



**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 a la seva millor gestió

AUTOR:

VICTOR LOBATO TORRES

DIRECTORS:

RAMON PEREZ MAGRANE

SERGI GRAU TORRENT

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

---

*TREBALL FINAL DE GRAU*

---

28 de Setembre de 2021



## Declaració d'honor

Declaro que,

el treball d'aquesta tesi és completament el meu propi treball,

aquesta Tesi de Grau no té cap part del treball d'altres persones sense donar-los crèdit,

s'han citat clarament totes les referències,

Entenc que una infracció d'aquesta declaració em deixa subjecte a les accions disciplinàries  
previstes per la Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTECH

*Nom del estudiant*

*Signatura*

*Data*

Víctor Lobato Torres

Víctor Lobato Torres

28/09/2021

*Títol de la tesis:* : **Estudi i modelització d'una xarxa d'aigua potable per a la seva millor gestió**

## Agraïments

En primer lloc, m'agradaria donar les gràcies als meus tutors Ramon Pérez Magrane i Sergi Grau Torrent. Sense la seva ajuda a les sessions que hem anat realitzant, m'hagués resultat impossible passar del primer punt. Gràcies a ells he après molt sobre un tema el qual desconeixia totalment i del qual no en tenia referències. Sempre disposats a resoldre els dubtes que em sorgien, tant per correu com per sessions virtuals, han sigut molt importants per a la realització d'aquest treball.

En segon lloc, m'agradaria donar les gràcies als meus companys d'Erasmus: Maria Farrés i Vallbona, Llibert Julià i Frigola i Marc Ayter Coderch. Gràcies per ajudar-me en tot el que heu pogut i fer-me molt de suport en l'estància a Bèlgica.

També m'agradaria agrair als meus companys de la universitat: Juan Carlos Lopez Garcia, Antonio René Florentin Campana, Alicia Sánchez Luis, Albert Cornelles Pardell, Àlex Sayago Muñoz, Albert Lafuente Arroyo i Manel Ayuso Duro. Sense ells no hagués arribat on estic ara.

Per últim, a la meua família, la qual sempre ha estat al meu costat i m'ajuda a superar els reptes a diari.

Moltes gràcies a tots i cadascun de vosaltres!

## Resum

Aquest treball consisteix en l'estudi i modelització d'una xarxa d'aigua potable per a la seva millor gestió. En les companyies d'aigua, els models hidràulics disponibles requereixen de constants ajustos que són difícils d'implementar. L'objectiu d'aquest projecte és crear un model de simulació en un software lliure.

En el model s'analitzaran la caracterització de la xarxa i s'implementaran tres mètodes de ponderació per tal d'ajustar les fuites que té el model hidràulic a un cas real.

Una vegada implementat el model es buscarà realitzar una optimització per tal d'ajustar encara més els coeficients referents a les fuites al cas real per tal de tindre un error mínim.

Per finalitzar s'analitzaran les dades obtingudes en correspondència amb un cas real i es comentaran les solucions obtingudes.

## Abstract

*This project is about the study and modeling of a water network for a best management. In water companies, the available hydraulic models require constant adjustments that are difficult to implement. The goal of this project is to create a simulation model in free software.*

*The model will analyze the characterization of the network and implement three weighting methods in order to adjust the leaks of the hydraulic model to a real case.*

*Once the model has been implemented, an optimization will be sought in order to further adjust the leakage coefficients to the actual case in order to have a minimal error.*

*Finally, the data obtained will be analyzed in correspondence with a real case and the solutions obtained will be commented on.*

## Índex

Declaració d'honor .....	3
Agraïments .....	4
Resum.....	5
Abstract .....	5
1. Introducció .....	9
2. Objectius .....	10
3. Coneixements i conceptes bàsics de xarxes de distribució d'aigua .....	11
3.1. Xarxa de distribució d'aigua .....	11
3.2. Tancs .....	13
3.3. Canonades .....	14
3.4. Vàlvules.....	15
3.5. Bombes .....	16
3.6. Pèrdues de Càrrega .....	17
4. Programaris .....	23
4.1. Elements principals d'Epanet: .....	23
4.2. Entorn R .....	26
5. Xarxa.....	29
5.1. Caracterització de la xarxa.....	31
5.2. Mètode equi-repartit.....	36
5.3. Mètode Longituds.....	39
5.4. Mètode de ponderació probabilitats de trencament .....	43
6. Comparació amb mesures reals.....	45
6.1. Comparació coeficients equí-repartits .....	47
6.2. Comparació ponderació de longituds .....	49
6.3. Comparació ponderació probabilitats de trencament .....	51
6.4. Algoritme implementat per la simulació.....	54
7. Algoritmes Genètics .....	56
7.1. Població Inicial .....	57
7.2. Fortalesa (Fitness).....	57
7.3. Seleccionar Individus .....	58
7.4. Encreuar dos individus ( <i>crossover</i> , recombinació).....	58
7.5. Mutar Individus .....	59
7.6. Codi d'algoritmes genètics .....	59
7.7. Algoritme d'optimització.....	62

8. Conclusions .....	63
9. Bibliografia .....	65

## Índex d'equacions

Equació 1: Pèrdues de càrrega primàries. Mètode de Darcy-Weisbach velocitat .....	18
Equació 2: Pèrdues de càrrega primàries. Mètode de Darcy-Weisbach Cabal .....	18
Equació 3: Reynolds viscositat dinàmica .....	18
Equació 4: Reynolds viscositat cinemàtica.....	19
Equació 5: Fricció de Darcy .....	19
Equació 6: Pèrdues de càrrega secundaries .....	20
Equació 7: Pèrdues de càrrega general.....	21
Equació 8: Pressió disponible.....	22
Equació 9: Pèrdues de càrrega usuari.....	22
Equació 10: Fòrmula del caudal - coeficients emissors .....	24
Equació 11: Diferència de rendiments reals .....	30
Equació 12: Aigua lliurada del dipòsit.....	30
Equació 13: Ponderació de Longituds.....	39
Equació 14: Ponderació per probabilitats de trencament.....	43
Equació 15: Main square error .....	46
Equació 16: Main absolut error .....	46
Equació 17: Coeficient emissor optimitzat .....	59
Equació 18: Funció Fitness .....	60

## Índex d'il·lustracions

Il·lustració 1: Xarxa de distribució oberta o ramificada, fotografia extreta d'una part de la xarxa de distribució de la ciutat de Manresa .....	12
Il·lustració 2: Xarxa de distribució tancada o mallada, fotografia extreta d'una part de la xarxa de distribució de la ciutat de Manresa. ....	13
Il·lustració 3: Diagrama de Moody .....	20
Il·lustració 4: Objecte d'estudi; xarxa de distribució de la ciutat de Manresa .....	29
Il·lustració 5: Gràfic de materials en la xarxa.....	31
Il·lustració 6: Gràfic d'edats de la xarxa. ....	32
Il·lustració 7: Histograma distribució de longituds .....	33
Il·lustració 8: Histograma de distribucions de longituds reals.....	34
Il·lustració 9: Distribució de longituds menors de 100m .....	34
Il·lustració 10: Distribució de longituds majors de 100m .....	35
Il·lustració 11: Pèrdues de càrrega (Equi-repartits) .....	37
Il·lustració 12: Semblança normal – pèrdues de càrrega .....	38
Il·lustració 13: Pèrdues de càrrega (Longituds) .....	41
Il·lustració 14: Semblança normal - pèrdues de càrrega (longituds).....	42
Il·lustració 15: Pèrdues de càrrega probabilitats .....	44
Il·lustració 21: Diferència node 3 coeficient equi-repartit.....	48

Il·lustració 22: Diferència node 1 coeficient longituds .....	49
Il·lustració 21: Diferència node 3 coeficient longitud .....	50

## Índex de taules

Taula 1: Coeficient de pèrdues menors - vàlvules .....	21
Taula 2: MSE i MAE - Sense coeficients .....	49
Taula 3: MSE i MAE - Coeficients equi-repartits .....	49
Taula 4: MSE i MAE - Coeficients Longituds.....	51
Taula 5: Valors obtinguts de la simulació. ....	61



## 1. Introducció

L'aigua és un dels pilars imprescindibles que té l'espècie humana ja que és necessària per a sobreviure. Antigament, les civilitzacions buscaven una manera de poder portar l'aigua a les seves residències per tal de poder tenir aquest recurs a l'abast, sense haver-se de desplaçar cap a rius o llacs.

Les aplicacions més comunes per les quals es necessita aigua, tant antigament com avui en dia, són diverses, entre les quals destaquen aplicacions d'ús domèstic, agricultura, indústria o la pròpia salut de les persones, com és la higiene o la sanitat.

Per a poder transportar aquesta aigua cap a les poblacions o assentaments s'ha passat per varies etapes, com per exemple, simples sistemes de canonades o grans construccions, com són els aqüeductes.

Avui en dia, gran part de la població, de països desenvolupats, té accés a aigua potable de qualitat en qualsevol instant només obrint l'aixeta de la casa seva. Això és possible gràcies als sistemes de xarxes de distribució d'aigua que hi ha instal·lats a les ciutats.

Una xarxa de distribució d'aigua és el conjunt de canonades, accessoris i estructures que porten l'aigua des de dipòsits de servei fins a domicilis o serveis públics. Aquestes xarxes, però, han de tenir un disseny òptim per tal de minimitzar-ne el cost i també han de complir un requisits que venen establerts per: pressió mínima, cabal, velocitat d'aigua a més a més dels requeriments sanitaris.

Fins fa relativament poc, els controls de les xarxes d'aigua es realitzaven de manera manual amb la utilització de vàlvules i aparells de mesura. Avui en dia, però, aquest control es pot realitzar de forma més automatitzada mitjançant programes informàtics que permeten realitzar una simulació i càlcul. L'Epanet és el programa més utilitzat per l'optimització i operació de la xarxa.

Cada vegada es realitzen més estudis amb l'objectiu de poder optimitzar el control de dites xarxes aplicant diferents mètodes.

## 2. Objectius

L'objectiu principal d'aquest projecte és l'estudi i la simulació de les dades d'una xarxa d'aigua cedida per l'empresa Aigües de Manresa. Es pretén realitzar un control de paràmetres com el diàmetre, longitud o edat de les canonades. També es busca balancejar el model hidràulic mitjançant l'ús dels coeficients emissors, paràmetres als quals se'ls hi donarà un valor en funció de la probabilitat de trencament de les canonades i la utilització de patrons que regulen la demanda dels nodes i l'altura del dipòsit. Una vegada realitzada la caracterització de la xarxa es durà a terme la seva optimització, per tal d'ajustar els coeficients emissors al rendiment de la xarxa desitjat, mitjançant algorismes genètics.

Per fer-ho, s'utilitzarà el programa Epanet. És un programa que s'utilitza per la realització de simulacions sobre el comportament hidràulic i l'evolució de la qualitat d'aigua en xarxes de subministrament de pressió.

En el cas d'estudi, la xarxa d'aigua està composta per canonades, nusos i dipòsits d'emmagatzematge.

A part de la seva versió de software, Epanet té l'opció d'utilitzar toolkits per llegir el programa des de diferents llenguatges informàtics. En aquest treball s'utilitzarà una toolkit anomenada "Epanet2toolkit" que permet entendre el programa des de un entorn de "R". Utilitzant programes com "Rstudio" i el "Rcomander" es pot realitzar l'estudi de la nostra xarxa des de un software diferent al d'Epanet. Dintre d'aquest entorn també s'utilitzen llibreries que permeten l'ús d'algorismes genètics.

## 3. Coneixements i conceptes bàsics de xarxes de distribució d'aigua

En aquest apartat es realitza una explicació dels conceptes i coneixements que cal tenir presents per a la correcta comprensió i seguiment del treball. S'expliquen tant els elements que intervenen en una xarxa d'aigua, com els softwares utilitzats per fer les simulacions corresponents.

### 3.1. Xarxa de distribució d'aigua

Una xarxa de distribució d'aigua és aquella en la qual es transporta l'aigua des del dipòsit d'aigua de consum humà fins el punt de consum. Aquest punt pot ser des d'una fàbrica fins un domicili particular d'un client.

Per poder distribuir aquesta aigua de manera correcta i amb les mínimes pèrdues possibles s'ha de mantenir una pressió mínima (manomètrica) positiva, el qual és un requeriment sanitari per l'aigua potable. El conjunt de canonades amb el dipòsit i les diferents vàlvules i bombes que es troben abans d'arribar al punt de consum s'anomenen xarxes de distribució que es divideixen en arterial i secundària o ramal.

Aquesta xarxa arterial es connecta amb una xarxa secundària en el punt de distribució. Aquesta última és l'encarregada de distribuir l'aigua a menor escala, fins el punt de destinació final. El conjunt de les dues xarxes és el que s'anomena xarxa de distribució d'aigua potable.

Existeixen dos tipus principals de sistemes de xarxes de distribució d'aigua; el sistema de xarxes obert o ramificat i el sistema de xarxes tancat o mallat. Es procura que les xarxes siguin mallades ja que d'aquesta manera compensen les pressions.

#### 3.1.1. Xarxa oberta o ramificada

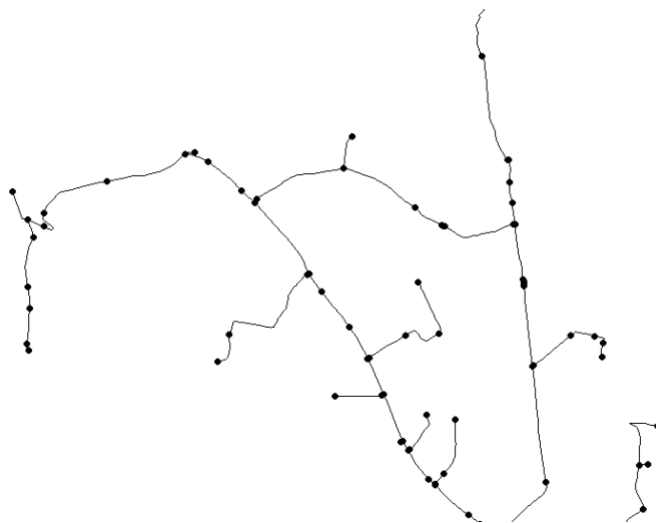
En aquest sistema de distribució es parteixen o es ramifiquen les xarxes secundàries des de l'arteria. Aquest, presenta una sèrie d'avantatges i desavantatges.

Els avantatges es poden resumir en que per a zones on és difícil construir per el terreny o altres condicions aquesta opció es senzilla, factible i sobretot econòmica.

Els desavantatges principals es basen en que el flux de l'aigua només pot tenir una direcció determinada per la xarxa matriu. Això provoca que degut a reparacions o manteniment gran part dels clients es quedaran sense aquest servei. A més a més, no es compensen les pressions dins la xarxa.

També existeix el problema del temps de residència de l'aigua. El valor de la concentració de clor ha d'estar comprès entre 0.2 i 1. Si el valor sobresurt d'aquest paràmetre, l'aigua no es podrà considerar dins dels valors paramètrics establerts. A més a més, a partir de les característiques organolèptiques (color, olor i sabor) també pot ajudar a determinar la potabilitat de l'aigua.

En la Il·lustració 1 es pot observar un exemple d'aquest tipus de xarxa. És una il·lustració treta d'una part de la xarxa que s'analitza en aquest treball. Aquesta xarxa, tal i com es mostra més endavant està composta d'una part d'aquest tipus de malla.



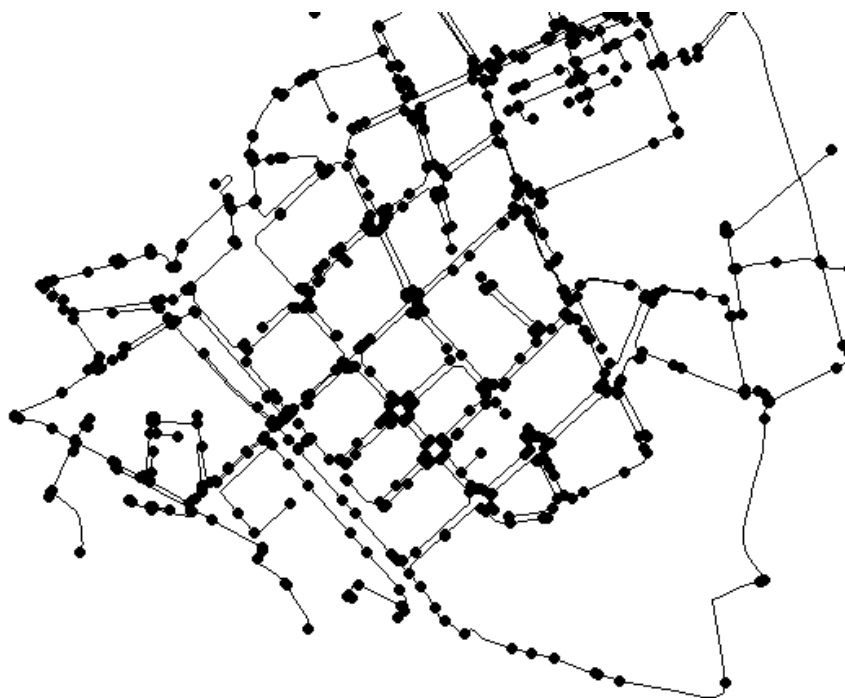
*Il·lustració 1: Xarxa de distribució oberta o ramificada, fotografia extreta d'una part de la xarxa de distribució de la ciutat de Manresa*

### 3.1.2. Xarxa tancada o mallada:

Aquest sistema es basa en la interconnexió entre les canonades que formen aquesta distribució, és a dir, la formació de circuits tancats. Amb això s'aconsegueix reduir els punts morts o crítics en la xarxa al circular aigua contínuament pel sistema. També s'aconsegueixen menors pèrdues de càrrega al abastir les canonades per els dos extrems de les mateixes.

Normalment, aquests sistemes són la configuració típica dels nuclis urbans. El mallat de la xarxa es sol correspondre a la xarxa arterial. Són utilitzats en zones on el terreny és favorable i no són grans distàncies degut a que la seva instal·lació és molt menys econòmica que la primera opció.

En la Il·lustració 2 es pot observar un exemple d'aquesta xarxa. També és un fragment de la xarxa d'estudi d'aquest treball.



*Il·lustració 2: Xarxa de distribució tancada o mallada, fotografia extreta d'una part de la xarxa de distribució de la ciutat de Manresa.*

### 3.2. Tancs

Les instal·lacions d'emmagatzematge de les xarxes de subministrament són conegudes com dipòsits. Aquestes emmagatzemen l'aigua tractada abans de la seva distribució. També equilibren les fluctuacions en la quantitat i qualitat de l'aigua (dipòsits cua).

Aquests magatzem s'escullen mitjançant un criteri econòmic, en funció del preu de l'electricitat o la disponibilitat de l'aigua. Per aquest criteri, s'omplen en els moments de menor demanda (preu d'aigua més baix) per tal d'assegurar la quantitat necessària en els moments de més demanda.

La grandària d'aquests depèn també de la demanda que s'ha d'atendre, la confiabilitat de la font i el finançament disponible per el manteniment del subministrament d'aigua. A més a més de disposar d'aigua per hidrants d'incendi.

Aquests tancs poden estar situats semisoterrats o per sobre la cota del terreny. Aquesta última es solució que ja no es sol utilitzar, en el seu lloc s'han substituït per grups de pressió. En la xarxa a analitzar es tracta d'aquesta segona situació. Degut a que el tanc es troba en una certa altura, els pisos més elevats dels edificis disposen d'una pressió mínima perquè els hi arribi l'aigua.

Un tanc o reservori està compost dels següents elements:

- Dipòsit d'emmagatzematge: La grandària del tanc be determinat com ja sabem per la demanda mitja d'aigua, així com la freqüència de subministrament a la població beneficiada. Aquestes també es dissenyen pensant en el creixement urbà, o reservar addicionals com per exemple per aigua contra incendis.
- Punt d'accés a l'interior: Aquest element existeix per tal de poder inspeccionar, netejar i fer el manteniment dins del tanc.
- Canonada de ventilació d'aire: Les ventilacions solen ser laterals, tenen una superfície mínima i estan protegides amb tela mosquitera. Això permet que no es contamina l'aigua de dins i que tampoc pugui accedir cap animal. A més a més, també permet evitar l'acumulació de productes derivats del clor a l'aire.
- Bomba d'aigua i tanc de pressió: S'anomenen també grups de pressió i serveixen per donar servei a les zones més elevades de la població.

