



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,  
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

# Estudi i modelització d'una xarxa d'aigua potable per la localització de fuites

Document:

Memòria

Autor/Autora:

David Casado Ruiz

Director/Directora - Codirector/Codirectora:

Ramon Pérez Magrané – Sergi Grau Torrent

Titulació:

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Convocatòria:

Tardor 2021.

TREBALL DE FI D'ESTUDIS





## Agraïments

En primer lloc, m'agradaria agrair als meus tutors Ramon Pérez Magrané i Sergi Grau Torrent per al seu constant suport i compromís al llarg de tot treball. Moltes gràcies per l'energia tan positiva que es desprèn treballant amb vosaltres.

En segon lloc, agrair a Aigües de Manresa per la seva col·laboració en l'aportació dels models hidràulics i dades que han permès portat a terme el treball.

En tercer lloc, agrair a la meva família per la confiança i esforç dipositat en mi.

Finalment, agrair a la Sílvia Armengol per fer-me costat, escoltar-me i brindant-me el seu suport tant tècnic com emocional al llarg de tot aquest temps.

## Resum

Aquest treball consta d'un estudi i modelització d'una xarxa d'aigua potable amb l'objectiu de crear una eina que sigui capaç de localitzar fuites puntuals. D'aquesta forma, contribuir a la millora i manteniment de la infraestructura i també a la reducció de l'impacte mediambiental que suposen aquestes pèrdues.

Les fuites es localitzaran a partir de l'ajust de models hidràulics definits per dades de pressió i cabal, concretament de la xarxa real d'aigua elevada de Manresa. La utilització d'*Epanet* com a motor de simulació hidràulica i el codi implementat amb el llenguatge de programació R, amb el qual es defineixen les ordres a executar, són les eines determinants del desenvolupament del projecte.

La metodologia a seguir consistirà a iniciar les simulacions amb el model d'Aigua Elevada de Manresa i introduir progressivament nous paràmetres per a ajustar el model. Aquests paràmetres són el consum global real, les fuites generals generades a partir de coeficients emissors constants, els quals seran substituïts per la ponderació en funció al llarg de les canonades, i finalment l'addició del dipòsit de la Culla, factor imprescindible per a ajustar el model de forma significativa.

Un cop ajustada la corba de pressió del model amb la corba de pressió real amb un error relatiu inferior a l'1% s'ha portat a terme la simulació que ens indica el dimensionament de la fuita, trobant-ne una d'aproximadament 4,34 l/s.

Finalment, amb el model ja significativament ajustat i coneixent que el valor de la fuita és de 4,34 l/s, s'ha pogut localitzar-la al llarg d'una petita zona propera al node 188008 de la xarxa d'aigua potable, assolint l'objectiu principal.

## Abstract

This work consists of a study and modelling of a potable water network with the aim of creating a tool which is capable to pinpoint specific leaks around the network. Therefore, the project will contribute to the improvement and maintenance of the infrastructure and also to the environmental impact of these leaks.

The leaks are located due to the adjustment of hydraulic models which are defined by pressure and flow data from *Aigües de Manresa* potable water network. The use of *Epanet* as a hydraulic engine simulator and the implemented code with the programming language named R, which will define the commands to run, are the essential factors to develop the whole project.

The methodology to be followed consists of beginning the simulations with the *Aigua Elevada* model from *Aigües de Manresa* and gradually introducing new parameters to adjust the model. These parameters are the global consumption, the general flow generated from constant emission coefficients, which will be replaced by the weighing according to the length of the pipes, and finally the addition of the *dipòsit de la Culla*, an essential factor for adjusting the model significantly.

Once the pressure data curve from the model had been adjusted to the real pressure data curve with a relative error less than 1%, the simulation was carried out to show the scale of the leak, which was found to be approximately 4,34 l/s.

Finally, with the significantly adjusted model and knowing that the leak is 4,34 l/s, it has been located along a small area close to the node 188008 of the network, achieving the main objective.



# Índex

Agraïments .....	i
Resum .....	ii
Abstract .....	ii
Índex.....	iii
Índex de taules .....	iv
Índex de figures .....	v
1. Introducció .....	1
1.1 <i>Objecte</i> .....	1
1.2 <i>Abast</i> .....	1
1.3 <i>Requeriments</i> .....	2
1.4 <i>Justificació</i> .....	2
2 Antecedents.....	4
3 Materials i mètodes .....	5
3.1 <i>Eines</i> .....	5
3.2 <i>Dades</i> .....	6
3.3 <i>Fuites</i> .....	8
3.4 <i>Simulacions</i> .....	8
4 Desenvolupament de la solució o les solucions escollides.....	10
4.1 <i>Simulació inicial model aigua elevada</i> .....	10
4.2 <i>Introducció del consum global real</i> .....	14
4.3 <i>Introducció de fuites generals</i> .....	20
4.4 <i>Introducció dipòsit de la Culla i ponderació dels coeficients emissors</i> .....	27
4.5 <i>Cerca magnitud de la fuga puntual</i> .....	34
4.6 <i>Ajust del coeficient emissor</i> .....	36
4.7 <i>Cerca de la fuga puntual</i> .....	38
5 Resum del pressupost.....	41
6 Anàlisi i valoració de les implicacions ambientals i socials .....	42
7 Suggeriments per a una possible continuació del treball.....	43
8 Conclusions .....	44
9 Referències .....	45

## Índex de taules

Taula 1. Condicions de contorn. Simulació 1 (Elaboració pròpia).....	10
Taula 2. Errors Simulació 1 (Elaboració pròpia).....	14
Taula 3. Identificador corbes. Simulació 2 (Elaboració pròpia).....	15
Taula 4. Condicions de contorn – Normalització del consum (Elaboració pròpia).....	15
Taula 5. Errors Simulació 2 (Elaboració pròpia).....	19
Taula 6. Identificador corbes. Simulació 3 (Elaboració pròpia).....	20
Taula 7. Condicions de contorn. Simulació 3 (Elaboració pròpia).....	20
Taula 8. Errors Simulació 3 (Elaboració pròpia).....	25
Taula 9. Comparativa Errors. Simulació 3 (Elaboració pròpia).....	25
Taula 10. Cerca del valor constant. Simulació 4 (Elaboració pròpia).....	28
Taula 11. Identificador corbes. Simulació 4 (Elaboració pròpia).....	28
Taula 12. Condicions de contorn. Simulació 4 (Elaboració pròpia).....	29
Taula 13. Errors Simulació 4 (Elaboració pròpia).....	33
Taula 14. Comparativa Errors. Simulació 4 (Elaboració pròpia).....	33
Taula 15. Identificador corbes – Simulació 5 (Elaboració pròpia).....	34
Taula 16. Condicions de contorn. Simulació 5 (Elaboració pròpia).....	35
Taula 17. Condicions de contorn. Simulació 5 (Elaboració pròpia).....	36
Taula 18. Identificador corbes. Simulació 6 (Elaboració pròpia).....	36
Taula 19. Condicions de contorn. Simulació 6 (Elaboració pròpia).....	37
Taula 20. Ajust del coeficient emissor. Simulació 6 (Elaboració pròpia).....	37
Taula 21. Identificador corbes. Simulació 7 (Elaboració pròpia).....	38
Taula 22. Condicions de contorn. Simulació 7 (Elaboració pròpia).....	38
Taula 23. Comparació dels errors mitjans en les corbes de pressió (Elaboració pròpia).....	40
Taula 24. Pressupost total (Elaboració pròpia).....	41
Taula 25. Emissions de CO <sub>2</sub> (Elaboració pròpia).....	42
Taula 26. Reducció de CO <sub>2</sub> (Elaboració pròpia).....	42

## Índex de figures

Figura 1. Model d'aigua elevada de Manresa Ciutat (Aigües de Manresa).....	7
Figura 2. Comparació corbes de pressió del node 518. Simulació 1 (Elaboració pròpia).....	11
Figura 3. Diferència de les corbes de pressió del node 518. Simulació 1 (Elaboració pròpia) .....	11
Figura 4. Error relatiu de les corbes de pressió del node 518. Simulació 1 (Elaboració pròpia). ....	11
Figura 5. Comparació corbes de pressió del node 188008. Simulació 1 (Elaboració pròpia).....	12
Figura 6. Diferència de les corbes de pressió del node 188008. Simulació 1 (Elaboració pròpia). 12	
Figura 7. Error relatiu de les corbes de pressió del node 188008. Simulació 1 (Elaboració pròpia)12	
Figura 8. Comparació corbes de pressió del node 235846. Simulació 1 (Elaboració pròpia).....	13
Figura 9. Diferència de les corbes de pressió del node 235846. Simulació 1 (Elaboració pròpia). 13	
Figura 10. Error relatiu de les corbes de pressió del node 235846. Simulació 1 (Elaboració pròpia). .....	13
Figura 11. Comparació corbes de pressió del node 518. Simulació 2 (Elaboració pròpia) .....	16
Figura 12. Diferència de les corbes de pressió del node 518. Simulació 2 (Elaboració pròpia) ....	16
Figura 13. Error relatiu de les corbes de pressió del node 518. Simulació 2 (Elaboració pròpia) ...	16
Figura 14. Comparació corbes de pressió del node 188008. Simulació 2 (Elaboració pròpia).....	17
Figura 15. Diferència de les corbes de pressió del node 188008. Simulació 2 (Elaboració pròpia) 17	
Figura 16. Error relatiu de les corbes de pressió del node 188008. Simulació 2 (Elaboració pròpia) .....	17
Figura 17. Comparació corbes de pressió del node 235846. Simulació 2 (Elaboració pròpia).....	18
Figura 18. Diferència de les corbes de pressió del node 235846. Simulació 2 (Elaboració pròpia) 18	
Figura 19. Error relatiu de les corbes de pressió del node 235846. Simulació 2 (Elaboració pròpia) .....	18
Figura 20. Comparació corbes de pressió del node 518. Simulació 3 (Elaboració pròpia).....	22
Figura 21. Diferència de les corbes de pressió del node 518. Simulació 3 (Elaboració pròpia) ....	22
Figura 22. Error relatiu de les corbes de pressió del node 518. Simulació 3 (Elaboració pròpia) ...	22
Figura 23. Comparació corbes de pressió del node 188008. Simulació 3 (Elaboració pròpia).....	23
Figura 24. Diferència de les corbes de pressió del node 188008. Simulació 3 (Elaboració pròpia) 23	
Figura 25. Error relatiu de les corbes de pressió del node 188008. Simulació 3 (Elaboració pròpia) .....	23
Figura 26. Comparació corbes de pressió del node 235846. Simulació 3 (Elaboració pròpia).....	24
Figura 27. Diferència de les corbes de pressió del node 235846. Simulació 3 (Elaboració pròpia) .....	24
Figura 28. Error relatiu de les corbes de pressió del node 235846. Simulació 3 (Elaboració pròpia) .....	24
Figura 29. Definició dels intervals de la figura 23 (Elaboració pròpia).....	25
Figura 30. Baixades de pressió figura 23 (Elaboració pròpia) .....	26
Figura 31. Entrada del dipòsit de la Culla controlat per dues vàlvules (Aigües de Manresa) .....	26
Figura 32. Model d'aigua elevada de Manresa. Visualització del dipòsit de la Culla (Aigües de Manresa) .....	27
Figura 33. Modificació del .inp per afegir noves corbes (Elaboració pròpia) .....	29
Figura 34. Comparació corbes de pressió del node 518. Simulació 4 (Elaboració pròpia).....	30
Figura 35. Diferència de les corbes de pressió del node 518. Simulació 4 (Elaboració pròpia) ....	30
Figura 36. Error relatiu de les corbes de pressió del node 518. Simulació 4 (Elaboració pròpia) ...	30
Figura 37. Comparació corbes de pressió del node 188008. Simulació 4 (Elaboració pròpia).....	31
Figura 38. Diferència de les corbes de pressió del node 188008. Simulació 4 (Elaboració pròpia) 31	
Figura 39. Error relatiu de les corbes de pressió del node 188008. Simulació 4 (Elaboració pròpia) .....	31

Figura 40. Comparació corbes de pressió del node 235846. Simulació 4 (Elaboració pròpia).....	32
Figura 41. Diferència de les corbes de pressió del node 235846. Simulació 4 (Elaboració pròpia)	32
Figura 42. Error relatiu de les corbes de pressió del node 235846. Simulació 4 (Elaboració pròpia) .....	32
Figura 43. Exemple variació dels nodes del dipòsit de la fuga. Simulació 5 (Elaboració pròpia) ....	34
Figura 44. Modificació del .inp per afegir corba de la fuga. Simulació 5 (Elaboració pròpia) .....	35
Figura 45. Modificació de la sortida del report. Simulació 7 (Elaboració pròpia) .....	39
Figura 46. Escala de grisos de l'error mitja de les corbes de pressió. Simulació 7 (Elaboració pròpia) .....	39
Figura 47. Mapa de colors segons l'error mitja de les corbes de pressió. Simulació 7 (Elaboració pròpia) .....	40





# 1. Introducció

## 1.1 Objecte

L'objectiu principal d'aquest projecte és crear una eina que sigui capaç de detectar i localitzar fuites en una xarxa d'aigua potable.

La detecció i localització de fuites se cerca a partir del desenvolupament i ajust de models hidràulics definits per les dades de pressió i cabal de la xarxa d'aigua potable.

Per una banda, utilitzem *Epanet* per a definir el model hidràulic inicial i per portar a terme les simulacions a nivell hidràulic i per l'altra banda, programem amb *R* per a modificar les condicions de contorn, simular i extreure les dades del model hidràulic. En altres paraules, podríem dir que *Epanet* és el motor de simulació hidràulic i el codi desenvolupat en *R* les ordres a executar.

Aquest projecte se centrarà en la xarxa d'aigua elevada de Manresa.

## 1.2 Abast

El treball es divideix en diverses tasques i activitats per tal d'aconseguir l'objectiu final.

1. Ingesta i tractament de dades.  
Inicialment, és necessari conèixer totes aquelles dades utilitzades al llarg de l'estudi proporcionades per Aigües de Manresa.
2. Simulació del model hidràulic.  
A partir de les dades se simularà el model hidràulic construït equivalent a la xarxa de Manresa. Per tal de realitzar aquestes simulacions es farà servir *Rstudio*, que a partir de la *Toolkit epanet2toolkit* i *epanetReader* es podrà executar el model construït a *EPANET* i analitzar els resultats.
3. Plantejament del problema.  
Coneixem que la xarxa d'aigua potable de Manresa té un rendiment aproximat del 80%, de forma que el 20% restant són pèrdues distribuïdes al llarg de la infraestructura.
4. Modelització i programació.  
Mitjançant el llenguatge de programació *R*, modelitzarem la xarxa d'aigua fins a detectar una zona on es puguin localitzar les fuites.
5. Presentació dels resultats.  
La majoria dels resultats es presentaran mitjançant gràfiques comparatives entre les dades del model i les dades reals.
6. Redacció de la memòria.  
Paral·lelament a la resta de tasques es redactarà la memòria per a presentar i defensar el projecte.

### 1.3 Requeriments

Per tal de culminar el projecte en la seva fase final existeixen una sèrie de restriccions y especificacions bàsiques les quals són completament necessàries.

1. Model hidràulic amb l'extensió *.inp* compatible amb *Epanet* de la xarxa d'aigua potable de Manresa.
2. Corbes de dades reals de pressió i cabal crítiques per a poder portar a terme les simulacions.
3. El desenvolupament continu del codi fins a la localització de la fuita.
4. Informes de les simulacions.
5. Memòria final documentant tot el projecte.

Els dos programes informàtics utilitzats son el *EPANET 2.2* per tal de portar a terme les simulacions a nivell hidràulic i *Rstudio* per tal d'implementar el codi i fer la simulació global que executa l'*EPANET*, obté i gestiona totes les dades.

Per acabar de resumir i aclarir l'anterior paràgraf, *Rstudio* és el *software* amb el qual s'escriurà tot el codi. A partir d'aquest codi i mitjançant les llibreries que s'especificaran a continuació s'obrirà i s'executarà de forma automàtica el motor d'*EPANET*, aconseguim les dades que desitgem, tanquem *EPANET* i tractem aquestes dades que finalment es guardaran, tot amb el codi desenvolupat a *Rstudio*.

Les principals llibreries que s'usaran són les següents:

1. *Epanet2toolkit*. Permet fer ús de l'entorn *Epanet* a partir de *R*.
2. *EpanetReader*. Permet llegir els resultats simulats per *Epanet*.
3. *Ggplot2*. Permet crear gràfics.
4. *Readr*. Permet importar i exportar dades des de *R*.
5. *GridExtra*. Permet dibuixar taules

### 1.4 Justificació

Gairebé totes les cases (1r món) compten amb aigua corrent, ja no només com a privilegi, sinó com a necessitat. Per poder fer tot això possible ha d'existir una xarxa d'aigua potable que pugui cobrir totes i cadascuna de les demandes dels usuaris.

Aquestes xarxes ja estan instal·lades i a priori distribueixen correctament l'aigua. El problema és que l'envelliment de la instal·lació o moviments del terreny poden provocar fuites al llarg de les xarxes d'aigua. A causa d'aquestes fuites és necessari poder-les localitzar amb precisió per tal de poder arreglar-les al més aviat possible. Així doncs, neix la necessitat de realitzar un programa que de forma automàtica trobi aquestes fuites.

Tot i que aquest programa està pensat per a que es pugui utilitzar per a qualsevol xarxa d'aigua modelada mitjançant *Epanet* ens centrarem i treballarem a partir de la xarxa d'aigua elevada de Manresa, de la qual es coneix que hi ha un 20% en pèrdues comparant l'aigua subministrada amb l'aigua que arriba al final de la xarxa.

Aquest treball, anomenat "Estudi i modelització d'una xarxa d'aigua potable per a la localització de fuites", és la continuació d'un treball anterior anomenat "Estudi i modelització d'una xarxa d'aigua potable per a la seva millor gestió", portat a cap pel Sr. Victor Lobato Torres amb el Sr. Ramon Perez Magrane i el Sr. Sergi Grau Torrent com a director i codirector del treball. La diferència d'aquest projecte respecte de l'anterior és treballar a



partir d'establir una sèrie d'hipòtesis prèviament definides amb les quals es simularà el sistema per tal de trobar les fuites introduint variacions independents a cada node dels factors emissors.

El principal avantatge és que aquest cop es treballarà cada node de forma independent seguint una certa relació entre ells i els paràmetres físics. De forma que la precisió a l'hora de trobar aquesta fuga hauria de ser molt més alta.

## 2 Antecedents

El present projecte parteix de l'antecedent treball anomenat "Estudi i modelització d'una xarxa d'aigua potable per a la seva millor gestió" amb la referència [2].

L'objectiu del treball era el control i l'optimització del model hidràulic d'Aigües de Manresa a partir de l'ajust dels coeficients emissors mitjançant algoritmes genètics.

Per a portar a terme els objectius es va utilitzar *Epanet* per a les simulacions sobre el comportament hidràulic conjuntament amb el llenguatge de programació *R* a partir del programa *Rstudio* i *Rcomander*.

El treball se centra principalment en l'estudi i caracterització de la xarxa, en concret, sobre la distribució d'aigua, els tancs, les diferents canonades d'aigua tenint en compte la seva llargària, materials i edats així com de les vàlvules i bombes a més a més de les pèrdues de càrrega.

Un cop finalitzat l'estudi de la xarxa es manipula el valor dels coeficients emissors portant a terme tres escenaris diferents. En primer lloc, el mètode equi-repartit en què tracta tots els coeficients emissors amb el mateix valor, en segon lloc, el mètode longituds on tracta els coeficients emissors en funció de les longituds de les canonades i, en tercer lloc, el mètode de ponderació per probabilitat de trencament. Una vegada simulats tots tres escenaris es comparen les seves corbes de pressió amb les corbes de pressió reals resultant uns errors mitjans massa elevats en superar el metre per columna d'aigua.

