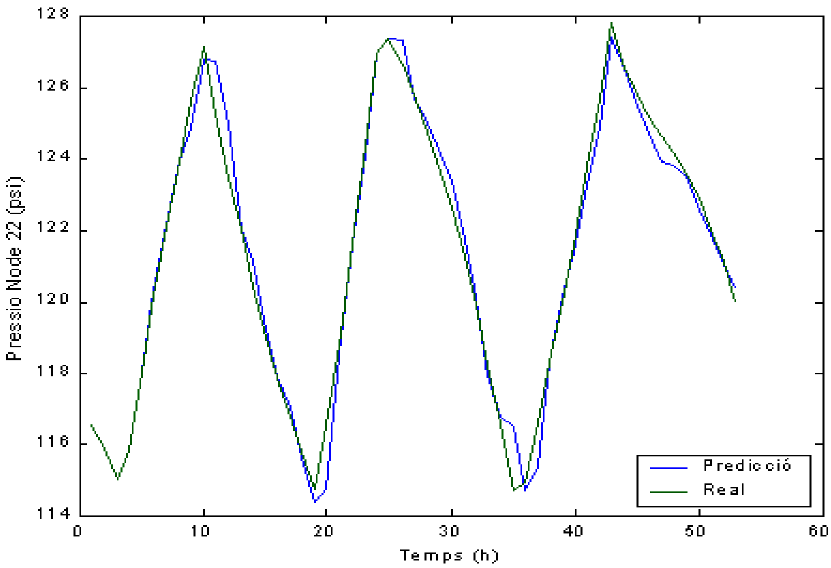

Fig. 20 Predicció del conjunt de test realitzada amb la màscara 1-FMS

Com es pot apreciar a la figura 20, i tal com s'ha dit anteriorment, la predicció del senyal es manté, encara que afegim més hores de predicció.

4.4.2. Model 2

La màscara que s'aconsegueix per aquesta xarxa, seguint els mateixos criteris de l'apartat anterior, és:

	P10	P11	P12	P21	D2	P22	
màscara =	0	0	0	0	-1	0	
	0	0	0	0	0	0	
	-2	0	0	0	0	0	**(màscara 2-FMS)**
	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	-3	0	0	
	0	0	0	0	0	1	

i té una qualitat de 0.8160. El resultat de la predicció (de 48 hores), es pot observar en la figura 21.

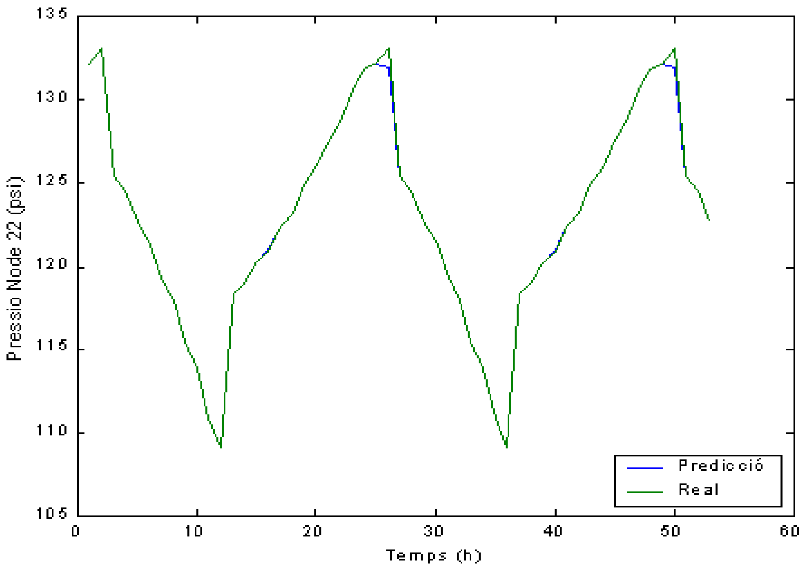

Fig. 21 Predicció del conjunt de test realitzada amb la màscara 2-FMS

Com es pot veure a la figura, el senyal real i el de predicció són molt similars obtenint-se un error quadràtic mig de 0.1306%.