### 3.3. Canonades

Les canonades són les encarregades de transportar l'aigua en el sistema fins al punt de servei. Existeixen diferents tipus de canonades depenent del servei que es pretén donar amb el sistema de distribució implantat i del cost de l'època en que es van instal·lar.

#### 3.3.1. Canonades metàl·liques

- 3.3.1.1. Canonades d'acer: Són les canonades més resistents i duradores de totes, però a la vegada són les menys econòmiques. Suporten grans pressions i per tant són les utilitzades a la sortida d'aigua de la xarxa de distribució. D'altra banda, no es solen utilitzar perquè s'oxiden amb facilitat.
- 3.3.1.2. Canonades de ferro o acer galvanitzat: Són les tradicionalment utilitzades per les instal·lacions de calderes. Últimament la seva popularitat està disminuint degut a que davant d'estancament continu de l'aigua, s'oxiden. Actualment estan sortint al mercat opcions més econòmiques i amb prestacions similars.
- 3.3.1.3. Canonades de ferro fos: Al igual que les canonades d'acer, són resistents a pressions d'aigua, però són molt més pesades amb lo que es difícil la seva instal·lació en terrenys complicats. També son les més cares econòmicament parlant però la seva vida útil es molt llarga.

### 3.3.2. Canonades ciment

- 3.3.2.1. Canonades de formigó: La principal avantatge d'aquestes respecte totes les altres es que són resistents a la corrosió. El problema es que no s'utilitzen degut a que en sistemes d'aigua potable no es possible segellar les juntes, una variant d'aquestes són les canonades de formigó amb ànima d'acer.
- 3.3.2.2. Canonades d'asbest-cement: Són també resistents a la corrosió i són canonades fàcils de dissenyar i transportar. El problema principal d'aquestes és que el fibrociment al inhalar-lo pot ser cancerigen. Per aquesta raó, aquestes canonades estan prohibides. Les canonades que van ser construïdes antigament (actualment ja fa més de 20 anys que no s'instal·len) amb aquest material s'han anat substituint amb el temps.

### 3.3.3. Canonades de plàstic

- 3.3.3.1. Canonades de CPVC (Policlorur de vinil clorat): Utilitzades per transportar aigües a altes pressions però sempre i quan la temperatura de la mateixa no sigui alta. La temperatura de l'aigua sempre ha de ser inferior als 25°C.
- 3.3.3.2. Canonades de PEX (Polietilè reticulat): Tenen les mateixes característiques que les anteriors però són capaces de suportar temperatures més elevades que les anteriors. Aquestes tenen un preu més elevat.
- 3.3.3.3. Canonades de Polietilè: Les més comunes en aquest apartat de canonades de plàstic. Resistents a altes pressions i temperatures. Són les utilitzades per les entrades als domicilis.

## 3.4. Vàlvules

Les vàlvules són elements claus en instal·lacions de xarxes d'aigua degut a que permeten el control del flux del fluid en una canonada, permeten el pas del mateix per la canonada o aturar-ne el flux. Algunes d'aquestes vàlvules es fan servir per controlar el flux i d'altres controlen la pressió, encara que tenen més funcions.

Les vàlvules poden ser fabricades en metall, aliatges metàl·lics o polímers. El més comú es diferenciar-les per el ús que se'ls hi dona. Podem diferenciar llavors les següents:

### 3.4.1. Vàlvules de bola o esfera:

Aquest tipus de vàlvules són utilitzades sobretot en àmbits residencials i per diàmetres petits. Poden ser dos o tres vies les quals es tanquen mitjançant una esfera giratòria i una bola esfèrica en el seu interior amb el lateral perforat. Si parlem de xarxes aquestes es solen utilitzar fins a polsada o polsada i mitja.

#### 3.4.2. *Vàlvules de comporta:*

Aquesta vàlvula és utilitzada per a fluids els quals no s'interrompen i són nets, com per exemple aigua potable. També es poden utilitzar en aigües residuals però amb tancament elàstic. Una de les característiques més rellevants d'aquestes vàlvules és que no poden ser obertes parcialment sinó que han d'estar o obertes o tancades totalment. No s'utilitzen en obertura parcial degut a la dificultat de regular el cabal i al perill de cavitació.

#### 3.4.3. *Vàlvula de papallona:*

La vàlvula papallona és utilitzada degut a la seva gran versatilitat ja que pot regular el pas de l'aigua mitjançant la secció de pas gràcies a una placa que gira en el eix. Aquestes vàlvules no es poden utilitzar en aigües residuals.

### 3.5. Bombes

Les bombes són màquines capaces de convertir l'energia mecànica en energia hidràulica. Aquesta conversió permet l'impuls d'un fluid incompressible entre dos nivells, de baixa a alta pressió, o també permeten passar aigua d'un dipòsit a un altre o estan en grups de pressió.

Podem classificar les bombes segons la seva font d'alimentació:

#### 3.5.1. *Electro-bombes*

Aquestes bombes estan connectades a la xarxa elèctrica per tal de que funcionin. Es solen utilitzar per bombejar aigua d'un lloc a un altre transportant aigua neta, bruta o líquids variis. Dins d'aquestes en podem trobar dos de principals:

##### 3.5.1.1. *Bomba Centrífuga:*

Aquestes bombes són utilitzades per l'ús domèstic. Són capaces d'elevat 30 metres d'altura l'aigua donant pressió a la mateixa.

##### 3.5.1.2. *Bomba Perifèrica:*

Aquestes bombes són utilitzades principalment en dos àmbits: l'agrícola i el domèstic. Extreuen l'aigua en grans quantitats i en poc temps.

#### 3.5.2. *Motobombes*

Tenen un motor a combustible amb el que no han d'estar connectades al corrent. Aquest motor mou un generador que els hi proporciona energia elèctrica. Extrauen cabal i pressió a parts iguals i la manera de funcionar depèn de la capacitat del motor. Es sol fer servir en equips d'emergència.

Les bombes centrífugues que són construïdes pel subministrament d'aigua en una xarxa estan compostes per les següents parts:

- **Carcassa:** Normalment estan fetes de ferro fos per aigua potable. També es solen fer de bronze o acer inoxidable si el líquid de transport és aigua corrosiva. També se solen utilitzar per altres tipus d'aigua com aigua de mar o aigües residuals. Però si el subministrament és per xarxes d'aigua potable no es corrosiu.



- Eix impulsor: Aquest té com a funció transmetre el parell motor que rep el motor durant l'operació de bombeig.
- Impulsor: Per el bombeig d'aigua potable en petits, mitjans o grans cabals, s'utilitzen alabès radials i semi axials.
- "Tazones": Aquestes es troben en bombes multicel·lulars. Els impulsors s'armen per separat, dintre de caixes que presenten formes cilíndriques. A aquestes caixes se les coneix com tazones.
- Motor: A diferència de les electro-bombes, aquests funcionen amb combustible en intercanvi d'electricitat. Aquesta bomba acciona las pales que mouen el líquid radialment generen energia i velocitat.

### 3.6. Pèrdues de Càrrega

Podem definir les pèrdues de càrrega com la pèrdua de pressió que es produeix per la fricció de l'aigua passant a través de les parets de les canonades.

Aquestes pèrdues també es localitzen en el pas d'elements de la distribució d'aigua com: vàlvules, bombes, colzes, pèrdues puntuals.

*"La pérdida de carga en una tubería o en un elemento hidráulico de una conducción es la diferencia de presión entre dos puntos, para un determinado caudal. Si no hay fluido en movimiento no puede haber pérdida de carga."* (ARCO, 2019)

Les principals causes de pèrdues de càrrega es poden definir com les següents:

- El diàmetre: Quant major és aquesta variable disminueix la pèrdua de càrrega.
- La longitud: Si la canonada és molt llarga es produeix una major pèrdua de càrrega que en una més curta.
- El cabal: Quanta més velocitat porti el fluid que passa per la canonada, major serà aquesta pèrdua.
- El material: Si una canonada és molt rugosa, s'hi troba més fricció i per tant major pèrdua.
- Tipus de fluid: Segons el fluid que s'utilitza, la seva densitat i la seva viscositat, el valor de la pèrdua de càrrega es veurà influenciat.

Les pèrdues de càrrega en aquest tipus de sistemes es divideixen en dos grans grups:

#### 3.6.1. Pèrdues de carregues primàries o contínues.

Són aquelles que es produeixen per la fricció del fluid amb la paret de la canonada.

El valor d'aquesta pèrdua de càrrega ve influenciat principalment per els factors de longitud i rugositat de la canonada i per la densitat, velocitat i viscositat del fluid.

Existeixen diversos mètodes per a determinar la pèrdua de càrrega, però EPANET utilitza els tres següents:

#### 3.6.1.1. Mètode de Hazen-Williams

Utilitzat només per a l'àmbit de l'aigua. Els resultats obtinguts depenen de la rugositat relativa i el número de Reynolds.

#### 3.6.1.2. Mètode de Chery-Manning

Utilitza l'estimació de la velocitat de dos punts.

#### 3.6.1.3. Mètode de Darcy-Weisbach

És el mètode que millor funciona i està recomanat per a realitzar càlculs teòrics.

L'equació que segueix és la següent:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

*Equació 1: Pèrdues de càrrega primàries. Mètode de Darcy-Weisbach velocitat*

On també la podem expressar de la següent manera:

$$h_f = f \cdot \frac{8 \cdot L \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot D^5}$$

*Equació 2: Pèrdues de càrrega primàries. Mètode de Darcy-Weisbach Cabal*

On:

- ❖  $h_f$ : Pèrdua de càrrega localitzada (mca)
- ❖  $f$ : Factor de fricció de Darcy (adimensional)
- ❖  $L$ : Longitud de la canonada (m)
- ❖  $D$ : Diàmetre del conductor (m)
- ❖  $v$ : Velocitat mitjana de l'aigua (m/s)
- ❖  $Q$ : Flux del fluid circulant (m<sup>3</sup>/s)
- ❖  $g$ : Acceleració gravitatòria (9,81 m<sup>2</sup>/s)

En referència al factor de fricció de Darcy, aquest és influenciat per la rugositat relativa de la canonada i el número de Reynolds.

El número de Reynolds determina la relació entre les forces inercials amb les viscoses del fluid i determina si el mateix es troba en un flux laminar  $Re < 2300$ , un flux de transició on el valor de Reynolds va entre  $Re > 2300$  i  $Re < 4000$  i un flux turbulent  $Re > 4000$ .

Podem expressar el número de Reynolds amb la següent expressió:

$$Re = \frac{\rho \cdot V_s \cdot D}{\mu}$$

*Equació 3: Reynolds viscositat dinàmica*

O també en funció de la viscositat cinemàtica com:

$$Re = \frac{v_s \cdot D}{\nu}$$

Equació 4: Reynolds viscositat cinemàtica

On:

- ❖ *Re*: Número de Reynolds (adimensional)
- ❖ *v<sub>s</sub>*: Velocitat característica del fluid (m/s)
- ❖ *D*: Diàmetre de la canonada (m)
- ❖ *μ*: Viscositat dinàmica del fluid (Pa·s)
- ❖ *ν*: Viscositat cinemàtica del fluid (m<sup>2</sup>/s)
- ❖ *ρ*: Densitat de l'aigua (kg/m<sup>3</sup>)

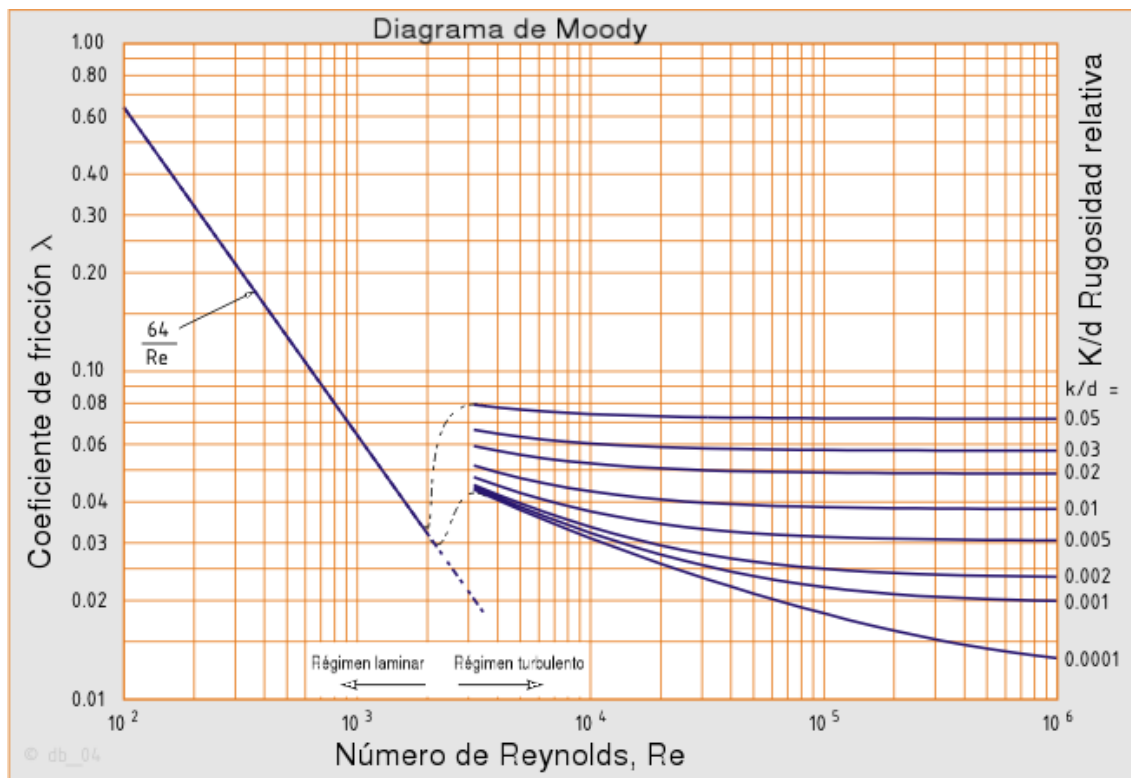
En el cas de que trobéssim que el número de Reynolds en el nostre fluid es correspongués a regim laminar. Podríem expressar el factor de fricció de Darcy com a:

$$f = \frac{64}{Re}$$

Equació 5: Fricció de Darcy

Si el número de Reynolds expressa que el fluid es troba en regim turbulent, una de les opcions més utilitzades és treballar amb taules, les quals marquen el valor de la fricció de Darcy. Sovint també es té en compte l'edat de la canonada ja que amb el temps incrementen la rugositat. Una altre opció també utilitzada és el diagrama de Moody.

El diagrama de Moody representa en escala logarítmica el factor de fricció de Darcy en funció de la rugositat relativa. En la Il·lustració 3 es pot trobar el diagrama en qüestió:



Il·lustració 3: Diagrama de Moody

Com es pot observar en el següent gràfic, en règim laminar el fluid no depèn de la rugositat relativa de la canonada ja que segueix una tendència lineal.

En el cas del règim turbulent el càlcul es complica, per això s'utilitza el diagrama de Moody el qual dona una aproximació del valor del coeficient de fricció  $f$  en correspondència amb la rugositat relativa.

Aquest valor normalment ve tabulat pel propi fabricant a la documentació tècnica.

### 3.6.2. Pèrdues de carregues puntuals:

Es pot definir les pèrdues de càrregues puntuals com la pèrdua de pressió degut als elements que es solen anomenar peces especials. Alguns exemples són:

- Entrada i sortida de canonades
- Eixamplament o contracció brusca
- Colzes, canvis de direcció, juntes o derivacions
- Vàlvules parcialment o totalment obertes.

L'expressió que utilitzem és una opció de càlcul per pèrdues de carregues puntuals:




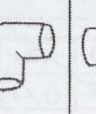
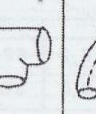




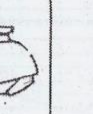
$$h_m = \Sigma K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Equació 6: Pèrdues de càrrega secundaries

On:

- ❖  $h_m$ : Pèrdua de càrrega secundària (mca)
- ❖  $K$ : Coeficient de pèrdues menors (adimensional)
- ❖  $v$ : Velocitat del flux (m/s)
- ❖  $g$ : Acceleració gravitatòria (9,81 m2/s)

En referència al coeficient de pèrdues menors, aquest ve determinat per la Taula 1. És un exemple ja que n'hi ha molts i depenen del material i de la forma de la geometria de la peça especial.

									
DIAMETRO INTERNO (m.m.)	CURVA 90° R-3D	CURVA 90° R-2D	CODO	TE	MANGUERA R-100	DIAFRAGMA ABIERTA	MANQUITO	MACHO PASO RECTO	TECH TAYLOR
LONGITUD EQUIVALENTE EN m DE TUBO RECTO DE IGUAL RESISTENCIA AL FLUJO.									
25	0.52	0.70	0.82	1.77	0.30	2.56	—	0.37	—
32	0.73	0.91	1.13	2.38	0.40	5.29	—	0.49	—
40	0.85	1.10	1.31	2.74	0.49	3.44	1.19	0.58	—
50	1.07	1.40	1.68	3.35	0.55	3.66	1.43	0.73	—
65	1.28	1.65	1.98	4.27	0.70	4.60	1.52	0.85	—
80	1.55	2.07	2.47	5.18	0.85	4.88	1.92	1.04	0.20
90	1.83	2.44	2.90	5.79	1.01	—	—	1.22	—
100	2.13	2.77	3.35	6.71	1.16	7.62	2.19	1.40	0.23
115	2.41	3.05	3.66	7.32	1.28	—	—	1.58	—
125	2.71	3.66	4.27	8.23	1.43	13.11	3.05	1.77	0.30
150	3.35	4.27	4.88	10.06	1.55	18.29	3.11	2.13	0.37
200	4.27	5.49	6.40	13.11	2.41	19.81	7.92	2.74	0.82
250	5.18	6.71	7.92	17.07	2.99	21.34	10.67	3.47	0.61
300	6.10	7.92	9.75	20.12	3.35	28.96	15.85	4.08	0.76
350	7.01	9.45	10.97	23.16	4.27	28.96	—	4.88	0.91
400	8.23	10.67	12.80	26.52	4.88	—	—	5.49	1.04
450	9.14	12.19	14.02	30.48	5.49	—	—	6.22	1.16
500	10.36	13.11	15.85	33.53	6.10	—	—	7.32	1.25

NOTA: PARA CURVA 135° USAR VALOR CURVA 90° x 1.5

Taula 1: Coeficient de pèrdues menors - vàlvules

El sumatori de les càrregues principals amb les càrregues secundàries és el que s'anomena pèrdua de càrrega. Té la següent expressió:

$$\Delta H_{1-2} = h_f + h_m$$

Equació 7: Pèrdues de càrrega general

### 3.6.3. Pressió disponible i pressió usuari

En aquest sub-capítol s'expliquen les diferències en relació a la pèrdua de càrrega en qüestió de pressió disponible i pressió usuari.

Però primer es defineixen cadascuna de les pressions.

#### *Pressió disponible:*

La pressió disponible és la que té el fluid quan la seva velocitat es zero. En aquesta simulació s'expressa la pressió estàtica amb unitats de metres d'aigua i com una diferència entre l'altura del dipòsit i la dels nodes.

L'expressió corresponent és:

$$\textit{Pressió disponible} = \textit{elevació del dipòsit} - \textit{elevació del node}$$

*Equació 8: Pressió disponible*

On el valor de l'elevació del dipòsit es troba mitjançant la caracterització de la xarxa utilitzant la Toolkit d'Epanet. El valor corresponent per la xarxa de treball és de 310,33 m.

També es pot expressar aquesta pressió disponible mitjançant l'equació de Bernoulli, però al tenir el model d'Epanet es pot extreure directament els valors de l'elevació dels nodes i l'altura del dipòsit del model.

#### *Pressió usuari:*

Aquest valor de pressió s'obté al model una vegada simulat establint els consums i les velocitats diferents de zero. Igual que en el cas anterior, aquest valor s'obté amb unitats de metres columna d'aigua.

