

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Agroalimentària

Títol: Filtres granulars en sistemes de reg per degoteig amb aigües residuals regenerades: comportament hidràulic i energètic

Document: Memòria

Alumne: Pau Combis Hurtos

Tutors: Miquel Duran Ros i Francesc Ramírez de Cartagena Bisbe

Departament: d'Enginyeria Química, Agrària i Tecnologia Agroalimentària

Àrea: Enginyeria Agroforestal; Enginyeria Hidràulica

Convocatòria: Setembre de 2018

RESUM	5
PARAULES CLAU	7
AGRAÏMENTS	8
1 INTRODUCCIÓ	9
1.1 USOS DE L’AIGUA	9
1.2 IMPORTÀNCIA DE L’AIGUA A L’AGRICULTURA	9
1.3 NECESSITAT DE REG.....	10
1.4 AIGUA REGENERADA.....	11
1.5 SISTEMES DE REG	12
1.6 SISTEMA DE REG LOCALITZAT.....	15
1.7 SISTEMES DE FILTRACIÓ	17
1.8 FILTRE DE SORRA	20
1.8.1 Parts del filtre de sorra	20
1.8.2 Cicle de filtració i rentatge a contracorrent en filtres de sorra	21
1.9 GRUP DE RECERCA D’ENGINYERIA I GESTIÓ DE REG DE LA UDG I LA INVESTIGACIÓ EN EL CAMP DE LA FILTRACIÓ EN REG LOCALITZAT	23
2 OBJECTIUS	25
3 MATERIALS I MÈTODES	26
3.1 LOCALITZACIÓ	26
3.2 DESCRIPCIÓ DE L’ESTACIÓ DEPURADORA	27
3.3 DISPOSITIU EXPERIMENTAL	28
3.3.1 Esquema general del disseny.....	28
3.3.2 Captació i impulsíó de l’aigua	30
3.3.3 Cabal de funcionament.....	30
3.3.4 Filtració	31
3.3.5 Injecció de clor.....	33
3.3.6 Vàlvula proporcional.....	33
3.3.7 Rentatge a contracorrent	34
3.3.8 Sensors de qualitat	34
3.3.9 Sensors de pressió	35
3.4 SUPERVISIÓ, CONTROL I ADQUISICIÓ DE DADES	37
3.4.1 Maquinari	38
3.4.1.1 Ordinador personal	38
3.4.1.2 Autòmats programables.....	38
3.4.1.3 Components de la instal·lació	38

3.4.2	Programari	39
3.4.3	Funcionament del sistema SCADA.....	39
3.4.4	Accés remot a la instal·lació	41
3.4.5	Registre de dades	42
3.5	CARACTERITZACIÓ DE LA SORRA DELS FILTRES	43
3.5.1	Granulometria de la sorra	43
3.5.2	Determinació de la densitat aparent del medi filtrant.....	45
3.5.3	Determinació de la densitat real del medi filtrant	46
3.5.4	Determinació de la porositat del medi filtrant.....	47
3.5.5	Determinació del diàmetre equivalent de partícula del medi granular	48
3.6	MANEIG DEL BANC DE FILTRACIÓ.....	48
3.7	TRACTAMENT DE DADES.....	49
3.7.1	Selecció dels cicles i dades bones.....	49
3.8	CARACTERITZACIÓ DE L'AIGUA D'ENTRADA ALS FILTRES	50
3.9	CARACTERITZACIÓ DE L'EFECTE DEL FILTRE EN L'AIGUA	51
3.9.1	Reducció d'oxigen dissolt de l'aigua d'entrada	51
3.9.2	Reducció de terbolesa de l'aigua d'entrada	52
3.10	DESCRIPCIÓ DELS CICLES DE FILTRACIÓ.....	52
3.10.1	Volum filtrat per cada cicle de filtració	52
3.10.2	Volum d'aigua utilitzada per cada rentatge a contracorrent.....	53
3.10.3	Percentatge d'aigua pel rentatge a contracorrent.....	53
3.10.4	Relació entre l'augment de la pèrdua de càrrega del filtre i el volum filtrat	53
3.10.5	Consum energètic per cada cicle de filtració	54
3.10.6	Consum energètic en el rentatge a contracorrent.....	54
3.10.7	Percentatge d'energia pel rentatge a contracorrent	54
3.10.8	Relació entre volum filtrat i el consum energètic en fase de filtració.....	54
3.11	DISTRIBUCIÓ DE LA PÈRDUA DE CÀRREGA EN EL FILTRE	55
3.12	EVOLUCIÓ DE LA PÈRDUA DE CÀRREGA EN FUNCIÓ DEL VOLUM D'AIGUA FILTRADA.....	56
4	RESULTATS I DISCUSSIÓ.....	57
4.1	CARACTERITZACIÓ DE L'AIGUA D'ENTRADA ALS FILTRES	57
4.1.1	Conductivitat elèctrica.....	57
4.1.2	Oxigen dissolt	58
4.1.3	pH	59
4.1.4	Temperatura.....	60
4.1.5	Terbolesa	61
4.2	SELECCIÓ DELS CICLES	63
4.3	CARACTERITZACIÓ DE L'EFECTE DEL FILTRE EN LA QUALITAT DE L'AIGUA	64

4.3.1	Reducció de l'oxigen dissolt de l'aigua d'entrada.....	64
4.3.2	Reducció de terbolesa de l'aigua d'entrada	65
4.4	DESCRIPCIÓ DELS CICLES DE FILTRACIÓ.....	67
4.4.1	Volum filtrat.....	67
4.4.2	Volum de rentatge a contracorrent.....	68
4.4.3	Percentatge d'aigua de rentatge a contracorrent	69
4.4.4	Relació entre l'augment de la pèrdua de càrrega i el volum filtrat	70
4.4.5	Consum energètic dels cicles de filtració.....	71
4.4.6	Consum energètic del rentatge a contracorrent	72
4.4.7	Percentatge d'energia utilitzada en el rentatge a contracorrent	73
4.4.8	Relació entre volum filtrat i consum energètic en fase de filtració.....	74
4.5	DISTRIBUCIÓ DE LA PÈRDUA DE CÀRREGA EN ELS FILTRES	75
4.5.1	Distribució de la pèrdua de pressió en el filtre prototip.....	75
4.5.2	Distribució en la pèrdua de pressió en el FC1.....	76
4.5.3	Distribució en la pèrdua de pressió en el FC2.....	78
4.6	EVOLUCIÓ DE LA PÈRDUA DE CÀRREGA EN FUNCIÓ DEL VOLUM D'AIGUA FILTRADA.....	79
5	CONCLUSIONS	81
6	BIBLIOGRAFIA.....	82

RESUM

El gran volum d'aigua utilitzada per a l'agricultura i les irregularitats de les precipitacions ha potenciat la utilització d'aigua regenerada en alguns àmbits, com el de l'agricultura. A nivell espanyol, l'evolució de les tècniques de reg ha anat cap al reg localitzat, on ha representat un gran avenç en termes d'eficiència d'aigua. A més, quan es tracta d'aigua regenerada, el millor sistema de reg és el localitzat.

El sistema de reg localitzat té nombrosos avantatges, però també té punts dèbils, com ara les obturacions dels emissors. Per fer front a les obturacions, el reg localitzat ha d'anar acompanyat d'un sistema de filtració, que pot ser de malla, discs o sorra. A l'hora d'utilitzar efluents secundaris, els més aconsellables són els filtres de sorra.