Per solucionar el problema en què l'error mitjà és massa elevat, es planteja el desenvolupament d'algoritmes genètics a partir de 5 mètodes implementats en un algoritme de simulació. Un cop portada a terme la simulació de l'algoritme d'optimització els valors s'ajusten més, però amb un tipus d'error en què no es pot definir si es tracta d'una fuga o bé d'un altre problema de la xarxa.

A causa d'això, neix la necessitat de dur a terme aquest nou projecte específic per al control de la xarxa i la cerca de fuites.

## 3 Materials i mètodes

En aquest apartat es descriurà les eines informàtiques, les dades proporcionades, el tractament de les fuites i la metodologia de les simulacions que es portaran a terme.

### 3.1 Eines

#### Epanet

*Epanet* és un programa lliure que permet estudiar i analitzar la distribució d'aigua a través de canonades en funció del temps. Per al nostre estudi, aquest serà el principal motor de simulació del model a estudiar.

#### R Studio i R

*R Studio* és el programa utilitzat per escriure el codi mitjançant el llenguatge de programació conegut com a *R*, elaborat per a l'anàlisi de dades. *R* compta amb llibreries de funcions per a la manipulació del programa *Epanet* com ara *epanet2toolkit*, per a la lectura de les dades processades mitjançant *Epanet* com és *epanetreader* i per a la visualització de dades com *ggplot2*. S'han fet ús les referències [5], [6] i [8] per a poder realitzar la totalitat del codi.

#### Epanet2toolkit

*Epanet2toolkit* és una llibreria de *R* que permet manipular tot l'entorn del model hidràulic d'*Epanet* i s'utilitza al llarg del treball. Les funcions d'aquesta llibreria accedeixen a *Epanet* per tal de simular el sistema hidràulic, generar informes de dades, visualitzar i modificar les condicions de contorn [3].

#### Epanetreader

*Epanetreader* és una llibreria de *R* que permet accedir a la xarxa de simulació i dels informes, les extensions són *.inp* i *.rpt* respectivament.

Accedir a les dades del informe es altament rellevant, si únicament fem servir la llibreria anterior, *epanet2toolkit*, només podrem accedir a la primera o l'última dada de la simulació, en canvi, l'informe generat conté informació al llarg del temps (prèviament s'ha de definir la freqüència, com per exemple cada 5 minuts de simulació) i es pot llegir amb aquesta funció obtenint corbes de dades per a cadascun dels paràmetres [16].

### 3.2 Dades

Les següents dades han sigut proporcionades per Aigües de Manresa.

#### Model hidràulic Aigua Elevada

El model hidràulic d'*Aigua Elevada* correspon a la xarxa d'aigua potable de Manresa ciutat. El model està definit per un tanc d'aigua que alimenta a tota la xarxa a partir de nodes, connectats per canonades.

Les canonades s'encarreguen de desplaçar el cabal d'aigua corresponent de node a node, és molt important tenir en compte que aquest model treballa sota les demandes particulars de cada node definides prèviament en el model, així doncs el tanc d'aigua proporcionarà l'aigua suficient per a cobrir totes i cadascuna de les demandes, incloent-hi les fuites introduïdes prèviament definides en cada node.

Tant els nodes com les canonades estan definits per les següents propietats principals, totes elles poden ser modificades mitjançant la llibreria epanet2toolkit.

Per a les canonades:

1. Diàmetre [m].
2. Longitud [m].
3. Coeficient de rugositat.
4. Coeficient de pèrdues menors.
5. Estat de la canonada, obert o tancat.

Per als nodes:

1. Elevació respecte al nivell del mar [m].
2. Demanda base [L/s]
3. Corba variable en funció del temps (producte de la demanda base).
4. Coeficient emissor.
5. Coordenades.

Tots aquests paràmetres definiran el comportament del model i cada canonada i node és independent.

Dins de la xarxa d'aigua elevada real hi ha tres nodes que compten amb un sensor de pressió d'una resolució d'un centímetre, d'aquesta forma podrem comparar les corbes de pressió del model i de la realitat. Aquests nodes s'identifiquen com el node 518, 188008 i 235846.

En tot moment, l'objectiu serà crear un model en què la corba de pressió per a aquests tres nodes sigui el més similar possible a la corba de pressió real. La corba de pressió serà modificada per les fuites, ja que les demandes dels abonats (consum) és el mateix, per tant, estem buscant un model, en què les fuites aproximïn la corba de pressió a la realitat. Estimem que per a trobar aquest model haurem de situar alguna o algunes fuites puntuals al llarg de la xarxa trobant un node o una zona en particular on se situaria la fuga.

El model d'aigua elevada és el següent:



*Figura 1. Model d'aigua elevada de Manresa Ciutat (Aigües de Manresa)*

Cada un dels nodes està situat estratègicament, ja que són punts sensibles a les variacions properes en les seves zones.

Aquests nodes compten amb un sensor de pressió que es va distribuir de forma òptima en un treball previ, seguint la metodologia de la referència [1].

### Sèries temporals de dades reals

Per simular el model correctament farem ús d'una sèrie de corbes de dades que varien en funció del temps i així executar el codi i comparar el resultat mitjançant dades reals.

Les dades que introduïrem al model seran el consum total dels abonats de la xarxa en l/s, i el nivell d'elevació del dipòsit d'aigua en metres per a 24 h.

Les dades emprades per comparar els resultats seran el cabal total que surt del dipòsit en l/s, i les corbes de pressió per als nodes 518, 188008 i 235846 en metres per a 24 h.

Aquestes dades són extretes d'un dia sense valors anòmals i el comportament resultant és estable i previsible.

### 3.3 Fuites

La xarxa d'aigua potable de Manresa té unes pèrdues d'aproximadament un 20%, això es coneix, ja que el cabal total dels abonats és inferior al cabal total que surt del tanc d'aigua, tota aquesta aigua perduda es tradueix en fuites.

Dividirem les fuites en dues tipologies diferents, fuites generals i fuites puntuals. Considerarem que el cabal total que surt del tanc d'aigua és el sumatori del cabal d'aigua que han consumit els abonats, les fuites generals i les fuites puntuals.

#### Fuites generals

Anomenarem fuites generals totes aquelles petites fuites, menys d'un 0,001% del consum total, que es reparteixen d'una forma semblant al llarg de tots els nodes del model.

Aquestes fuites poden variar en funció del coeficient emissor assignat i de la pressió a cada node, com més alt sigui el valor del coeficient emissor i de la pressió, més alt serà la magnitud de la fuita general.

#### Fuites puntuals

Anomenarem fuites puntuals aquelles fuites significatives que es troben en el model en un únic node seleccionat. Aquestes fuites es modelaran com a una nova demanda del node.

Un cop coneixem les eines a utilitzar, les dades necessàries i la forma de modelar les fuites plantejarem la metodologia a seguir simulació a simulació amb el seu ordre a seguir.

### 3.4 Simulacions

A partir de les simulacions es vol detectar i localitzar fuites en el mateix temps que se supervisa tota la xarxa en general.

Per fer això partirem d'una simulació molt senzilla la qual anirà evolucionant en funció dels resultats per a que cada cop el model s'ajusti més. Donat el cas, s'introduiran fuites generals i si n'hi ha alguna de puntual localitzant-la el millor possible.

Tot i que els resultats de cada simulació definiran el proper pas, aquí enumerarem els passos que al final s'han seguit en el treball per a donar una idea global de com s'ha procedit per ajustar les pressions del model amb les mesures. Cada pas, excepte els assenyalats són acumulatius.

1. Simulació inicial o prèvia: Començarem el treball portant a terme una simulació del model que proporciona Aigües de Manresa, únicament introduïrem la corba real que defineix l'alçada del tanc d'aigua, en cap moment modelitzarem les fuites. Analtzarem els resultats per tal de verificar que totes les eines esmentades anteriorment funcionen correctament i que les dades no presenten cap anomalia visible.



2. Introducció del consum global real: El consum del model es determina a partir de la demanda base assignada a cada node, subministrada per la companyia a partir de les lectures trimestrals dels comptadors. Com que estem treballant per a un dia concret normalitzarem aquest consum base a partir de la corba de consum real dels abonats. Això també facilitaria que en el cas de variar el dia de la simulació, únicament hauríem de tornar a normalitzar els valors utilitzant la corba de consum dels abonats.
3. Introducció de fuites generals: Introduïrem fuites generals a tots els nodes aplicant el mateix coeficient emissor amb l'objectiu d'ajustar el rendiment de la xarxa.
4. Ponderació dels coeficients emissors: Els coeficients emissors es ponderaran en funció de les longituds de les canonades associades a cada node, de forma que a major longitud, major serà el coeficient emissor. Aquest criteri es porta a terme, ja que les canonades més llargues tenen una major probabilitat de trencar i tenir fuites. Hem de recordar que en tot moment.
5. Introducció dipòsit de la culla: Un cop arribat a aquest punt ens adonem de què el model està incomplet a causa d'uns valors anòmals de la corba de pressió. Per completar el model introduïrem el dipòsit de la culla, el qual xucla una gran quantitat d'aigua de la xarxa, aproximadament 140 l/s, durant uns intervals de temps definits.
6. Cerca magnitud de la fuga puntual: Per a aquesta simulació en concret, abans d'entrar en detall en el codi introduïrem al model d'aigua elevada d'*Epanet* un nou tanc d'aigua i una canonada d'un metre que sortirà d'aquest i anirà a parar a un node qualsevol.

Farem tres simulacions independents, en la primera, connectarem el nou tanc d'aigua amb el node 518, a la segona al node 188008 i a la tercera al node 235846. A més a més, utilitzarem la corba de pressions reals per a cada un dels nodes per a que la corba de pressió del model sigui la mateixa a la real i així obtenir la magnitud de la fuga, també haurem d'interpretar si aquest tanc d'aigua aportarà aigua a la xarxa o bé en consumirà.

7. Ajust del coeficient emissor: Partint de la simulació quatre, afegirem la fuga puntual al node que correspongui i reajustarem els coeficients emissors, ja que el cabal total de fuga ha de ser constant, si afegim una fuga puntual hem de reduir les fuites generals.
8. Cerca de la fuga puntual: Un cop coneixem la magnitud de la fuga i hem ajustat de nou el coeficient emissor portarem a terme una simulació completa de 24 h distribuïnt la fuga puntual per tots els nodes del model. En cada simulació es calcularà l'error mitjà de les tres corbes de pressió si comparem el model amb la realitat, de forma que cada node tindrà associat un error. Un cop finalitzada la simulació crearem un mapa de grisos de tota la xarxa per tal de localitzar una possible fuga puntual.

## 4 Desenvolupament de la solució o les solucions escollides

A continuació desenvoluparem el procediment de cada simulació i les pròximes accions realitzades per a poder localitzar la fuga. Com a guió principal, seguirem els passos de l'apartat anterior on es defineix quines simulacions es portaran a terme.

És important avançar pas per pas per a poder analitzar correctament la influència de cada paràmetre i controlar l'aparició d'anomalies en les corbes de dades a analitzar.

### 4.1 Simulació inicial model aigua elevada

Començarem el treball simulant el model d'aigua elevada introduint la corba real que defineix l'alçada del tanc d'aigua que alimenta a tota la xarxa. Cap altra dada serà introduïda o modificada, de forma que no hi haurà cap mena de fuga en el model ni variació de les demandes al llarg del dia.

#### Condicions de contorn

Totes les condicions de contorn es controlen mitjançant codi, les excepcions estaran assenyalades amb el fons de color blau i s'explicaran en més detall.

Condicció de contorn	Aplicació
Codi / Simulació base	Cap, aquesta és la inicial
Modificacions en l'arxiu d' <i>Epanet .inp</i>	NO
Introducció corba real. Alçada de l'aigua del tanc [m].	Si
Introducció corba real per a la normalització del consum dels abonats. Consum dels abonats [l/s].	NO
Fuites generals	NO
Fuites puntuals	NO

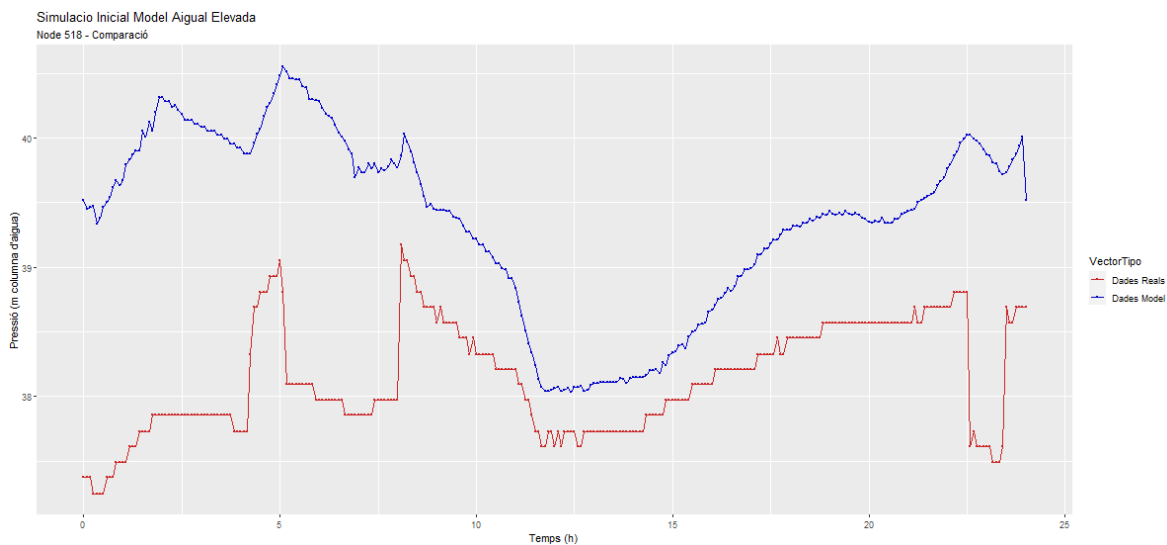
Taula 1. Condicions de contorn. Simulació 1 (Elaboració pròpia)

#### Codi

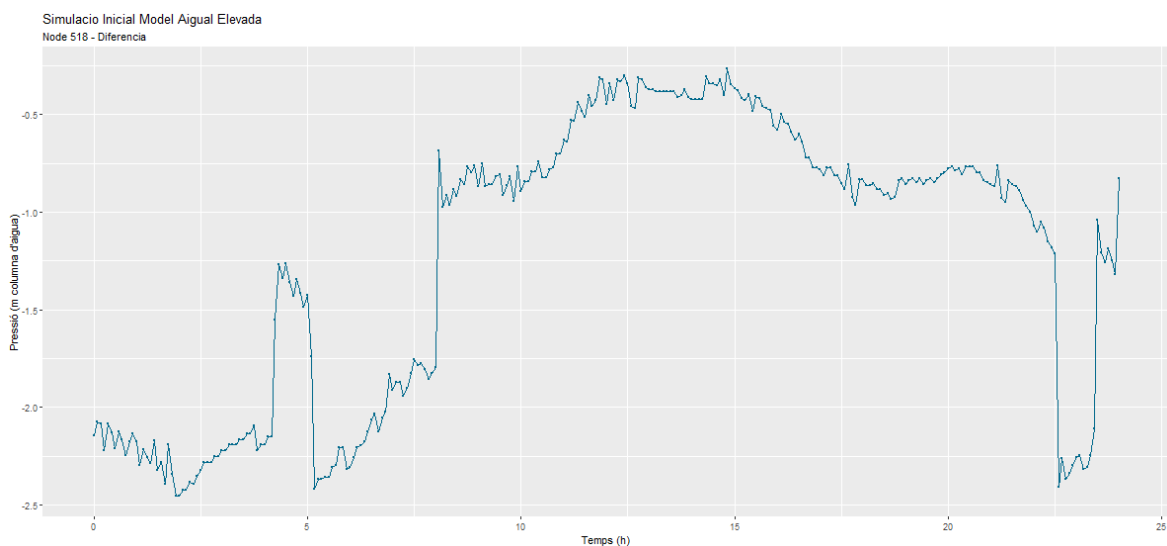
El codi complet i detallat es pot trobar en els annexes (Annex I).

#### Resultats

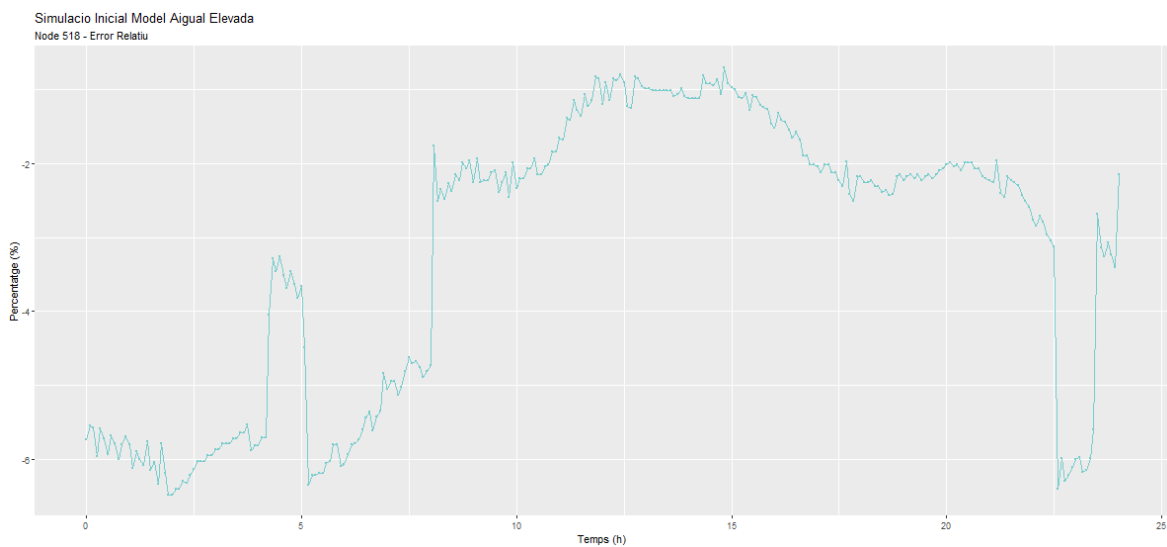
Interpretar correctament els resultats té una gran importància, per això sempre es farà la gràfica de la corba simulada amb la real. També es visualitzarà la diferència i l'error relatiu.