La diferència entre la pressió disponible i la pressió usuari dona les pèrdues de càrrega pels diferents nodes de la xarxa. L'equació resultant és la següent.

$$\textit{Pèrdues de càrrega} = \textit{Pressió disponible} - \textit{Pressió usuari}$$

*Equació 9: Pèrdues de càrrega usuari*

## 4. Programaris

Per a la realització d'aquest treball s'utilitzen els softwares d'Epanet i l'entorn R, amb la utilització dels softwares de Rcommander i Rstudio. A través de l'entorn R es pretén simular, caracteritzar i optimitzar (mitjançant algoritmes genètics) la xarxa de distribució presentada a continuació amb la Toolkit anomenada "Epanet2toolkit". A continuació, s'explica com realitzar la descàrrega de les eines que es necessiten per a la realització del treball.

També s'expliquen els diferents softwares utilitzats juntament amb les funcions més importants per realitzar l'optimització al cas d'estudi i les llibreries utilitzades per la compilació del codi.

Epanet és el software utilitzat per la simulació de xarxes de subministrament d'aigües. És un software lliure amb una llicència d'ús també lliure que es pot utilitzar per a qualsevol ordinador tant Mac com Windows.

Aquest software va ser desenvolupat per la Divisió de Recursos hídrics i subministrament d'aigua del laboratori nacional d'investigació per la prevenció de riscos de l'agència per la protecció del medi ambient de EEUU (EPA).

Es va desenvolupar una versió en Espanyol d'Epanet 2.2, identificada pel prefix Esp. Aquesta versió traduïda és tan utilitzada com en ambient estudiantil com en empreses encarregades de desenvolupar xarxes de subministrament d'aigua en grans ciutats o en petites instal·lacions. També s'utilitza en xarxes de reg.

Epanet serveix per a realitzar simulacions, en amplis períodes de temps, del comportament hidràulic i qualitat de l'aigua en xarxes de distribució. El programa troba l'equilibri hidràulic per una determinada situació. El software no fa càlculs en règim transitori.

Una xarxa de distribució d'aigua pot estar constituïda, tal com s'ha vist abans, per canonades, nusos, bombes, vàlvules i dipòsits d'emmagatzematge o "reservoir", o tancs. Aquest programa realitza un seguiment de l'evolució dels cabals en les canonades, les pressions en els nusos, els nivells dels dipòsits, la concentració de productes químics que trobem a l'aigua i el temps de residència de l'aigua dins de la xarxa, al llarg del període de simulació.

### 4.1. Elements principals d'Epanet:

Epanet és un sistema de distribució que es basa en un conjunt de línies connectades a nusos. Les línies representen elements físics, principals, que són els següents nusos, canonades, bombes, tancs o vàlvules de control.

Aquests estan descrits anteriorment, però en aquest apartat es veuen la seva rellevància en el programa.

Els nodes de cabal són aquells punts on s'ajunten dos o més canonades. A través d'aquests punts l'aigua entra o surt de la canonada depenen de la direcció que prengui el cabal.

Els paràmetres que es visualitzen en aquests nusos són:

- La cota respecte al nivell de referència ( nivell del mar )
- La demanda del aigua ( flux que abandona la xarxa )
- La qualitat inicial de l'aigua

Els resultats obtinguts pels nusos després de realitzar la simulació són:

- L'altura piezomètrica
- La pressió
- La qualitat de l'aigua

Aquests nusos tenen paràmetres depenen del tipus de simulació que es vulgui realitzar amb el programa Epanet i se'ls hi pot adjudicar una sèrie de variables en el temps com són:

- Una demanda variable en el temps (Pattern)
- Tenir assignada diferents tipus de demanda (domestica, industrial, etc.)
- Presentar una demanda negativa, indicant que el cabal entra a la xarxa a través del node.
- Tenir associat un emissor, el qual el cabal de sortida depèn de la pressió dins de la canonada.

Coefficients Emissors: aquest paràmetre està associat als nodes i serveix per a modelitzar el flux de sortida de les canonades per un forat i és un dels paràmetres més importants en el nostre cas d'estudi. Aquest modelatge de flux fa que el cabal de sortida es vegi afectat per tres paràmetres els quals són:

$$q = C * p^{\text{gamma}}$$

*Equació 10: Fórmula del cabal - coeficients emissors*

On:

$$q = \text{Caudal}$$

C = Coeficient de descàrrega

gamma = exponent de la pressió

Per tant, amb aquest coeficient podem modelitzar les fuites de la xarxa atribuint un coeficient. Com es veurà més endavant, aquests coeficients són ponderats de tres maneres diferents per cadascun dels nodes de la xarxa (Equí-repartits, longituds, ponderació).

La demanda és un paràmetre que també està associat als nodes i indica el consum dels abonats que suporta cadascun d'ells. Aquest consum és proporcionat per l'empresa d'Aigües de Manresa en forma de Patern.



Existeixen dos tipus de demandes:

- Demanda Base: Consum mig o nominal en el nus per al principal tipus de consumidor.
- Demanda Real o actual: Suma dels consums depenent del usuari menys les pèrdues físiques.

Les canonades són línies que transporten aigua des del node inicial fins al node final. La direcció del flux en aquestes canonades sempre és unidireccional i circula des del node que té major altura piezomètrica fins al node final. Aquesta consideració de flux és contant que les canonades es troben sempre plenes.

Els paràmetres principals que estan associats a les canonades són:

- Nodes inicial i final
- Diàmetre
- Longitud
- Coeficient de rugositat
- Estat: obert, tancada o semioberta

Una vegada realitzada la simulació de la xarxa d'aigua en particular els paràmetres que es poden contemplar són els següents:

- Cabal de circulació
- Velocitat de flux
- Pèrdua de càrrega unitària
- Factor de fricció Darcy-Weisbach
- Velocitat mitja de la reacció
- Qualitat de l'aigua.

Embassaments: en aquest tipus de xarxes de distribució existeixen dos tipus d'alimentacions o emmagatzematge, aquests són els dipòsits o tancs i els embassaments. En aquest treball no es compta amb embassaments però sí amb dipòsits.

Dipòsits: els dipòsits són nusos amb certa capacitat d'emmagatzematge. El volum que ocupen aquests dipòsits varien en funció del temps de la simulació. Els principals resultats associats a aquest paràmetre són:

- Altura piezomètric.
- La qualitat de l'aigua.

En aquest estudi la simulació es realitza amb dipòsits i no amb embassament perquè es té en compte la dinàmica.

Una vegada descrits els principals elements de l'Epanet, es pot començar a descriure l'entorn R, amb el que es configuraran els valors de coeficients emissors pels diferents casos d'estudi.

Després d'adjudicar els coeficients emissors de les tres maneres, es planteja el problema d'optimització per tal de minimitzar les pèrdues de la mateixa xarxa modificant els coeficients emissors. Per poder aplicar aquesta optimització és necessari la utilització d'algoritmes genètics mitjançant el codi de R.

## 4.2. Entorn R

Epanet és un programa que analitza problemes hidràulics i de qualitat d'aigua en sistemes de distribució. Mitjançant la Toolkit d'Epanet es poden utilitzar funcions que ens permeten desenvolupar o caracteritzar la xarxa en llargs períodes de temps. Per poder utilitzar la Toolkit es pot codificar mitjançant llenguatge R.

R és un ambient de programació molt flexible a causa de la possible instal·lació de paquets, llibreries o definir les nostres pròpies funcions.

És un codi desenvolupat a partir del projecte GNU, com podria ser Linux o Mozilla Firefox.

L'entorn de R es va presentar al mercat l'any 1993 desenvolupat pel seu creador Robert Gentleman i Ross Ihaka, que van desenvolupar aquesta eina en el departament d'Estadística de la Universitat de Auckland.

Algunes de les característiques que més destaquen en aquest entorn són les següents:

- Eina més utilitzada per tot tipus de procés i manipulació de dades.
- Entorn de treball flexible i extensible
- Permet crear gràfics d'alta qualitat exportables en diversos formats
- Gran quantitat d'informació sobre les seves funcions i paquets.
- Consumeix pocs recursos informàtics.
- Disponible per a tots els sistemes operatius.

Els programes utilitzats per escriure el codi en l'entorn R són Rcommander, el qual és el mateix llenguatge, i Rstudio, el qual ajuda a entendre millor aquest entorn fent una *interface* més amigable pel consumidor.

Per poder modificar les dades proporcionades per la xarxa de distribució d'aigua que veurem a continuació és necessària la instal·lació d'una llibreria o Toolkit dintre de l'entorn de R. Aquesta Toolkit és l'Epanet2toolkit.

La instal·lació d'aquesta eina s'explica a continuació. Mitjançant aquesta, es pot modificar les entrades al sistema que són cedides en la xarxa per tal de poder modificar el cabal i donat el consum es podrà modificar els coeficients emissors i així ajustar-los a la demanda que té aquesta xarxa d'aigua. Els coeficients emissors són les sortides del sistema (fuites).

#### 4.2.1. Instal·lació de Rcomander, Rstudio i Epanet2toolkit

Com s'ha comentat anteriorment la utilització de *Rcomander*, *Rstudio* i *Epanet2toolkit* són recomanables si es vol dur a terme el projecte d'optimització d'aigua. Per aquesta raó es realitza una petita explicació de la instal·lació d'aquests juntament amb *Epanet* en l'ordinador corresponent.

Per a la instal·lació de *Rcomander* i *Rstudio*, entrant en les webs corresponents es pot baixar tant el llenguatge *Rcomander*, com un lector més amigable com és *Rstudio*, sense cap complicació. És molt recomanat baixar les dues versions que existeixen de *Rcomander*, ja en funció de l'actualització que es duu a terme, alguna de les versions tenen problemes de compatibilitat.

Pel cas d'instal·lar la *toolkit* que permet controlar l'*Epanet* des d'un entorn d'*R*, es podia realitzar abans amb la mateixa instal·lació de *Rcomander* col·locant al mateix programa el codi:

```
install.packages("epanet2toolkit")
```

En l'actual versió, és diferent. Per a realitzar la instal·lació de la Toolkit el primer que s'ha de fer és accedir al *link* de descàrrega:

<https://github.com/bradleyjeck/epanet2toolkit>

Una vegada dins d'aquesta pàgina es baixen les carpetes que apareixen i es localitzen dins de la carpeta de *library* del *R comander*.

Ubicada la carpeta dins del fitxer corresponent es podrà obrir el programa de *R studio* i escriure el següent codi per tal d'acabar la instal·lació de forma adequada.

```
install.packages("epanet2toolkit",  
repos="http://mran.revolutionanalytics.com/snapshot/2020-01-09")
```

Una vegada el codi ha estat executat, es donarà per finalitzada la instal·lació.

#### 4.2.2. GGplot2

*GGplot2* és una Toolkit utilitzada en l'entorn de *R* per tal de poder visualitzar grans quantitats de dades d'una manera clara. En aquest treball s'ha decidit utilitzar aquesta eina perquè permet fer gràfics de dades complexes, com poden ser histogrames, diagrames de caixes, línies de tendències, entre d'altres.

A més, aquesta eina permet el control de funcions com per exemple la modificació de títols en els gràfics, canvis de colors en els fons o combinar dos gràfics per tal de poder trobar la correlació entre les dades proposades en aquest treball.

#### 4.2.3. Epanet Reader

*Epanet Reader* és un paquet de *R* per llegir les simulacions d'una xarxa d'aigua en format *.inp* i *.rpt*

Aquesta eina ens ajuda a llegir resultats com les pressions, les demandes o el temps de simulació per un interval de temps.

#### 4.2.4. GA

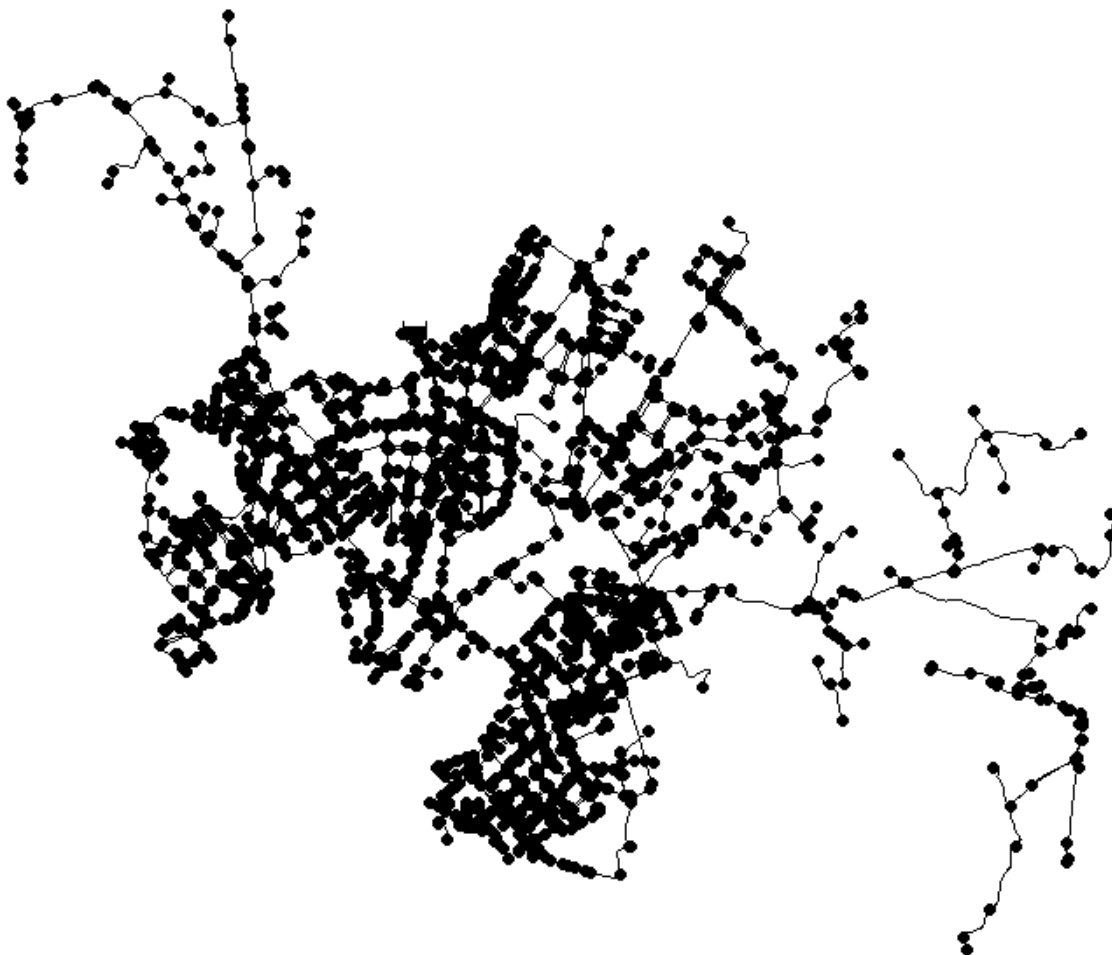
La llibreria GA, és la més utilitzada per l'optimització mitjançant algoritmes genètics. Permet realitzar aquesta optimització per dades reals, binaries i permutacions de valors. Més endavant s'explica el funcionament d'aquesta eina entre d'altres també importants en el treball.

Els links per la descàrrega d'aquestes llibreries es troben en la bibliografia.

## 5. Xarxa

En aquest apartat s'explica la xarxa cedida per Aigües de Manresa. Gràcies a la Toolkit es pot observar algunes dades rellevants de la xarxa com poden ser la longitud, el diàmetre, la rugositat de les canonades, la pressió en els nodes, la demanda o els coeficients emissors.

En la Il·lustració 4 es pot observar la xarxa en qüestió:



*Il·lustració 4: Objecte d'estudi; xarxa de distribució de la ciutat de Manresa*

Aquesta xarxa es tracta d'una distribució combinada on podem trobar zones on la xarxa és ramificada o oberta i d'altres on la xarxa es torna mallada. Aquesta combinació es realitza per temes geogràfics com són la trama urbana i les zones rurals o perifèriques. A vegades és més fàcil realitzar una xarxa ramificada i d'altres on el benefici que aporta la xarxa mallada és major a causa de la circulació de l'aigua.

La xarxa compta amb un dipòsit elevat el qual s'encarrega de mantenir la pressió de la xarxa oscil·lant aproximadament 3 metres. La seva funció principal en la xarxa és la de reserva.

Podem definir el rendiment de la xarxa com el percentatge d'aigua consumida respecte a l'aigua aportada a la xarxa. La resta d'aigua són fuites que es poden simular mitjançant l'ús de coeficients emissors. Alguns factors que són rellevants en el rendiment és per exemple l'edat de la xarxa on el mateix es veu afectat negativament quanta més edat té la xarxa.

L'aigua alliberada de la xarxa a l'inici, que és causada per un valor de coeficients emissors iguals a 0 (fuites), és de 66,03 L/s. L'aigua alliberada o la sortida de l'aigua bé donada pel consum de la xarxa juntament amb el valor que trobarem dels coeficients emissors.

L'objectiu de modificar aquesta xarxa és ajustar el rendiment a un valor de treball del 78%. Per això l'aigua lliurada ha de passar de ser del 66,03 L/s al 84.5 L/s. Aquest valor l'obtenim de fer la següent operació.

$$\frac{100\%}{78\%} = 1,28$$

*Equació 11: Diferència de rendiments reals*

Aquest és el coeficient que ha d'augmentar l'aigua lliurada per tal de poder assolir el 78% de rendiment estimat pel subministrament d'aigua de la xarxa. Per tant l'aigua lliurada ha d'augmentar segons la següent equació.

$$66,03 * 1,28 = 84,5 \frac{l}{s}$$

*Equació 12: Aigua lliurada del dipòsit*

Per lo tant l'aigua lliurada en la xarxa de distribució s'ha de veure incrementada fins al valor de 84,5l/s. Per a poder simular fins a aquest valor haurem d'augmentar el valor dels coeficients emissors.

Plantejat el problema de la nostra xarxa podem començar amb la caracterització. Això ens permetrà saber quantes canonades i nodes componen la nostra xarxa i les característiques de cadascun d'ells. També llegirem dades interessants com son els seus metres o els materials que la componen.

## 5.1. Caracterització de la xarxa

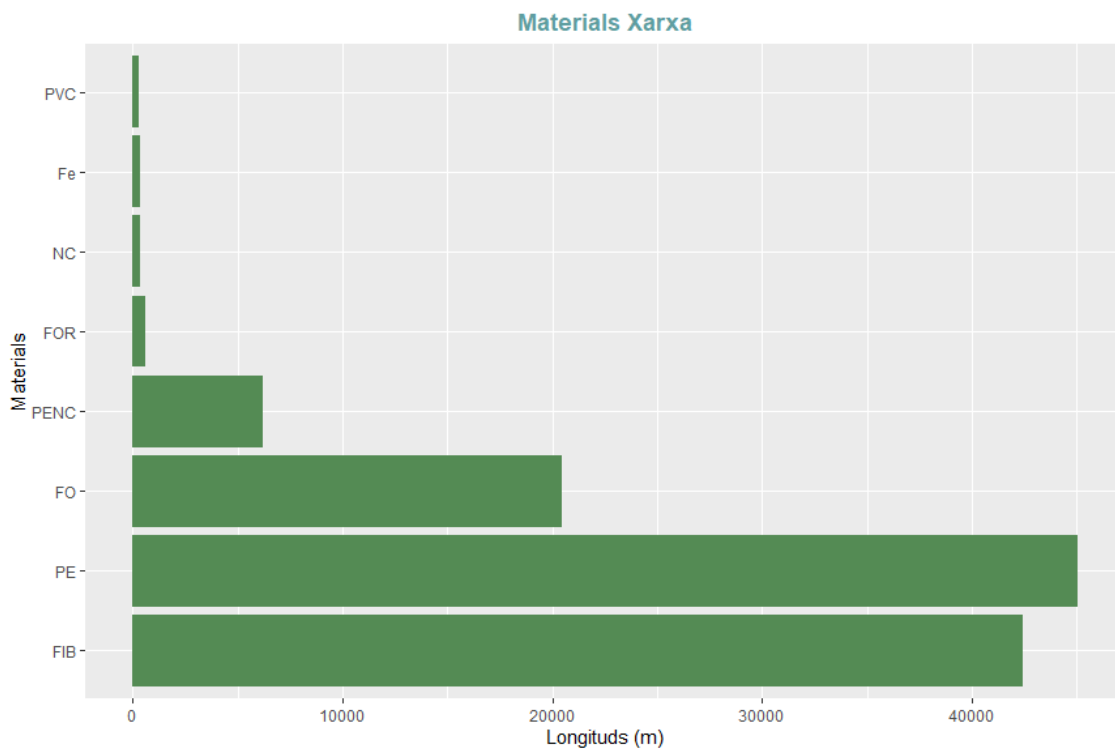
Per a realitzar la caracterització de la xarxa ens ajudarem de l'eina Epanet2toolkit juntament amb la llibreria de GGplot2, per tal de poder generar gràfiques de les dades proporcionades.