4.4.3. Model 3

La màscara identificada per la tercera xarxa, és:

	P10	P11	P12	P21	D2	P22	
màscara =	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	-1	0	
	0	0	0	0	0	0	**(màscara 3-FMS)**
	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	
	0	0	-2	0	0	1	

amb una qualitat de 0.7860 (sub–òptima). El resultat de la simulació, es mostra a la figura 22.

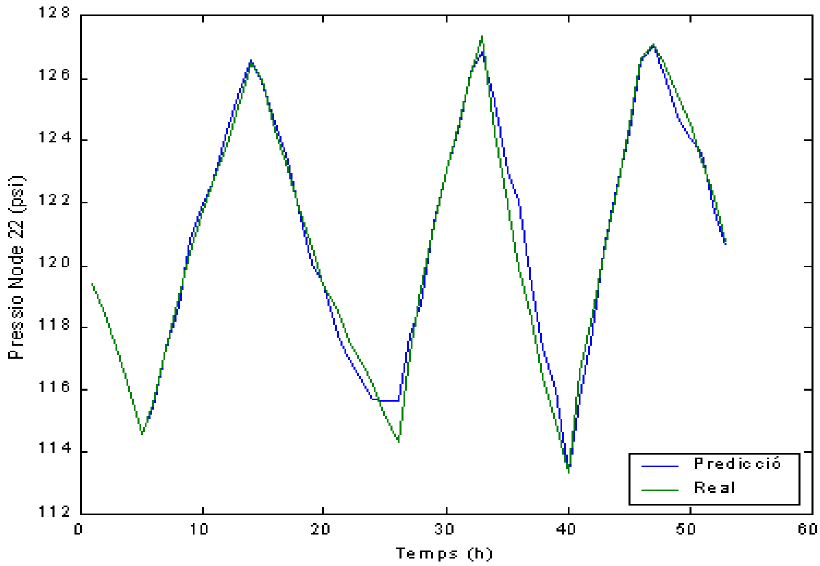

Fig. 22 Predicció del conjunt de test realitzada amb la màscara 3-FMS

L'error quadràtic mig és de 2.2731%.

Els dos models obtinguts que representen les falles (2-FMS i 3-FMS) són guardats en la llibreria de models de falles per tal de poder dur a terme el FMS. Recordem que el model FIR d'un sistema ve determinat per la seva màscara i la matriu de comportament (conjunt de regles), per tant ambdós són emmagatzemats en la llibreria.

4.5. Generació de les falles

Un cop s'han modelitzat els tres comportaments de la xarxa, s'han de generar noves dades amb la xarxa i provocar els canvis estructurals (falles) per comprovar si FIRFMS és capaç de detectar-les.

Modifiquem el programa que simula la xarxa d'aigües per provocar els canvis d'estructura i intentar determinar en quina de les tres situacions (models aconseguits anteriorment) ens trobem. El nou codi de simulació de la xarxa és a l'annex 2.

Les alteracions aplicades a la xarxa d'aigües són:

T = 0 h : 47 h	Vàlvula línia 11	oberta	Model 1
	Vàlvula línia 121	tancada	
T = 48 h : 95 h	Vàlvula línia 11	tancada	Model 2
	Vàlvula línia 121	tancada	
T = 96 h : 143 h	Vàlvula línia 11	oberta	Model 3
	Vàlvula línia 121	oberta	
T = 144 h : 192 h	Vàlvula línia 11	oberta	Model 1
	Vàlvula línia 121	tancada	

Taula 2: Generació de falles en la xarxa d'aigües

Els senyals de les entrades i sortida del sistema es mostren a la figura 23 a on es poden apreciar els instants en què es produeixen les falles.