**Figura 2. Comparació corbes de pressió del node 518. Simulació 1 (Elaboració pròpia)**



**Figura 3. Diferència de les corbes de pressió del node 518. Simulació 1 (Elaboració pròpia)**



**Figura 4. Error relatiu de les corbes de pressió del node 518. Simulació 1 (Elaboració pròpia).**

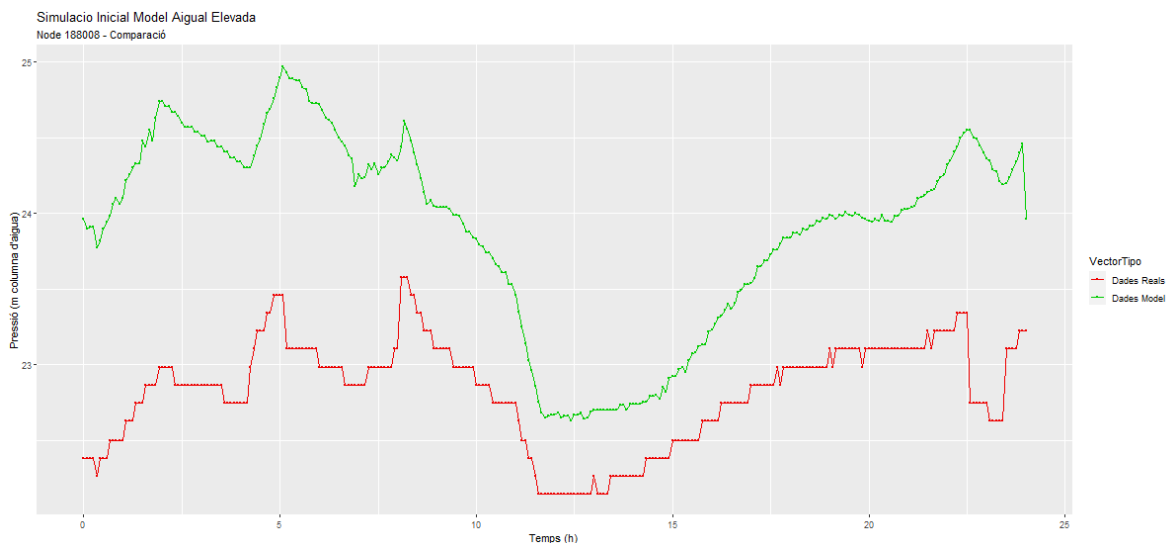


Figura 5. Comparació corbes de pressió del node 188008. Simulació 1 (Elaboració pròpia)

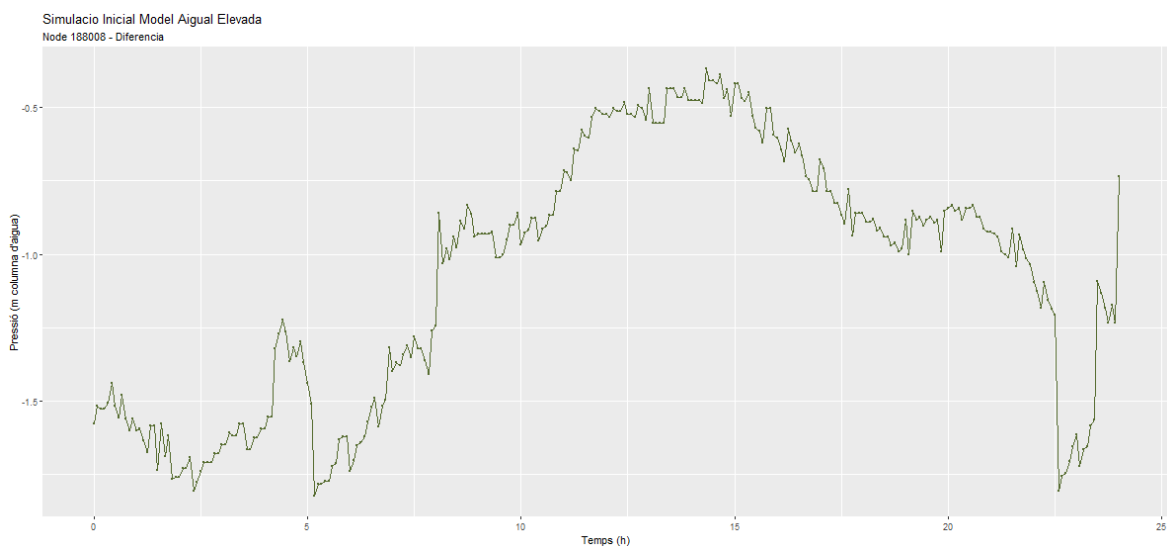


Figura 6. Diferència de les corbes de pressió del node 188008. Simulació 1 (Elaboració pròpia).

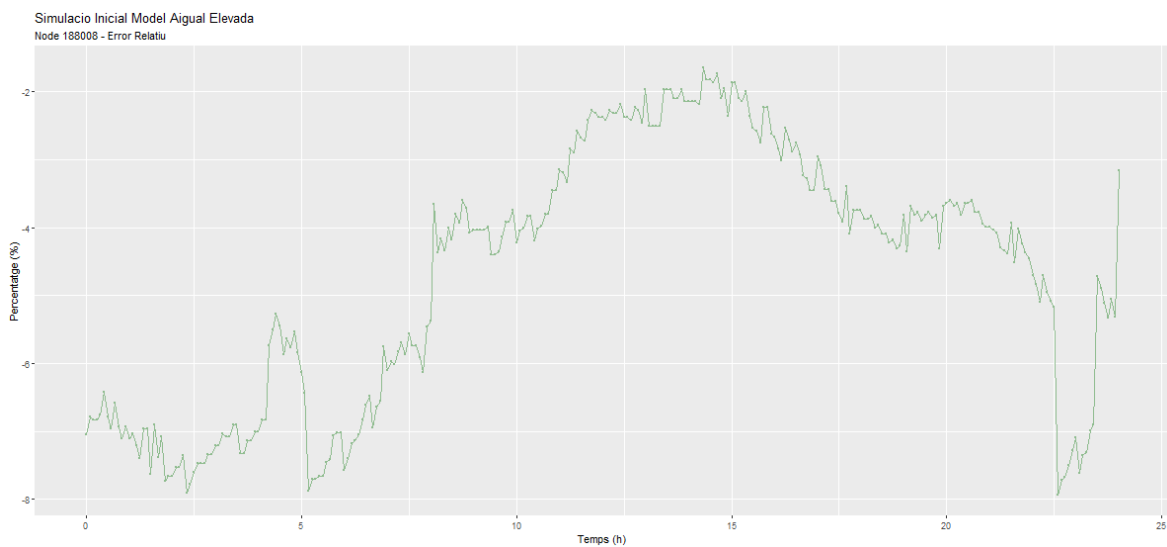
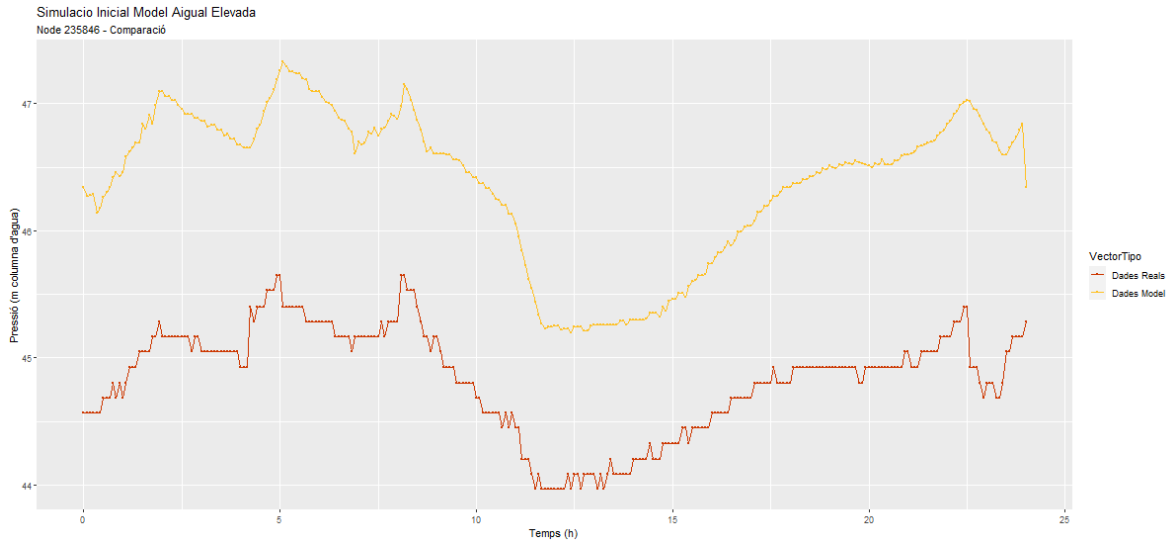
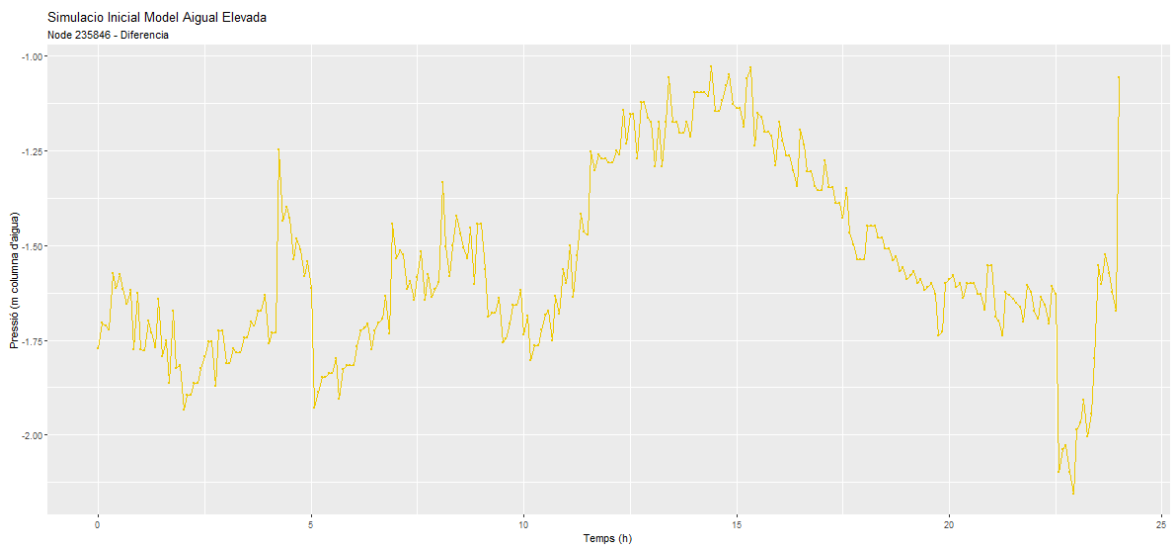


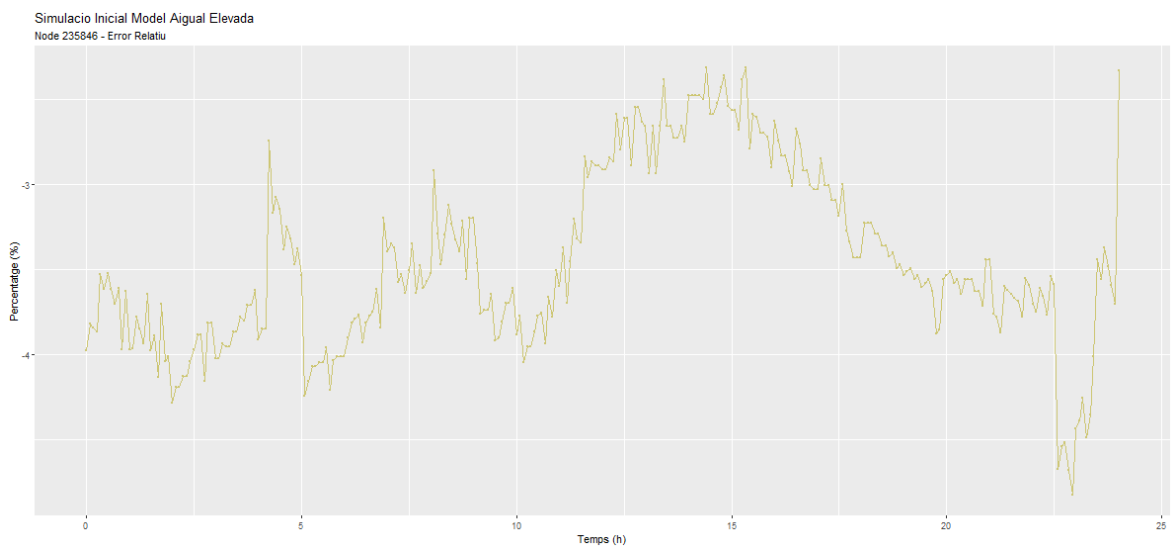
Figura 7. Error relatiu de les corbes de pressió del node 188008. Simulació 1 (Elaboració pròpia)



**Figura 8.** Comparació corbes de pressió del node 235846. Simulació 1 (Elaboració pròpia)



**Figura 9.** Diferència de les corbes de pressió del node 235846. Simulació 1 (Elaboració pròpia).



**Figura 10.** Error relatiu de les corbes de pressió del node 235846. Simulació 1 (Elaboració pròpia).

Taula dels errors mitjans

Error Mitjà en 24 h	Valor
Pressió Node 518	1,228595 m
Pressió Node 188008	1,073924 m
Pressió Node 235846	1,549332 m
Mitjana dels nodes	1,283950 m

Taula 2. Errors Simulació 1 (Elaboració pròpia)

Tots tres nodes compten amb corbes de pressió similars a les reals, amb un error mitjà d'aproximadament 1,3 metres. Tot i que les corbes són similars podem veure que des de les 0 h fins a aproximadament les 8 h apareixen dos intervals amb diferències més grans que les anteriors, amb errors relatius propers al 8%, en aquest punt no es considerarà com a anomalia, ja que falta introduir diferents paràmetres, de forma que a les pròximes simulacions podrem obtenir millors conclusions.

Com hem dit, les corbes de pressió per a tots tres nodes són similars, sense veure grans anomalies, perquè encara hem de fer bastants ajusts, a més a més té sentit que en tots tres nodes, la pressió sigui major a la real, puix que no hem introduït cap fuga. En introduir fuites, el cabal d'entrada serà més gran del que fins ara hem simulat fent baixar les pressions i ajustant-se així a les corbes reals.

Com que els resultats no són dolents, el pròxim pas serà la introducció de la demanda global real, de forma que haurem de normalitzar el cabal a partir de les demandes base per a aconseguir un patró.

## 4.2 Introducció del consum global real

Normalitzem la corba de cabal per convertir-la en patró a partir de la corba real de consum dels abonats per al dia concret en què executem la simulació. Per a fer això, dividirem cada instant de temps en què coneixem la dada real de consum pel sumatori de demandes base del model d'*Epanet* ja introduït.

$$\text{Corba Consum Normalitzat } [i] = \frac{\text{Corba Consum Real dels Abonats } [i]}{\sum \text{Demandes base}}$$

Com podem veure, en aquest cas hem d'introduir dues corbes a *Epanet*, per una banda, la corba de consum normalitzat i, per altra banda, l'alçada del tanc d'aigua. Aquesta acció ha d'estar totalment controlada, ja que cada corba tindrà assignat un identificador el qual s'utilitzarà per afegir la informació.

### Identificador de les corbes d'Epanet

Corba	Identificador
Corba Consum Normalitzat	1
Corba Alçada del Tanc d'Aigua	2

Taula 3. Identificador corbes. Simulació 2 (Elaboració pròpia)

Aquestes corbes són les que defineixen la variació en funció del temps del paràmetre vinculat. Per exemple, en afegir la corba de consum normalitzat estem explicant al valor de la demanda base com ha de variar en el temps, cada paràmetre es té en compte cada 5 minuts de simulació.

### Condicions de contorn

Condicció de contorn	Aplicació
Codi / Simulació base	Simulació Inicial Model Aigua Elevada
Modificacions en l'arxiu d'Epanet .inp	NO
Introducció corba real. Alçada de l'aigua del tanc [m]	SI
Introducció corba real per a la normalització del consum dels abonats. Consum dels abonats [l/s].	SI
Fuites generals	NO
Fuites puntuals	NO

Taula 4. Condicions de contorn – Normalització del consum (Elaboració pròpia)

### Codi

El codi complet i detallat es pot trobar en els annexes (Annex II). És important tenir en compte que hem d'afegir les corbes de dades reals abans de simular el model d'Epanet i que hem de passar totes les dades de cabal a l/s.

### Resultats

Es visualitzarà la gràfica comparativa de la corba simulada amb la real, la diferència i l'error relatiu a més a més de discutir els resultats.

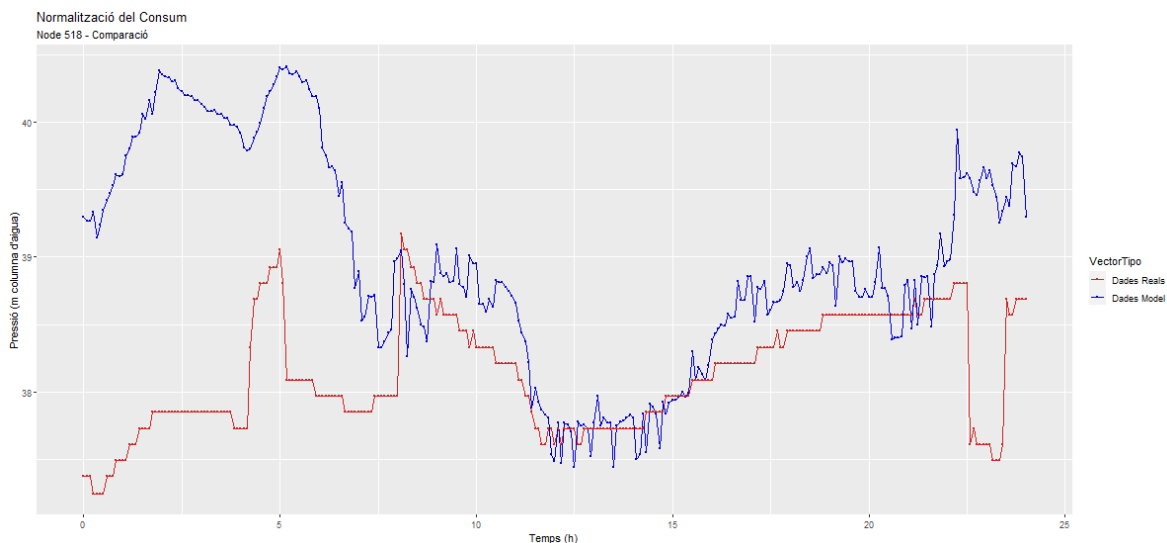


Figura 11. Comparació corbes de pressió del node 518. Simulació 2 (Elaboració pròpia)

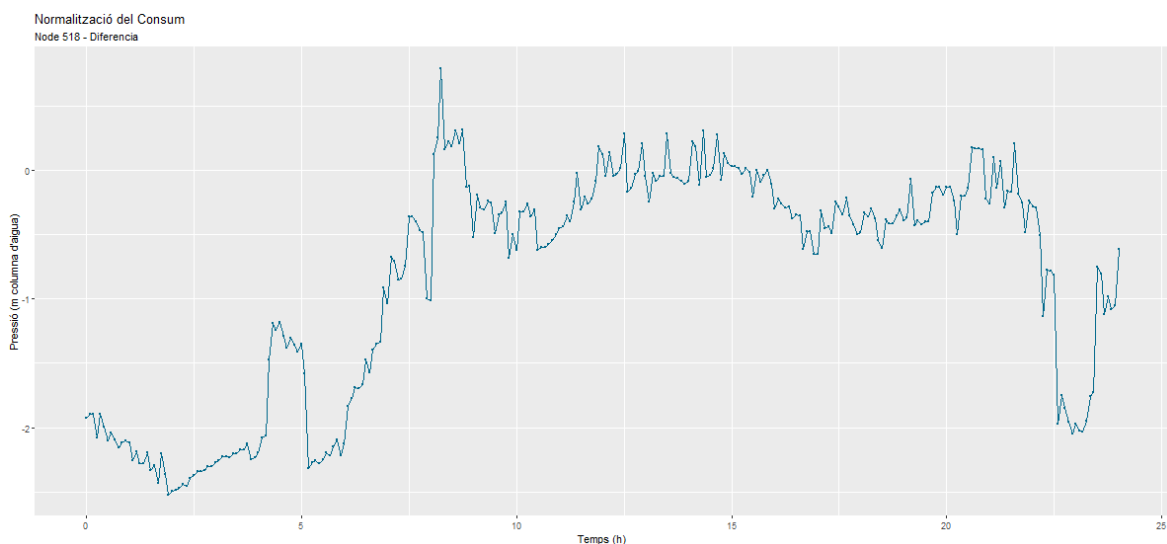


Figura 12. Diferència de les corbes de pressió del node 518. Simulació 2 (Elaboració pròpia)