Amb el procés de filtració de l'aigua hi ha una pèrdua de pressió al llarg del filtre, que majoritàriament es troba en el medi filtrant i en la crepina. És per aquest motiu que el Grup de recerca d'Enginyeria i Gestió del reg de la UdG van dissenyar un filtre prototip on disminuïa la pèrdua de càrrega que es generava a la crepina, millorant així l'eficiència del sistema de filtració.

L'assaig va tenir lloc a l'EDAR de Celrà, on els filtres van treballar amb efluents secundaris, amb una alçada del llit de filtració de 20 cm amb una velocitat de filtració de 30 m/h. La instal·lació present a l'EDAR de Celrà disposava de diversos equips mesuradors per tal d'enregistrar variables com el cabal i el volum de filtració, paràmetres de qualitat d'entrada i de sortida, pressions a diferents nivells del filtre, entre d'altres. Alguns d'aquests elements servien per donar informació del funcionament de les condicions de treball dels filtres i d'altres per actuar en la instal·lació. Tots ells integrats en un sistema SCADA per tal de poder interactuar amb el banc d'assajos, tot creant consignes, enregistrant dades i consultant-les en temps real.

L'objectiu principal d'aquest projecte és comparar en condicions de camp el comportament del filtre prototip desenvolupat pel grup de recerca d'Enginyeria i Gestió del Reg de la UdG amb dos filtres comercials.

A partir de les dades de qualitat d'aigua d'entrada als filtres s'ha determinat que van treballar a les mateixes condicions en la majoria dels paràmetres controlats. En el pH, la terbolesa i l'oxigen dissolt les condicions van ser estadísticament les mateixes, però en la conductivitat elèctrica el filtre prototip va treballar en condicions estadísticament diferents del filtre comercial 1, similar va passar amb la temperatura, on el filtre

comercial 2 va treballar a condicions estadísticament diferents del filtre prototip i el comercial 1. Tot i així, per la magnitud de la diferència presentada, es pot concloure que no ha afectat les propietats hidràuliques.

A partir de les dades de qualitat de sortida dels filtres, i la seva comparació amb les dades de qualitat d'entrada als filtres, ha resultat que tot i no haver-hi diferències estadísticament significatives, el filtre prototip ha obtingut millors resultats en la reducció de terbolesa i oxigen dissolt a l'aigua amb un 39,00% i -9,93% respectivament.

Amb les dades de volum i consum energètic de filtratge i de rentatge a contracorrent per calcular valors d'eficiència d'aigua i eficiència energètica s'ha determinat que el filtre prototip obté millors resultats respecte els filtres comercials, en tots els casos són estadísticament diferències exceptuant l'eficiència energètica del filtre prototip i el filtre comercial 2, que no tenen diferències estadístiques significatives.

Amb les mesures de les pressions enregistrades en diferents posicions dels filtres, s'ha observat que en el tram del medi filtrant és el que hi ha més pèrdua de pressió a l'inici del cicle. Un cop el cicle de filtració avança, la pèrdua de càrrega de la crepina pren una importància similar, excepte en el cas del filtre prototip, on al final del cicle la pèrdua de pressió de la crepina es manté estable.

El repartiment de la pèrdua de càrrega quan ha passat 2/3 del cicle de filtració, en el filtre prototip ha sigut del 16,86% en la crepina i 83,14% en el medi filtrant, i en el cas del filtre comercial 1 ha resultat un 46,69% a la crepina i un 53,31% en el medi filtrant.

PARAULES CLAU

Reg localitzat

Filtració

Medi filtrant

Pèrdua de càrrega

Aigües regenerades

Eficiència

SCADA

AGRAÏMENTS

M'agradaria agrair a les persones i institucions que han fet possible la realització d'aquest treball de fi de grau.

En primer lloc vull agrair als meus tutors, el Dr. Francesc Ramírez de Cartagena i el Dr. Miquel Duran Ros pel temps dedicat en el projecte i per donar-me l'oportunitat en participar en un assaig d'aquestes característiques.

També destacar l'ajuda que he rebut per part d'en Carles Solé, becari de doctorat del Grup d'Enginyeria i Gestió del Reg de la UdG, sense la seva implicació ni ajuda, aquest projecte no hagués estat possible, i donar-li ànims en el que l'hi resta de tesi doctoral.

Però no només em vull quedar en agrair a la gent que ha fet possible aquest projecte, sinó que m'agradaria agrair a tots els professors del Grau d'Enginyeria Agroalimentària la seva dedicació en la docència que m'han fet conèixer i estimar aquest món Agroalimentari.

I com no, donar uns agraïments als meus pares, que són els que m'han donat l'oportunitat de poder estudiar i donar-me el suport necessari per poder arribar fins a dia d'avui, moltes gràcies. I a la meva germana que ha estat al meu costat en els moments complicats.

Donar gràcies als amics de classe, que m'han fet créixer com a persona i viure experiències que no oblidaré i donar-los ànims i forces pel món laboral que ens espera.

També agrair a tota la gent que ha passat a la meva vida durant aquests quatre anys fent possible la realització del grau.

Per acabar els agraïments, m'agradaria esmentar la presència dels meus avis en el meu recorregut com a estudiant des de ben petit fins a dia d'avui.

1 INTRODUCCIÓ

1.1 USOS DE L'AIGUA

L'aigua és essencial per a la vida i per moltes activitats econòmiques que depenen totalment d'aquest recurs. A grans termes, l'ús dels recursos hidràulics es poden repartir en tres: usos agrícoles, industrials i domèstics. Si es diferencia l'ús de l'aigua que hi va haver l'any 2012 a Espanya (Figura 1), més de dos terços va anar destinat a l'agricultura, i les llars i la indústria es repartien la part faltant a parts similars (FAO, 2018).

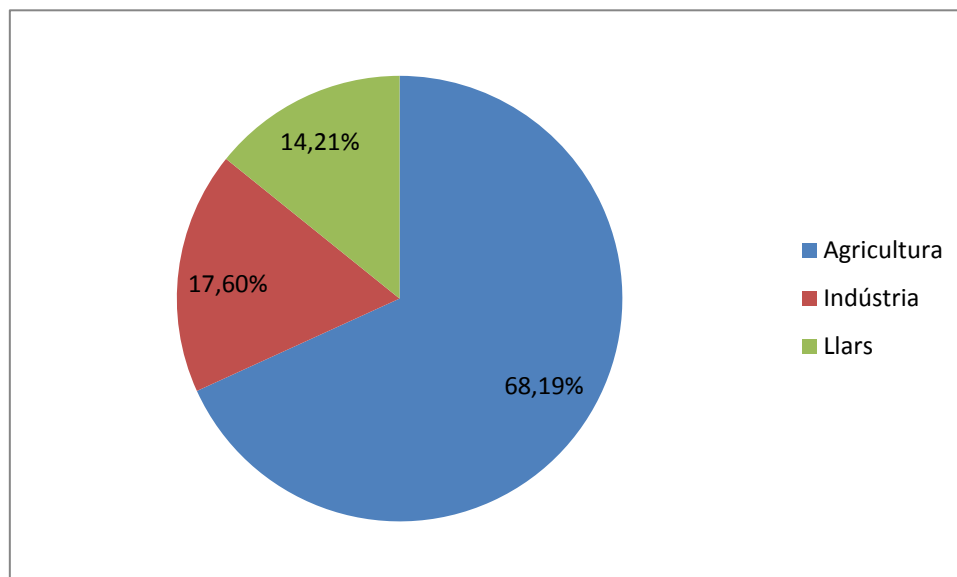


Figura 1. Distribució de l'ús de l'aigua a Espanya l'any 2012 (FAO, 2018).