### 5.1.1. Materials de la xarxa

Es decideix realitzar una caracterització de la quantitat de materials que té dita xarxa i dels metres que té cadascun d'ells. Aquesta anàlisi es fa per saber quin material és el que predomina en la xarxa i el perquè.

La llargada total de la xarxa és de 115742.9 m i està composta per 79 tipus de canonada, material i diàmetres diferents. Per tal de representar-los d'una manera més senzilla els hem dividit per materials quedant un total de 8 materials.

Per saber la quantitat de metres que hi ha de cada material a la xarxa es realitza un gràfic. En aquest gràfic, l·lustració 5, es pot visualitzar que la gran majoria de la xarxa està composta per polietilè.



Il·lustració 5: Gràfic de materials en la xarxa

El polietilè és el material més utilitzat en aquests sistemes de distribució, això és degut a les seves característiques principals entre les quals destaquem:

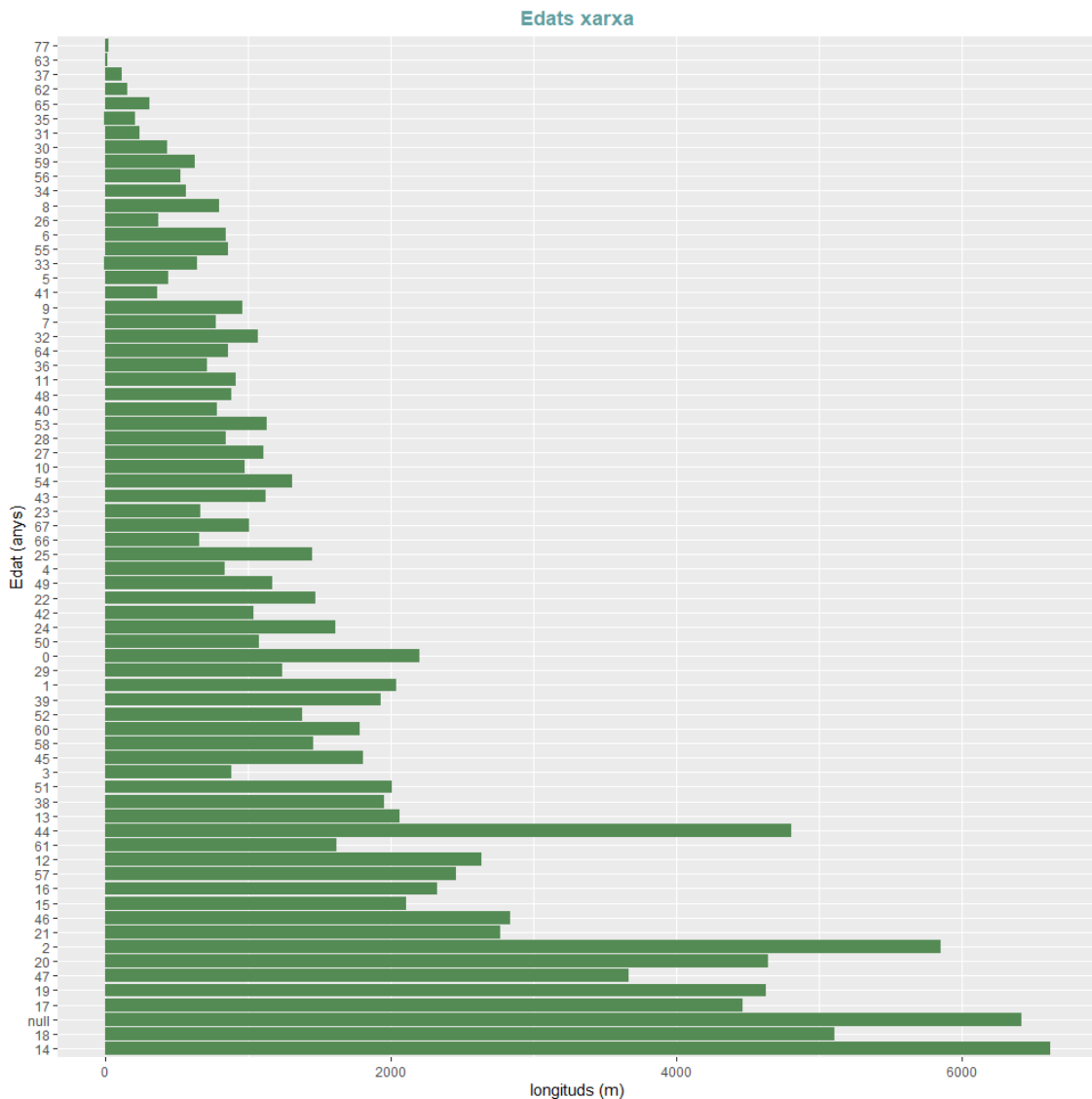
- Absència de toxicitat
- Resistència a la corrosió, als productes químics i als raigs ultraviolats
- Bon comportament hidràulic degut a la seva baixa rugositat

La composició de polietilè que té més metres de longitud en la xarxa és el **PE\_110\_PN16\_PE100**. Aquesta composició de polietilè augmenta la densitat del polietilè augmentant així la pressió dins del tub i disminuint la temperatura.

També es pot observar una important quantitat de fibrociment, material que no s'instal·la des de fa més de 20 anys i que progressivament està sent substituït.

### 5.1.2. Edats de la xarxa

Una altra manera per caracteritzar millor la xarxa és amb la identificació de metres de canonades que hi ha de cada edat. Aquesta característica va lligada al rendiment de la pròpia xarxa. Per poder visualitzar millor aquesta caracterització es realitza el següent gràfic, Il·lustració 6, on es pot observar la quantitat de metres que hi ha per edat.



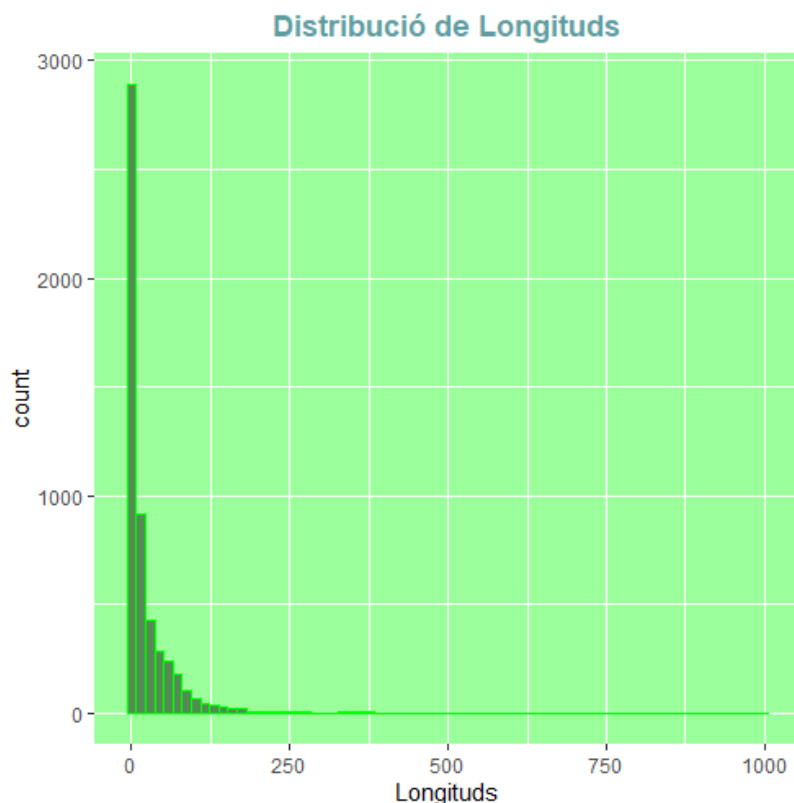
Il·lustració 6: Gràfic d'edats de la xarxa.

S'observa en aquest gràfic que les edats d'aquesta xarxa són molt variades, compreses des de els 90 anys fins l'actualitat. Això ens dona a entendre que es tracte d'una xarxa instal·lada en una població amb un urbanisme consolidat on es va reposant per tal de controlar les pèrdues de càrrega i el seu rendiment total.



### 5.1.3. Distribucions de Longituds

S'analitza la xarxa comprovant la distribució de longituds de la mateixa, tal i com es pot observar en el següent histograma Il·lustració 7.



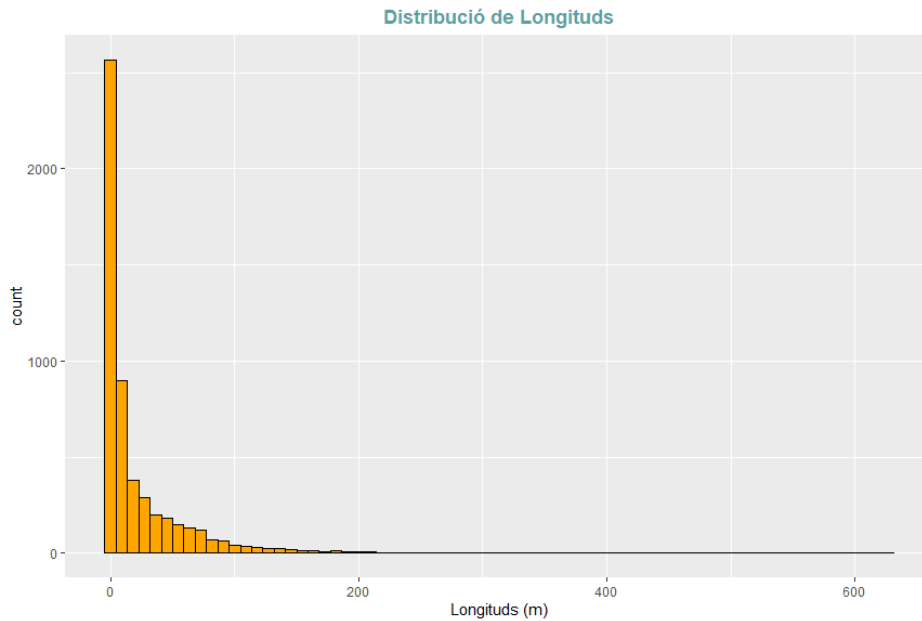
Il·lustració 7: Histograma distribució de longituds

En aquest histograma es veuen representades les diferents longituds per les canonades que conformen la xarxa.

Com es mostra en el gràfic, la majoria de canonades que hi ha en el model hidràulic d'Epanet tenen longituds petites. Això es degut a que una xarxa de subministrament urbà pateix múltiples ramificacions causant que gran part de les canonades utilitzades siguin de longituds reduïdes.

També es pot observar canonades de major longitud, però la gran majoria estan dins del rang de 0 a 100 metres sent més de 4500 les que estan compreses en aquest rang.

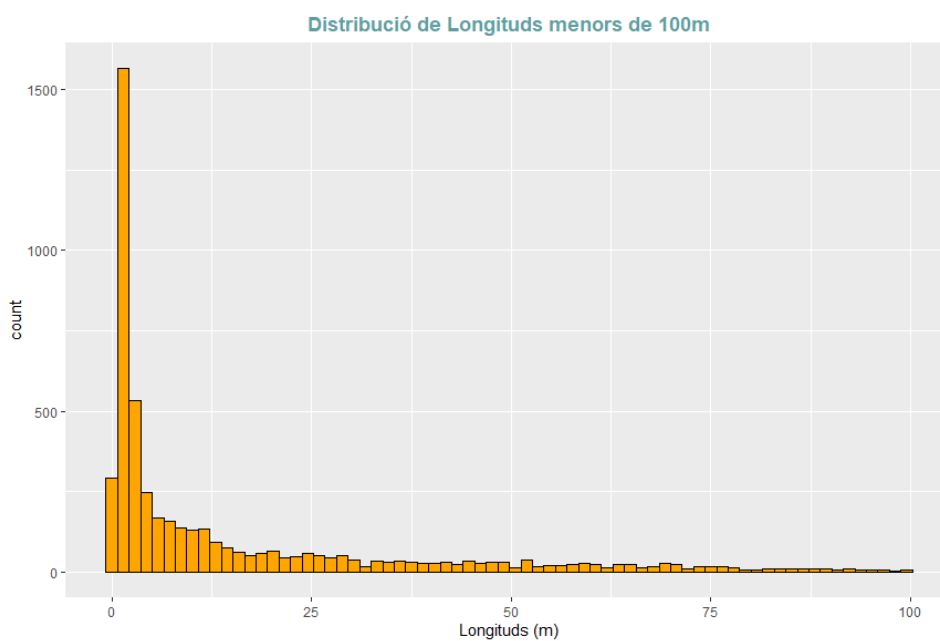
A l'histograma es pot comprovar que hi ha una canonada que té una longitud de 1000 metres. Aquesta canonada està mal introduïda al programa, ja que els valors del diàmetre i longitud estan intercanviats entre si. Una vegada canviats els valors corresponents a aquesta canonada, el nou histograma és la Il·lustració 8 que es mostra a continuació:



*Il·lustració 8: Histograma de distribucions de longituds reals*

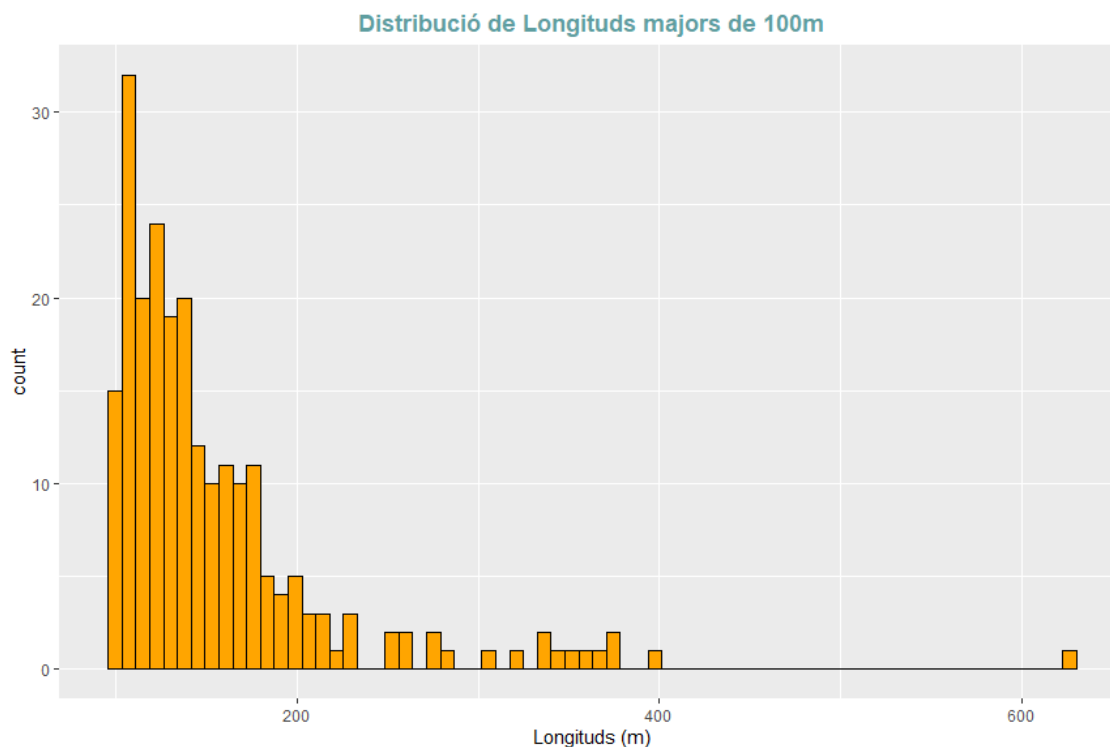
Tal i com mostra el gràfic, només hi ha una canonada que supera els 600 metres. Aquesta canonada uneix el dipòsit amb un node allunyat de la ciutat de Manresa.

Al següent histograma, es representen les diferents canonades corresponents a longituds més petites o igual a 100 metres, Il·lustració 9.



*Il·lustració 9: Distribució de longituds menors de 100m*

Per les canonades de més de 100 metres l'histograma queda tal i com es mostra en la Il·lustració 10:



Il·lustració 10: Distribució de longituds majors de 100m

Una vegada es coneixen les característiques de la xarxa es pot tenir una millor idea de l'objecte d'estudi que s'ha d'optimitzar.

En l'annex I es pot trobar el codi que compila la caracterització de la xarxa.

Per tal de començar amb la optimització de la xarxa el primer pas és plantejar l'augment de l'aigua lliurada de 66,03 L/s a 84,5 L/s per poder treballar en un cas que s'aproximi a la realitat. Per fer-ho s'ha de ponderar els coeficients emissors.

Per poder trobar els valors corresponents a aquests coeficients es proposen tres mètodes diferents:

- **Equi-repartit:** En aquest mètode es pretén augmentar el valor de tots els coeficients emissors a la vegada. Es comença amb un valor mínim, que en aquest cas d'estudi és de 0.00007, i es realitza una iteració per tal de trobar el valor corresponent pel rendiment de treball del 78%.
- **Longituds:** Per aquesta ponderació es pretén modificar aquests valors de manera que siguin proporcionals a les longituds de les canonades que componen la xarxa. Això es realitza perquè les fuites de la xarxa van molt associades a les longituds de les canonades.
- **Edats i probabilitats de trencament:** Aquesta ponderació està molt relacionada amb l'anterior ja que depèn directament d'aquesta. La manera de modificar-los serà per tal de poder trobar una relació entre els coeficients emissors i les edats i probabilitats de trencament de les diferents canonades que conformen la xarxa.

Explicats els tres mètodes de ponderació es passa a explicar cadascun d'ells.

## 5.2. Mètode equi-repartit

Una vegada s'han estudiat les distribucions de les canonades i els nodes de la xarxa d'aigua es comença a imposar els valors dels coeficients emissors. El primer mètode és l'equi-repartit.

En aquest mètode s'imposa que el valor dels coeficients emissors dels nodes siguin igual per tots ells.

Una vegada s'ha imposat un bucle en el programa *Rstudio* per tal d'iterar el valor dels coeficients emissors en un 0.000007 fins el valor d'aigua lliurada desitjat (consum del dipòsit), el valor que assoleixen els coeficients emissors és de 0.000511. Per aquest valor l'aigua lliurada de la xarxa assoleix un 84.5 l/s i per tant el rendiment té un valor d'un 78%.