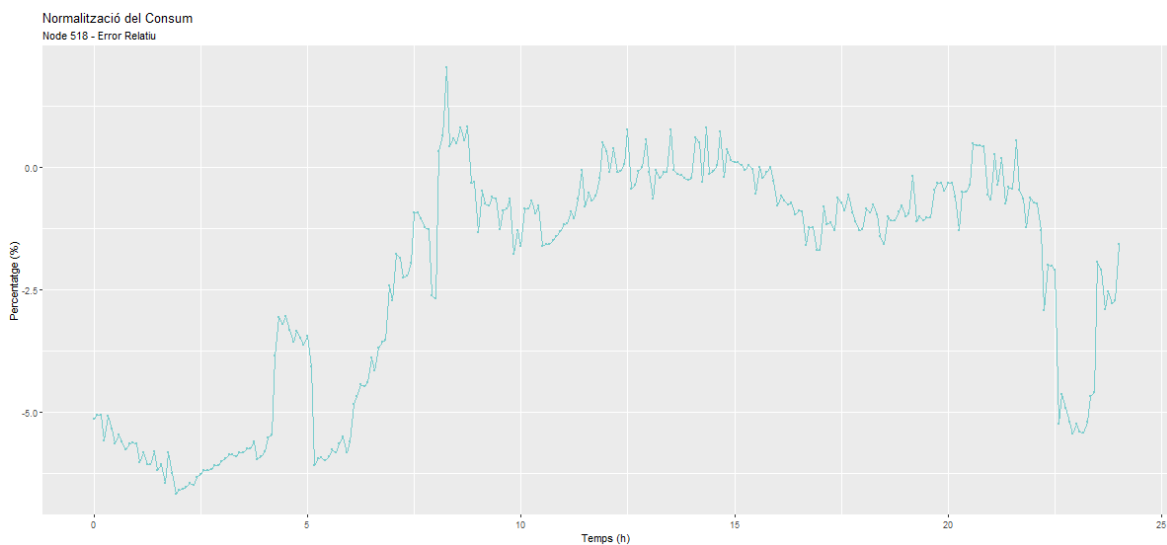


Figura 13. Error relatiu de les corbes de pressió del node 518. Simulació 2 (Elaboració pròpia)



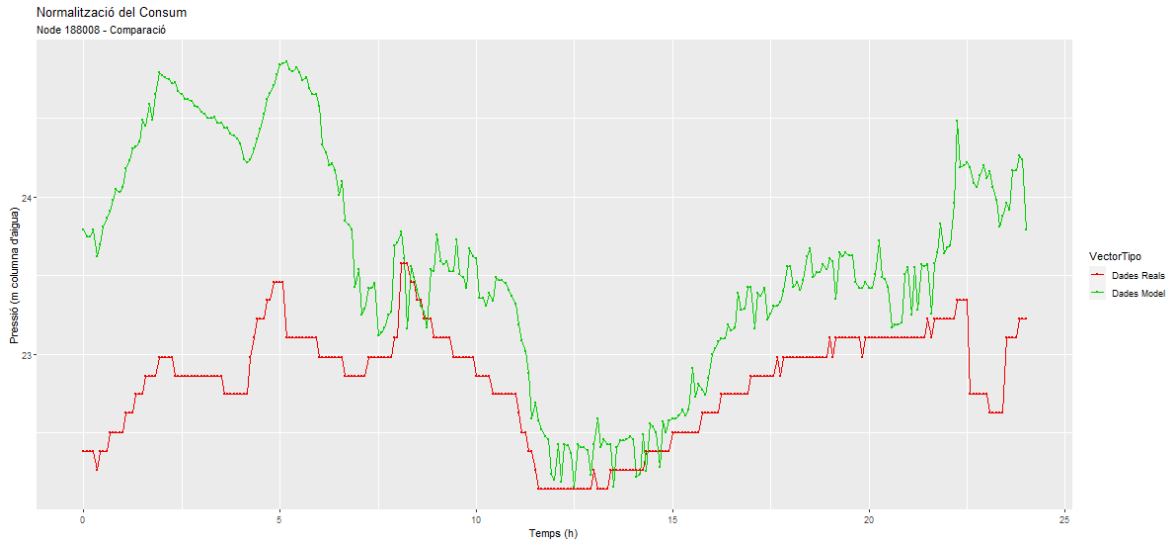


Figura 14. Comparació corbes de pressió del node 188008. Simulació 2 (Elaboració pròpia)

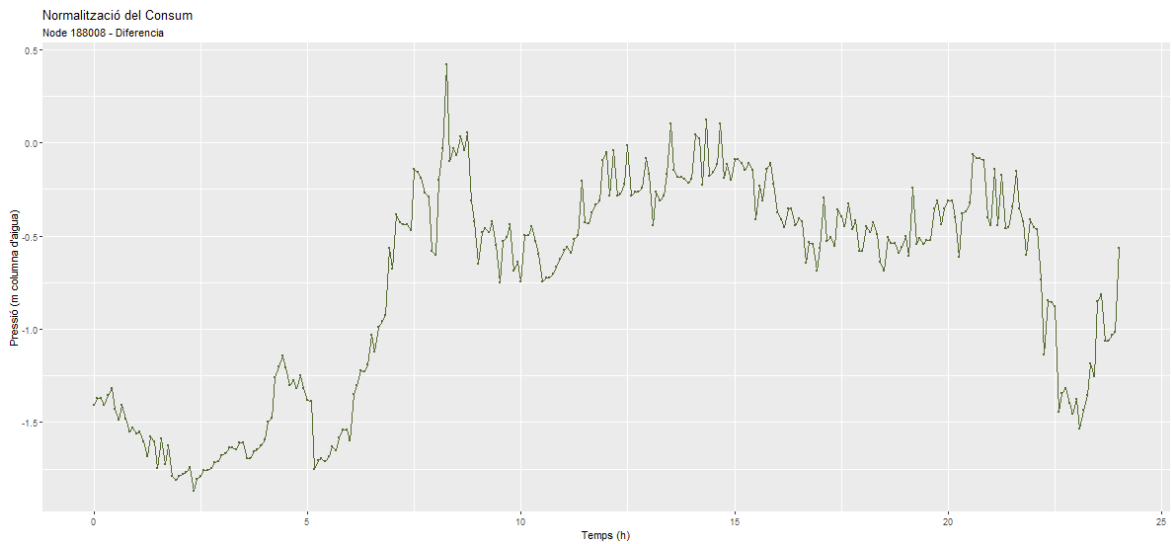


Figura 15. Diferència de les corbes de pressió del node 188008. Simulació 2 (Elaboració pròpia)

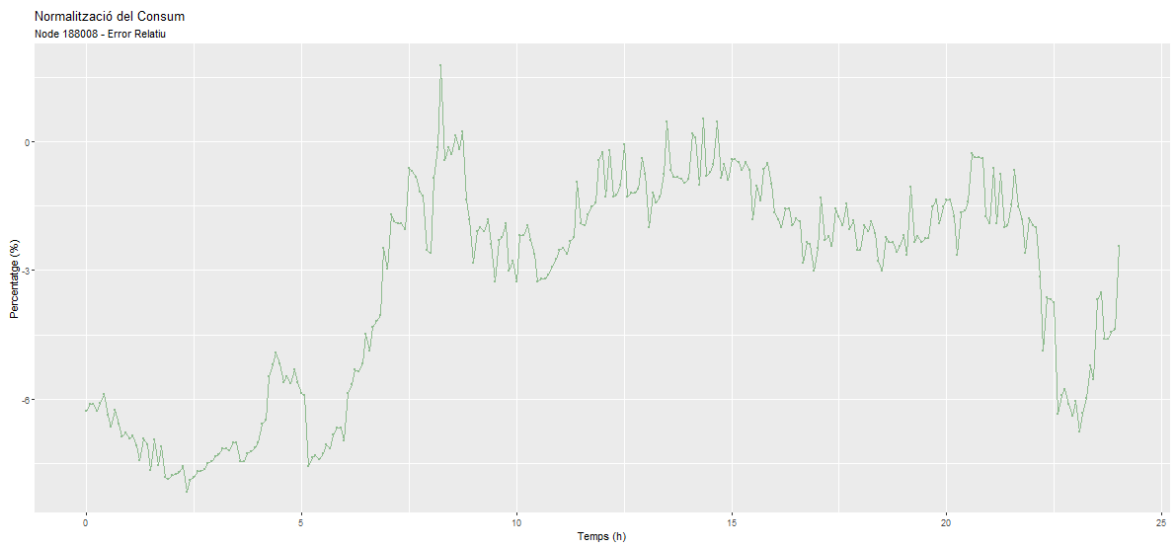


Figura 16. Error relatiu de les corbes de pressió del node 188008. Simulació 2 (Elaboració pròpia)

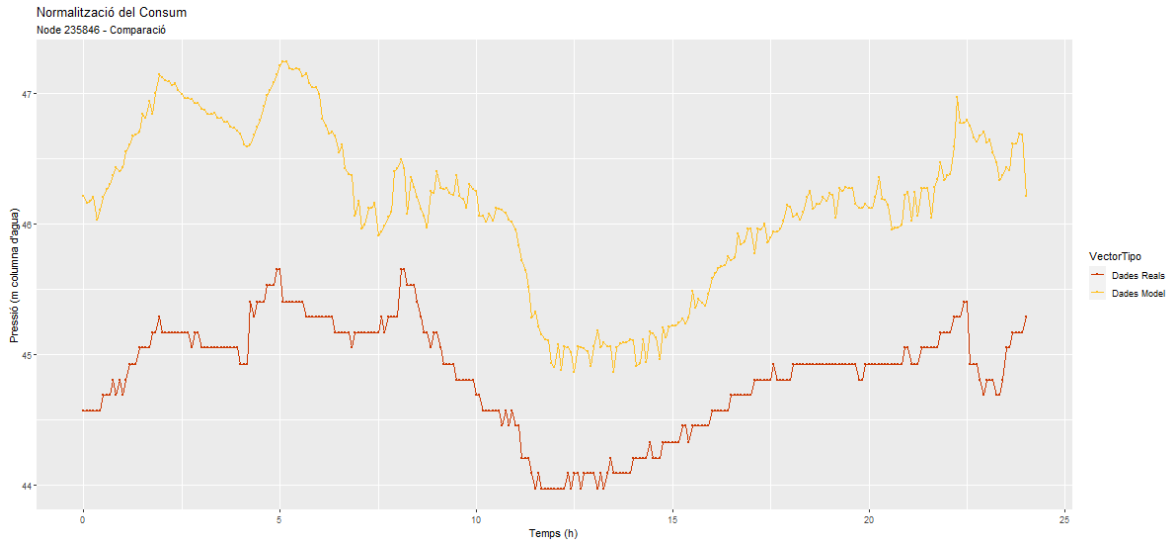


Figura 17. Comparació corbes de pressió del node 235846. Simulació 2 (Elaboració pròpia)

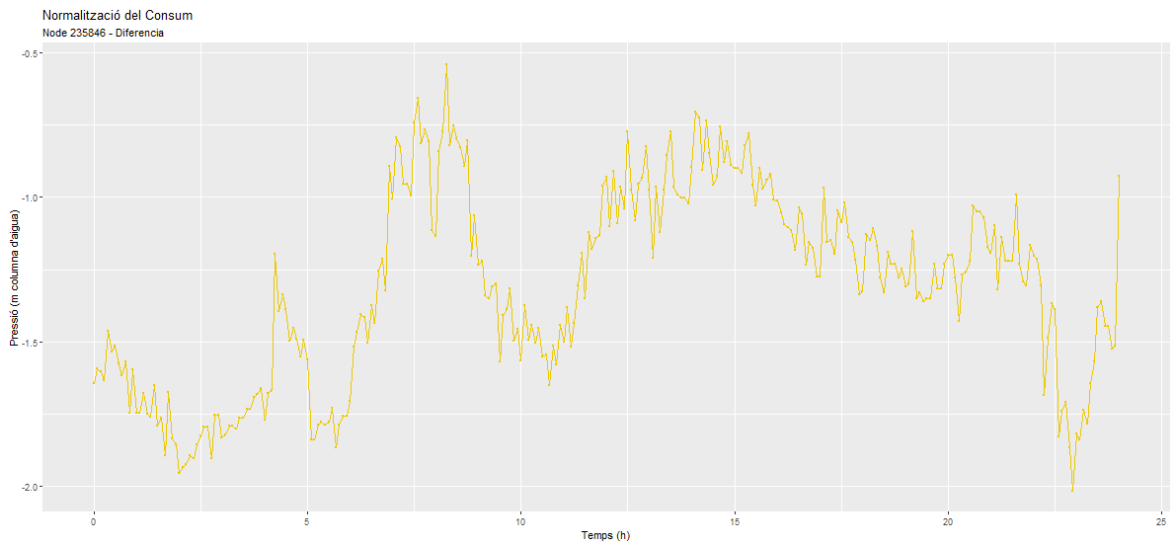


Figura 18. Diferència de les corbes de pressió del node 235846. Simulació 2 (Elaboració pròpia)

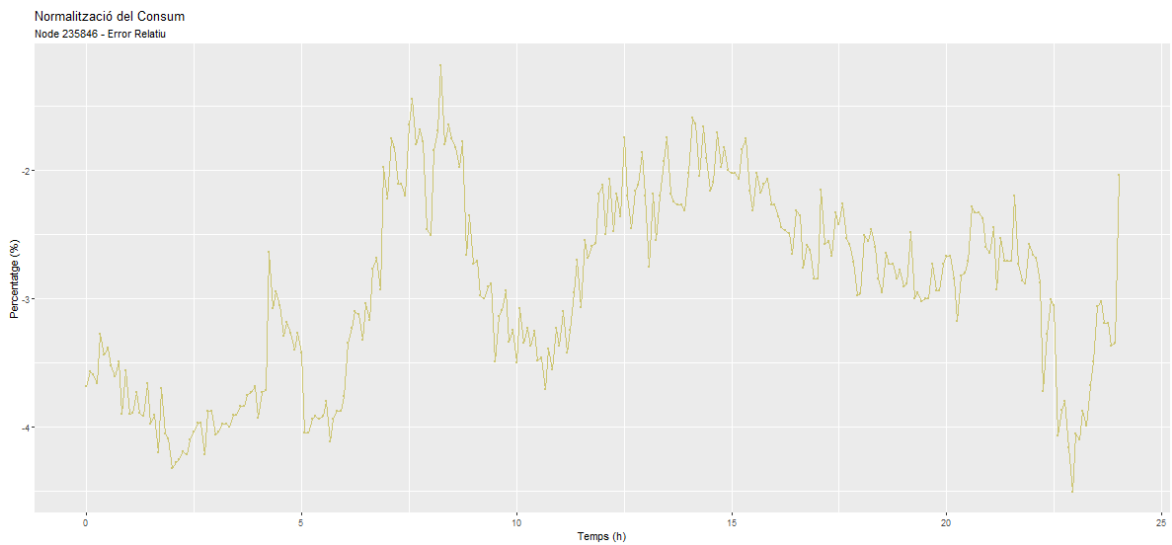


Figura 19. Error relatiu de les corbes de pressió del node 235846. Simulació 2 (Elaboració pròpia)

### Taula dels errors mitjans

<b>Error Mitja en 24 h</b>	<b>Valor</b>
Pressió Node 518	0,876533 m
Pressió Node 188008	0,757516 m
Pressió Node 235846	1,312204 m
Mitjana dels nodes	0,982084 m

*Taula 5. Errors Simulació 2 (Elaboració pròpia)*

Si visualitzem la taula dels errors mitjans, podem observar que l'error ha disminuït per a tots tres nodes, això també es pot observar a partir de les gràfiques, ja que s'ajusten més que l'anterior simulació i els errors relatius màxims són d'aproximadament d'un 6% en lloc d'un 8%.

La introducció de la demanda global real, tal com esperàvem en un inici ha incrementat la qualitat de la simulació. De totes maneres, els errors continuen sent significatius en el mateix interval, de les 0 h a aproximadament les 8 h i la pressió de la simulació és major a la real donat a que no hi ha cap fuga fins al moment.

En la pròxima simulació afegirem els coeficients emissors, de forma que un cop definit el valor tornarem a analitzar si l'error principal en la corba de pressió continua en el mateix interval i si l'ajust ha millorat.

### 4.3 Introducció de fuites generals

Arribats a aquest punt, introduïrem fuites generals a tots els nodes amb el mateix coeficient emissor. Tot i que tots els nodes tenen el mateix coeficient emissor les fuites no seran les mateixes, ja que és funció de la pressió.

El cabal total que surt del tanc d'aigua està format per la suma del consum dels abonats i el consum de les fuites, per tant, controlarem aquest paràmetre i a més a més la pressió hauria de tenir el mínim error possible.

#### Identificador de les corbes d'Epanet

Corba	Identificador
Corba Consum Normalitzat	1
Corba Alçada del Tanc d'Aigua	2

Taula 6. Identificador corbes. Simulació 3 (Elaboració pròpia)

#### Condicions de contorn

Condicció de contorn	Aplicació
Codi / Simulació base	Introducció del consum global real
Modificacions en l'arxiu d'Epanet .inp	NO
Introducció corba real. Alçada de l'aigua del tanc [m]	SI
Introducció corba real per a la normalització del consum dels abonats. Consum dels abonats [l/s].	SI
Fuites generals	SI, coeficients emissors homogenis
Fuites puntuals	NO

Taula 7. Condicions de contorn. Simulació 3 (Elaboració pròpia)

#### Codi

El codi complet i detallat es pot trobar en els annexes (Annex III). Abans de simular el model d'Epanet ens hem d'assegurar que hem afegit el coeficient emissor correctament.

## Alternativa

Amb les mateixes condicions de contorn hem desenvolupat una nova simulació per tal d'obtenir el coeficient emissor a partir d'una cerca exhaustiva automatitzada obtenint així un resultat més precís i sense haver de fer les iteracions de forma manual.

La cerca exhaustiva es va plantejar de forma que la demanda del tanc d'aigua, la qual serà negativa, ja que aporta aigua a la xarxa, ha de ser igual a la real, que son 74,72 l/s. Per a fer això portarem a terme una cerca exhaustiva en què cada volta serà una nova simulació del model d'*Epanet*.

En primer lloc, definirem un criteri d'error per tal de definir la sortida objectiu màxim i mínima respecte a la sortida objectiu, els -74,72 l/s (negatiu segons el criteri del programa).

$$Sortida Objectiu Max = Sortida Objectiu - \left( \frac{Sortida objectiu}{Criteri Error} \right)$$

$$Sortida Objectiu Min = Sortida Objectiu + \left( \frac{Sortida objectiu}{Criteri Error} \right)$$

En segon lloc, definirem noves variables, aquestes són el factor emissor que s'introduirà als nodes (inicialment 0), el nombre de voltes i el nombre de salts, que defineixen el nombre de voltes, vegades que ha entrat en el bucle, i de salts, número de vegades que ha passat d'un extrem a l'altre de la sortida objectiu, que han fet. A més a més llegirem la dada de la demanda.

Un cop definides les variables realitzarem una cerca exhaustiva que finalitzarà quan la demanda base estigui dins de la sortida objectiu màxim i mínima. Per variar el factor emissor cada cop que es fa una volta es portarà a terme la següent funció:

$$Factor Emissor = Factor Emissor - \left( \frac{Suma Factor Emissor}{Numero Salts} * Numero Salts^{-1} \right)$$

Cada cop que es realitza un salt, es canviarà el signe i el valor es modificarà amb més precisió. Noteu que el valor inicial equival al valor de la suma factor emissor, variable inicial amb què s'iniciarà la cerca.

Un cop simulat trobem que el coeficient emissor té un valor de 0,0005762505 després de fer 56 voltes i 31 salts.

## Resultats

Es visualitzarà la gràfica comparativa de la corba simulada amb la real, la diferencia i l'error relatiu a més a més de discutir els resultats.