1.2 IMPORTÀNCIA DE L'AIGUA A L'AGRICULTURA

L'aigua és molt important pel que fa a la producció d'aliments, tot i que hi ha més superfície de secà que no de regadiu. Només el 20% de la superfície cultivada en el món s'hi utilitza algun sistema de reg, i aquesta representa un 40% de la producció mundial d'aliments (UNESCO, 2018). A Espanya la superfície regada representa un 14% de la superfície agrària útil i aporta més del 50% de la producció final vegetal (MAPAMA, 2018 d).

A escala mundial, el rendiment de cultiu de cereals de secà en regions en desenvolupament arriba a 1,5 T/ha, mentre que en condicions de regadiu, s'arriba a 3,3 T/ha de mitjana (FAO, 2011).

1.3 NECESSITAT DE REG

Les necessitats de reg es calculen a partir del balanç d'aigua al sòl. Habitualment, en sòls no salins i amb nivell freàtic profund, les variables del balanç a efectes de la determinació de les necessitats d'aigua de reg queden reduïdes a l'evapotranspiració del conreu i a la precipitació. L'evapotranspiració es calcula a partir d'un cultiu lliure de malalties amb un creixement en un terreny de superfície superior a 1 ha, amb unes condicions òptimes del sòl, referents a uns nivells de fertilització i humitat suficients per arribar a la producció potencial del cultiu. S'anomena ET_c i s'expressa en mm/dia (Vermeiren i Jobling, 1986).

La demanda d'aigua del cultiu ha de ser aportada per l'aigua del sòl i absorbida a través del sistema radicular. L'aigua disponible en el sòl serà un dels factors que marcarà les diferents evapotranspiracions del cultiu al llarg del temps, obtenint així un rendiment més o menys elevat. Quan al sòl hi ha l'aigua necessària per al cultiu, l'evapotranspiració és la màxima, i a mesura que es va esgotant, l'evapotranspiració es va reduint. Aquesta evapotranspiració inferior a la màxima, s'anomena real. Quan es té una evapotranspiració real, significa que la planta està passant per un dèficit d'aigua, i això es veu reflectit en el creixement del cultiu, i en el seu rendiment. L'afecta del dèficit d'aigua depèn molt de l'espècie, la durada i l'època en què es duu a terme (Doorenbos i Kassam, 1979).

En relació a la precipitació, la sèrie històrica de precipitació (Taula 1), indica que en el període transcorregut del 2007 al 2017 hi ha hagut 6 anys amb precipitacions inferiors a la mitjana registrada Espanyola de 648 mm, 3 anys ha sigut amb valors superiors a la mitjana, i un any igual (AEMET, 2018).

Taula 1. Precipitació anual Espanyola i variació respecte a la mitjana en els últims 7 anys (AEMET, 2018).

Any	Precipitació (mm)	Balanç (%)
2017	474	-27
2016	682	+5
2015	500	-23
2014	680	+5
2013	715	+13
2012	550	-15
2011	565	-13
2010	855	+30
2009	650	0
2008	579	-11
2007	608	-6

El nivell dels embassaments al territori Espanyol són en certa mesura, reflex dels períodes de més i menys precipitació. La mitjana dels últims 10 anys de la capacitat dels embassaments al mes de març és de 66,2% (MAPAMA, 2018 c), i al mes de juny és de 68,1% (AEMET, juny 2018).

1.4 AIGUA REGENERADA

El balanç d'aigua a nivell espanyol i les irregularitats de les precipitacions ha fet que s'investigués més en l'obtenció i aplicació d'aigües regenerades en reg. La utilització d'aquestes aigües està prohibida per a consum humà, segons el Real Decret 1620/2007 del 7 de desembre, però permès el seu ús en reg, tant en particulars, zones urbanes, agrícoles i camps de golf, ús ambiental, aqüicultura, industrial entre altres usos (BOE, 2007). La prohibició de l'ús d'aigües regenerades pel consum humà és a causa del contingut de contaminants bioquímics, bacterians i fecals que poden suposar un risc per a la salut humana (Comisión Europea, 2005).

Segons l'INE (2018) a Espanya, al 2014 (Taula 2), la gran quantitat d'aigua reutilitzada l'utilitza l'agricultura, que juntament amb el reg a jardins i zones esportives d'oci es destinava aproximadament un 80% del total. El 20% restant es repartia entre la indústria, la neteja de municipis i altres usos (INE, 2018).

Taula 2. Distribució dels usos de l'aigua regenerada a Espanya (INE, 2014).

Àmbit	Percentatge (%)
Agrícola	61,3
Indústria	8,2
Jardins i zones esportives d'oci	18,5
Neteja municipal	0,6
Altres usos	11,4

A Catalunya l'any 2015 es va reutilitzar un total de 29,35 hm³ d'aigua (Taula 3). L'àmbit on es va destinar més aigua va ser l'ús ambiental amb un 63%, després es trobaria l'ús recreatiu amb un 17%, l'ús industrial amb un 12%, l'ús agrícola amb un 7% i finalment l'ús municipal amb un 1% (ACA, 2015).

Taula 3. Distribució per àmbit d'aplicació dels volums d'aigua reutilitzada a Catalunya (ACA, 2015).

Àmbit	Volum (hm ³)
Agrícola	1,88
Indústria	3,46
Recreatiu	5,06
Municipal	0,36
Ambiental	18,57

A nivell Espanyol, al 2012, el 79,98% de l'aigua utilitzada pel reg procedia d'aigua superficial, el 18,43% procedia d'aigua subterrània, l'1,32% era aigua regenerada, i finalment un 0,27% representava l'aigua dessalinitzada (FAO, 2017).

1.5 SISTEMES DE REG

La conjunció de la manca d'aigua i els grans volums d'aigua utilitzats per l'agricultura, ha afavorit que les diferents tècniques de reg hagin anat evolucionant per tal d'intentar reduir les dotacions d'aigua per hectàrea. S'ha aconseguit millorar la utilització dels recursos hídrics gràcies a una modernització de les tècniques de reg, de les instal·lacions utilitzades, tot millorant les eficiències i uniformitats de reg (MAPAMA, 2018 b).

Cada any, el Ministeri d'Agricultura Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Ambient de l'estat espanyol realitza una enquesta sobre superfície i rendiments de cultiu. Aquesta estadística estableix les tipologies de reg següents (MAPAMA, 2017):

- Reg per gravetat o reg per superfície: inclouent el reg a manta o tesa.
- Reg per aspersió: fent referència a instal·lacions fixes.
- Reg automotriu: aquesta tipologia inclou les màquines de reg per aspersió.
- Reg localitzat: fent referència als sistemes de reg per microaspersió i el degoteig.

Actualment a Espanya (Taula 4), el sistema de reg que s'utilitza en més superfície és el localitzat, representant el 51% de la superfície regada; el segon amb més superfície és el sistema de reg per gravetat, amb 25%; l'altre gran sistema que és el d'aspersió, representa un 15%; i finalment els automotrius representen un 9% (MAPAMA, 2018 a).

Taula 4. Superfície regada diferenciada per sistemes de reg l'any 2017 a Espanya (MAPAMA, 2018 a).