L'algoritme utilitzat per implementar aquest mètode és el següent:

**Requereix:** *.inp, Rendiment*

**Obtenir:** *Nl, Nn*

**Per** *z=1:Nn* **fer**

**Obtenir:** *Demanda, Coeficient emissor, Elevació, Elevació (Dipòsit), Pattern*

**Finalitzar per**

**Simulació**

**Per** *z=1:Nn* **fer**

**Obtenir:** *Pressió, Consum, Consum dipòsit.*

**Finalitzar per**

**Mentre** *Consum (Dipòsit) > 84.5*

**Per** *z=seq(Nn, -1)* **fer**

*Coeficient Emissor + 0.000007*

**Finalitzar Per**

**Simulació**

**Per** *z=1:Nn* **fer**

**Obtenir:** *Pressió usuari, Consum*

**Finalitzar Per**

**Finalitzar Mentre**

**Per** *z=1:Nn* **fer**

*Pressió Disponible = Elevació (dipòsit) – Elevació*

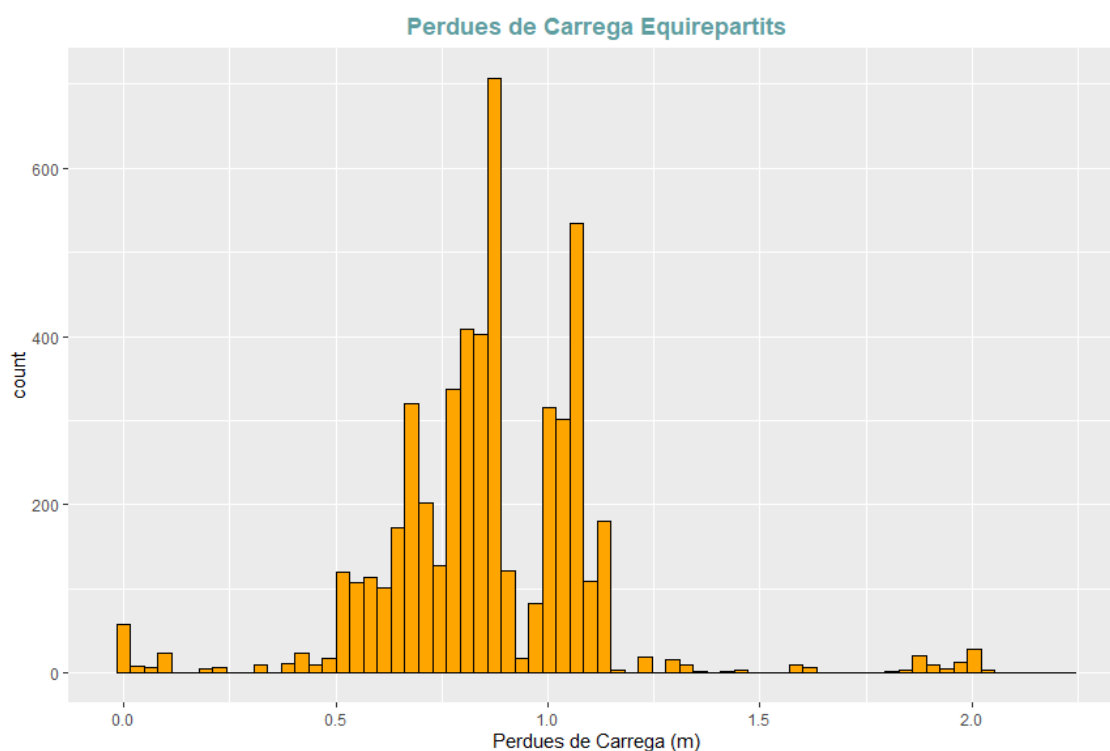
*Pèrdua de càrrega = Pressió Disponible – Pressió Usuari*

**Finalitzar Per**

**Finalitzar codi**

Dins l'algoritme s'observa que les pèrdues de càrrega en el sistema són la diferència entre la pressió disponible i la d'usuari. La pressió disponible o estàtica es pot definir com la diferència d'altures entre el dipòsit i l'altura dels nodes respectivament i defineix la màxima pressió en condicions perfectes, quan les pèrdues de la xarxa són zero. Per contra, la pressió usuari defineix els nivells reals de pressió que arriben a cada node amb un flux de funcionament tenint en compte les pèrdues de càrrega que es produeixen al llarg de la xarxa.

Realitzant el càlcul de les diferències de pressions s'obté la Il·lustració 11, on es mostren les pèrdues de càrrega:



Il·lustració 11: Pèrdues de càrrega (Equi-repartits)

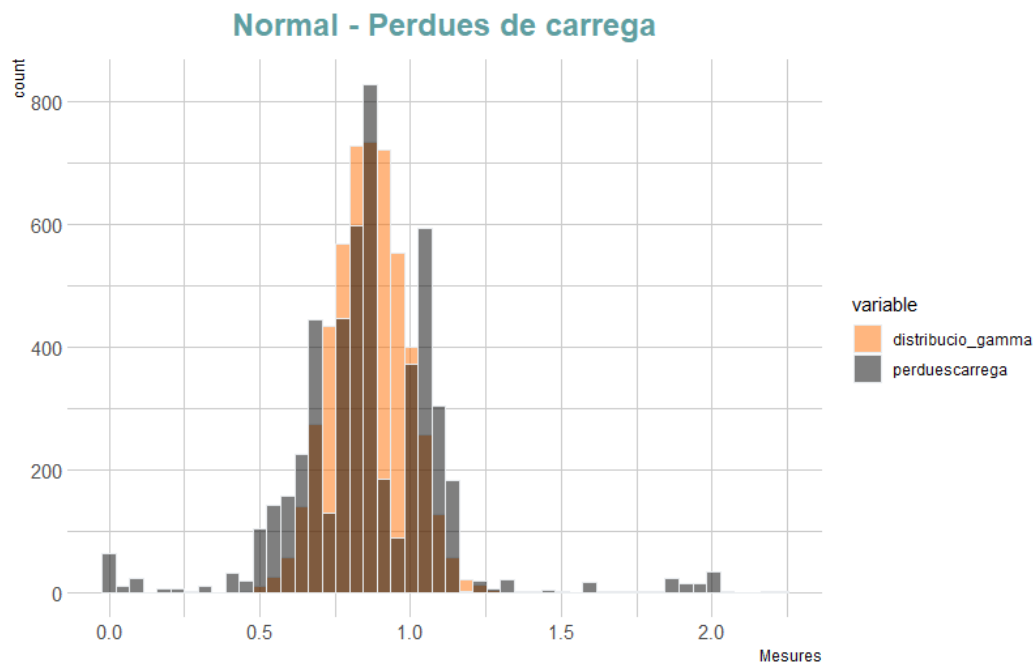
Tal i com es mostra a gràfic, la distribució de quasi totes les pèrdues de càrrega es troben compreses entre 0,5 i 1,5 m.c.a (metres de columna d'aigua).

També s'observa que algunes diferències són molt properes al valor de 0 m.c.a. Això és degut a que aquestes canonades són molt pròximes al dipòsit i les pèrdues de càrrega es poden considerar pròximes a zero degut al gran diàmetre que tenen les canonades amb velocitats reduïdes.

Aquells nodes que tenen una densitat més elevada són els que tenen menors pèrdues de càrrega. La densitat dels nodes depèn de la quantitat dels mateixos concentrats en una zona en concret.

Una canonada que es troba dins d'aquestes pèrdues de càrregues pràcticament nul·les, és la de 600m de longitud. Aquesta ha de tenir una pèrdua de càrrega ínfima, degut a la seva gran longitud.

La distribució es pot considerar que té una certa aproximació a una normal degut a la forma representada a l'histograma. En el següent gràfic es pot observar la semblança entre les dues funcions, Il·lustració 12.



*Il·lustració 12: Semblança normal – pèrdues de càrrega*

La distribució normal es troba compresa entre els valors de 0.0 i 2.0 m.c.a. mentre que el gràfic obtingut per les pèrdues de càrrega està desplaçat cap a la dreta, estant la gran majoria dels seus valors entre el 1.0 i el 0.5 m.c.a.

La funció densitat de la gràfica normal utilitzada ha estat de 5123 mostres de grandària, una mitjana igual a 0.86 i una variància de 0.12.

El codi utilitzat per implementar aquest mètode es troba a l'annex II.

### 5.3. Mètode Longituds.

Aquesta manera de ponderar coeficients emissors es realitza perquè aquelles canonades que tenen longituds molt petites i siguin properes al dipòsit se'ls hi adjudiqui als nodes adjacents un coeficient emissor més petit. Aquells punts que estiguin mes allunyats tindran un valor més gran.

Per poder realitzar el mètode s'imposa a cada node de la xarxa una ponderació. Aquesta ponderació ve determinada per la canonada que té associada a cada node. El coeficient que s'adjudica a ells és la meitat de la longitud de la canonada associada ("Ln"), entre la longitud total de la xarxa ("Lt"). El resultat de la divisió és multiplicat per un factor (K) per tal d'ajustar encara més aquests valors. A la següent equació es pot veure com s'adjudiquen les ponderacions:

$$\frac{L_n}{L_t} * K = C_e$$

*Equació 13: Ponderació de longituds*

On:

$L_n =$  Longitud per node (m)

$L_t =$  Longitud total de la xarxa (m)

$K =$  coeficient de ponderació (adimensional)

$C_e =$  Coeficient emissor (adimensional)

Una vegada s'ha imposat la ponderació, corresponent a cada node, es multiplica o es divideix a cada un dels coeficients emissors una única constant per a tota la xarxa per tal d'ajustar l'aigua lliurada de la xarxa a 84.5 L/s. Per realitzar això s'aplica un bucle *while*, on la condició que s'imposa és que l'error entre el cabal calculat i el valor objectiu d'aigua lliurada, 84.5 L/s, ha de ser més petit que 1.

Per poder ajustar la constant, si l'error calculat és més gran que 1, aquesta dividirà, i si el valor calculat és més gran, es multiplicarà.

L'algoritme que s'aplica per implementar aquest codi en llenguatge R és el següent:

**Requereix:** *.inp, Rendiment*

**Obtenir:** *Nl, Nn*

**Per** *z=1:Nl* **fer**

**Obtenir:** *Longitud*

**Finalitzar per**

**Per** *z=1:Nn* **fer**

**Obtenir:** *Demanda, Coeficient Emissor, Elevació, Pattern*

**Finalitzar per**

### Simulació

Per  $z=1:Nn$  fer

**Obtenir:** Pressió, Consum

**Finalitzar Per**

Per  $z=1:Nn$  fer

Per  $z=1:Nl$  fer

**Obtenir:** Longitud Total

**Finalitzar Per**

**Finalitzar Per**

Per  $z=1:Nn$  fer

$$\text{Coeficient Emissor} = \left( \frac{\text{Longitud [node]}}{\text{Longitud Total}} \right) * 10$$

**Finalitzar Per**

**Mentre** Consum (dipòsit) > 84.5 **fer**

**Si** (Consum (dipòsit) + 84.5) > 1 **fer**

Per  $z=seq(Nn, -1)$  **fer**

Coeficient emissor \* 0,98

**Finalitzar Per**

**Finalitzar Si**

**Si** (Consum (dipòsit) + 84.5) < 1 **fer**

Per  $z=seq(Nn, -1)$  **fer**

Coeficient Emissor \* 1,0005

**Finalitzar Per**

**Finalitzar Si**

**Simulació**

Per  $z=1:Nn$  **fer**

**Obtenir:** Pressió usuari, Consum

**Finalitzar Per**

**Finalitzar Mentre**

Per  $z=1:Nn$  **fer**

Pressió Disponible = Elevació (Dipòsit) – Elevació

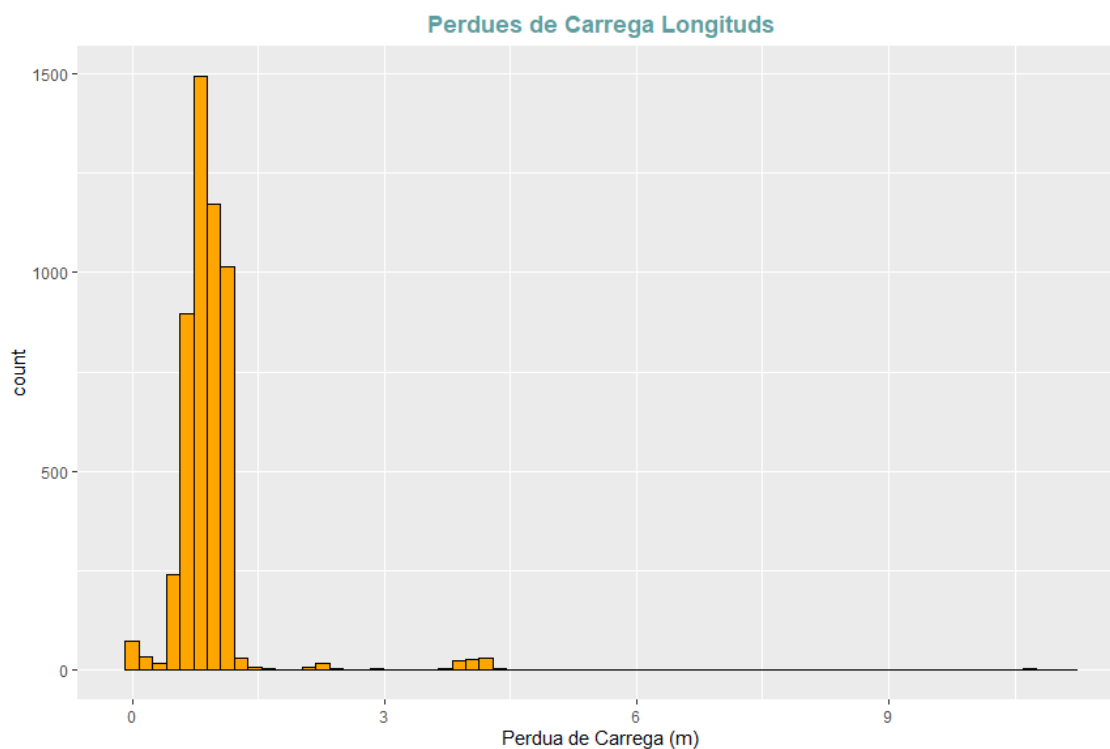
Pèrdua de Càrrega = Pressió Disponible – Pressió Usuari

**Finalitzar Per**

**Finalitzar Codi**



Vist l'algorisme es passa a visualitzar les pèrdues de càrrega que s'han assolit imposant aquests coeficients emissors ponderats per longitud. Aquestes pèrdues s'aconsegueixen igual que amb el mètode de coeficients equí-repartits amb la llibreria de ggplot2, Il·lustració 13.

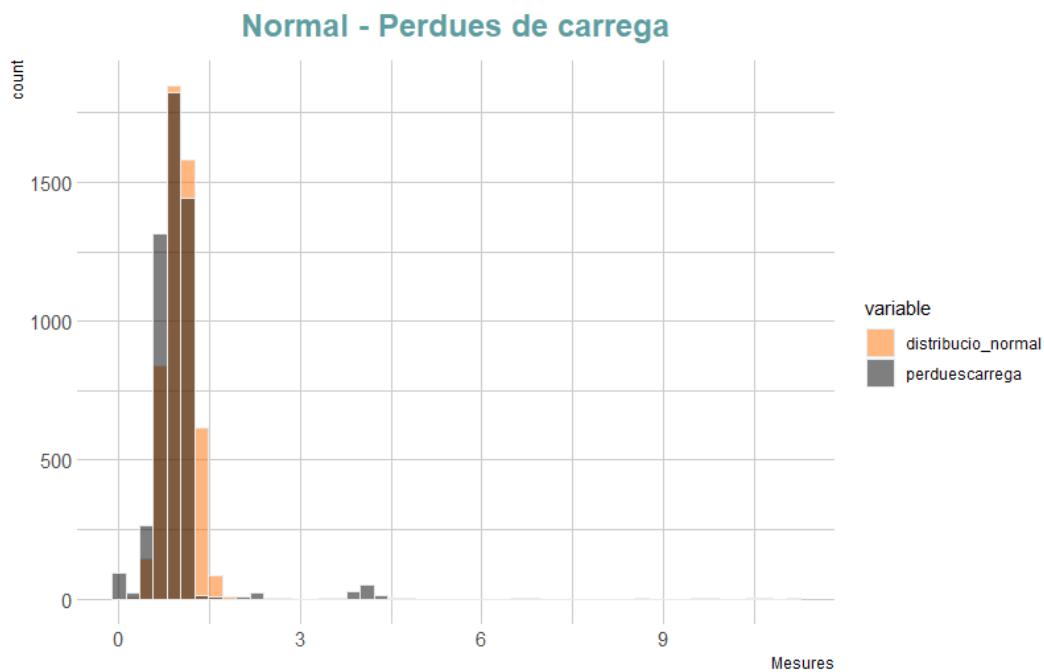


Il·lustració 13: Pèrdues de càrrega (Longituds)

Com es mostra en el gràfic, algunes pèrdues de càrrega són pròximes als 10 m.c.a.

Això és degut a que s'ha ponderat els coeficients emissors per longituds fent que aquelles canonades que es troben més allunyades del dipòsit tinguin una longitud bastant elevada i, per tant, tinguin unes pèrdues de càrrega bastant més considerables que les altres.

El gràfic obtingut de pèrdues de càrrega per coeficients ponderats per longitud és una distribució normal, Il·lustració 14.



Il·lustració 14: Semblança normal - pèrdues de càrrega (longituds)

En comparació als dos gràfics, els valors compresos entre els valors de 0 a 1.5 m.c.a. són pràcticament idèntics, sent aquests la majoria dels nodes de la xarxa d'estudi.

La funció densitat de la distribució normal té una grandària de 5.123 nodes, una mitjana de 1 i una desviació tipus de 0.23.

El codi per implementar aquest mètode es troba a l'annex III.

#### 5.4. Mètode de ponderació probabilitats de trencament

El mètode de ponderació de coeficients emissors per probabilitats de trencament permet adjudicar un valor als coeficients emissors depenent de la probabilitat i la longitud de la seva canonada associada. Es parteix de la idea de que la probabilitat d'avaria va associada proporcionalment a la probabilitat de fuga, ja que la segona sol precedir a la primera

Les dades de probabilitat de trencament venen donades per l'empresa d'aigües de Manresa qui les ha calculades amb una xarxa neuronal i representen la probabilitat de trencament d'aquestes canonades.

Aplicant aquest mètode es pretén donar un coeficient de fuites més elevat a aquelles canonades que tenen una probabilitat de trencament més elevat.

Per poder aplicar aquest mètode s'ha de multiplicar aquestes probabilitats per les longituds de les canonades corresponents. Una vegada realitzat aquest pas s'haurà d'aplicar la mateixa fórmula aplicada en l'anterior mètode però amb les longituds ja ponderades per probabilitats. L'equació a aplicar és la següent:

$$\frac{L_n * probabilitat}{L_t} * K = C_e$$

*Equació 14: Ponderació per probabilitats de trencament*

On:

$$L_n = \text{Longitud per node (m)}$$

$$\text{probabilitat} = \text{probabilitat trencament (adimensional)}$$

$$L_t = \text{Longitud total de la xarxa (m)}$$

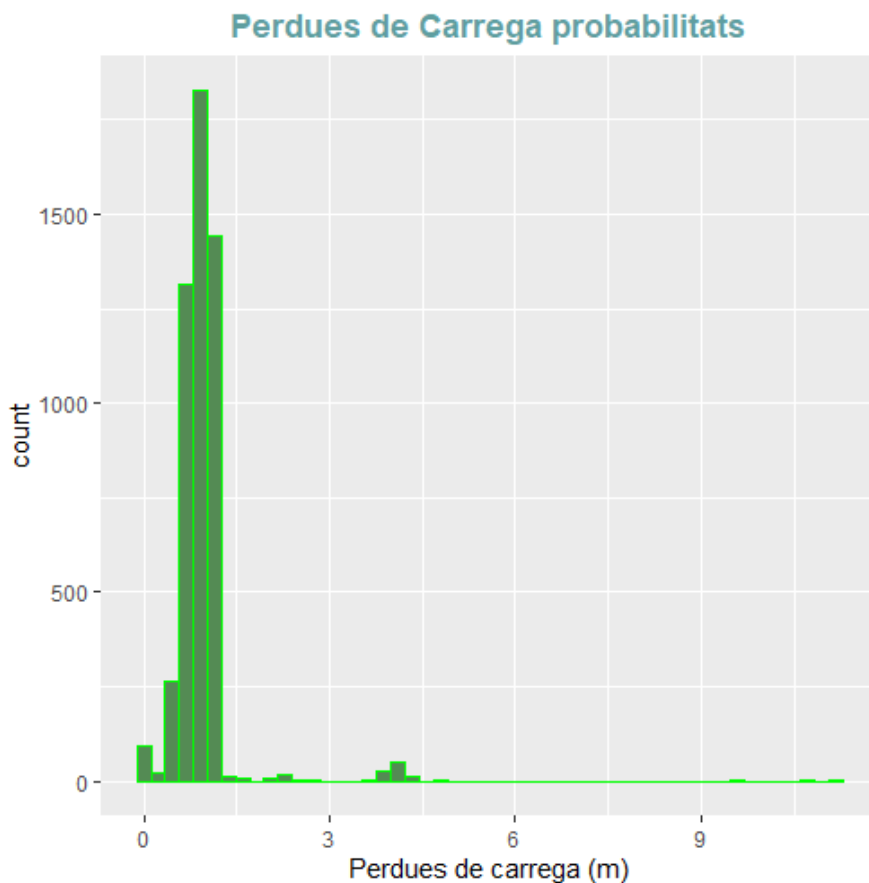
$$K = \text{coeficient de ponderació (adimensional)}$$

$$C_e = \text{Coeficient emissor (adimensional)}$$

Aplicant aquesta equació s'obtenen els coeficients emissors ponderats per cadascun dels nodes que conformen la xarxa.