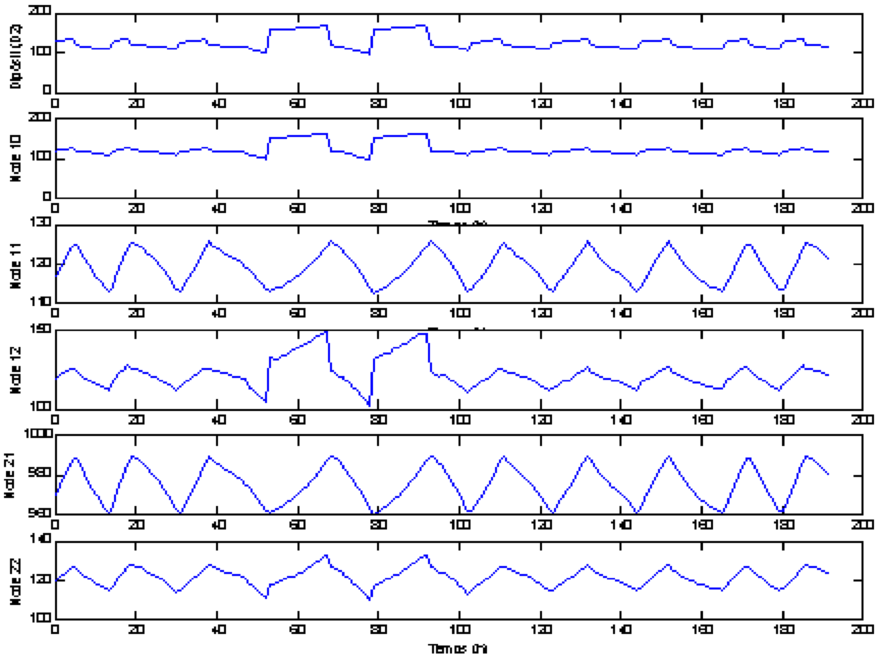

Fig. 23 Variables d'entrada i de sortida seguint les alteracions de la taula 2

4.6. Localització de les falles

Tal com s'ha explicat al començament de l'apartat 4, per localitzar les falles o canvis d'estructura de la xarxa d'aigües s'utilitza el FIRFMS. Aquest està presentat en detall en [Escobet et al., 1999a; 1999b], no sent l'objectiu d'aquest treball descriure'l. El procés consisteix en predir el comportament de la xarxa d'aigües en un interval determinat (finestra de predicció) amb el model del que es disposa que representa les condicions normals de la xarxa. En el moment en que el número d'errors de predicció és superior a un llindar predeterminat, es detecta una falla i es procedeix a caracteritzar-la.

Per detectar una falla, el que es fa és comprovar si les dades reals estan dins de l'interval de valors compresos entre el valor mínim predit i el valor màxim predit, és a dir, si està dins de l'envoltant. Quan una dada queda fora d'aquest envoltant de predicció es considera que s'ha produït un error. Els errors d'una finestra s'aniran acumulant i quan es supera el llindar fixat, es dispara l'alarma.

La finestra de detecció en aquest exemple és de 5 mostres i el llindar per tal de detectar una falla és d'un sol error. Cal notar que el llindar d'un sol error és el mínim possible i per tant estem exigint al FMS que detecti la falla molt ràpidament. Quan es detecta més d'un error es produeix una alarma i s'inicia el procés d'identificació de la falla. Per identificar-la es fa la predicció d'un interval per a tots els models emmagatzemats en la llibreria de models de falles i es calcula la mesura d'acceptabilitat de cada model. El que té aquesta mesura més alta és el nou model del sistema.

En aquesta aplicació els senyals de les xarxes 1 i 3 son molt similars i s'ha detectat que en moltes finestres s'obté el mateix nombre de falles. Quan dos models tenen el mateix nombre de falles l'algorisme ens retorna com a millor model el primer que s'ha calculat. De fet en el penúltim tram de la simulació (model 3) la identificació de la falla oscil·la contínuament entre els models 1 i 3. Per solucionar aquest problema hi ha dues opcions. En la primera, en cas d'empat de falles es decideix el model resultat depenent del millor model obtingut en la finestra anterior. De moment aquesta solució no s'ha implementat, encara que es pensa que podria ser força bona. L'opció utilitzada és afegir un mecanisme addicional que consisteix en buscar l'error quadràtic mig en percentatge (equació 1) entre les dades de la finestra real i les de predicció. El model escollit és el que té l'error més petit.