Sistema de reg	Superfície (ha)
Gravetat	926.748
Aspersió	570.360
Automotrius	318.695
Localitzats	1.917.892
TOTAL	3.733.695

A Catalunya, (Taula 5) el sistema de reg més utilitzat és el de gravetat, amb un 49% de la superfície; en segon lloc es troba el reg localitzat amb 36%; el reg per aspersió comporta un 11%; i finalment els automotrius amb una superfície del 4% (MAPAMA, 2018 a).

Taula 5. Superfície regada diferenciada per sistemes de reg l'any 2017 a Catalunya (MAPAMA, 2018 a).

Sistema de reg	Superfície (ha)
Gravetat	126.105
Aspersió	28.151
Automotrius	11.200
Localitzats	92.058
TOTAL	257.574

La Figura 2 presenta l'evolució de les tècniques de reg en els últims 10 anys a l'estat espanyol. S'observa un augment del 22% de la superfície regada amb reg localitzat, un augment del 19% en aspersió i un 21% en automotrius. El sistema de reg per superfície presenta un 20% de decreixement de superfície de reg. El balanç de la superfície regada en tots els sistemes augmenta un 10% (MAPAMA, 2017).

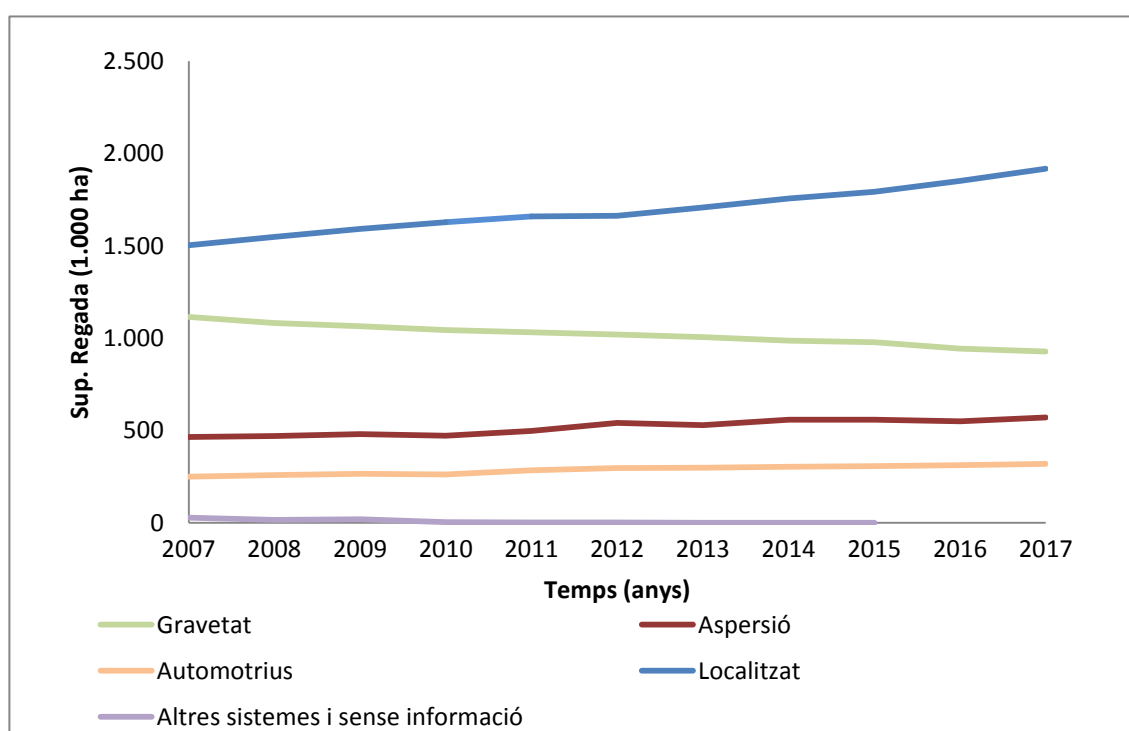


Figura 2. Evolució de la superfície regada a Espanya entre l'any 2007 i l'any 2017 (INE, 2018).

Tal com s'observa a la Taula 6, les tècniques de reg per aspersió i localitzat a Espanya augmenten la quantitat d'aigua utilitzada, per contra, hi ha una reducció significativa de la quantitat d'aigua en reg per superfície. Fins i tot l'any 2015 el volum d'aigua utilitzat pel reg localitzat és superior al volum destinat al reg per gravetat (INE, 2018).

Taula 6. Comparació de l'ús de l'aigua en diferents tècniques de reg a Espanya al 2000 i 2015 (INE, 2018).

Sistema de reg	Volum d'aigua (hm³) al 2000	Volum d'aigua (hm³) al 2015
Gravetat	12.398	5.204
Aspersió	3.058	4.001
Localitzats	1.440	5.739
TOTAL	16.896	14.944

L'evolució de les tècniques de reg anteriorment esmentada fan que entri en joc l'energia utilitzada pel reg. Tradicionalment es regava amb aigua superficial o de deus i amb la tècnica per gravetat, així doncs el consum d'energia era molt baix. El desenvolupament de sistemes de reg que necessitaven distribució a pressió com ara l'aspersió, automotrius i més endavant el localitzat ha exigít una aportació d'energia extra (Corominas, 2010).

Així doncs, de la informació presentada anteriorment se n'extreu que la manca de recursos hídrics ha provocat que l'agricultura tendeixi a utilitzar en major proporció el sistema de reg localitzat, i que es planteja un horitzó on la utilització d'aigües regenerades a l'agricultura pot prendre importància.

1.6 SISTEMA DE REG LOCALITZAT

Fuentes Yagüe (2003) defineix el reg localitzat com una tècnica que consisteix a aplicar l'aigua de reg a una zona més o menys restringida del volum de sòl que habitualment ocupen les arrels. Les característiques principals d'aquest sistema de reg són:

- No es mulla la totalitat del sòl
- S'utilitzen petits cabals a baixa pressió
- L'aigua s'aplica amb alta freqüència

Segons el mateix autor, el reg per degoteig presenta avantatges i inconvenients (Taula 7) respecte als altres sistemes de reg.

Taula 7. Avantatges i inconvenients del reg per degoteig (Fuentes Yagüe, 2003).

Avantatges	Inconvenients
Millor aprofitament de l'aigua	Es necessita un personal més qualificat
Possibilitat d'utilitzar aigües amb un índex de salinitat més alt	Realitzar una anàlisi inicial de l'aigua per saber els materials en suspensió presents
Uniformitats de reg més elevades	Quan no es fa un correcte maneig del reg, poden sorgir problemes de salinització del bulb
Millor aprofitament dels fertilitzants	Revisar el funcionament de la instal·lació per prevenir obturacions dels emissors
Augment de la quantitat i qualitat de la collita	Controlar correctament les dosis d'aigua, fertilitzants, pesticides i productes que s'apliquen amb l'aigua de reg
Menor infestació de males herbes, gràcies a la menor superfície mullada	Inversió inicial és més elevada
Possibilitat d'aplicar fertilitzants, correctors i pesticides juntament amb l'aigua de reg	
Facilitat per executar feines agrícoles gràcies al fet que una part de la superfície queda seca	
Estalvi de mà d'obra durant el funcionament	
En aigües regenerades, és el sistema més aconsellat, ja que s'evita el contacte amb l'operari i la part aèria de la planta	

El problema més greu i freqüent de les instal·lacions de reg localitzat, i en particular del reg per degoteig, és el de l'obturació dels emissors. El que provoca les obturacions, és que el cabal dels emissors disminueixi o fins i tot sigui nul si s'obtura del tot, el que implicarà una mala uniformitat de reg. És per aquest motiu que el sistema de reg ha d'estar proveït d'un equip de filtratge, que dependrà de les partícules que es vulguin separar de l'aigua.