El coeficient emissor trobat ha sigut de 0,000577, després de desenvolupar tota la cerca exhaustiva veiem que el resultat és el mateix, tants decimals no aporta informació nova i pot haver-hi errors, ja que només compara l'últim valor que surt del tanc i no tota la corba. De forma, que tot i haver comprovat que utilitzarem el mateix coeficient emissor no utilitzarem l'alternativa.

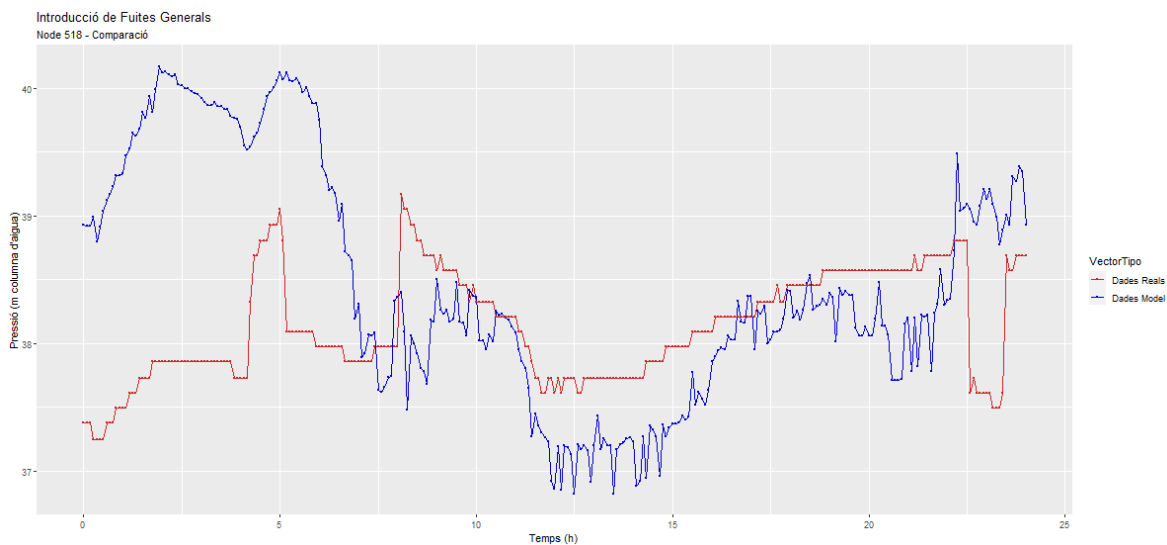


Figura 20. Comparació corbes de pressió del node 518. Simulació 3 (Elaboració pròpia)

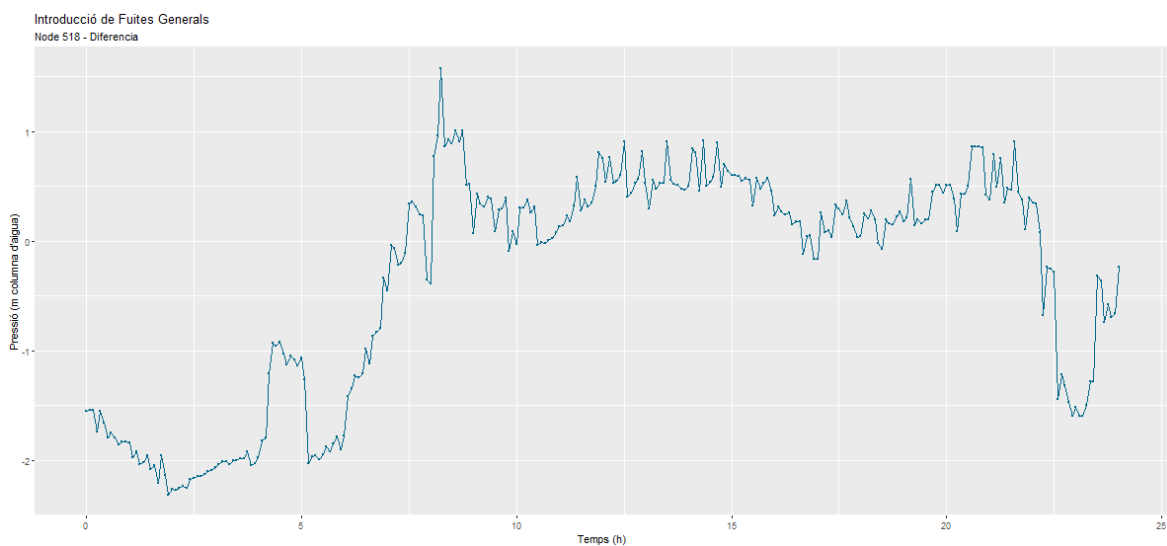


Figura 21. Diferència de les corbes de pressió del node 518. Simulació 3 (Elaboració pròpia)

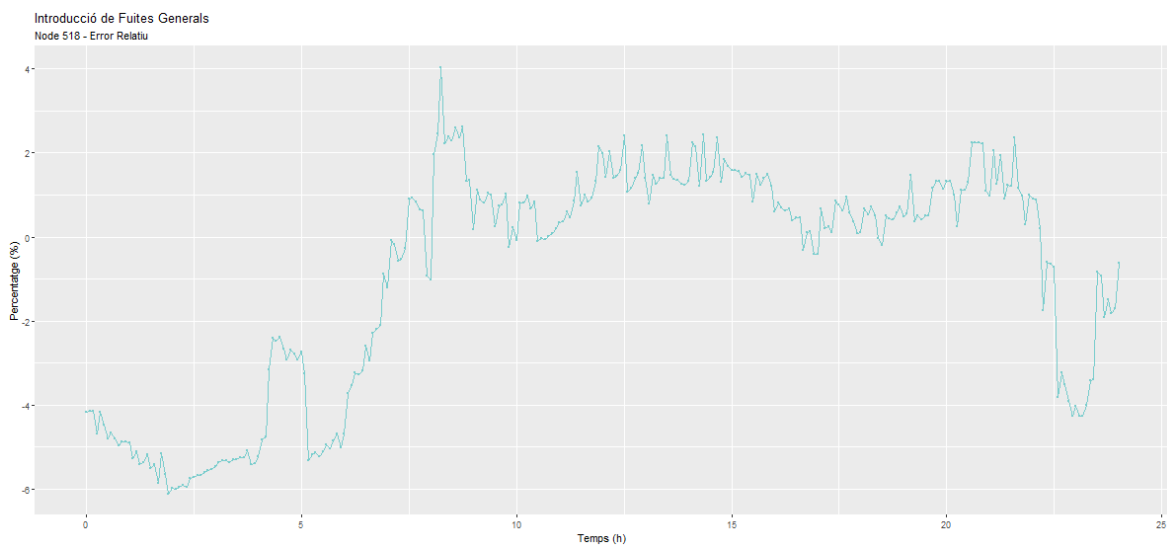
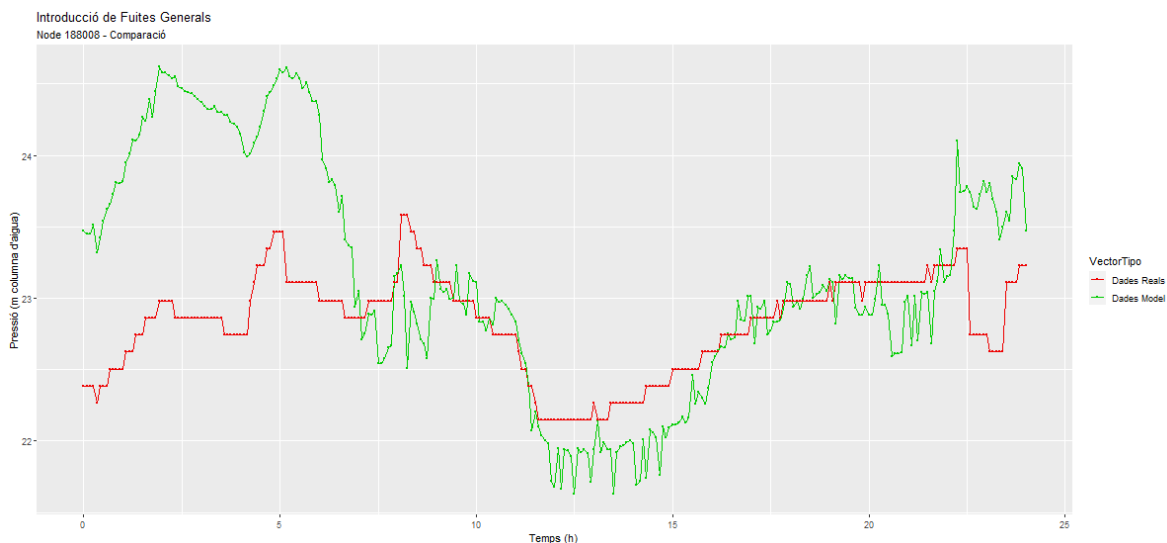
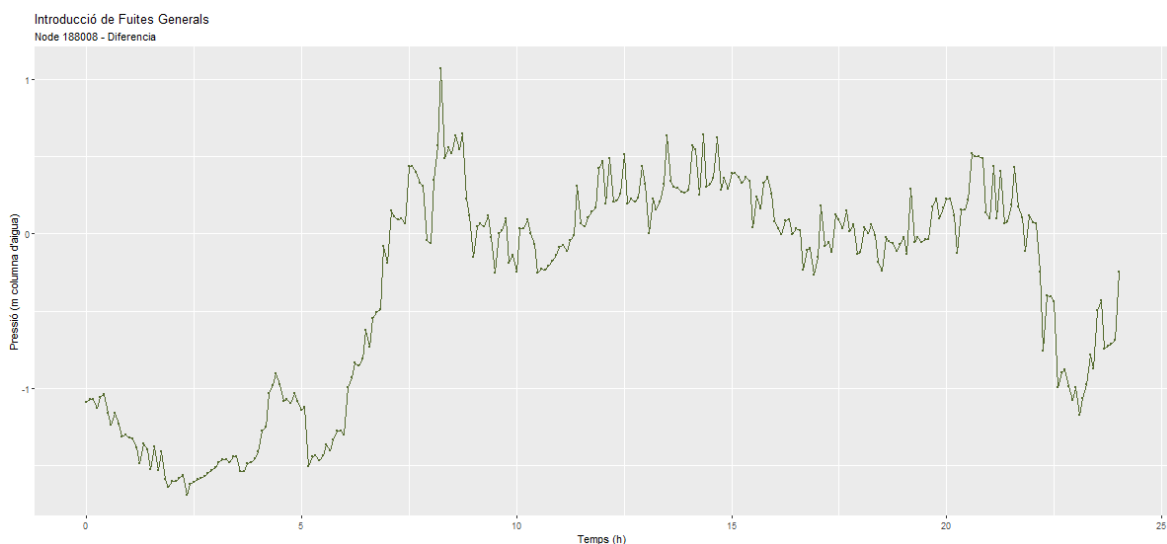


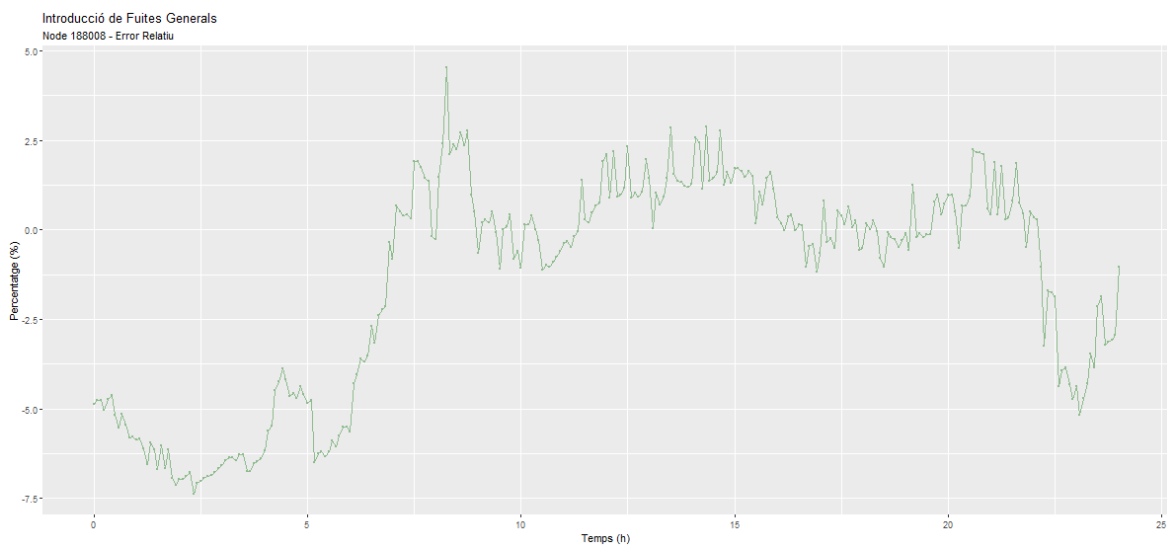
Figura 22. Error relatiu de les corbes de pressió del node 518. Simulació 3 (Elaboració pròpia)



**Figura 23.** Comparació corbes de pressió del node 188008. Simulació 3 (Elaboració pròpia)



**Figura 24.** Diferència de les corbes de pressió del node 188008. Simulació 3 (Elaboració pròpia)



**Figura 25.** Error relatiu de les corbes de pressió del node 188008. Simulació 3 (Elaboració pròpia)

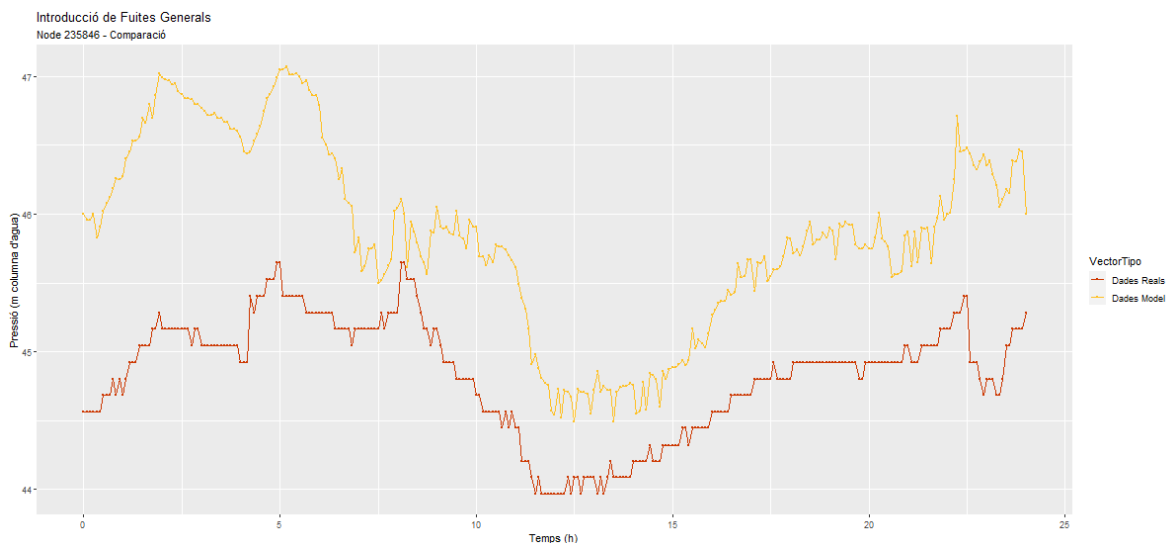


Figura 26. Comparació corbes de pressió del node 235846. Simulació 3 (Elaboració pròpia)

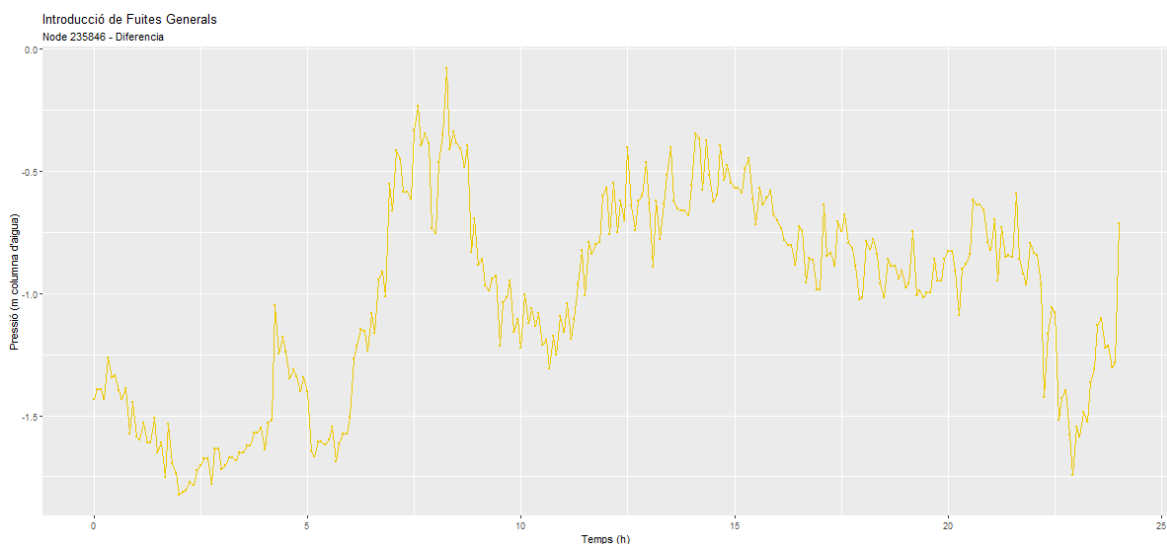


Figura 27. Diferència de les corbes de pressió del node 235846. Simulació 3 (Elaboració pròpia)

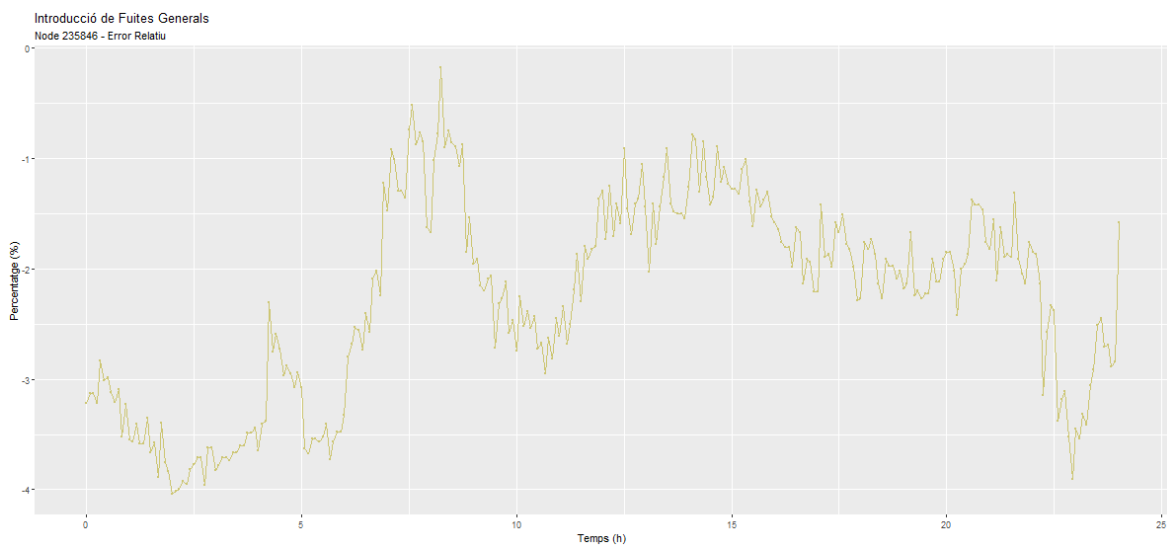


Figura 28. Error relatiu de les corbes de pressió del node 235846. Simulació 3 (Elaboració pròpia)



Taula dels errors mitjans

Error Mitja en 24 h	Valor
Pressió Node 518	0,830616 m
Pressió Node 188008	0,559142 m
Pressió Node 235846	1,020405 m
Mitjana dels nodes	0,803388 m

Taula 8. Errors Simulació 3 (Elaboració pròpia)

Per a poder representar d'una forma més significativa els resultats, visualitzarem els errors mitjans de les pressions per a totes les simulacions portades a terme fins ara.