Amb la configuració del programa en el que es defineix una finestra de 5 hores i un llindar per les falles d'un sol error de predicció, s'aconsegueix una monitorització de les falles molt acurada, tal com es mostra en la figura 24.

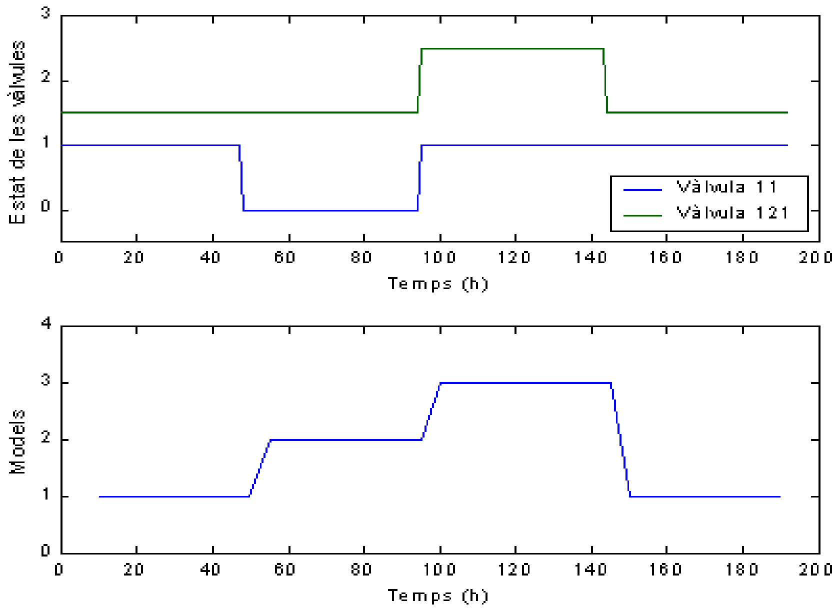

Fig. 24 Identificació dels canvis d'estructura de la xarxa fet per FIRFMS

En la part superior d'aquesta figura es mostra l'estat de les vàlvules per senyalar les falles establertes en el sistema i en la inferior es presenta la identificació feta per FIRFMS de les falles o canvis en l'estructura de la xarxa d'aigües. Com es pot veure FIRFMS és capaç de detectar les falles de seguida després de que es produeixin i identificar el nou model que correspon al nou comportament, és a dir el model que captura la falla que s'ha produït.

En el gràfic inferior de la figura 25 es mostra la màxima mesura d'acceptabilitat que s'obté en cada moment. Aquesta mesura dóna un índex relatiu de quin és el model que millor prediu el nou comportament del sistema. A més, aquesta mesura permet identificar de manera fiable quan la falla no es troba representada en la llibreria o quan s'identifiquen diferents models per a una mateixa falla.

Tal com mostra la gràfica, en aquells punts a on es produeix una transformació en l'estructura del sistema, el model que s'està utilitzant en aquell moment deixa de funcionar i s'identifica mitjançant la mesura d'acceptabilitat el millor model que caracteritza el nou comportament. Cal notar que la mesura d’acceptabilitat es manté a 1 quan el model que s’està utilitzant en aquell moment té com a màxim un error de predicció en cada interval.