Igual que en casos anteriors, la intenció és que la xarxa tingui una demanda de 84.5 L/s. Per a poder realitzar això s'aplica exactament el mateix algoritme d'abans amb la diferència que els valors de coeficients ja estan ponderats per probabilitats de trencament, multiplicant la longitud de les canonades per aquesta probabilitat.

A continuació, es pot observar el gràfic de pèrdues de càrrega obtingut per aquest mètode, Il·lustració 15.



Il·lustració 15: Pèrdues de càrrega probabilitats

Com es pot observar en el gràfic obtingut les pèrdues de càrrega són, de màxima, més elevades que en casos anteriors. Això és degut a que aquelles canonades que estan allunyades del dipòsit i tenen unes longituds bastant elevades solen tenir probabilitats elevades de trencament.

Es busca aconseguir que les fuites de la xarxa es concentrin en aquelles canonades que tenen longituds elevades i probabilitats de trencament també elevades.

Implementant el codi expressat en l'annex IV en .R es pot obtenir aquests resultats.

## 6. Comparació amb mesures reals

Implementats els tres mètodes de ponderació sobre les fuites en el nostre projecte, es procedeix a comparar aquests amb una simulació de temps aportada per l'empresa d'aigües de Manresa.

S'afegeix a més un patró de temps (*pattern*) que fa que les demandes als nodes variïn al llarg del temps, i un *pattern* que varia l'altura d'aigua del dipòsit, és a dir l'aigua lliurada per tal d'ajustar la pressió disponible. Recordar que la introducció d'aquests *patterns* es realitza al llenguatge .R però el temps que triga en canviar la dada del *pattern* s'ha de fer manualment al software Epanet.

L'empresa d'aigües de Manresa cedeix les dades reals de pressió de tres nodes en concret, el node 188008, 235486 i el 518. Aquestes dades dels nodes estan preses al llarg d'una setmana de temps amb intervals de 5 minuts on, en cadascun d'ells, s'observa els valors de mitjana, màxima, mínima i pressió disponible en els nodes.

La simulació de temps aportada i els *patterns* de demanda i elevació del dipòsit estan en format .CSV el qual és compatible amb el llenguatge .R utilitzat.

Els resultats que s'esperen obtenir una vegada simulada la xarxa és que les pressions dels 3 nodes sempre es trobin entre el màxim i el mínim i molt propers al valor de la mitjana.

També es prenen altres mesures en m<sup>3</sup>/h. Aquestes mesures són:

- Cabal: Cabal d'entrada a la xarxa, que es divideix en consum i fuites.
- Consum: Cabal consumit pels abonats associat a les demandes.
- Fuites: Cabal associat als coeficients emissors.
- Estàtica: Diferència de cota entre el nivell d'aigua al dipòsit i el sensor de mesura.

Per poder llegir les mesures de pressió en els tres nodes per intervals de temps de 5 minuts al llarg d'una setmana s'utilitza la Toolkit Epanet Reader. S'estableixen els *patterns* d'altura del dipòsit per simular el cabal de la xarxa i la demanda dels nodes per poder simular les mateixes demandes dins del codi.

Amb la simulació es genera un arxiu binari el qual expressa el valor mitjà de la pressió del node en l'interval de 5 minuts. Epanet no és capaç de retornar el valor màxim o mínim de pressió en aquest interval perquè treballa realitzant un equilibri hidràulic, i el que fa és calcular d'acord amb les dades que té en cada instant. No calcula transitoris ni evolució d'un estat al següent.

Tots els valors s'han d'expressar en segons per a poder implementar la simulació correctament.

Per realitzar l'estudi i en comparació amb els coeficients emissors obtinguts en els mètodes de ponderació es realitza una comparació per cadascun dels escenaris.

La comparació es dur a terme realitzant una gràfica que compari els resultats obtinguts de la simulació amb els mesurats en un interval de temps d'una setmana. A més, es calcula l'error entre les dues situacions mitjançant dos mètodes:

Aquestes mesures serveixen per saber la diferència entre dos variables contínues que normalment venen de dos bases de dades distintes (calculats i simulats).

- MSE (*main square error*)

$$MSE = \frac{\sum (P_m - P_s)^2}{N}$$

*Equació 15: Main square error*

Aquest calcula l'error entre les mitjanes dels errors al quadrat. És una mesura de qualitat d'un estimador que s'utilitza sobretot en l'àmbit de l'estadística.

- MAE (*main absolut error*)

$$MAE = \frac{\sum |P_m - P_s|}{N}$$

*Equació 16: Main absolut error*

Per les equacions els valors són:

$P_m =$  Pressió mesurada (m)

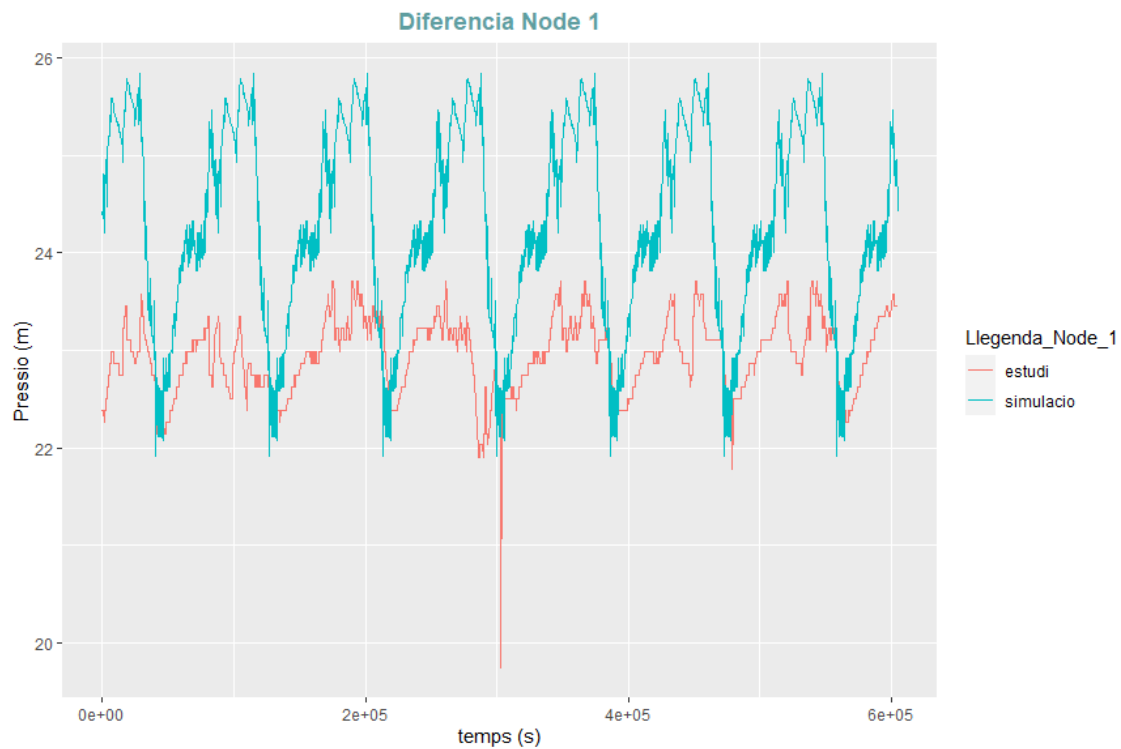
$P_s =$  Pressió simulada (m)

$N =$  Número de mostres

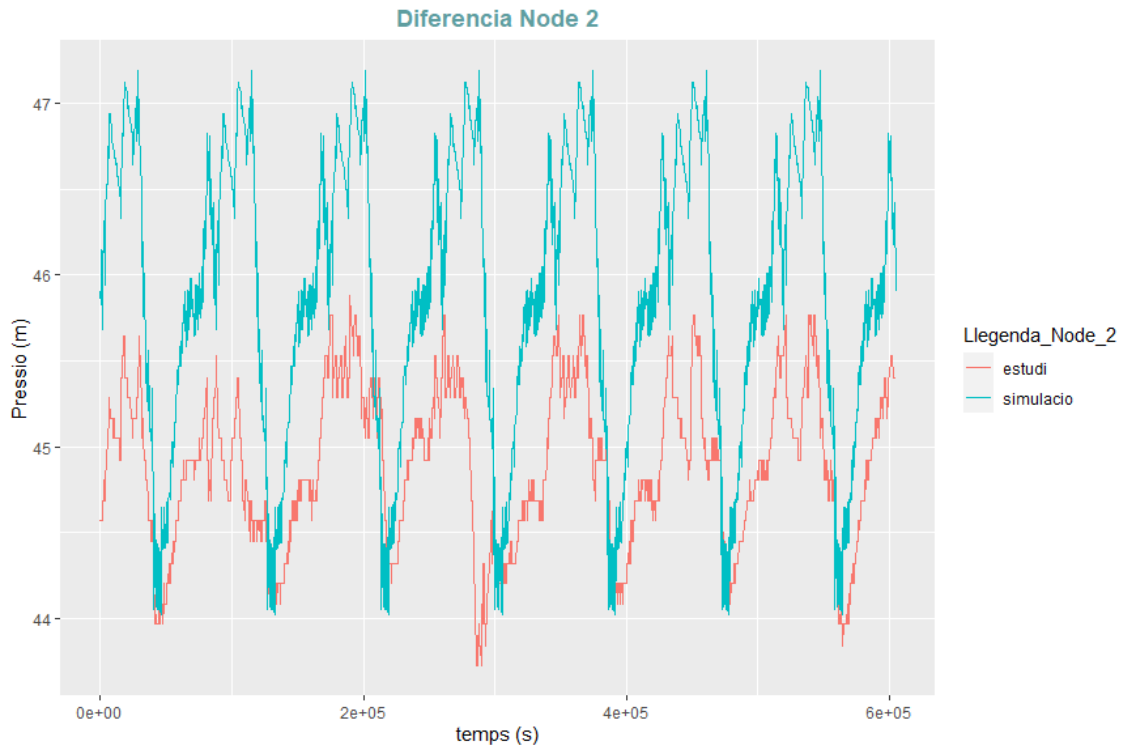
Una vegada descrita la comparació que es realitza, es passa a observar per les diferents ponderacions utilitzades en aquest estudi la relació amb les dades mesurades per l'empresa d'aigües de Manresa.

## 6.1. Comparació coeficients equi-repartits

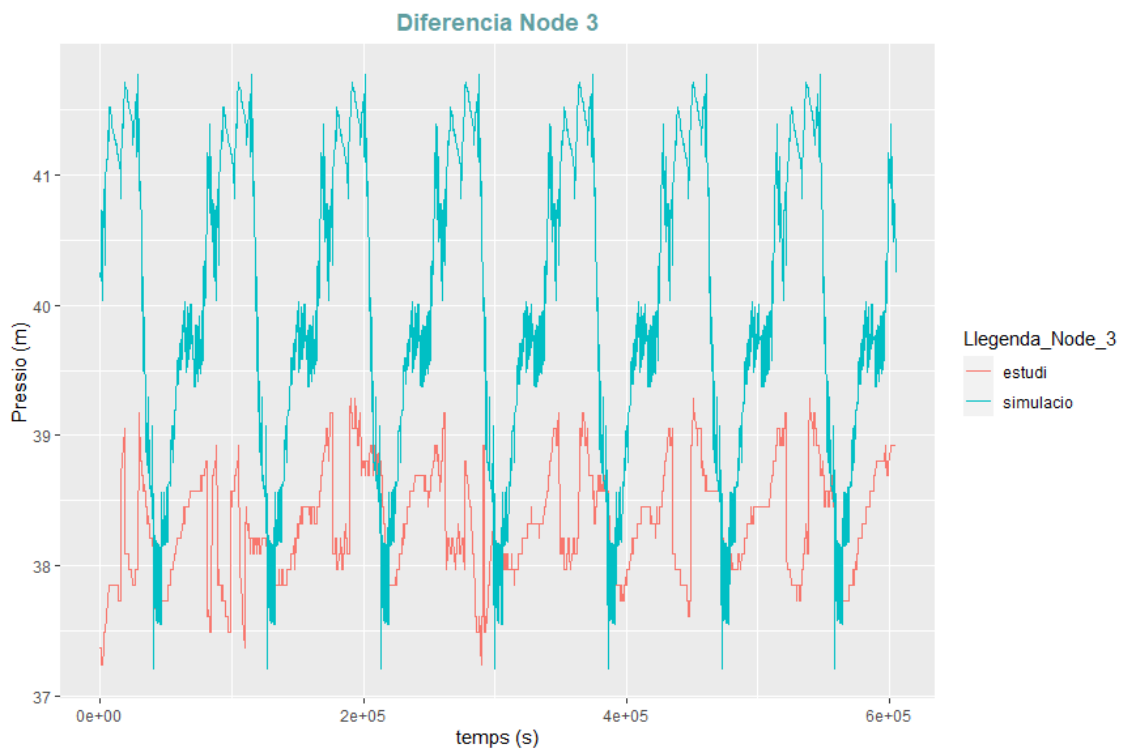
En aquest cas de comparació, els resultats mesurats són estudiats respecte a els obtinguts mitjançant la ponderació equi-repartida de les fuites o coeficients emissors en els diferents nodes en la duració d'una setmana. Els resultats s'espera que siguin millors que els obtinguts en el cas anterior. Il·lustració, Il·lustració i Il·lustració 16



Il·lustració 19: Diferència node 1 coeficient equi-repartit



Il·lustració 20: Diferència node 2 coeficient equi-repartit



Il·lustració 16 Diferència node 3 coeficient equi-repartit



Els resultats obtinguts per aquesta ponderació es mostren en

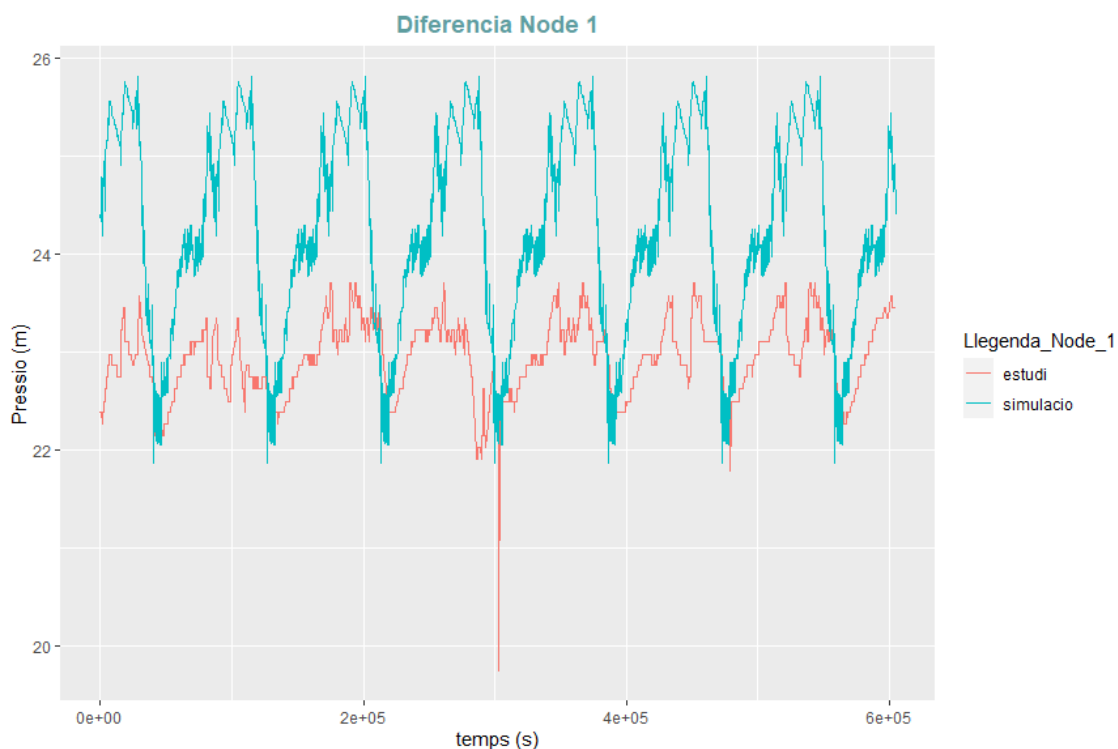
Equi-repartits	Node 1	Node 2	Node 3
MSE (m.c.a)	2,53	1,35	4,17
MAE (m.c.a)	1,37	1,01	1,73

Taula 2: MSE i MAE - Coeficients equi-repartits

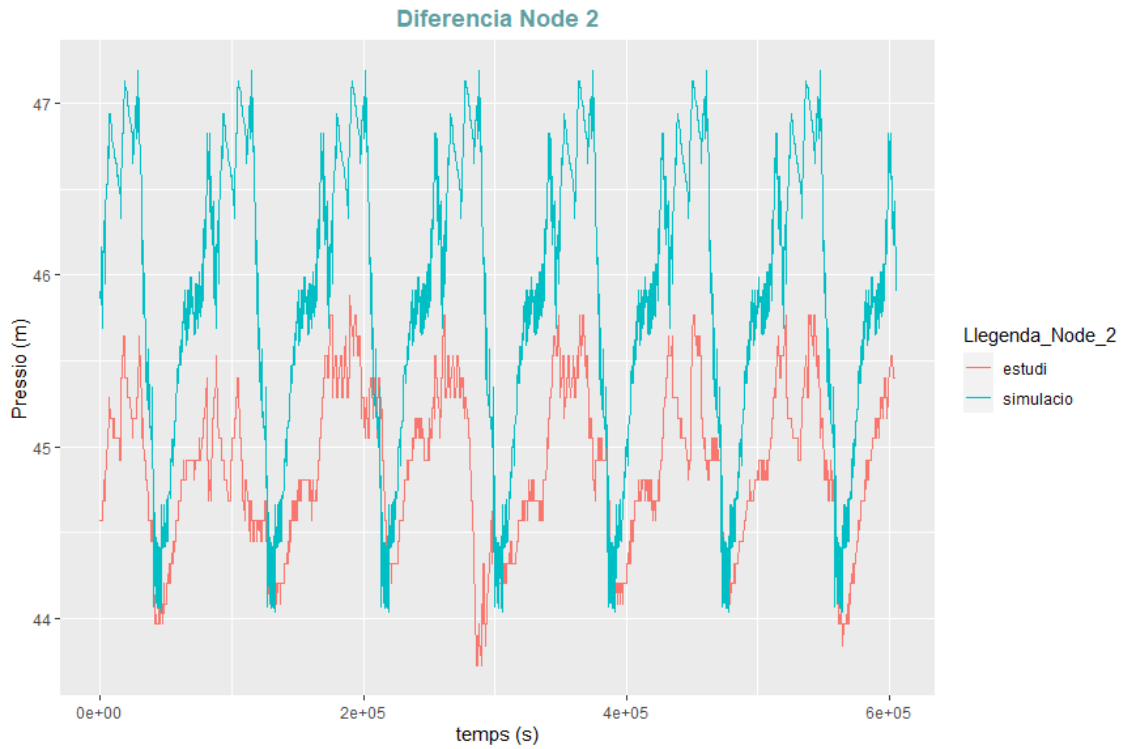
Com es pot comprovar en la taula de resultats els valors dels errors en relació als mètodes equi-repartits són correctes en excepció al node 3. Implementant el problema d'optimització s'espera obtenir uns valors més aproximats als mesurats a l'estudi de l'empresa.