Error Mitja en 24 h	Simulació inicial model aigua elevada	Introducció del consum global real	Introducció de fuites generals
Pressió Node 518	1,228595 m	0,876533 m	0,830616 m
Pressió Node 188008	1,073924 m	0,757516 m	0,559142 m
Pressió Node 235846	1,549332 m	1,312204 m	1,020405 m
Mitjana dels nodes	1,283950 m	0,982084 m	0,803388 m

Taula 9. Comparativa Errors. Simulació 3 (Elaboració pròpia)

Cada ajust que hem portat a terme ha portat millors resultats, ja que l'error és cada cop més petit de forma que podem validar la forma d'evolucionar cada una de les simulacions.

En aquesta última simulació, hi ha intervals en què l'error relatiu s'apropa al 0%, tot i això, de les 0 hores fins a les 8 hores de simulació l'error és massa gran, el mateix passa al final del dia. Tornarem a representar la gràfica comparativa del node 188008 per a més detalls.

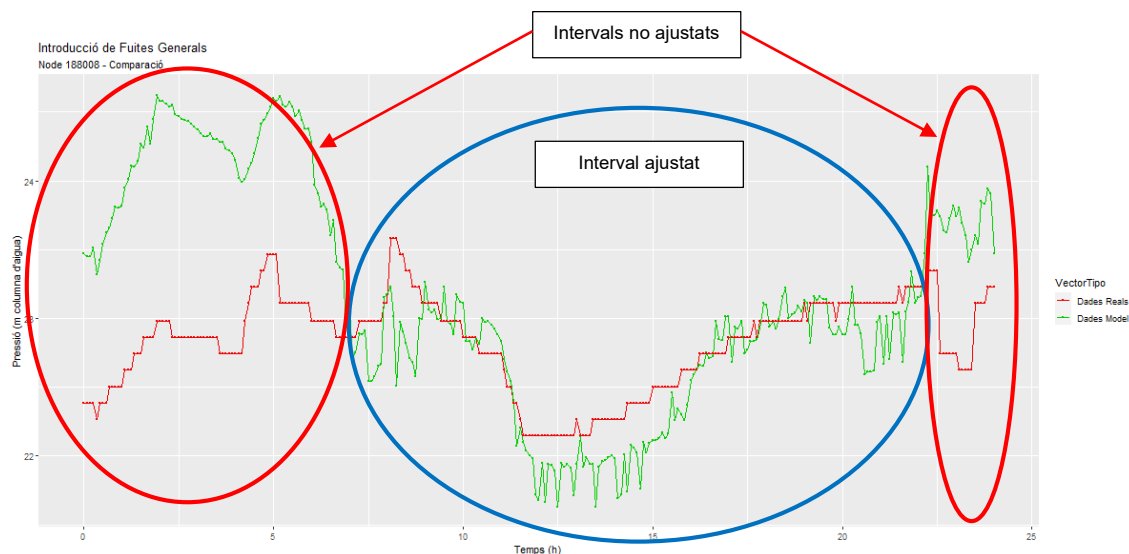


Figura 29. Definició dels intervals de la figura 23 (Elaboració pròpia)

Entrant en més detall, podem visualitzar que per a tots tres nodes, la corba real té tres grans baixades de pressió que no segueix el model.



Figura 30. Baixades de pressió figura 23 (Elaboració pròpia)

El problema d'aquestes tres baixades de pressió és que són definides per la corba de dades reals d'Aigua de Manresa, a causa d'això consultarem aquestes dades per tal de trobar el motiu.

Un cop consultat aquests resultats amb Aigües de Manresa podem definir que aquestes caigudes de pressió tenen sentit, ja que la xarxa d'aigua potable compta amb un segon tanc d'aigua, que fins ara desconeixíem i que no es considerava en el model, que s'encarrega de xuclar grans quantitats d'aigua (aproximadament 140 l/s) durant certs intervals del dia provocant aquestes baixades de pressió d'aproximadament 2 metres.

Fins ara, el model d'aigua elevada utilitzat no valorava el cabal que anava a parar a aquest dipòsit perquè la canonada que l'alimenta té un diàmetre de 600 mm i es considerava que les pèrdues eren mínimes, però la pressió si es veu afectada.

Aquest nou dipòsit està controlat per dues vàlvules DN200, una de papallona i l'altra de comporta, totes dues estan motoritzades i escanyades per tal d'evitar que la pressió dels habitatges veïns caiguin quan el dipòsit s'obre.



Figura 31. Entrada del dipòsit de la Culla controlat per dues vàlvules (Aigües de Manresa)

Aquest dipòsit té una cota d'uns 10 metres inferior a la del dipòsit que alimenta la xarxa d'aigua elevada i s'anomena dipòsit de la Culla pel nom del mas en el terreny del qual es va construir, l'altre dipòsit utilitzat fins ara, que alimenta a tota la xarxa, l'anomenarem dipòsit principal.

Per a les pròximes simulacions emprarem el mateix model tenint en compte el dipòsit de la Culla, de forma que tindrem un model molt més complet que l'inicial.

#### 4.4 Introducció dipòsit de la Culla i ponderació dels coeficients emissors

En aquest apartat introduïm dos nous canvis. Per una banda, modelitzarem l'efecte de la Culla en el model hidràulic i per l'altra banda, ponderarem els coeficients emissors en funció de la longitud de les canonades.

##### Dipòsit de la Culla

El dipòsit de la Culla actua com a una gran demanda dins del model, de forma que en un primer lloc es va tractar com a una nova demanda d'aproximadament 139 l/s en el node corresponent, aquestes dades són facilitades per Aigües de Manresa.

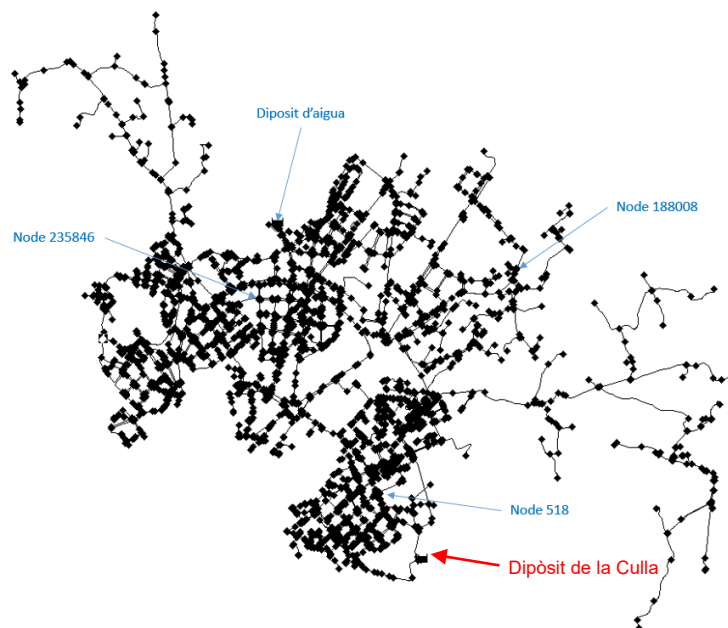


Figura 32. Model d'aigua elevada de Manresa. Visualització del dipòsit de la Culla (Aigües de Manresa)

Tractar aquest dipòsit com a un node que succiona grans quantitats d'aigua no va ser una bona solució, ja que tots els nodes de la xarxa experimentaven una baixada de pressió d'aproximadament 15 metres respecte a la corba de pressió real i és per aquest motiu, que des d'aigües de Manresa ens van explicar que les dues vàlvules que obren aquest dipòsit es troben escanyades. Si les vàlvules no estiguessin escanyades, la baixada de pressió experimentada en el model passaria a la xarxa real, provocant pèrdua de qualitat en el servei dels abonats que es troben propers a l'entrada del dipòsit de la Culla. Arribats a aquest punt, Aigües de Manresa va proporcionar un nou model hidràulic amb el programa

*Epanet* en què no hi hauria d'haver cap problema amb les baixades de pressió, ajustant-se així a la realitat. El que s'ha fet és crear un nou dipòsit com a dipòsit de la Culla, introduint pèrdues en el conducte d'entrada a més a més de col·locar-hi una antiretorn. Gràcies a la variació del nivell durant la simulació, l'antiretorn evita la sortida d'aigua, ja que la cota és més elevada. A partir d'aquest punt es treballarà amb aquest nou model com a motor de les simulacions.

#### Ponderació coeficients emissors

Tots els coeficients emissors seran ponderats en funció a la longitud de totes les canonades associades al node treballat. Per fer això assignarem la meitat de la longitud de les canonades associades al node i finalment ho dividirem per la longitud total de la xarxa. El coeficient emissor serà el resultat del següent producte.

$$\text{Coeficient Emissor Ponderat } [i] = \text{Constant} * \text{Longitud ponderada}[i]$$

La mitjana del coeficient emissor hauria de ser semblant al coeficient emissor utilitzat de forma homogènia, de forma que el valor de la constant variarà per tal que la mitjana del coeficient emissor ponderat sigui aproximadament 0,00057.

Per determinar el valor de la constant es va simular de forma repetida el càlcul anterior fins a trobar el valor ideal en què la mitjana fos similar a 0,00057.

Constant	Mitjana Coeficient Emissor	Diferencia
0,002	0,00039032	0,00017968
0,0029	0,000565964	0,00000406
0,00291	0,000567916	0,00000208
0,00292	0,000569867	0,00000013
0,00295	0,000575722	-0,00000572
0,003	0,000585801	-0,00001580
0,05	0,009758002	-0,00918800
0,5	0,09758002	-0,09701002

Taula 10. Cerca del valor constant. Simulació 4 (Elaboració pròpia)

El valor de la constant serà 0,00292.

#### Identificador de les corbes d'*Epanet*

Corba	Identificador
Corba Consum Normalitzat	1
Corba Alçada Dipòsit Principal	2
Corba Alçada Dipòsit de la Culla	3

Taula 11. Identificador corbes. Simulació 4 (Elaboració pròpia)

Des de R sempre es pot modificar el valor de les corbes gràcies a les llibreries anomenades anteriorment, el que no es pot fer és afegir una nova corba. En aquells casos en què utilitzem més de dues corbes (les definides de forma prèvia) hauríem d'accedir al model hidràulic amb l'extensió *.inp* des de bloc de notes i afegir manualment la nova corba.

NIVELEVAT	307.055	307.080	307.105	307.105	307.055	307.005
NIVELEVAT	306.980	306.930	306.905	306.905	306.930	306.955
;NIVELL DEL DIPOSIT DE LA CULLA	293.9846	294.0112	294.0112	294.0112	294.0378	294.0378
NIVCULLA						

Figura 33. Modificació del *.inp* per afegir noves corbes (Elaboració pròpia)

Com veiem, únicament hem de crear una nova corba després d'afegir un punt i coma, podem introduir els valors que vulguem, ja que després seran modificats a partir del codi.

### Condicions de contorn

Condicció de contorn	Aplicació
Codi / Simulació base	Introducció de fuites generals amb el nou model hidràulic d' <i>Epanet</i>
Modificacions en l'arxiu d' <i>Epanet .inp</i>	Si. Afegir una nova corba
Introducció corba real. Alçada de l'aigua del tanc [m]	Si
Introducció corba real per a la normalització del consum dels abonats. Consum dels abonats [l/s].	Si
Introducció corba real. Alçada dipòsit de la Culla.	Si
Fuites generals	Si, coeficients emissors ponderats
Fuites puntuals	No

Taula 12. Condicions de contorn. Simulació 4 (Elaboració pròpia)

### Codi

El codi complet i detallat es pot trobar en els annexes (Annex IV). Abans de simular el model d'*Epanet* ens hem d'assegurar que hem afegit el coeficient emissor ponderat correctament i que hem introduït el nivell de la Culla.

### Resultats

Es visualitzarà la gràfica comparativa de la corba simulada amb la real, la diferència i l'error relatiu a més a més de discutir els resultats.

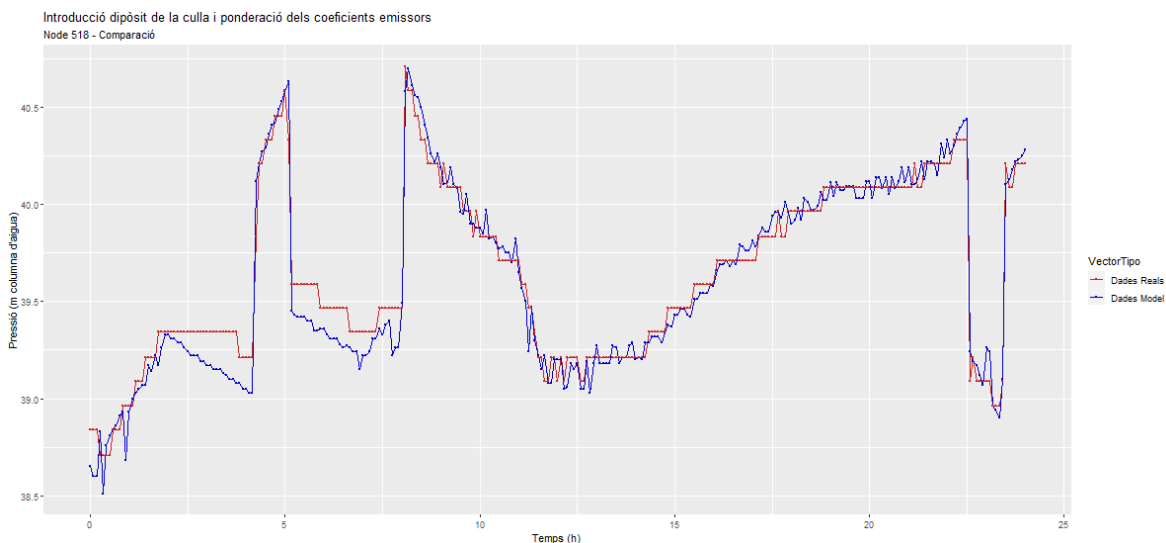


Figura 34. Comparació corbes de pressió del node 518. Simulació 4 (Elaboració pròpia)

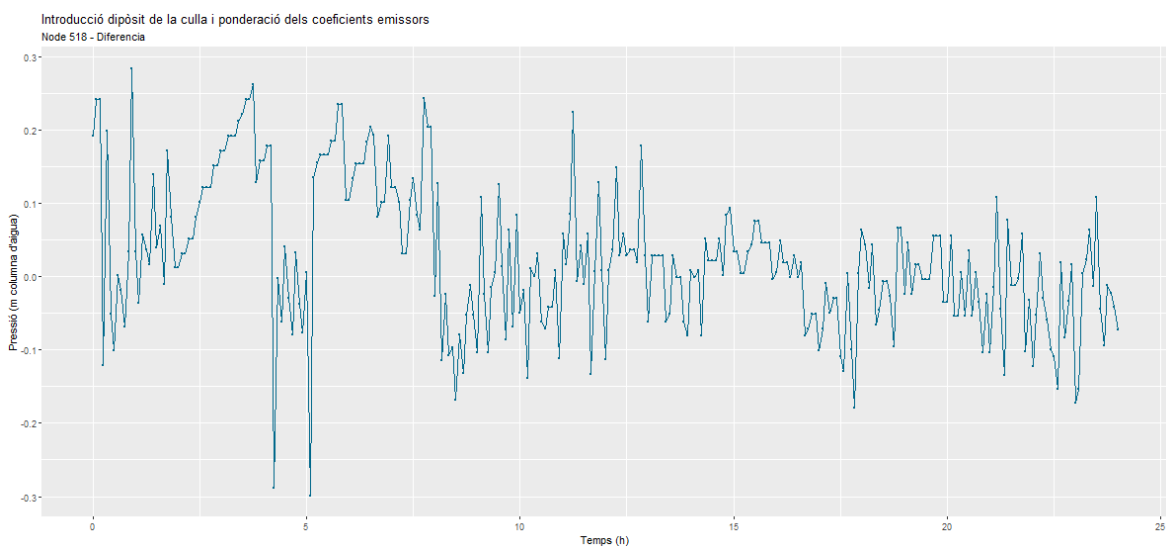


Figura 35. Diferència de les corbes de pressió del node 518. Simulació 4 (Elaboració pròpia)

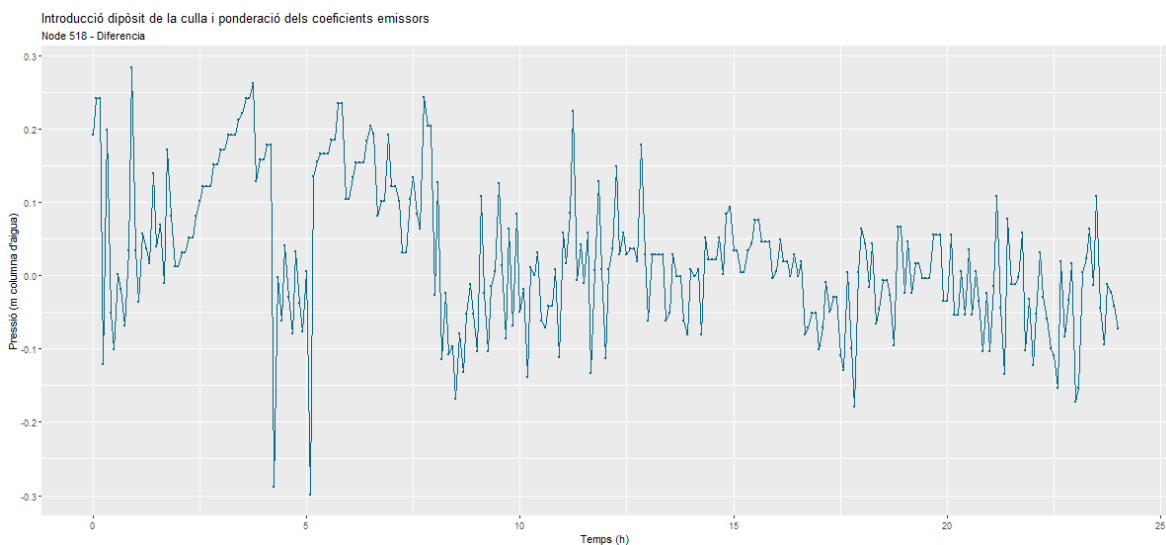


Figura 36. Error relatiu de les corbes de pressió del node 518. Simulació 4 (Elaboració pròpia)

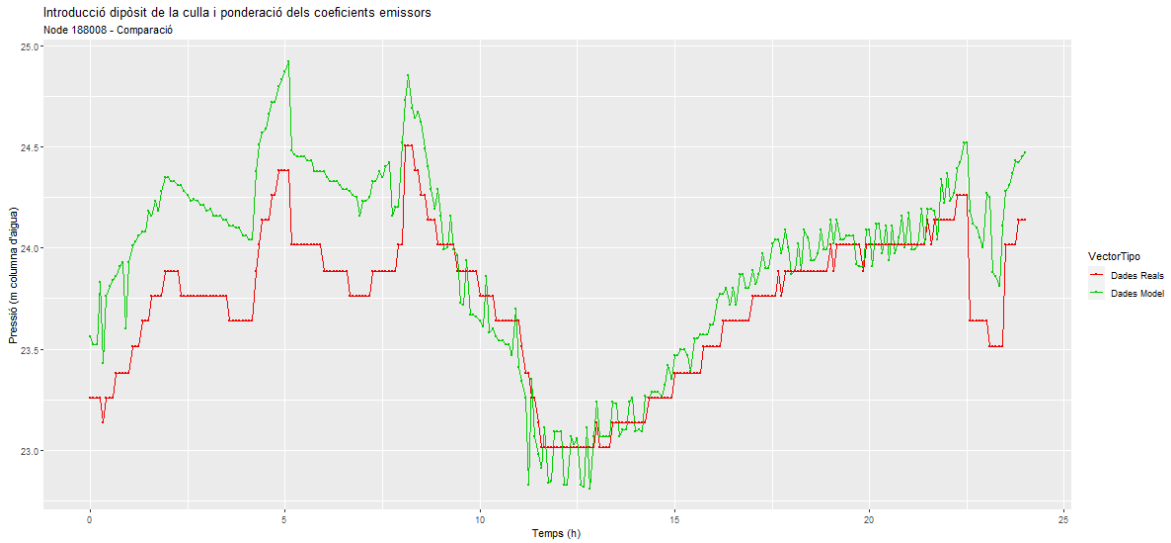


Figura 37. Comparació corbes de pressió del node 188008. Simulació 4 (Elaboració pròpia)