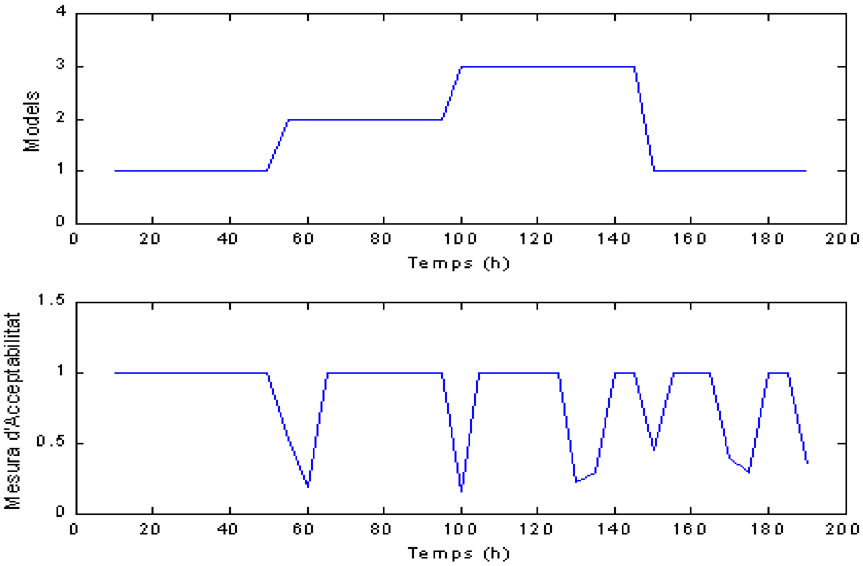

Fig. 25 Mesura d’acceptabilitat en el procés d’identificació de la falla

La mesura d'acceptabilitat dona valors força baixos, ja que és una mesura relativa entre tots els models i la quantitat de falles que s'obtenen en les finestres de predicció és molt similar en tots tres models, tal com es mostra en la figura 26.

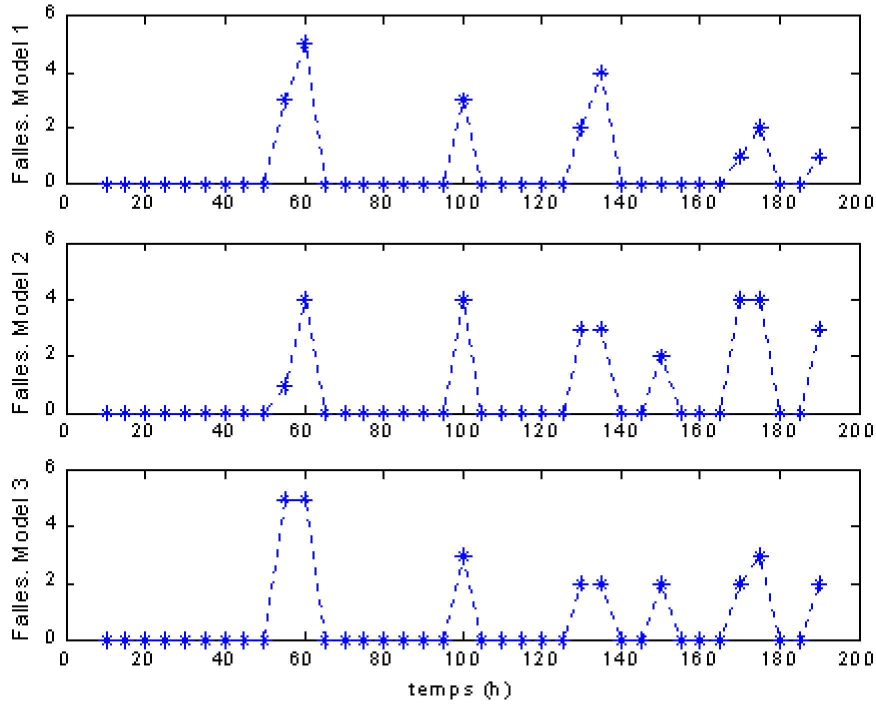

Fig. 26 Errors de predicció obtinguts per cada model en cada interval

El codi del programa en Matlab que localitza i detecta les falles o canvis d'estructura a la xarxa d'aigües es troba en l'annex 3.

5. Conclusions

En aquest treball s'ha utilitzat la metodologia del FIRFMS per a detectar i identificar falles en una xarxa de distribució d'aigua. FIRFMS ha demostrat ser capaç de detectar falles en un únic interval de temps de 5 punts i amb un llindar de detecció de només un error. Per tant, la detecció d'una falla es produeix d'una manera ràpida i la identificació d'aquesta es produeix sense error. Cal senyalar que la xarxa que s'ha utilitzat en aquest treball és una xarxa reduïda amb un número limitat de canonades, vàlvules, dipòsits i bombes. L'objectiu d'aquest treball no ha estat utilitzar FIRFMS en un sistema de complexitat real sinó estudiar el seu comportament i eficiència de les millores realitzades en aquest sistema de monitorització de falles, l'envoltant i la mesura d'acceptabilitat dels models.