## 6.2. Comparació ponderació de longituds

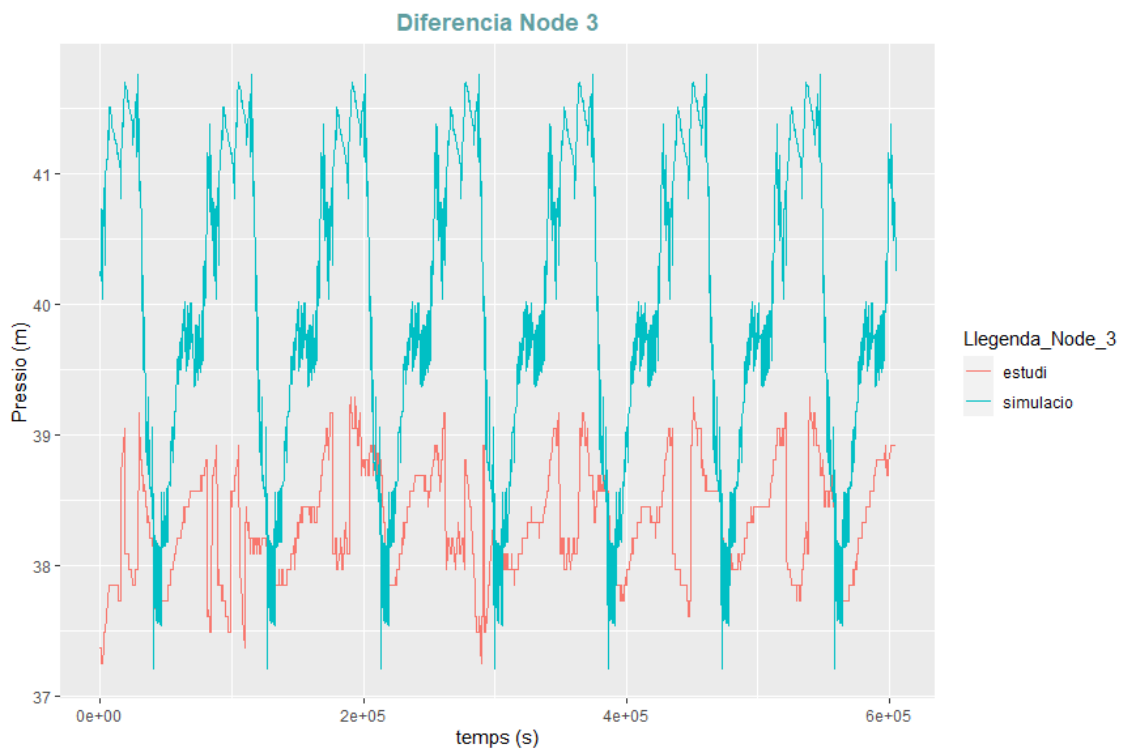
En aquest punt es comparen els resultats obtinguts mitjançant la ponderació de coeficients emissors per longitud, amb les dades mesurades en els 3 nodes proposats. Les gràfiques resultants són: Il·lustració 17, Il·lustració i Il·lustració.



Il·lustració 17 Diferència node 1 coeficient longituds



Il·lustració 23: Diferència node 2 coeficient longitud



Il·lustració 24: Diferència node 3 coeficient longitud

La Taula 3 obtinguda per aquest cas és la següent:

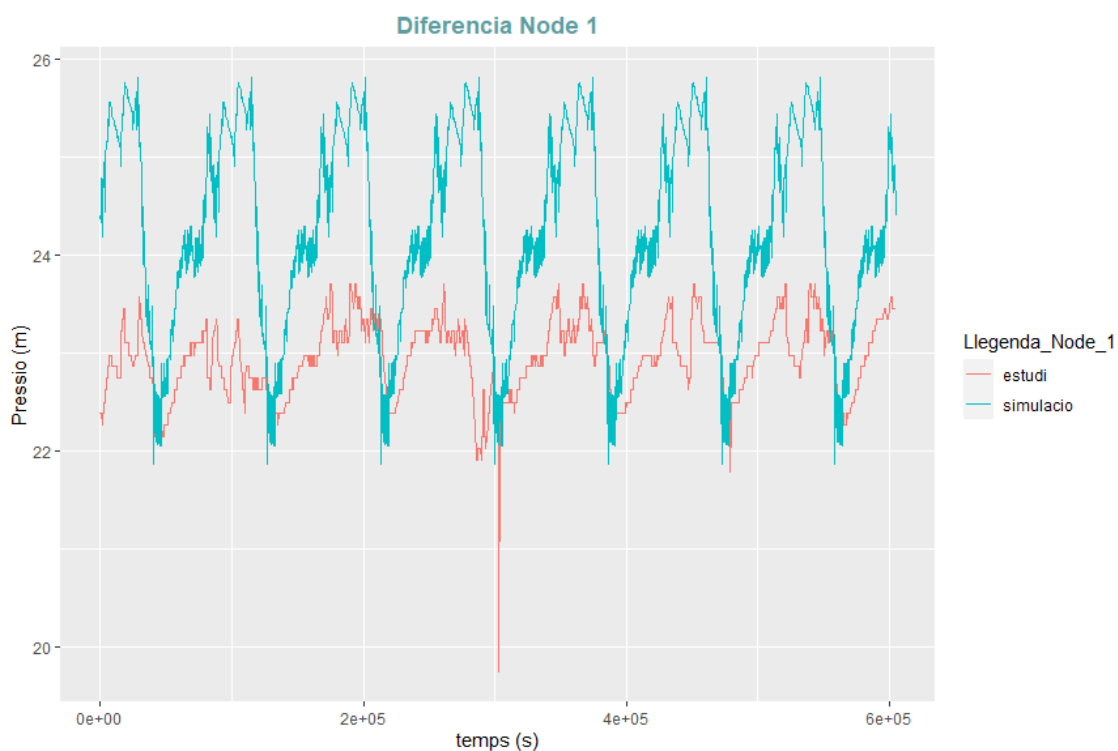
Longituds	Node 1	Node 2	Node 3
MSE (m.c.a)	2,47	1,36	4,15
MAE (m.c.a)	1,35	0,99	1,72

Taula 3: MSE i MAE - Coeficients Longituds

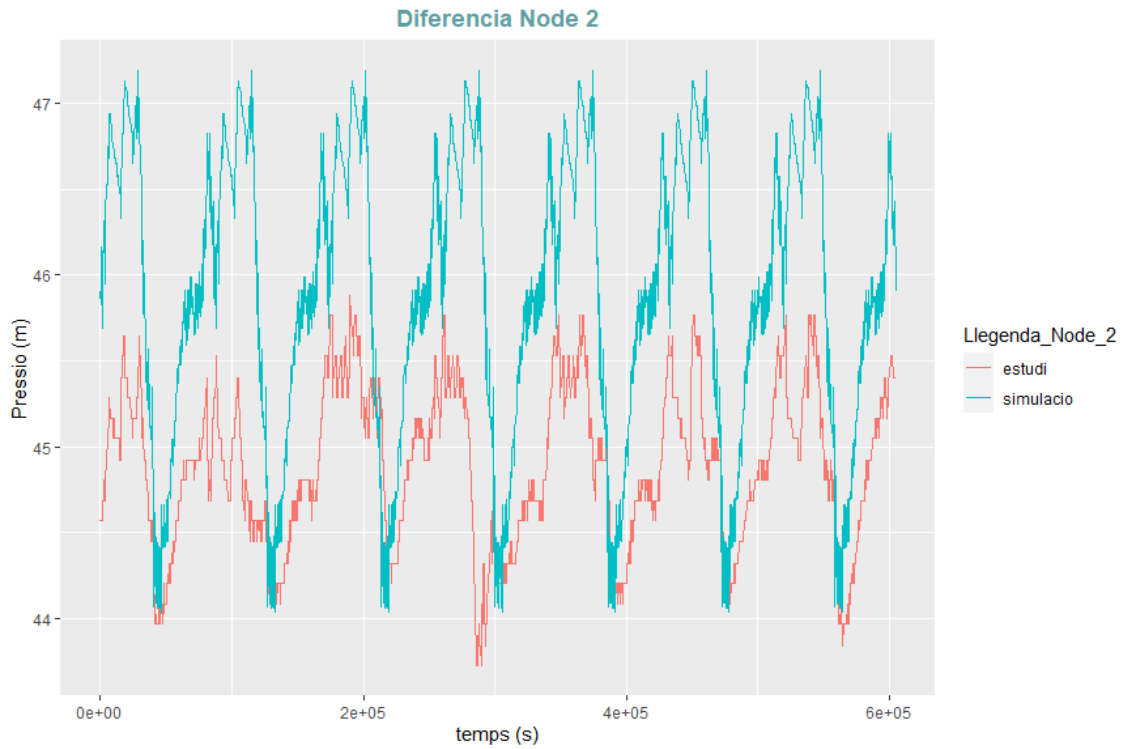
Els valors obtinguts en aquest mètode de ponderació són molt semblants als obtinguts en el mètode equi-repartit. El node 3 segueix donant un error per sobre dels 4 m.c.a.

### 6.3. Comparació ponderació probabilitats de trencament

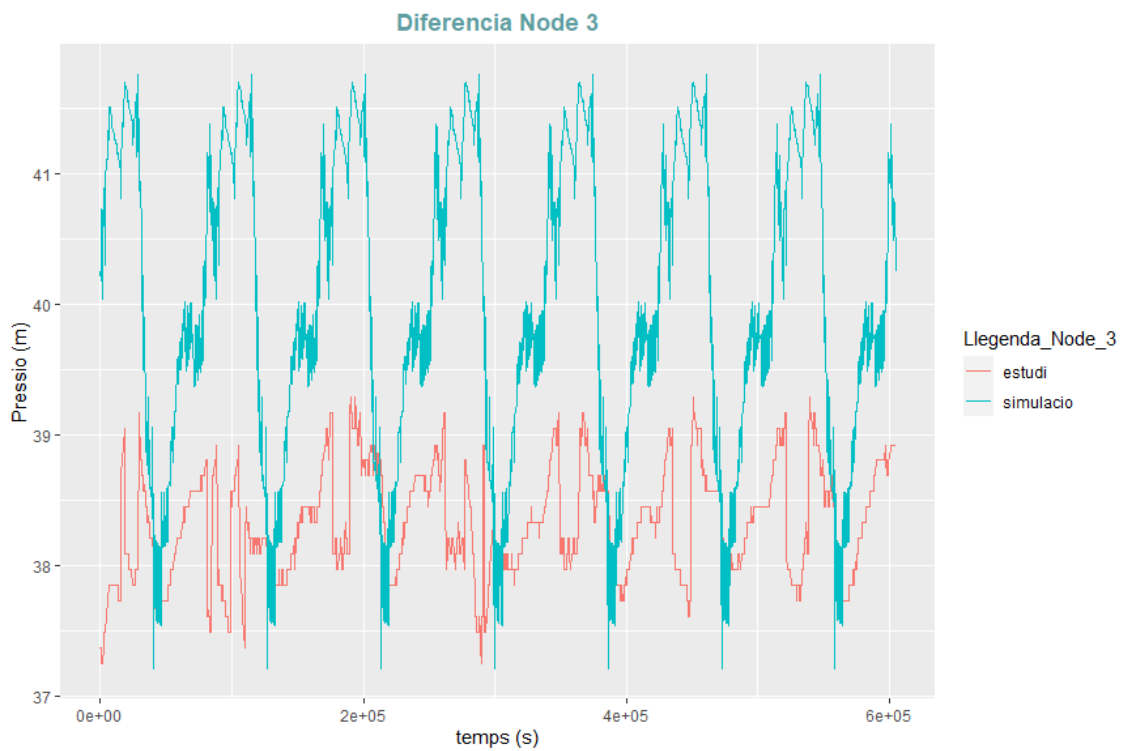
En aquest punt es comenten els resultats obtinguts de la simulació per la ponderació de coeficients emissors amb les probabilitats de trencament proporcionades per l'empresa. Les gràfiques són les següents:



Il·lustració 25: Diferència probabilitat de trencament node 1



Il·lustració 26: Diferència probabilitat de trencament node 2



Il·lustració 27: Diferència probabilitat de trencament node 3

En aquesta simulació els resultats de MSE i MAE obtinguts es poden observar en la següent :

Longituds	Node 1	Node 2	Node 3
MSE (m.c.a)	2,47	1,36	4,15
MAE (m.c.a)	1,35	0,99	1,72

Com es pot observar en les taules obtingudes els valors són pràcticament idèntics pels tres casos generats.

Com a comentari als resultats obtinguts per la simulació es pot concloure que el resultat es coherent però contradictori, degut a que durant el dia les corbes s'ajusten (horari de més demanda), mentre que per la nit es quan la diferencia es major. No té gaire sentit en aquest aspecte perquè precisament per la nit es el moment on el dipòsit esta ple.

Aquest error el podem adjudicar al desajust en la cota del sensor i les distribucions realitzades per la ponderació dels coeficients emissors.

També es pot observar que el tercer node sempre es el que té la major diferencia amb respecte les dades reals. Això pot estar degut a que la cota del sensor per aquest cas concret té un error major que per els altres dos casos.

Per la pressió estàtica, es a dir, la diferencia entre la cota del dipòsit i del punt del node, sempre es trobarà per sobre de les línies de las gràfiques obtingudes degut a que no es simulen pèrdues de càrrega.

#### 6.4. Algorisme implementat per la simulació.

En aquest punt es fa una explicació del algorisme implementat per tal de dur a terme la simulació.

**Requereix:** *.inp, coeficient\_ponderat, pattern\_elevació, pattern\_demanda, dades\_reals*

**Llegir:** *coeficient\_ponderat*

*Vector\_pattern\_elevacio = pattern\_elevació*

*Vector\_pattern\_demanda = pattern\_demanda*

*Temps\_simulació = 604800 s.*

*Temps\_report = 300 s.*

**Per**  $z=5123$  **fer**

*Elevació\_diposit = Vector\_pattern\_elevació*

**Finalitzar Per**

**Per**  $z = seq(Nn, -1)$  **fer**

*Demanda\_nodes = Vector\_pattern\_demanda*

**Finalitzar Per**

*Resolució\_hidraulica*

*Resolució\_qualitat*

*Report*

**Tancar\_programa**

**Llegir:** *Dades\_Reals*

**Obtenir:** *Dades\_Simulació*

**Obtenir:** *Nº\_mostres*

*MSE\_Node\_1: (sum((Node\_1\_Simulació – Node\_1\_Real))/(Nº\_mostres)*

*MSE\_Node\_2: (sum((Node\_2\_Simulació – Node\_2\_Real))/(Nº\_mostres)*

*MSE\_Node\_3: (sum((Node\_3\_Simulació – Node\_3\_Real))/(Nº\_mostres)*

*MAE\_Node\_1: (sum((Node\_1\_Simulació – Node\_1\_Real))/(Nº\_mostres)*

*MAE\_Node\_2: (sum((Node\_2\_Simulació – Node\_2\_Real))/(Nº\_mostres)*

*MAE\_Node\_3: (sum((Node\_3\_Simulació – Node\_3\_Real))/(Nº\_mostres)*

**Finalitzar Codi**

A l'annex II, III i IV es pot observar la implementació del codi per a obtenir els resultats de la ponderació, seguint l'algoritme creat a l'anterior punt dels coeficients emissors per equi-repartits, longituds i probabilitats respectivament.

A continuació, es planteja l'optimització a realitzar en el cas d'estudi per tal d'ajustar els coeficients emissors a les dades reals proporcionades per l'empresa.

Es realitza una explicació dels paràmetres que influeixen dins dels algoritmes genètics, es defineixen les variables utilitzades i la llibreria per poder plantejar aquest problema d'optimització.

## 7. Algoritmes Genètics

Els algoritmes genètics són una de les formes d'optimització, que s'utilitzen per trobar el valor o valors que aconseguen maximitzar o minimitzar una funció. En aquest treball s'utilitza aquesta forma d'optimització per reduir l'error obtingut entre els valors simulats mitjançant l'eina d'Epanet2Toolkit i els valors mesurats per l'empresa d'Aigües de Manresa.

La metodologia que segueixen, consisteix en la creació de descendents a partir d'una població inicial. Aquesta població són els coeficients emissors, que a la vegada són els que varien les pressions dels nodes per a tota la xarxa. La funció objectiu que es vol obtenir és la minimització de l'error obtingut entre el mètode simulat i les dades reals mesurades.

Les característiques de la nova població són combinació de les característiques dels seus progenitors. D'aquesta nova població només sobreviuen els individus que tenen millors característiques, en correspondència a la funció objectiu que es vol optimitzar.

Aquests individus que han sobreviscut es tornen a reproduir realitzant el mateix procés una i altre vegada fins que la funció objectiu està optimitzada, o se li posa un límit d'iteracions.

Aquests algoritmes són una de les moltes possibilitats d'optimitzar una funció. Existeixen altres possibilitats com per exemple l'anàlisi que per alguns casos pot ser més convenient que els algoritmes. En aquest treball, descartem aquesta opció degut a la quantitat de dades que es tenen en una xarxa de distribució d'aigua potable per a una ciutat.

Per tant, s'utilitzarà com a mètode per l'optimització dels coeficients emissors els algoritmes genètics, els quals tenen les següents parts:

- Població Inicial
- Fortalesa (Fitness)
- Nova Població: Per crear aquesta nova població s'han de realitzar els següents passos:
  - o Seleccionar dos individus en els que la probabilitat sigui semblant al fitness.
  - o Creuar els dos individus seleccionats.
  - o Aplicar un procés de mutació aleatori sobre el nou individu.
  - o Afegir el nou individu a la població.
- Reemplaçar la nova població per la antiga.
- Tornar a repetir el procés si no hi ha cap finalització d'iteracions.

A continuació es realitza una descripció de les parts que conformen aquest apartat.



## 7.1. Població Inicial

La població inicial consisteix en una sèrie d'individus que poden estar representats en forma de vector o número. Els individus fan referència a les possibles solucions del problema a resoldre. En el cas que ens ocupa, minimitzar l'error entre els dos mètodes de mesura per les pressions dels nodes de la xarxa mitjançant l'augment o disminució de les fuites, coeficients emissors.

Aquests coeficients són la població inicial dels algorismes genètics. També es podria donar el cas que la població inicial fos aleatòria, però en aquest treball s'ha realitzat una ponderació per tres mètodes diferents (equi-repartits, longituds i probabilitat de trencament) per tal d'obtenir una població inicial més pròxima a la funció objectiu.

En aquest procés es delimita als individus de la població amb un rang inferior i un de superior de tal manera que l'aigua lliurada pel dipòsit es situï dintre del valor objectiu dels 84,5 L/s.

## 7.2. Fortalesa (Fitness)

Per crear la nova població que substituirà a l'actual, s'ha d'avaluar cadascun dels individus per saber quins són els que han sobreviscut a la selecció. A aquesta avaluació o quantificació se li anomena *fitness*. En relació a la funció objectiu que es vol assolir el *fitness* pot variar entre maximització o minimització:

- Maximització: L'individu té major *fitness* quan més gran sigui el valor de la funció objectiu.
- Minimització: L'individu té menor *fitness* com més petit sigui el valor de la funció objectiu.

En aquest treball es vol obtenir els valors dels coeficients emissors que ajustin millor les dades obtingudes per la simulació en correspondència amb les dades mesurades per l'empresa. Per lo tant es vol reduir l'error entre els dos mètodes i l'avaluació a realitzar es la de minimització.

Una vegada avaluat el *fitness* a un individu s'ha de realitzar el mateix a tots els individus de la població inicial, que en el cas d'estudi seran els coeficients de la xarxa. Per poder avaluar aquests *fitness* es necessària una població inicial, una funció objectiu i determinar el tipus d'optimització a realitzar.

### 7.3. Seleccionar Individus

Existeixen 4 diferents mètodes per la selecció d'individus a la nova població, però la gran majoria d'ells estan relacionats amb el *fitness* avaluat.