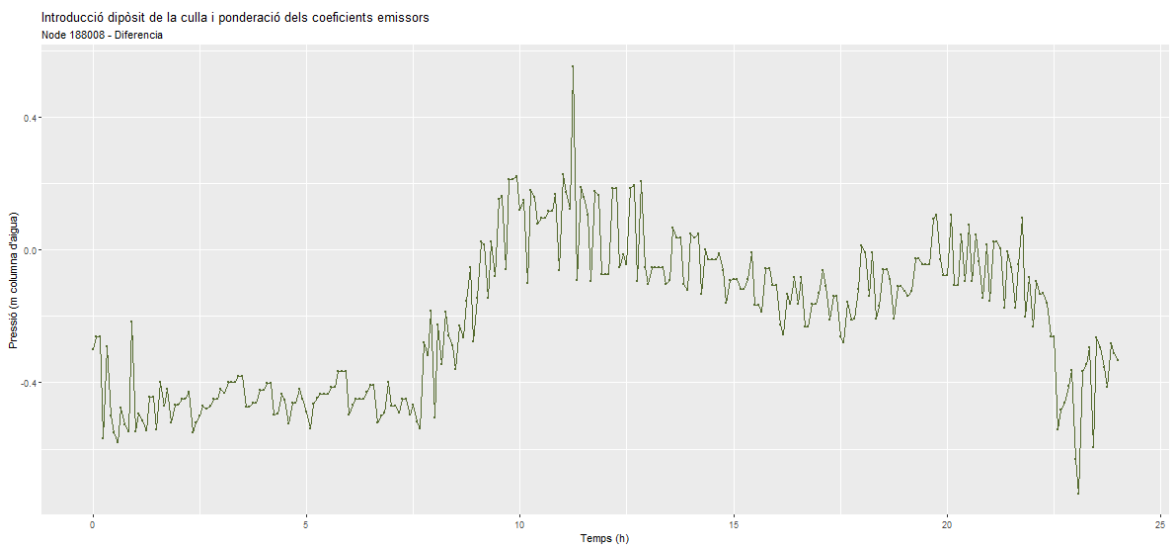


Figura 38. Diferència de les corbes de pressió del node 188008. Simulació 4 (Elaboració pròpia)

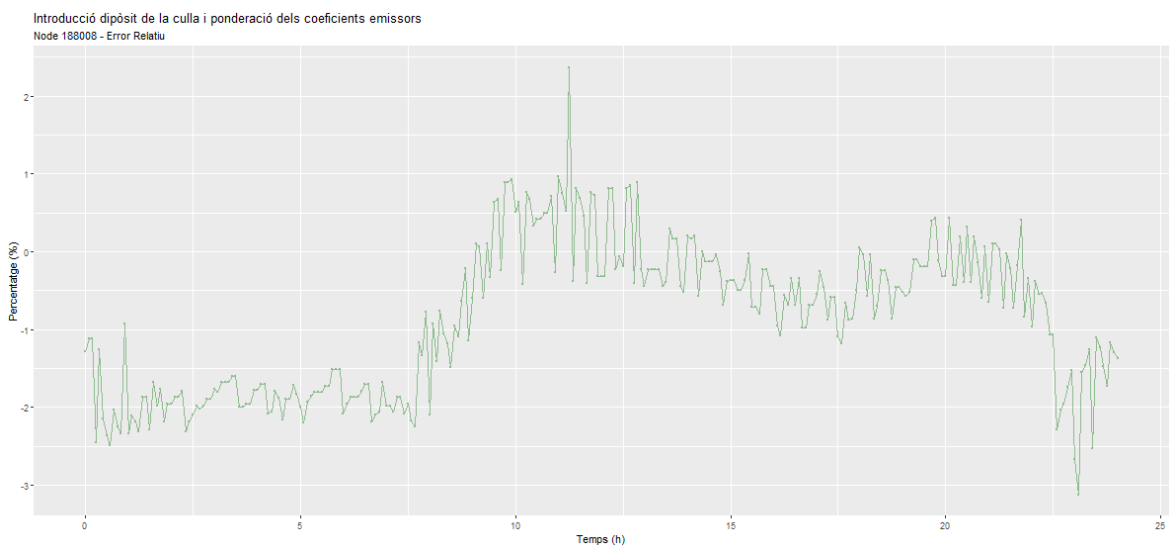


Figura 39. Error relatiu de les corbes de pressió del node 188008. Simulació 4 (Elaboració pròpia)

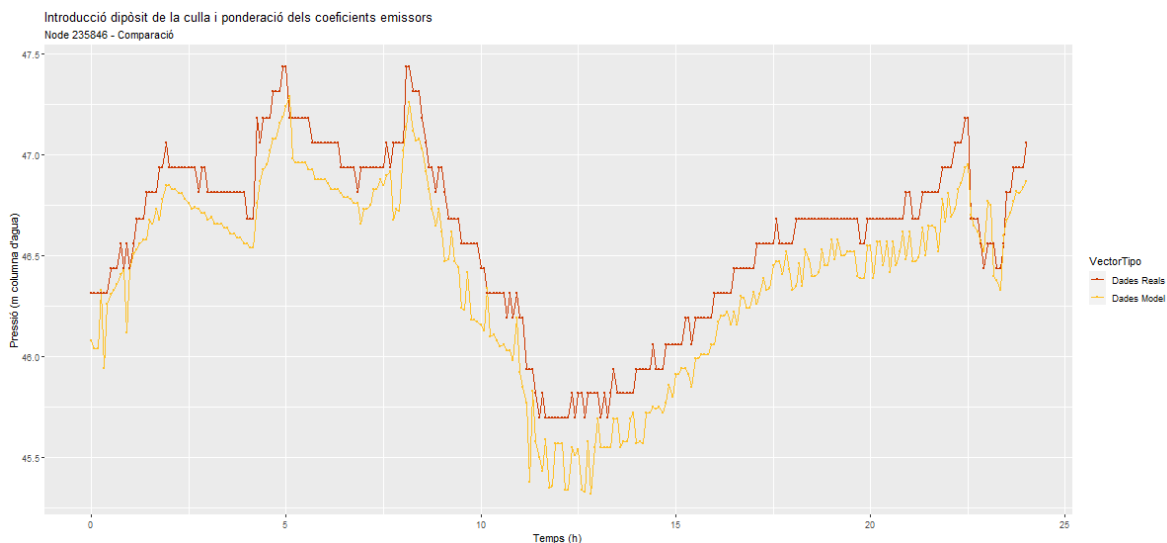


Figura 40. Comparació corbes de pressió del node 235846. Simulació 4 (Elaboració pròpia)

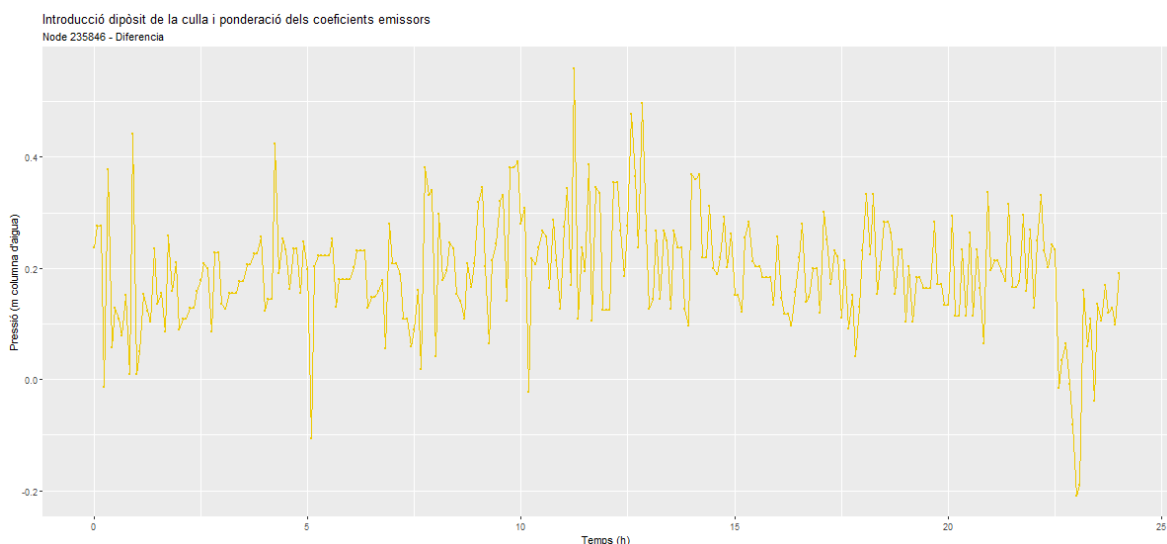


Figura 41. Diferència de les corbes de pressió del node 235846. Simulació 4 (Elaboració pròpia)

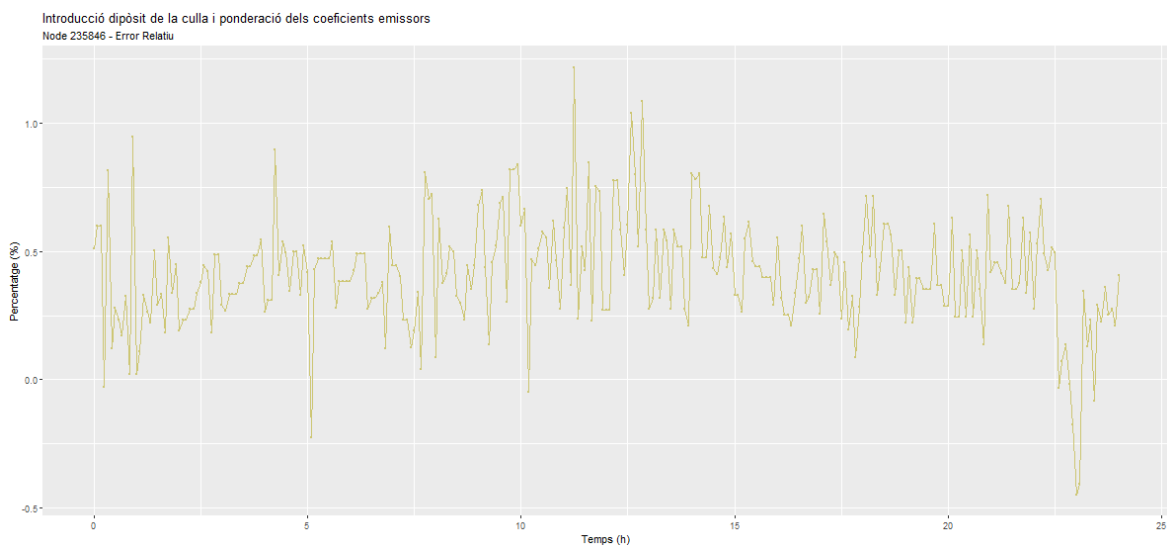


Figura 42. Error relatiu de les corbes de pressió del node 235846. Simulació 4 (Elaboració pròpia)



### Taula dels errors mitjans

<b>Error Mitja en 24 h</b>	<b>Valor</b>
Pressió Node 518	0,077114 m
Pressió Node 188008	0,249073 m
Pressió Node 235846	0,197529 m
Mitjana dels nodes	0,174572 m

*Taula 13. Errors Simulació 4 (Elaboració pròpia)*

Per a poder representar d'una forma més significativa els resultats, visualitzarem els errors mitjans de les pressions per a totes les simulacions portades a terme fins ara.

<b>Error Mitja en 24 h</b>	<b>Introducció de fuites generals</b>	<b>Introducció dipòsit de la Culla i ponderació dels coeficients emissors</b>
Pressió Node 518	0,830616 m	0,077114 m
Pressió Node 188008	0,559142 m	0,249073 m
Pressió Node 235846	1,020405 m	0,197529 m
Mitjana dels nodes	0,803388 m	0,174572 m

*Taula 14. Comparativa Errors. Simulació 4 (Elaboració pròpia)*

A primera vista ja veiem que el model actual està molt ben ajustat amb errors relatius màxims molt petits. Per al node 518 l'error relatiu màxim és d'un 0,3%, en el node 188008 d'un 3% i del node 235846 d'un 1%. Comparant els valors dels errors de la simulació actual amb l'anterior, la millora de l'ajust és molt bona amb errors que ja no són significatius.

Aquest nou model, que modelitza el dipòsit de la Culla i que pondera els coeficients emissors en funció de la longitud ens fa veure que tota l'evolució del model ha sigut correcte per a poder arribar a aquests errors tan petits.

El node més afectat és el 188008, de forma que és molt probable que la fuga estigui a prop d'aquest node i lluny del 518, ja que els efectes de la fuga son molt petits.

Per últim podem visualitzar que en l'error del node 188008 es veu una clara tendència en què diferencia la nit amb el dia.

El següent pas serà la cerca de la magnitud de la fuga per a poder cercar-la en tota la xarxa.

## 4.5 Cerca magnitud de la fuga puntual

Aquesta simulació tracta de trobar la magnitud de la fuga puntual mitjançant un nou dipòsit d'aigua virtual que es connectarà amb una canonada d'un metre de llargària als nodes estudiats (aquells que tenen una mesura de pressió) un per un. Aquest nou tanc d'aigua tindrà la mateixa corba de pressió que la corba real del node a estudiar.

El volum d'aigua necessari que aquest dipòsit virtual necessita per a que la corba de pressió sigui la mateixa es determinarà com a fuga puntual, ja que la corba de pressió serà igual a la real.

Es repetirà tres cops, en cada simulació s'analitzarà un dels nodes, primer el 518, el segon el 188008 i per últim el 235846.

Un cop portada a terme les simulacions exportarem la corba de cabal generat per aquest nou dipòsit amb el qual trobarem la magnitud de la fuga puntual. En funció dels resultats tractarem les fuites d'una forma o d'una altra.

### Epanet

En primer lloc, hem d'entrar a *Epanet* amb el seu propi programa i afegir un nou dipòsit d'aigua i una nova canonada d'un metre, que anirà des d'aquest dipòsit fins a un node qualsevol, un cop fet això exportarem el model recordant la referència de la canonada i del dipòsit.

Utilitzant el bloc de notes hem de buscar la canonada i variar el punt que no pertany al dipòsit que sigui un dels tres nodes, i per a cada simulació o canviarem.

2	240478	163060	1	1000	100	0	Open	;
4	240493	163060	1	1000	100	0	Open	;
173274	173274	173274n2n	1	100	8	0	CV	;
1	188008	188008_n2n_r	1	9999	0,006	0	Open	;

Figura 43. Exemple variació dels nodes del dipòsit de la fuga. Simulació 5 (Elaboració pròpia)

La canonada 1 és la nova que hem introduït i aquest exemple s'ha fet amb el node 188008, al nou dipòsit d'aigua l'hem anomenat com el node al qual anirà més n2n\_r. D'aquesta forma no perdrem la referència.

### Identificador de les corbes d'Epanet

Corba	Identificador
Corba Consum Normalitzat	1
Corba Alçada Dipòsit Principal	2
Corba Alçada Dipòsit de la Culla	3
Corba Alçada Dipòsit temporal de la Fuita	4

Taula 15. Identificador corbes – Simulació 5 (Elaboració pròpia)

La corba que té l'identificador 4 s'ha afegit de la mateixa forma que la 3 en l'apartat anterior, hem obert l'arxiu *.inp* del model hidràulic i ho hem afegit per a que es pugui modificar a partir del codi.

NIVCULLA	1000	1000	1000	1000	1000	1000
;NIVELL DÍPOSIT FUITA	←					
NIVFUITA	290	290	290	290	290	290

Figura 44. Modificació del *.inp* per afegir corba de la fuita. Simulació 5 (Elaboració pròpia)

### Condicions de contorn

Condicció de contorn	Aplicació
Codi / Simulació base	Introducció de fuites generals amb el nou model hidràulic d' <i>Epanet</i>
Modificacions en l'arxiu d' <i>Epanet .inp</i>	Si. Afegir dues noves corbes
Introducció corba real. Alçada de l'aigua del tanc [m]	Si
Introducció corba real per a la normalització del consum dels abonats. Consum dels abonats [l/s].	Si
Introducció corba real. Alçada dipòsit de la Culla.	Si
Introducció corba real. Alçada dipòsit temporal de la fuita	Si
Fuites generals	Si, coeficients emissors ponderats
Fuites puntuals	No

Taula 16. Condicions de contorn. Simulació 5 (Elaboració pròpia)

### Codi

El codi complet i detallat es pot trobar en els annexes (Annex V). Abans de simular el model d'*Epanet* ens hem d'assegurar que hem afegit la canonada en els nodes corresponents.

### Resultats

Per tal de discutir els resultats de forma significativa analitzarem que ha passat en cadascuna de les simulacions.

Node amb el que hem igualat la corba de pressió	Mitjana del cabal (l/s)	Sentit del cabal
Node 518	1,04	El dipòsit dona aigua a la xarxa
Node 188008	4,34	El dipòsit xucla aigua de la xarxa
Node 235846	7,01	El dipòsit dona aigua a la xarxa

Taula 17. Condicions de contorn. Simulació 5 (Elaboració pròpia)

Un cop portades a terme les tres simulacions de forma independent, el node 188008 és l'únic que actua com a una fuga, xuclant aigua de la xarxa, concretament un valor mitjà de 4,34 l/s mentre que els altres dos nodes aporten aigua al sistema.

Aquest comportament en què el node 188008 xucla aigua i els nodes 518 i 235846 donen aigua al sistema s'interpreta de forma que la fuga es localitza principalment a prop del node 188008 i lluny de la resta.

Per interpretar els resultats en més detall hem de recordar que ara mateix hi ha moltes fuites generals distribuïdes per tota la xarxa, de forma, que quan el dipòsit connectat al node 188008 xucla aigua és que la zona en què el sensor és sensible hi ha algun node o alguns nodes en la fuga ha de ser major, mentre que quan el dipòsit connectat als altres dos nodes, 518 i 235846, aporta aigua al sistema és que hem assignat fuites en els nodes que els sensors són sensibles que no hauria de ser-hi. En conclusió, les zones dels nodes 518 i 235846 sobre fuites generals i en la zona del node 188008 falten fuites, que aquesta la treballarem com a puntual.

Finalment, dimensionarem la fuga puntual amb un valor de 4,34 l/s de mitjana. Exportarem la corba del cabal i aquesta serà la fuga que passem per tots els nodes.

#### 4.6 Ajust del coeficient emissor

En aquesta simulació reajustarem el valor de la constant del coeficient emissor, ja que si volem introduir una nova fuga puntual, hem de mantenir constant el sumatori de fuites constants i fuites generals. Per fer això modificarem la demanda base d'un node per a que sigui una fuga puntual de 4,34 l/s, concretament utilitzarem el node 188008.