6. Bibliografia

[Klir, 1985] Klir, G.J., Architecture of Systems Problem Solving, Plenum Press, New York, 1985.

[Cellier, 1987] Cellier, F.E. and D.W. Yandell, SAPS-II: A New Implementation of the Systems Approach Problem Solver, International J. of General Systems, vol. 13, no. 4, pp 333-344, 1987.

[Albornoz, 1996] de Albornoz, A. Inductive resoning and reconstruction analysis, two complementary tools for qualitative fault monitoring of large-scale systems. Ph. D. Tesi. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. 1996.

[Escobet et al., 1999a] Antoni Escobet, Angela Nebot and François E. Cellier. Model Acceptability Measure for the Identification of Failures in Qualitative Fault Monitoring Systems, ESM'99: European Simulation Multiconference, Warsaw, Poland, 1999.

[Escobet et al., 1999b] Antoni Escobet, Angela Nebot and Montserrat Vallverdú, A Qaulitative Fault Monitoring System to Support Medical Decisions: An Application to the Central Nervous System, SCB'99: Intern. Conf. On Soft Computing in Biomedicine, Rochester, N.Y., 1999.

[Epanet1.1] Grupo Mecánica de Fluidos. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. http://www.gmf.upv.es/soft/epanet/default.html

7. Annexes

Annex 1

Codi del programa de simulació fet amb EPANETES

```
[TITLE]
EPANET Xarxa Aigües

[JUNCTIONS]
;--------------------
;     Cota   Demanda
; Id    ft      gpm
;--------------------
  10   710     0
  11   710     150
  12   700     150
  21   700     150
  22   695     200

[TANKS]
;--------------------------------------------
;     Cota  Nivell  Nivell  Nivell   Diam.
; Id   ft     Inic   Min     Max     ft
;--------------------------------------------
   2   850    120    100     150     50.5
   1   800

[PIPES]
;------------------------------------------------
;       Node     Node   Longitud    Diam    Coef.
;Id    Inicial   Final     ft        in     Rugos.
;------------------------------------------------
10       10       11     10530       18      100
11       11       12      5280       14      100
21       21       22      5280       10      100
110       2       12       200       18      100
111      11       21      5280       10      100
112      12       22      5280       12      100

[PUMPS]
;--------------------------------
;     Node    Node    H-Q Nominal
;Id  Inicial  Final    ft    gpm
;--------------------------------
 1      1      10     250   1500

[CONTROLS]
;----------------------------------------------------
; Bomba 1 en marxa quan el  Nivell Dipòsit 2 < 110 ft
; Bomba 1 parada  quan el Nivell Dipòsit   2 > 140 ft
;----------------------------------------------------
 LINK 1 OPEN IF NODE 2 BELOW 110
 LINK 1 CLOSED IF NODE 2 ABOVE 140

[PATTERNS]
;-------------------------------------------
; Id  Multiplicadors ....
;--------------------------------------------
  1   1.0  1.2  1.4  1.6  1.4  1.2
```

```
  1   1.0  0.8  0.6  0.4  0.6  0.8

[QUALITY]
;------------------------
;          Concent.
;Nodes     Inicial mg/L
;------------------------
  2  32     0.5
  1         1.0
  2         1.0

[REACTIONS]
;-------------------------------------------------------
 GLOBAL BULK  -.5          ; Coef. decaïment en el mitja
 GLOBAL WALL  -1           ; Coef. decaïment en la paret

[TIMES]
;----------------------------------------------
 DURATION 96        ; simulació en un període de 96 hores
 PATTERN TIMESTEP 2 ; interval de simulació de 2 hores

[OPTIONS]
;---------------------------------------------
MAP      Xarxa2.map  ; Fitxer de coordenades
; UNITS    SI

[REPORT]
node  10
node  11
node  12

[END]
```