- **Mètode de ruleta:** Aquest mètode consisteix en seleccionar el *fitness* proporcionalment al valor relatiu del mateix. Es a dir, es realitza el sumatori de tots els *fitness* i els divideix per el valor de cadascun d'ells. Obtenint així els valors que tenen major *fitness* per passar a la següent generació. Cal tenir present que per el cas d'estudi els individus que tenen major *fitness* son aquells que redueixen més el valor de l'error entre els dos mètodes de mesura de les pressions als nodes.  
El problema d'aquest mètode és si alguns d'aquests individus té un valor de *fitness* major que la resta. Si aquest fos el cas la variabilitat del mètode seria molt reduïda.
- **Mètode Rank:** Aquest mètode consisteix en organitzar tots els individus de major a menor depenen del valor del *fitness*. Una vegada organitzats es realitza la selecció inversament proporcional a aquest ordre. Aquest mètode es menys agressiu que el de la ruleta en termes de variabilitat. Per aquest motiu el mètode *rank* es el escollit en aquest cas de treball.
- **Selecció Competitiva (tournament):** Aquesta selecció consisteix en emparellar a dos parelles d'individus aleatòriament. De cada parella d'individus s'escull el que tingui major *fitness*. Aquesta acció es realitza en tot el grup d'individus seleccionant al final aquell que té major *fitness*. Si es realitza aquesta opció augmenta bastant més el temps de simulació total del codi compilat per realitzar aquesta funció
- **Selecció Truncada (truncated selection):** Mateix procés que a l'anterior selecció amb la diferència de que es descarten una sèrie d'individus depenen del nombre "n".

Una vegada escollit el mètode de selecció d'individus es passa al penúltim punt abans de la creació de la nova població que es el *crossover* o recombinació.

### 7.4. Encreuar dos individus (*crossover*, recombinació)

Aquest punt tracta de la creació de nous individus a partir dels individus ja creats. Al igual que l'anterior punt existeixen varis mètodes que permeten realitzar aquesta recombinació.

- Encreuament a partir d'un únic punt: Es selecciona aleatòriament un punt de tall. Cada individu que es trobi en aquesta posició intercanvia les meitats del *fitness*.
- Encreuament a partir de múltiples punts: Es selecciona aleatòriament punts de tall dins de la població, i com a l'anterior cas, aquests individus intercanvien les seves meitats.
- Encreuament uniforme: Per realitzar aquest mètode, la posició del nou individu s'obté d'un dels dos parentals. La probabilitat de que provingui de qualsevol dels dos es la mateixa.

En les primeres dos estratègies per a cadascun dels encreuaments s'hi creant dos individus mentre que per la última estratègia això canvia creant simplement un.

## 7.5. Mutar Individus

Després de generar els nous individus seguint un encreuament particular tal i com es mostrava en l'anterior apartat, en aquest es sotmet als individus a un procés de mutació. En aquest procés la posició dels mateixos pot variar seguint una probabilitat en concret.

Aquesta mutació és necessària per donar diversitat a la nova població. Existeixen tres mètodes per introduir aquesta mutació:

- Distribució uniforme: La mutació de la posició ve donada per una probabilitat que s'extreu de la distribució uniforme. És la mutació que ve per defecte a la llibreria i assolix un valor de 0.8 de probabilitat de realització d'aquesta mutació.
- Distribució normal: La mutació de la posició ve donada per la suma d'una probabilitat d'una distribució normal. Aquesta distribució ve centrada en el 0 i té associada una desviació estàndard. Depenent d'aquest darrer valor, amb major probabilitat la mutació serà introduïda. S'han d'establir els valors de probabilitat i desviació estàndard dins la llibreria per poder realitzar aquesta mutació.
- Aleatori: La mutació ve donada per la substitució del valor de la posició del individu per un altre dintre d'un rang limitat.

Aquests serien tots els punts que componen els algorismes genètics per problemes d'optimització. Explicats els conceptes es descriu la determinació dels paràmetres que s'han de definir en el nostre cas d'estudi, la xarxa de distribució d'aigua potable de la ciutat de Manresa.

## 7.6. Codi d'algorismes genètics

Per poder implementar el codi s'utilitza una llibreria proporcionada per R que es diu GA. Aquesta llibreria, mitjançant una sèrie de funcions, es capaç de definir l'algoritme genètic seleccionant una població inicial, una funció objectiu i uns paràmetres a definir, seguint els punts explicats anteriorment.

La funció objectiu haurà de ser la suma dels *main square errors* (MSE), es a dir dels tres nodes mesurats per l'empresa d'aigües de Manresa. Com es va comprovar en el apartat 6 els valors obtinguts no són massa satisfactoris, degut a que superen els 3 m.c.a en algun d'ells.

Per poder implementar la funció objectiu es busca crear una funció on la variable sigui l'optimització, en el nostre cas serà "Z", que representa els coeficients emissors. Dins d'aquesta funció s'obre el programa Epanet, es llegeixen els *patterns* d'alçada del dipòsit i la demanda dels nodes, de la mateixa manera que s'ha fet per realitzar la simulació.

Després s'imposa que les noves fuites siguin la variable optimització (z). Per a poder variar cada una de les variables per separat s'estableix la següent funció:

$$Coef_{e_{optimitzat}} = z * Coef_{e_{emissor}}$$

Equació 17: Coeficient emissor optimitzat

On:

$Coefe_{optimitzat}$ : *Coeficient optimitzat per aquella població*

$z$ : Variable d'optimització

$Coefe_{emisor}$ : *Coeficient emisor*

Una vegada implementats els coeficients emissors i la simulació, es resol hidràulicament i es crea l'arxiu binari de "Resultats de Simulació" d'on es calculen els *main square* errors dels tres nodes d'estudi.

Com s'ha expressat anteriorment, la funció objectiu serà la suma d'aquests errors i aquest mateix valor és el retorn de la funció creada.

També es necessita expressar la funció fitness del problema d'optimització. Aquesta funció ve expressada per la següent equació, que al tractar-se d'una minimització, l'equació resultant ha de ser una resta.

$$Fitness < -function(z) - f(z)$$

*Equació 18: Funció Fitness*

On:

Fitness: Valoració de la supervivència d'un individu

$function(z)$ : *Funció amb la variable optimització*

$f(z)$ : Funció objectiu

Una vegada s'han establerts els paràmetres i la funció objectiu que ocupa aquest cas d'estudi, es defineixen les següents variables per a realitzar el problema d'optimització mitjançant la llibreria de GA proporcionada al llenguatge .R:

- *Type: "Real-Valued"*. Aquesta optimització tracta amb valors reals de pressions en els nodes de la xarxa.
- *Fitness: "Fitness"*: Expressió definida anteriorment que valora la supervivència dels individus d'una població.
- *Lower*: Valor inferior que pot assolir la variable optimització. Depèn del mètode de ponderació utilitzat aquest valor pot variar.
- *Upper*: Valor superior que pot assolir la variable optimització. Depèn del mètode de ponderació utilitzat aquest valor pot variar.
- *Maxiter*: Número total d'iteracions que es realitzaran en el problema d'optimització. En aquest cas s'imposa que siguin 2.

Un altre paràmetre que és per defecte i, per tant, no fa falta definir, és el número total de poblacions dins d'una iteració on el valor serà de 50.

El mètode utilitzat sempre serà el de *rank*, el qual permet la variabilitat dins de l'optimització al tractar-se d'una quantitat d'individus per població elevada.

També queda definida la mutació dels individus seguint una distribució uniforme amb una probabilitat del 0.8.

Implementant aquesta funció i codi dins del nostre fitxer s'aconsegueix obtenir la solució més òptima de fuites dins de la xarxa d'aigües.

Aquest codi tarda en compilar, per això, el valor de "maxiter" imposat dins de la llibreria ha de ser de 5 o menor. En un futur es podria mirar de treure la simulació de qualitat del fitxer per reduir el temps de simulació.

Els valors obtinguts en el codi compilat dels annexos són:

MSE – Equi-repartits	MSE - Longituds	MSE -Trencament
11,925	12,105	12,104

*Taula 4: Valors obtinguts de la simulació.*

Els valors obtinguts del problema d'optimització es poden considerar acceptables al reduir l'error entre les pressions simulades al llenguatge .R i les pressions mesurades per l'empresa. Tot i així, existeix un marge de millora important per tal de reduir encara més aquest error.

Un exemple de millora seria establir que els coeficients emissors, és a dir, les fuites de la xarxa, siguin directament la variable optimització. Amb això implementat al codi, s'aconsegueix que el mar de dades dels coeficients emissors vari independentment la necessitat d'establir una variable que els modifiqui a tots a la vegada.

## 7.7. Algoritme d'optimització.

En aquest apartat tractarem l'algoritme implementat per a poder realitzar l'optimització al llenguatge .R

**Requereix:** *.inp*, *coeficient\_ponderat*, *nº\_mostres*, *vectorn\_pattern\_elevació*, *vector\_pattern\_demanda*, *dades\_reals*

**Llegir:** *Coeficient\_ponderat*, *nº\_mostres*

**Funció (Z) fer**

*Vector\_pattern\_elevació*

*Vectorn\_pattern\_demanda*

**Llegir:** *Dades\_reals*

**Obrir** *.inp*

*Temps\_simulació* = 604800 s.

*Temps\_report* = 300 s.

**Per** *z=5123* **fer**

*Elevació\_diposit* = *Vector\_pattern\_elevació*

**Finalitzar Per**

**Per** *z = seq (Nn, -1)* **fer**

*Demanda\_nodes* = *Vector\_pattern\_demanda*

**Finalitzar Per**

*Resolució\_hidraulica*

*Resolució\_qualitat*

*Report*

**Tancar\_programa**

**Llegir:** *Dades\_Reals*

**Obtenir:** *Dades\_Simulació*

**Obtenir:** *Nº\_mostres*

*MSE\_Total* = *MSE\_Node\_1* + *MSE\_Node\_2* + *MSE\_Node\_3*

**Retornar** *MSE\_Total*

**Finalitzar Per**

**Funció Algoritmes**

**Tancar Programa**

Als annexos V, VI i VII és pot observar el codi per implementar els algoritmes genètics als diferents nivells de ponderació implementats en aquest treball.

## 8. Conclusions

Tal i com s'ha explicat a l'inici d'aquest projecte, l'objectiu d'aquest consisteix en l'estudi i la simulació d'una xarxa d'aigua cedida per l'empresa Aigües de Manresa.

Les eines utilitzades per la realització d'aquest treball són el software d'Epanet, la Toolkit Epanet2toolkit i GA que són una llibreria del llenguatge .R. A partir d'aquestes eines s'ha pogut estudiar la caracterització d'una xarxa i s'ha realitzat la ponderació dels coeficients emissors (fuites) del model hidràulic utilitzat de tres maneres diferents. La intenció de realitzar la ponderació de les fuites per tres mètodes diferents sorgeix de la variabilitat de xarxes d'aigua que trobem en el dia a dia. Per finalitzar es varen utilitzar els algorismes genètics per realitzar l'optimització de la xarxa.

El primer pas va ser la simulació hidràulica de la xarxa i la lectura de tots els paràmetres de les canonades i nodes que conformen la xarxa. Es poden destacar, dels paràmetres obtinguts, els materials de la xarxa, les longituds de les canonades i les edats que la conformen. Cal destacar com a material més utilitzat el Polietilè degut a la seva composició i l'equilibri entre prestacions i preu. Un altre material que és abundant en aquesta xarxa és el fibrociment. Aquest és un material que es va utilitzar de forma prioritària durant la segona meitat del segle vint, però que fa més de vint anys que no s'instal·la i que progressivament es va substituint per polietilè o fosa.

Una vegada van ser analitzats els materials es va realitzar l'anàlisi de longituds on es va comprovar que el primer anàlisi la xarxa era defectuós degut a l'aparició d'una canonada irreal de 1000m de diàmetre. Una vegada eliminada del element d'estudi es va poder concloure que la majoria de canonades es troben dins d'un rang reduït comprès entre els 0 – 10 metres. Quan es van analitzar les canonades que tenen longituds més elevades es va observar que la majoria estan compostes del mateix material, polietilè, i que les seves probabilitats de trencament són molt reduïdes.

En relació a les edats de la xarxa es pot dir que es tracta d'una xarxa en un entorn urbà consolidat de fa molts anys, i per tant amb un rang d'edats molt ampli. Aquesta es troba en constant actualització per poder controlar les fuites i rendiments de la mateixa.

Tot començant la simulació i sense aplicar els coeficients emissors es va contemplar que l'aigua lliurada base del dipòsit és de 66,03 L/s. Aquesta aigua lliurada representa el 100% del rendiment de la xarxa, però per simular un cas realista es va imposar que el rendiment de la xarxa es reduís fins el 78%. Per tant, l'aigua lliurada pel dipòsit va assolir els 84.5 L/s controlant les fuites que es van imposar en els diferents nodes de la xarxa. Aquestes fuites han estat controlades per tres mètodes diferents.

El primer mètode de ponderació va ser el dels coeficients equi-repartits. Mitjançant aquest mètode totes les fuites associades als nodes de la xarxa van assolir el mateix valor, a excepció del node del dipòsit. Implementant un "while" on fins que el valor del consum del dipòsit sigui de 84.5 L/s les fuites de tots els nodes van anar augmentant en un 0.000007. El valor final obtingut va ser de 0.0000511 pels coeficients emissors de la xarxa.

El segon mètode està relacionat amb les longituds de la xarxa. Algunes canonades de la xarxa tenen major dimensió que les altres i per tant el coeficient de fuites adjudicat a elles hauria de ser menor que a aquelles canonades que tenen dimensions mes reduïdes. A partir d'aquest

plantejament es van adjudicar les fuites per cadascun dels nodes que conformen aquesta xarxa fins a assolir la demanda de 84.5 L/s en el dipòsit.

El tercer mètode de ponderació està associat a les probabilitats de trencament de la xarxa. Aquestes van estar també ponderades per les longituds de la xarxa, per tant és una extensió del anterior mètode. Les dades són proporcionades per l'empresa d'aigües de Manresa i estan associades a cadascun dels nodes.

Una vegada implementats els tres mètodes es va passar a la comparació amb les dades proporcionades per l'empresa d'aigües de Manresa. Les dades proporcionades van ser corresponent a tres nodes de la xarxa on es va trobar que per cada 5 minuts s'obtenia el valor de la pressió màxima, mínima i mitjà.

Per poder realitzar una comparació amb les dades proporcionades es va dur a terme una simulació d'una setmana amb reports de 5 minuts on es va mesurar a cada report les pressions dels nodes per a cada instant de temps. A continuació, es van calcular els valors de l'error absolut pels tres nodes amb el MSE i el MAE.

Una vegada aquests errors van estar calculats, es va observar que pel node 3 el valor d'error és bastant més elevat que pels altres dos. Això es pot donar per varies raons, entre les quals es destaca la possibilitat de que el sensor d'aquest node es trobi per sota de la seva cota nominal o que a l'entorn hi hagi una fuga relativament important.

Per tal de reduir encara més aquest error, es van aplicar els algoritmes genètics. Aquests, mitjançant una funció *fitness* i una població inicial es van poder optimitzar tenint en compte que l'aigua lliurada pel dipòsit mai pot ser major o menor que 84.5 L/s.

Els resultats que es van obtenir de l'optimització són acceptables però amb marge de millora. Aquest millora es podria obtenir buscant que els coeficients emissors, al aplicar el problema d'optimització, variïn independentment respecte la constant implementada en aquest treball (z). Així, el valor retornat pels algoritmes genètics estaria més ajustat a les dades mesurades per l'empresa d'Aigües de Manresa.



## 9. Bibliografia

[1] Sswm.info. 2021. Red de distribución comunitaria | SSWM - Find tools for sustainable sanitation and water management!. [online] Available at:

<https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/red-de-distribuci%C3%B3n-comunitaria>

[Accessed 5 April 2021].

[2] Desatascos Isurbide fontaneros y desatascos. 2021. ¿De qué tipo son las tuberías para el abastecimiento del agua? [online] Available at:

<https://desatascosisurbide.com/de-que-tipo-son-las-tuberias-para-el-abastecimiento-del-agua/>

[Accessed 5 April 2021].

[3] Carbing.co.jp. 2021. Reservoir Tank. [online] Available at:

<http://www.carbing.co.jp/international/products/tank/reservoir.shtml>

[Accessed 5 April 2021].

[4] Arco, E. and tuberías, Q., 2021. Qué es la pérdida de carga en tuberías. [online] Blog.valvulararco.com. Available at:

<https://blog.valvulararco.com/que-es-la-perdida-de-carga-en-tuberias>

[Accessed 5 April 2021].

[5] Alegret Breña, E., Martínez Valdés, Y., Alegret Breña, E. and Martínez Valdés, Y., 2021. Coeficiente de Hazen-Williams en función del número de Reynolds y la rugosidad relativa. [online] Scielo.sld.cu. Available at:

[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382019000300041](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382019000300041)

[Accessed 5 April 2021].

[6] Repository.udistrital.edu.co. 2021. [online] Available at:

<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/13336/parraarizajerssonaugusto2018.pdf;jsessionid=B09440393C59B22D1CFFE99A2E573432?sequence=1>

[Accessed 5 April 2021].

[7] Es.wikipedia.org. 2021. Diagrama de Moody - Wikipedia, la enciclopedia libre. [online] Available at:

[https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama\\_de\\_Moody](https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_de_Moody)

[Accessed 5 April 2021].

[8] Pirobloc. 2021. Cálculo de pérdidas de carga - Pirobloc. [online] Available at:

<https://www.pirobloc.com/blog-es/calculo-perdidas-carga/>

[Accessed 5 April 2021].

- [9] Sswm.info. 2021. Tanque de almacenamiento | SSWM - Find tools for sustainable sanitation and water management!. [online] Available at:  
<https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/tanque-de-almacenamiento>  
[Accessed 11 April 2021].
- [10] Aristegui Maquinaria. 2021. Cómo funciona una red de abastecimiento de agua potable - Aristegui Maquinaria. [online] Available at:  
<https://www.aristegui.info/como-funciona-una-red-de-abastecimiento-de-agua-potable/>  
[Accessed 11 April 2021].
- [11] Autosolar.es. 2021. Tipos de bombas de agua. [online] Available at:  
<https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/tipos-de-bombas-de-agua>  
[Accessed 11 April 2021].
- [12] Energía, C., 2021. Partes de una bomba -Sistemas de bombeo- Bombeo de agua potable municipal Estados y municipios. [online] gob.mx. Available at:  
<https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/partes-de-una-bomba-sistemas-de-bombeo-bombeo-de-agua-potable-municipal-estados-y-municipios>  
[Accessed 11 April 2021].
- [13] Codedocs.xyz. 2021. EPANET: Enumerated Types. [online] Available at:  
[https://codedocs.xyz/OpenWaterAnalytics/EPANET/group\\_Enumerations.html](https://codedocs.xyz/OpenWaterAnalytics/EPANET/group_Enumerations.html)  
[Accessed 11 April 2021].
- [14] Máxima Formación. 2021. Qué es R Software. [online] Available at:  
<https://www.maximaformacion.es/blog-dat/que-es-r-software/>  
[Accessed 20 April 2021].
- [15] Nuevo, D., Nuevo, D. and Nuevo, D., 2021. ¿Qué es EPANET? | Formación de ingenieros. [online] Tecpa.es. Available at:  
<https://www.tecpa.es/epanet-que-es-para-que-sirve/>  
[Accessed 20 April 2021].
- [16] Thermal-engineering.org. 2021. [online] Available at:  
<https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-presion-estatica-definicion/>  
[Accessed 18 May 2021].

[17] Epanet.es. 2021. [online] Available at:

[https://epanet.es/wp-content/uploads/2012/10/epanet2\\_manual.pdf](https://epanet.es/wp-content/uploads/2012/10/epanet2_manual.pdf)

[Accessed 18 April 2021].

[18] R-bloggers. 2021. Genetic algorithms: a simple R example | R-bloggers. [online] Available at:

<https://www.r-bloggers.com/2012/08/genetic-algorithms-a-simple-r-example/>

[Accessed 25 April 2021].

[19] Mathworks.com. 2021. Find minimum of function using genetic algorithm - MATLAB ga. [online] Available at:

<https://www.mathworks.com/help/gads/ga.html>

[Accessed 31 April 2021].

[20] Rdocumentation.org. 2021. ga function - RDocumentation. [online] Available at:

<https://www.rdocumentation.org/packages/GA/versions/3.2.1/topics/ga>

[Accessed 2 June 2021].

[21] Scrucca, L., 2021. A quick tour of GA. [online] Cran.r-project.org. Available at:

<https://cran.r-project.org/web/packages/GA/vignettes/GA.html>

[Accessed 21 June 2021].