##### Identificador de les corbes d'Epanet

Corba	Identificador
Corba Consum Normalitzat	1
Corba Alçada Dipòsit Principal	2
Corba Alçada Dipòsit de la Culla	3

Taula 18. Identificador corbes. Simulació 6 (Elaboració pròpia)

### Condicions de contorn

Condicció de contorn	Aplicació
Codi / Simulació base	Cerca magnitud fuga puntual
Modificacions en l'arxiu d' <i>Epanet .inp</i>	No
Introducció corba real. Alçada de l'aigua del tanc [m]	Si
Introducció corba real per a la normalització del consum dels abonats. Consum dels abonats [l/s].	Si
Introducció corba real. Alçada dipòsit de la Culla.	Si
Introducció corba real. Alçada dipòsit temporal de la fuga	No
Fuites generals	Si, coeficients emissors ponderats
Fuites puntuals	Si, de 4,34 l/s

Taula 19. Condicions de contorn. Simulació 6 (Elaboració pròpia)

### Codi

El codi complet i detallat es pot trobar en els annexes (Annex VI). Abans de simular el model d'*Epanet* ens hem d'assegurar que hem afegit la fuga puntual.

### Resultats

Hem portat a terme la simulació de forma reiterativa fins a obtenir una diferència amb el cabal de la simulació anterior molt petit.

Constant del coeficient emissor ponderat	Diferència
0,00292	0,2317
0,00252	0,2242
0,00232	0,2216
0,00225	0,2202

Taula 20. Ajust del coeficient emissor. Simulació 6 (Elaboració pròpia)

Hem trobat que el valor de la constant per al coeficient emissor ponderat per a que estigui ajustat amb la fuga puntual es de 0,00225.

#### 4.7 Cerca de la fuga puntual

Arribats a aquest punt, en què coneixem la corba de la fuga i tenim un model amb el qual poder treballar aquesta última simulació.

Es portarà a terme una simulació en què es calcularà l'error mitjà de les corbes de pressió per a tots els nodes, 5124 en total, a partir de la simulació del model hidràulic, una simulació per a cada node.

El que es vol fer és associar un error a cada node de forma individual, si l'error es fa petit interpretarem que hem posicionat la fuga en el node correcte, de forma que l'haurem localitzat.

##### Identificador de les corbes d'Epanet

Corba	Identificador
Corba Consum Normalitzat	1
Corba Alçada Dipòsit Principal	2
Corba Alçada Dipòsit de la Culla	3
Corba Cabal de la Fuita	4

Taula 21. Identificador corbes. Simulació 7 (Elaboració pròpia)

##### Condicions de contorn

Condicció de contorn	Aplicació
Codi / Simulació base	Ajust del coeficient emissor
Modificacions en l'arxiu d'Epanet .inp	Si, afegir corbes i limitar la sortida del report als nodes que volem analitzar
Introducció corba real. Alçada de l'aigua del tanc [m]	Si
Introducció corba real per a la normalització del consum dels abonats. Consum dels abonats [l/s].	Si
Introducció corba real. Alçada dipòsit de la Culla.	Si
Fuites generals	Si, coeficients emissors ponderats
Fuites puntuals	Si, de 4,34 l/s que es mourà

Taula 22. Condicions de contorn. Simulació 7 (Elaboració pròpia)

## Codi

El codi complet i detallat es pot trobar en els annexes (Annex VII).

És important que abans de simular es limiti el report dels nodes.

[REPORT]			
Status	Yes		
Summary	No		
Page	0		
Nodes	518	188008	235846
Links	119734		

Figura 45. Modificació de la sortida del report. Simulació 7 (Elaboració pròpia)

Les accions més lentes són la generació de reports i la lectura de reports, de forma que si ho fa per a més de 5000 nodes cada cop que se simularà, més de 5000 el temps real de simulació serà excessiu, d'aquesta forma cada simulació hidràulica triga 4 segons. Així doncs, la simulació en temps real és d'aproximadament 5 hores i 30 minuts.

## Resultats

Per visualitzar els resultats guardarem les dades obtingudes i utilitzarem un nou codi a part (Annex VIII) amb el que visualitzarem el mapa de la xarxa a partir d'una escala de grisos en funció de l'error mitjà de les corbes de pressió.

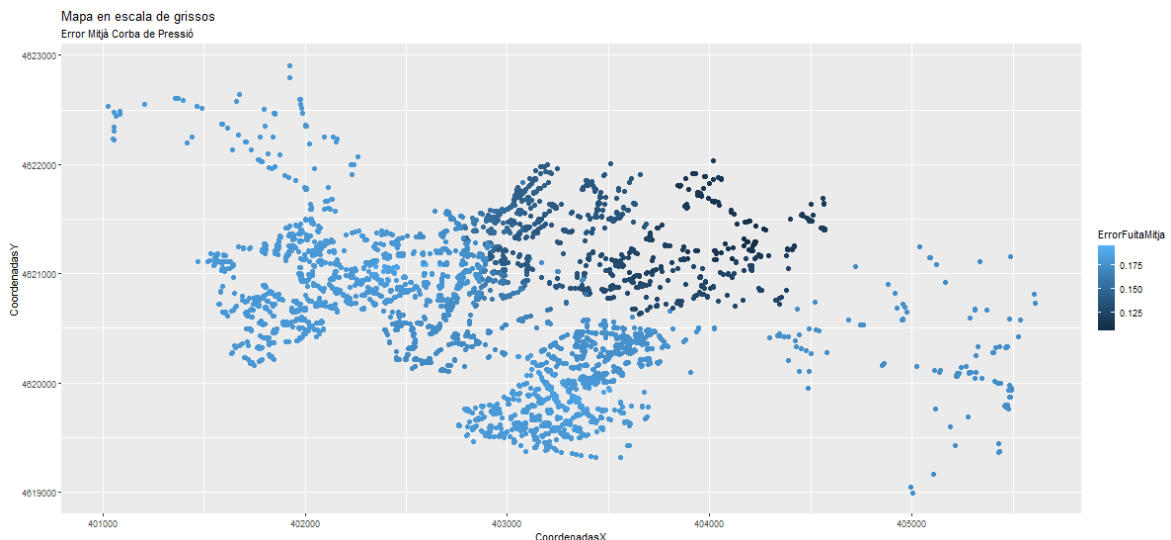


Figura 46. Escala de grisos de l'error mitjà de les corbes de pressió. Simulació 7 (Elaboració pròpia)

A partir d'aquest primer mapa podem diferenciar tres grans zones en funció de la foscor dels punts, com més fosc menys error. Tot i això, no és fàcil diferenciar la diferència dins de la zona fosca, així doncs pintarem els nodes en funció de l'error.



Figura 47. Mapa de colors segons l'error mitjà de les corbes de pressió. Simulació 7 (Elaboració pròpia)

Ara sí que podem diferenciar clarament quines són les zones en què podria estar la fuga, trobant així un espai reduït i proper al node 188008 (nodes en color taronja), tal com pensàvem on apareixeria la fuga pels resultats que obteníem.

Podem comparar l'error mitjà de les corbes de pressió per tal de comparar l'ajust progressiu del model en què cada cop es va reduint l'error mitjà fins a localitzar la fuga.

Simulació	Error mitjà en les corbes de pressió
Simulació inicial model aigua elevada	1,284
Introducció del consum global real	0,982
Introducció de fuites generals	0,803
Introducció dipòsit de la Culla i ponderació dels coeficients emissors	0,175
Cerca de la fuga puntual	< 0,115

Taula 23. Comparació dels errors mitjans en les corbes de pressió (Elaboració pròpia)

A partir de la taula veiem que l'evolució de les simulacions ha sigut positiva, amb un gran salt un cop introduït el dipòsit de la Culla indicant l'optimització del model fins a un error molt petit.

Finalment, en distribuir la fuga per tots els nodes en aquesta última simulació l'error ha disminuït significativament de forma que localitzem la fuga en la zona de color taronja de la figura 47.



## 5 Resum del pressupost

El resum del pressupost busca plasmar la viabilitat econòmica del projecte tenint en compte el valor de tots aquells recursos necessaris, en el document pressupost es pot trobar més detalladament.

Classificarem els recursos en tres apartats, el treball d'enginyeria, els equips necessaris i les despeses indirectes.

<b>Treball d'enginyeria</b>			
<b>Concepte</b>	<b>hores totals</b>	<b>€/h</b>	<b>€ Totals</b>
Enginyer junior	300	13	3900
Consultor sènior 1	18	35	630
Consultor sènior 2	18	35	630

<b>Equips necessaris</b>	
<b>Concepte</b>	<b>Preu €</b>
Ordinador portàtil ASUS	626,24
Ratolí	33
Auriculars	12,54

<b>Despeses indirectes</b>				
<b>Concepte</b>	<b>kWh/h consumit</b>	<b>Hores</b>	<b>€/kWh</b>	<b>€ Totals</b>
Consum electricitat	0,11	300	0,253	8,35
<b>Concepte</b>	<b>Mesos</b>	<b>€/mes</b>		<b>€ Totals</b>
Consum internet	4	30		120

<b>Pressupost total</b>	
<b>Classificació</b>	<b>Despesa en €</b>
Treball d'enginyeria	5160
Equips necessaris	671,78
Despeses indirectes	128,35

<b>Total</b>	<b>5960,13</b>
--------------	----------------

Taula 24. Pressupost total (Elaboració pròpia)

El pressupost total per a desenvolupar el projecte ha sigut de 5960,13 € dels quals l'apartat més significatiu ha sigut el treball d'enginyeria, ja que representa el 87% del pressupost.

## 6 Anàlisi i valoració de les implicacions ambientals i socials

Un cop hem finalitzat les simulacions i representat els resultats obtinguts és necessari analitzar aquelles implicacions ambientals i socials relacionades amb el projecte.

Per a poder finalitzar el projecte únicament hem necessitat un ordinador portàtil alimentat per una font d'energia durant 300 hores. Tenint en compte que l'ordinador portàtil té un consum aproximat de 0,11 kWh per a cada sessió d'una hora completa [4] i a més a més coneixem que cada kWh equival a 0,45 kg de CO<sub>2</sub> d'emissions a l'atmosfera.

Concepte	Hores d'ús	Consum energètic en kWh	Kg de CO <sub>2</sub>
Ordinador portàtil	300	33	14,85

Taula 25. Emissions de CO<sub>2</sub> (Elaboració pròpia)

L'ús de l'ordinador portàtil durant 300 hores per a realitzar la totalitat del treball equival a l'emissió de 14,85 kg de CO<sub>2</sub>.

Tenint en compte els resultats del treball es podria identificar una fuga d'aproximadament 4,34 l/s d'aigua potable. Coneixent que per cada m<sup>3</sup> d'aigua consumida equival a una emissió de 4 kg de CO<sub>2</sub> [13]. En el cas d'identificar la fuga esmentada suposaria una reducció d'emissions de CO<sub>2</sub>.

Fuita en l/s	Temps d'anàlisi	Volum d'aigua potable perduda	Reducció de Kg de CO <sub>2</sub>
4,34	1 dia	375 m <sup>3</sup>	1500

Taula 26. Reducció de CO<sub>2</sub> (Elaboració pròpia)

Per a un dimensionament d'una fuga de 4,34 l/s s'augmenta el consum d'aigua potable i d'emissions de CO<sub>2</sub>, per tant, en el cas de poder localitzar la fuga estaríem reduint les emissions de CO<sub>2</sub> a 1500 kg al dia.

## 7 Suggeriments per a una possible continuació del treball

Amb el temps disponible hem pogut interpretar la xarxa d'aigua, identificar i localitzar una possible fuga puntual de 4,34 l/s. Tot i això, en cas de disposar de més temps hauríem portat a terme certs estudis que es plantegen un cop localitzada la fuga.

### Proposta 1

Estudiaria la forma de modelitzar aquelles fugues negatives trobades en la simulació 5. Veiem que per al node 188008 el dipòsit xucla aigua, de forma que ho interpretem com una fuga. En canvi, per als nodes 518 i 235846 el dipòsit aporta aigua a la xarxa, de forma que ho hem interpretat com que aquella zona té un excés de fugues generals, però no ho hem modelitzat i únicament ens hem centrat en la fuga.

El que proposem fer, és crear una fuga puntual amb la magnitud trobada en la simulació 5 en els nodes 518 i 235846 amb l'objectiu de delimitar la zona afectada (una simulació per a cada node).

Un cop hem delimitat la zona afectada, reduir els coeficients emissors dels nodes que pertanyen a aquesta zona (es redueix, ja que hem interpretat que hi ha un excés de fugues generals) fins que les fugues generals de les zones hagin reduït la magnitud trobada en la simulació 5. El que es pretén és eliminar les fugues negatives, així doncs el pròxim pas és tornar a executar la simulació 5 amb la nova distribució de coeficients emissors esperant trobar fugues a tots tres nodes o bé identificar que en certes zones no hi ha fugues.

En el cas de només tenir fugues generals i puntuals proposem convertir les fugues generals restants en fugues puntuals en funció de la zona.

Finalment, portaríem a terme la localització de la fuga, però ens podem trobar que la fuga desplaçada tingui unes dimensions massa grans, de forma que deixem obert la forma de modelitzar aquest cas.

### Proposta 2

Amb l'objectiu de verificar la precisió en què es pot localitzar una fuga proposem la recreació d'aquest treball, però aquest cop, en lloc de treballar amb dades reals es podria crear una fuga en el model en el qual s'ha treballat fins ara, agafar les dades de cabal i pressió dels nodes estudiats i comprovar que la zona en què trobem la fuga correspon on està situada la fuga. També es podria provar d'aplicar més d'una fuga puntual per tal d'estudiar com modelitzar el sistema fins a poder localitzar un nombre indefinit de fugues.

## 8 Conclusions

A partir de les simulacions portades a terme al llarg de tot el treball hem pogut detectar i localitzar fuites puntuals en un petit sector de xarxa molt lligat hidràulicament al node 188008, que a més a més, segons els resultats de les simulacions prèvies a la localització de la fuga apuntava a aquest resultat.

La metodologia en què el model es desenvolupa progressivament ha permès analitzar amb facilitat l'impacte que té cada pas en què s'introdueix un nou paràmetre. Gràcies a això, hem pogut considerar aquelles noves entrades que ajustaven cada cop més el model a la realitat.

Hem comprovat la importància de llegir les dades de sortida, ja que aquestes poden indicar certes anomalies produïdes per un model incomplet tal com ha sigut amb el dipòsit de la Culla.

Tanmateix, també hem vist que a l'hora de dimensionar la fuga, el cabal pot sortir de la xarxa, assenyalant que hi ha una fuga o bé pot entrar. Aquestes entrades de cabal a la xarxa per a que la corba del model fos idèntica a la real han sigut interpretades com que en aquelles zones sobren fuites generals, obrin noves formes de modelitzar el sistema.

Pel que fa al codi, hem pogut controlar, manipular i modificar la majoria de paràmetres utilitzats per portar a terme cada simulació i així extreure els resultats mitjançant gràfiques per a elaborar una anàlisi visual a més a més de calcular en tot moments els errors mitjans de les pressions. Tot i això, afegir nous paràmetres com per exemple corbes de dades, dipòsits o canonades, no s'ha fet possible, de forma que, en primer lloc, s'han de crear sense fer servir el codi i a partir d'aquest modificar els valors per a aquells amb els que volem treballar.

Com que les simulacions són de 24 hores obtenint informació cada 5 minuts, ha sigut molt útil calcular les mitjanes per a poder treballar i comparar valors.

Finalment, cal remarcar que s'ha assolit l'objectiu principal d'aquest projecte a l'haver localitzat un petit sector amb una fuga de 4,34 l/s, en altres paraules tres ampolles d'un litre i mig cada segon. El sector es troba en una zona molt propera al node 188008, trobat a partir d'un model en què la corba de pressió del model s'ajusta a la corba de pressió de la realitat amb un error relatiu inferior a l'1%.

## 9 Referències

- [1] Sanz, G., & Pérez, R. (2015). *Sensitivity Analysis for Sampling Design and Demand Calibration in Water Distribution Networks Using the Singular Value Decomposition*. Journal of Water Resources Planning and Management.
- [2] Lobato, V. (2021). *Estudi i modelització d'una xarxa d'aigua potable per a la seva millor gestió*. Treball final de grau, UPC, Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa. (Accessed: 30 September 2021)
- [3] Arandia, E., Eck, B. and Rossman, L. (2021) *epanet2toolkit: Functions to Simulate Pipe Networks*. Available at: <https://rdr.io/cran/epanet2toolkit/man/epanet2toolkit.html> (Accessed: 30 October 2021).
- [4] Ecoresponsabilidad (no date) *Uso del ordenadors portàtil vs ordenador sobremesa*. Available at: <http://www.ecorresponsabilidad.es/fichas/portatil.htm> (Accessed: 5 January 2022).
- [5] Hafner, S. (2012) *r — ggplot2 para impresiones en escala de grises*. Available at: <https://www.it-swarm-es.com/es/r/ggplot2-para-impresiones-en-escala-de-grises/1070712653/> (Accessed: 18 December 2021).
- [6] Hernández, F. (2021) *5 Funciones básicas de R | Manual de R*. Available at: <https://fhernanb.github.io/Manual-de-R/funbas.html> (Accessed: 27 November 2021).
- [7] Jobted (no date) *¿Cuánto Cobra un Ingeniero? (Sueldo 2022)*. Available at: <https://www.jobted.es/salario/ingeniero> (Accessed: 4 January 2022).
- [8] May, C. I. C. (no date) *Introducción a R, edX*. Available at: [https://www.edx.org/es/course/introduccion-a-r?index=spanish\\_product&queryID=51bfe91da4aa881f2be79e47325ddc1d&position=1](https://www.edx.org/es/course/introduccion-a-r?index=spanish_product&queryID=51bfe91da4aa881f2be79e47325ddc1d&position=1) (Accessed: 8 January 2022).
- [9] PCcomponentes (2017) *Logitech H390 Auriculares con Micrófono | PcComponentes.com*. Available at: <https://www.pccomponentes.com/logitech-h390-auriculares-con-microfono> (Accessed: 4 January 2022).
- [10] PCcomponentes (2021) *Asus VivoBook S413JP-EK085 Intel Core i7-1065G7/16GB/512GB SSD/MX330/14" Reacondicionado*. Available at: <https://www.pccomponentes.com/asus-vivobook-s413jp-ek085-intel-core-i7-1065g7-16gb-512gb-ssd-mx330-14-reacondicionado> (Accessed: 4 January 2022).

[11] PCcomponentes (2022) *Trust GXT 101 Ratón Gaming 4800DPI Negro* | *PcComponentes.com*. Available at: <https://www.pccomponentes.com/trust-gxt-101-raton-gaming-4800dpi-negro> (Accessed: 4 January 2022).

[12] RCharts (no date) *Colores en R [Lista completa, Conversor a RGB y selector de color]* | *R CHARTS*. Available at: <https://r-charts.com/es/colores/> (Accessed: 13 November 2021).

[13] Roca, R. (2018) *El sistema eléctrico español dispara sus emisiones un 18% en 2017 hasta las 74,8 millones de TCO<sub>2</sub>*, *El periódico de la energía*. Available at: <https://elperiodicodelaenergia.com/el-sistema-electrico-espanol-dispara-sus-emisiones-un-18-en-2017-hasta-las-748-millones-de-tco2/> (Accessed: 5 January 2022).

[14] RPubS (2018) *Introducción a la Graficación con ggplot2*. Available at: <https://rpubs.com/rdelgado/429190> (Accessed: 15 October 2021).

[15] Sáez, A. (2018) *Breve introducción a la librería readr, Infinitos Contrastes*. Available at: <https://imalexissaez.github.io/2018/08/14/breve-introduccion-a-la-libreria-readr/> (Accessed: 15 October 2021).

[16] Eck, B. J. (2019) *Read Epanet Files into R*. Available at: <https://rdr.io/cran/epanetReader/> (Accessed: 30 October 2021).