Segons Rodrigo et al. (1997) es diferencien les obturacions segons la naturalesa en les provocades per partícules orgàniques o inorgàniques i les degudes a precipitacions i proliferació de bacteris.

Els emissors de degoteig són un dels elements més delicats de la instal·lació, i que a causa del seu reduït diàmetre de pas té risc a l'obturació. Com menor és el diàmetre de pas el risc d'obturació és més elevat. Les obturacions són especialment delicades en els punts on el recorregut dins de l'emissor té un canvi de sentit molt bruscat i en llocs on s'utilitzen materials que deixen passar la llum, que facilitaran el desenvolupament d'algues (Pizarro, 1987).

És per aquest motiu que el sistema de reg per degoteig requereix una filtració de l'aigua que s'utilitzarà.

1.7 SISTEMES DE FILTRACIÓ

Per regla general, quan s'utilitzen degoters és aconsellable retirar partícules més grans d'1/10 del diàmetre de l'orifici de sortida de l'emissor per tal d'evitar les obturacions per formació de ponts (Figura 3). En el cas dels microaspersors, on els orificis dels emissors són més grans, s'aconsella retirar les partícules majors d'1/7 part del diàmetre de l'orifici de sortida (Burt i Styles, 2000).

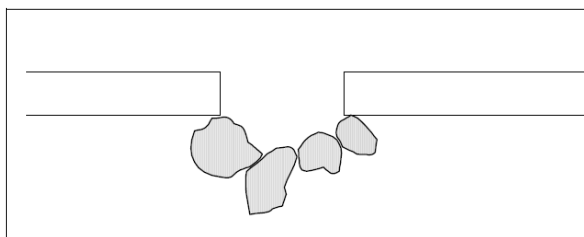


Figura 3. Obturacions per formació de ponts (Burt i Styles, 2000).

Per tal d'evitar l'aparició d'obturacions en els emissors en reg per degoteig és necessari la instal·lació de sistemes de prefiltratge i filtratge.

1. Sistemes de prefiltratge: són interessants la seva instal·lació quan l'aigua conté una gran quantitat de partícules inorgàniques en suspensió i es volen eliminar abans que entrin al capçal de reg. Segons Fuentes Yagüe (2003) hi ha diferents tipus de sistemes de prefiltratge, però els més utilitzats en reg localitzat són dos:

1.1. Dipòsits de decantació: la seva funció és separar de l'aigua, per sedimentació, les partícules minerals en suspensió (sorra i llim). Un dels inconvenients que presenten és que no són massa bona opció per a separar

material orgànic i necessiten grans superfícies per poder tenir aquesta instal·lació. Són recomanables quan hi ha més de 200 ppm de sòlids en suspensió per millorar el filtrat més endavant. La velocitat de sedimentació dependrà de la mida de les partícules (Burt i Styles, 2000).

1.2. Hidrocicló (Figura 4): consisteix en un dipòsit en forma de con invertit on l'aigua entra tangencialment per la part superior, provocant un moviment rotacional descendent a la perifèria, gràcies al qual les partícules sòlides es dirigeixen a la part inferior, i l'aigua surt per la part superior gràcies a un moviment rotacional ascendent per la cara interna. Permet la separació de les partícules sòlides en suspensió de mida superior a 75 micres i densitat superior a la de l'aigua (Fuentes Yagüe, 2003). El cabal de funcionament ha de ser l'adequat, si el cabal es redueix, no hi haurà la suficient força centrífuga per a separar les partícules de més pes específic (Burt i Styles, 2000).

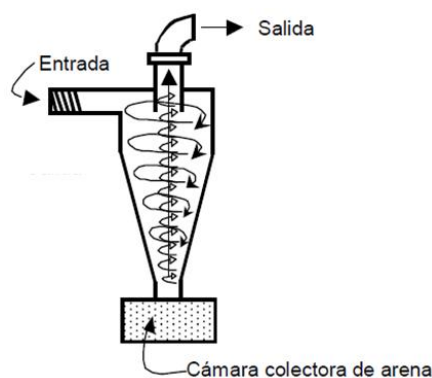


Figura 4. Hidrocicló (Burt i Styles, 2000).

2. Sistemes de filtratge: consisteix a retenir les partícules contaminants a l'interior d'una massa porosa (filtre de sorra) o sobre una superfície filtrant (filtre de malla i anelles) (Fuentes Yagüe, 2003). Els filtres que es poden instal·lar en un sistema de reg són els següents:

2.1. Filtre de malla (Figura 5): s'utilitza per retenir partícules inorgàniques en aigües que no estan molt contaminades. Si hi ha presència d'algues a l'aigua, s'ha d'instal·lar un altre filtre complementari, per tal que el filtre de malla no s'obturi ràpidament (Fuentes Yagüe, 2003). La filtració que s'hi duu a terme és en superfície, tot i que té poca capacitat d'emmagatzematge a causa de les seves dimensions (Burt i Styles, 2000).



Figura 5. Esquema d'un filtre de malla (Ingemecánica, 2018).

2.2. Filtre de discs o anelles (Figura 6): té les mateixes aplicacions que el filtre de malles, utilitzant un o altre indiferentment. Tot i que s'utilitza més el filtre d'anells per la seva facilitat a l'hora de la neteja i efectivitat (Fuentes Yagüe, 2003). S'utilitzen per cabals molt petits, menors a $5,7 \text{ m}^3/\text{h}$, ja que la capacitat de retenció de partícules és molt major que en el de malles, i els de sorra no són rendibles per a cabals petits. L'element filtrant d'aquests filtres són anelles ranurades amb un forat al centre que es disposen un al costat de l'altre creant un cos filtrant cilíndric (Burt i Styles, 2000).

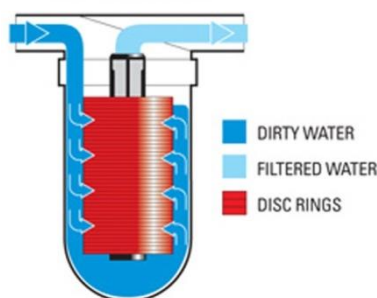


Figura 6. Esquema d'un filtre de discs o anelles (Insumos de riego, 2018).

2.3. Filtre de sorra (Figura 7): utilitzat per retenir contaminants orgànics (algues, bacteris, restes orgàniques) i inorgàniques (sorres, llims, argiles, precipitats químics). És el filtre més adequat quan es treballa amb aigües molt contaminades amb partícules petites o gran quantitat de matèria orgànica. (Fuentes Yagüe, 2003). La profunditat del llit de sorra proporciona una filtració en profunditat i en tres dimensions i té una capacitat d'emmagatzematge de partícules superior als filtres de malles. (Burt i Styles, 2000).

Els filtres de sorra redueixen significativament la terbolesa i els sòlids en suspensió aconseguint una menor obturació dels emissors (Duran-Ros et al., 2009), garantint millors rendiments dels emissors en reg localitzat (Capra i Scicolone, 2007).