Annex 2

Codi del programa de simulació de la xarxa per generar les falles fet amb EPANETES.

```
[TITLE]
EPANET Xarxa Falles

[JUNCTIONS]
;--------------------
;     Cota   Demanda
; Id    ft      gpm
;--------------------
  10   710      0
  11   710      150
  12   700      150
  21   700      150
  22   695      200
  31   700      1      2

[TANKS]
;--------------------------------------------
;     Cota  Nivell  Nivell  Nivell  Diam.
; Id   ft     Inic   Min     Max     ft
;--------------------------------------------
   2   850    120    100     150     50.5
   1   800

[PIPES]
;------------------------------------------------
;       Nus      Nus   Longitud    Diam    Coef.
;Id    Inicial   Final      ft       in     Rugos.
;------------------------------------------------
10        10       11     10530       18      100
11        11       12      5280       14      100
21        21       22      5280       10      100
110        2       12       200       18      100
111       11       21      5280       10      100
112       12       22      5280       12      100
121       21       31      5280        8      100

[PUMPS]
;--------------------------------
;     Nudo    Nudo    H-Q Nominal
;Id  Inicial  Final    ft    gpm
;--------------------------------
 1      1      10     250   1500

[STATUS]
;--------------------------------
;Id  Consigna
;--------------------------------
 11   OPEN

[CONTROLS]
;----------------------------------------------------
; Bomba 1 en marcha quan  Nivell Dipòsit 2 < 110 ft
; Bomba 1  parada   quan  Nivell Dipòsit 2 > 140 ft
;----------------------------------------------------
 LINK 1 OPEN IF NODE 2 BELOW 110
 LINK 1 CLOSED IF NODE 2 ABOVE 140
 LINK 11 CLOSED AT TIME 48  ; Tuberia 11 taponada
 LINK 11 OPEN AT TIME 96    ; Tuberia 11 destapada
```

```
[PATTERNS]
;-----------------------------------------
; Id  Multiplicadors ....
;------------------------------------------
  1   1.0  1.2  1.4  1.6  1.4  1.2  1.0  0.8  0.6  0.4  0.6  0.8
  2   0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
  2   0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
  2   150  150  150  150  150  150  150  150  150  150  150  150
  2   150  150  150  150  150  150  150  150  150  150  150  150
  2   0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0

[QUALITY]
;------------------------
;          Concent.
;Nusos     Inicial mg/L
;------------------------
  2  32     0.5
  1         1.0
  2         1.0

[REACTIONS]
;-------------------------------------------------------
 GLOBAL BULK  -.5          ; Coef. decaïmient en el mitja
 GLOBAL WALL  -1           ; Coef. decaïmient en la paret

[TIMES]
;-----------------------------------------------
 DURATION 192       ; simulació en un període de 192 hores
 PATTERN TIMESTEP 2 ; interval de simulació de 2 hores

[OPTIONS]
;----------------------------------------------
 QUALITY  NONE        ; Analisis del clor
 MAP      Xarxa3.map  ; Fitxer de coordenades

[REPORT]
node  10
node  11
node  12
links none

[END]
```

Annex 3

Codi del programa de detecció de falles.

```
global qualms repo confi miss_data memb_shape meth_search def abs_weight
norm_reg distance envol valida_dat
def = 1;
abs_weight = 1;
norm_reg = 2;
meth_search = 1;
memb_shape=0;
miss_data=0;
qualms = 1;
repo = 0;
confi = 0;
distance = 1;
envol = 0;
valida_dat = 0;

% Càrrega de les dades
load ..\dades\Falles1.dat
% format de les dades
% 1 columna -> Temps (hores)
% 2 columna -> Alçada del diposit 2
% 3 columna -> Pressió en el node 10
% 4 columna -> Pressió en el node 11
% 5 columna -> Pressió en el node 12
% 6 columna -> Pressió en el node 21
% 7 columna -> Pressió en el node 22 (Sortida del sistema)

t = Falles1(:,1);

% Definició de les constant
finestra = 5; % Nombre d'hores en que comproba el model
llindar = 1;   % Nombre de dades fora de marge del model, per considerar que
és erroni

% Dimensions de les variables del sistema

[ad,bd] = size(t);
models=zeros(round(ad/finestra),2);

% lectura dels models

% Model 1 (Condicions normals)
load ..\Models\model71
mask1 = mask;
cb1 = b1a;
mb1 = mb1a;
sb1 = sb1a;
lm1 = lm;
err1 = err;
[filM1, colM1] = size(cb1);

% Model 2
load ..\Models\model72
mask2 = mask;
cb2 = b1a;
mb2 = mb1a;
sb2 = sb1a;
lm2 = lm;
err2 = err;
```

```
[filM2, colM2] = size(cb2);

% Model 3
load ..\Models\model73
mask3 = mask;
cb3 = b1a;
mb3 = mb1a;
sb3 = sb1a;
lm3 = lm;
err3 = err;
[filM3, colM3] = size(cb3);

Vclass=[3,3,3,3,3,3];
masc = 1E7;

mask = [mask1,mask2,mask3];
cb = [cb1,cb2,cb3];
mb = [mb1,mb2,mb3];
sb = [sb1,sb2,sb3];
lm = [lm1,lm2,lm3];
err = [err1,err2,err3];
colM = [colM1, colM2, colM3];


% Nombre de mascares
[a,b]=size(mask);
[c,d]=size(Vclass);

ProfMask = a;

nModels = 3;

Nvar = b/nModels;

models=zeros(20,9);
mesura = 0;
model = 1;
model_i = 1;
j = 1;

% Model inicial
cbi = cb1;
mbi = mb1;
sbi = sb1;
lmi = lm1;
erri = err1;
maski = mask1;


for i = ProfMask:finestra:ad
   if i + finestra < ad
      mesura = 1;
      % limits de la finestra
      ini = i-(ProfMask-1);
      fi = i + finestra - 1;
      % Finestra a predir
      meas = Falles1(ini:fi,2:7);
      fal = llindar + 1;
      [fal,pred] = falles(meas,Vclass,cbi,mbi,sbi,maski,lmi,erri);
      %plot([meas(:,6),pred(:,2),pred(:,3)]);
      %[ini,fi,fal]
      if (fal>llindar)
```

```
[model,mesura,nfalles]=millor_model1(meas,Vclass,cb,mb,sb,mask,lm,err,colM,nM
odels);
         if model ~= model_i
            % Canvi de model
            maski=mask(:,(model-1)*Nvar+1:model*Nvar);
            lmi = lm(:,(model-1)*Nvar+1:model*Nvar);
            erri = err(model);
            % Calcul de la primera i l'ultima columna del model
            iniM = 1;
            for k = 1:model-1
               iniM = iniM + colM(k);
            end
            fiM = iniM + colM(model)-1;
            cbi=cb(:,iniM:fiM);
            mbi=mb(:,iniM:fiM);
            sbi=sb(:,iniM:fiM);
         end
         models(j,7:9) = nfalles';
      end
      %pause
      models(j,1) = j;
      models(j,2) = ini;
      models(j,3) = i;
      models(j,4) = fi;
      models(j,5) = model;
      models(j,6) = mesura;
      j = j + 1;
   end
end
models
save res_fall5 models
figure(2);
plot(models(:,4),[models(:,5)+5,models(:,7:9)]);
subplot(2,1,1);
plot(models(:,4),models(:,5));
axis([0 200 0 4]);
xlabel('Temps (h)');
ylabel('Models');
subplot(2,1,2);
plot(models(:,4),models(:,7:9));
axis([0 200 -0.5 5.5]);
legend('Falles Model 1','Falles Model 2','Falles Model 3',4);
xlabel('Temps (h)');
ylabel('Falles');

figure(3);
plot(models(:,4),[models(:,5)+5,models(:,7:9)]);
subplot(2,1,1);
plot(models(:,4),models(:,5));
axis([0 200 0 4]);
xlabel('Temps (h)');
ylabel('Models');
subplot(2,1,2);
plot(models(:,4),models(:,6));
axis([0 200 0 1.5]);
xlabel('Temps (h)');
ylabel('Mesura d''Acceptabilitat');
```