1.8 FILTRE DE SORRA

1.8.1 Parts del filtre de sorra

Els filtres de sorra consisteixen en tancs metàl·lics (acer galvanitzat, inoxidable o amb protecció de pintura antioxidant) o de plàstics reforçats (polièster bobinat amb fibra de vidre o polièster laminat) capaços de resistir les pressions estàtiques i dinàmiques de la xarxa, omplerts de sorra o grava tamisada d'una determinada mida. La filtració té lloc quan l'aigua travessa la sorra (Rodrigo et al., 1997).

Les parts d'un filtre de sorra es poden observar a la Figura 7 i es descriuen a continuació.

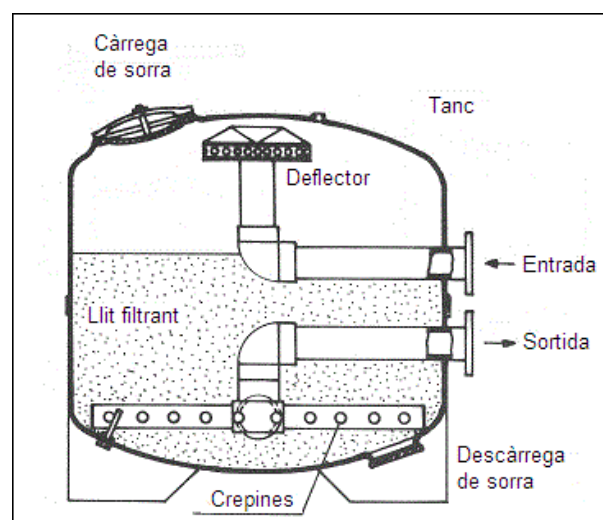


Figura 7. Part d'un filtre de sorra (OCWUS, 2008).

- 1. Tanc:** recipient tancat normalment metàl·lic amb protecció anticorrosiu que permet al sistema treballar en condicions de pressió.
- 2. Deflector:** el seu objectiu és evitar que l'aigua impacti directament amb la sorra i la remogui. (Pizarro, 1987).
- 3. Entrada i sortida d'aigua.**
- 4. Crepines:** col·lectors revestits de malla (Pizarro, 1987) que estan dissenyades per permetre la sortida de l'aigua filtrada, evitar que el medi filtrant surti del tanc i distribuir de forma regular l'aigua que s'utilitzarà per al rentatge a contracorrent (Burt i Styles, 2000).
- 5. Accés càrrega de sorra/ Accés descàrrega de sorra:** un accés per poder omplir el tanc del material que constitueix el llit filtrant i l'altre per a la retirada d'aquest mateix material (Pizarro, 1987).

6. Llit filtrant: el llit filtrant pot estar format per un únic tipus de sorra (monocapa) o bé utilitzar diversos tipus de sorra (multicapes) (Pizarro, 1987). Els monocapes, que tenen un llit de filtració homogeni, són els que s'utilitzen en l'agricultura, en canvi, els multicapes, que tenen llits estratificats, se solen utilitzar més en la indústria (Burt i Styles, 2000). A la llarga si s'utilitzen diversos tipus de sorra, amb els rentatges a contracorrent s'acaben barrejant, provocant una menor qualitat en la filtració (Pizarro, 1987). També es pot utilitzar com a materials de filtració granit triturat en substitució de la sorra (Burt i Styles, 2000).

Segons Burt i Styles (2000), a l'hora d'escollir la sorra de llit filtrant s'han de tenir en compte dos factors:

- 1-El grau de filtració necessari, que vindrà determinat pels emissors que s'utilitzaran i el manteniment que es voldrà fer en el sistema de reg.
- 2-La combinació de sorra, mida de partícula i cabals per aconseguir el nivell de filtració desitjat.

1.8.2 Cicle de filtració i rentatge a contracorrent en filtres de sorra

El funcionament d'un filtre de sorra inclou dues fases, una és la de filtració de l'aigua, i l'altra és la del rentatge a contracorrent (Burt i Styles, 2000).

El funcionament normal d'un filtre de sorra quan està filtrant (Figura 8) consisteix en l'entrada d'aigua per la part superior i es distribueix a l'interior del tanc gràcies a un deflector. La sortida de l'aigua filtrada té lloc per sota del tanc, gràcies a les crepines que recullen l'aigua i la dirigeixen als col·lectors de sortida. (Pizarro, 1987).

Durant la filtració, les partícules van quedant retingudes en les capes de sorra superiors i cap a l'interior. En el moment que tota la capa de sorra està contaminada es produeix una diferència de pressió important entre la part superior i la part inferior del medi filtrant. Aquest fet, portat a l'extrem, genera canals preferents en el medi per on circularà l'aigua sense filtrar-se disminuint així la qualitat de l'aigua a la sortida, és per aquest motiu que abans d'arribar a aquest punt s'ha de rentar el filtre i recuperar així la capacitat filtrant (Fuentes Yagüe, 2003).

Per rentar el llit de sorra, el que es realitza és un canvi del sentit de l'aigua, és a dir, l'aigua entra per la part inferior i surt per la part superior. Un esquema del rentatge a contracorrent es pot observar a la Figura 8 (Fuentes Yagüe, 2003).

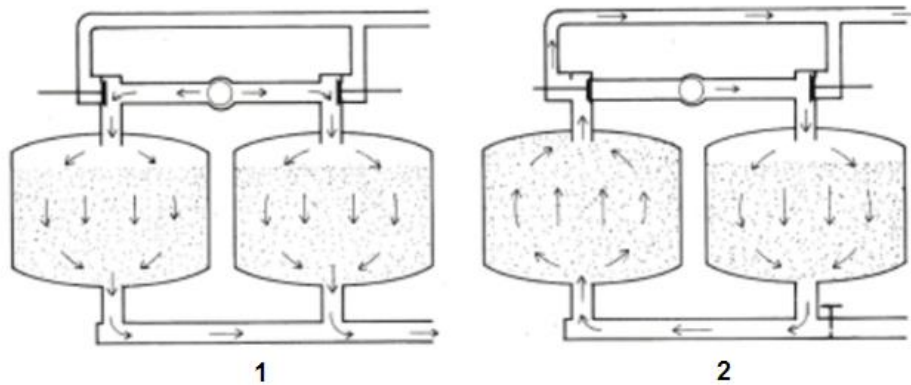


Figura 8. Esquema de funcionament i direcció del flux de l'aigua en la fase de filtració (1) i en la fase de rentatge a contracorrent (2) (Fuentes Yagüe, 2003).

Amb el rentatge a contracorrent el sentit de l'aigua s'inverteix i el flux d'aigua implicarà que el llit de sorra s'expandirà un 15-25%, per això és important deixar una cambra d'expansió sobre el llit filtrant (Rodrigo et al., 1997).

Amb aquests tipus de filtre convé instal·lar més d'un tanc, de manera que l'aigua filtrada per un es pugui fer servir per a fer el rentatge a contracorrent de l'altre (Figura 8). Si no és possible disposar de més d'un filtre i s'utilitza aigua no filtrada, hi ha el risc d'acumular impureses a la part inferior del filtre. Si s'opta per aquest segon mètode, cal eliminar l'aigua que passa pel filtre durant els primers minuts de funcionament després de la seva neteja (Pizarro, 1987).

Un bon rentatge a contracorrent necessita un cabal suficientment gran per aixecar el llit filtrant i permetre que les partícules retingudes es separin del medi filtrant (Burt i Styles, 2000). D'aquesta manera s'aconsegueix una neteja acceptable de les capes profundes del llit de sorra, però a vegades no és suficient per eliminar les crostes que es generen a la part superior i que poden baixar cap a capes més profundes. L'augment de la velocitat de l'aigua de rentatge a contracorrent no soluciona aquest problema, i el que genera és una classificació del material filtrant, col·locant els grans més fins a la part superior. Un procediment que es pot utilitzar per eliminar aquesta capa, és remoure manualment la crosta durant el rentatge a contracorrent (Pizarro, 1987).

Al pas de l'aigua pel filtre genera una pèrdua de pressió. Dues zones on n'hi ha són en el llit de filtració i a les crepines. A velocitats de filtració baixes (al voltant de 0,005 m/s) la caiguda de pressió produïda pel llit de filtració i per les crepines són aproximadament la mateixa, però quan es treballa amb velocitat de filtració més elevada, a la crepina hi ha una major pèrdua de càrrega (Bové et al., 2015).

1.9 GRUP DE RECERCA D'ENGINYERIA I GESTIÓ DE REG DE LA UDG I LA INVESTIGACIÓ EN EL CAMP DE LA FILTRACIÓ EN REG LOCALITZAT

El grup de recerca d'Enginyeria i Gestió de reg de la UdG té una trajectòria de més de 20 anys en la investigació en reg en aigües regenerades i en particular en la filtració d'aquestes.

L'equip de recerca va dissenyar un filtre prototip amb l'objectiu de millorar el rendiment de la filtració, aconseguint així una millor eficiència en l'ús de l'aigua i energia (Bové et al., 2016). Aquest filtre està registrat en data 29/05/2015 com a Model d'utilitat 201530629 per "la Oficina Española de Patentes y Marcas del Ministerio de Industria, Energía y Turismo".

La crepina dissenyada a escala (Figura 9) consistia en un cuboide de 37 mm d'altura, amb 8 orificis quadrats laterals de 550 mm² cada un i 4 orificis a la part superior de 625 mm² cada un. La sortida de l'aigua filtrada tenia lloc per la part inferior del cuboide de 60 mm de costat. Aquest cuboide estava col·locat dins d'un cilindre de 77 mm d'altura ple de vidre reciclat i triturat, prèviament tamisat per tal de tenir mida de partícula d'entre 0,85 i 1,50 mm.

Aquesta nova crepina permetia que l'aigua es distribuís més uniformement a través del llit de filtració i la velocitat de l'aigua a la sortida del col·lector es reduís (Bové et al., 2016).

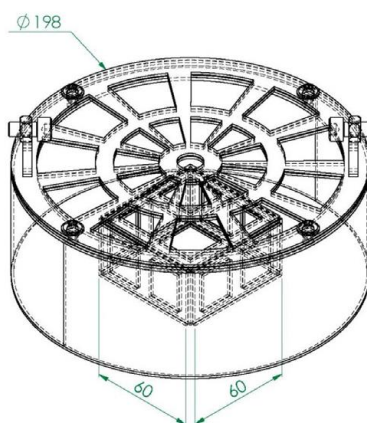


Figura 9. Disseny de la nova crepina (Bové et al., 2016).

La crepina utilitzada per a realitzar l'assaig va ser lleugerament diferent, en el filtre prototip construït no hi havia la presència del cuboide, i la part inferior era igual que la superior (ocupant tota la secció del filtre), augmentant així la superfície de la crepina.

Les proves efectuades fins al moment s'han realitzat en condicions de laboratori i amb aigua no regenerada. Aquest treball fi de grau es centra en l'anàlisi hidràulic del comportament d'aquest filtre prototip a camp en el seu ús amb aigües regenerades i la seva comparació amb filtres comercials.

2 OBJECTIUS

L'objectiu principal d'aquest projecte és comparar en condicions de camp el comportament del filtre prototip desenvolupat pel grup de recerca d'Enginyeria i Gestió del Reg de la UdG amb dos filtres comercials.

Els objectius específics són:

1. Descriure la variació de qualitat de l'aigua entre l'entrada i la sortida dels filtres mesurada en termes de turbidesa i d'oxigen dissolt.
2. Definir el comportament hidràulic dels tres filtres en termes d'evolució de pressions en diferents punts del filtre i les seves pèrdues de càrrega, volums filtrats i volums d'aigua utilitzats en el rentatge a contracorrent.
3. Definir el comportament energètic dels tres filtres.

3 MATERIALS I MÈTODES

3.1 LOCALITZACIÓ

La part experimental d'aquest projecte final de carrera es va realitzar en el banc de proves de filtració del grup de recerca d'Enginyeria i Gestió del Reg de la UdG. Aquest banc està situat al terreny annex a l'Estació Depuradora d'Aigües Residuals (EDAR) de Celrà (Figura 10), municipi de la província de Girona. L'any 2017 aquest municipi tenia una població de 5.376 habitants (Idescat, 2018). En aquesta EDAR es realitzava el tractament de les aigües residuals urbanes i les aigües procedents del polígon industrial del mateix municipi. En el terreny annex es pot observar la localització del banc de filtració i de les subunitats de reg (Figura 10).



Figura 10. Vista aèria de l'Estació Depuradora d'Aigües Residuals de Celrà i la parcel·la annexa on es van desenvolupar els assajos. El cercle indica la localització del banc de filtració i el rectangle del camp de degoteig (ICGC, 2018).

3.2 DESCRIPCIÓ DE L'ESTACIÓ DEPURADORA

L'aigua que arribava a la depuradora procedia de la zona urbana i de la zona industrial del municipi de Celrà i ho feia a través de l'estació de bombament inicial, lloc on es procedia a regular el cabal de tractament. La depuradora tenia una capacitat per tractar 250 m³/h. A l'arribada a l'estació de bombament, l'aigua es feia passar per unes reixes de desbast gruixut i a partir d'aquest punt es bombejava el cabal consignat cap a la planta de tractament. Una vegada l'aigua arribava a la planta, es feia passar a través d'uniques altres reixes per a realitzar un desbast més fi. Després d'aquest tractament, l'aigua entrava al canal de dessorrador i desgreixador que, gràcies a les diferents densitats de la sorra, el greix i l'aigua i amb l'ajuda d'aire injectat, se separava la sorra i els greixos de l'aigua.

Després d'aquest pretractament, l'aigua es repartia entre les dues línies del tractament secundari, on es pretenia reduir la contaminació orgànica i els nutrients fòsfor i nitrogen. S'eliminava un 30% del fòsfor per acció dels microorganismes, i per arribar a una reducció del 85 – 90% s'afegia clorur de ferro. La primera acció en el tractament secundari era l'alliberació, en el reactor anaeròbic, del fòsfor que es trobava en forma de polifosfat a fòsfor soluble a l'aigua. El següent era l'eliminació del nitrogen mitjançant la combinació de processos de nitrificació (en condicions aeròbiques) i de desnitrificació (en condicions anaeròbiques). Aquests dos processos es realitzaven en un reactor biològic tipus canal d'oxidació amb fangs actius, on es diferenciava els dos ambients d'actuació. L'aigua entrava per la part aeròbica del reactor, on tenia lloc la nitrificació i l'eliminació del fòsfor que hi havia soluble a l'aigua després del reactor anaeròbic. Després passava per la part anaeròbica on es realitzava la desnitrificació i es tornava a iniciar un altre cicle per eliminar el fòsfor i el nitrogen. En el tractament secundari, es reduïa també la Demanda Bioquímica d'Oxigen (DBO₅) en un 90%, que significava la reducció de la major part de la matèria orgànica biodegradable.

L'aigua de sortida del reactor biològic es derivava cap als decantadors, a on hi estava unes quatre hores per tal de clarificar-se i permetre la decantació dels fangs abans d'arribar a l'arqueta de sortida d'aigua residual tractada. Des d'aquesta arqueta, l'aigua es conduïa cap al riu.

Una part dels fangs obtinguts en el decantador es recirculaven cap al reactor biològic, per tal de mantenir la massa de fangs actius i garantir el bon funcionament del tractament. La resta s'eliminava del sistema amb la línia de fangs, on eren parcialment deshidratats amb la utilització d'un filtre de bandes, una centrifugadora horitzontal i amb l'ajuda de l'addició d'un polielectròlit.

3.3 DISPOSITIU EXPERIMENTAL

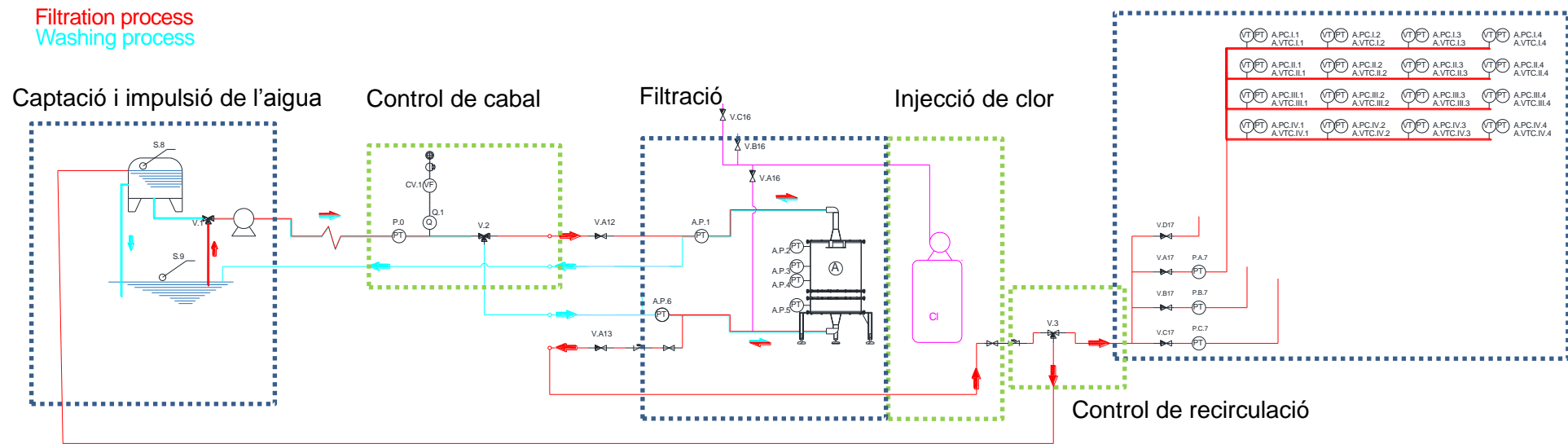
3.3.1 Esquema general del disseny

La instal·lació es podia dividir en tres zones principals: la captació i impulsió d'aigua, el banc de filtració i les subunitats de reg; i unes parts auxiliars necessàries (control de cabal, cloració, control de recirculació (Figura 11)).

L'aigua residual tractada de la depuradora era impulsada al banc de filtració des de l'arqueta de sortida de l'estació depuradora mitjançant la utilització d'una bomba de pressió. Una vegada l'aigua era filtrada, aquesta es conduïa cap a les unitats de reg, formats per laterals de reg per degoteig. Durant aquest procés l'aigua era analitzada per sensors de qualitat abans i després de la filtració. Tal com s'explicarà més endavant, tot aquest sistema estava integrat en un sistema SCADA (Supervisory, Control and Data Acquisition) per tal de facilitar el maneig de la instal·lació i la captura de dades.

Les consignes principals de funcionament de tota la instal·lació van ser el cabal de filtració; per tal de garantir una velocitat de filtració constant i les pressions en cadascun dels filtres; per tal de poder mesurar la pèrdua de càrrega dels filtres i provocar els rentatges a contracorrent dels filtres.

Subunitats de reg



- Boia de nivell
- Bomba centrífuga
- Transductor de pressió
- Comptador volumètric i emissor d'impulsos
- Cabalímetre electromagnètic
- Aplicador de clor
- Acomulador d'aigua filtrada
- Vàlvula motoritzada resposta proporcional
- Vàlvula motoritzada tot o res
- Vàlvula manual
- Vàlvula de retenció
- Vàlvula de tres vies
- Vàlvula de tres vies proporcional

Figura 11. Esquema hidràulic del procés de filtració (Solé et al., 2017).

3.3.2 Captació i impulsió de l'aigua

La captació de les aigües regenerades es realitzava des de l'arqueta d'aigua residual tractada, situada a continuació dels decantadors del tractament secundari. L'altura d'aspiració era d'1,3 m i el bombeig es realitzava amb una bomba centrífuga multicel·lular en línia, trifàsica i de 4 kW de potència model CR 15-4 (Grundfos, Bjerrinbro, Dinamarca) (Figura 12). A la captació també es disposava d'un dipòsit de 3000 litres de capacitat Aquablock (Shütz, Selters, Alemanya) (Figura 13) per a emmagatzemar aigua filtrada per un posterior ús com a aigua de rentatge a contracorrent dels filtres. Aquest dipòsit permetia emmagatzemar aigua filtrada i clorada.



Figura 12. Bomba centrífuga.



Figura 13. Dipòsit de captació.

3.3.3 Cabal de funcionament

La instal·lació va treballar a un cabal de 6 m³/h, per tal de garantir una velocitat de filtració de 30 m/s. El cabal es mesurava amb un cabalímetre electromagnètic i emissor d'impulsos model ISOMAG MS2500 (ISOIL Industria SpA, Cinisello Balsamo, Italia) (Figura 14). Aquest cabalímetre estava situat a l'entrada del banc de filtració. Amb la informació que proporcionava el cabalímetre, un variador de freqüència model FRN-4 (Fuji Electric, Cerdanyola del Vallès, Catalunya) (Figura 15) governava la bomba per ajustar-ne el seu funcionament i garantir el cabal consignat.



Figura 14. Cabalímetre electromagnètic.



Figura 15. Variador de freqüència.

3.3.4 Filtració

Per tal de complir els objectius de l'assaig es van utilitzar els tres filtres següents:

- Filtre de 500 mm de diàmetre nominal. És el filtre prototip desenvolupat pel grup de recerca d'Enginyeria i Gestió del Reg de la Universitat de Girona protegit amb el model d'utilitat espanyol número U201530629 (Figura 16) amb una superfície de filtració de 1960 cm². En aquest projecte s'anomena com a filtre prototip (FP).



Figura 16. Filtre prototip.

- Filtre de 508 mm de diàmetre nominal model FA-F2-188 (Regaber, Parets del Vallès, Espanya) (Figura 17). Aquest filtre disposava d'una superfície de filtració de 2026 cm^2 i cabal màxim de filtració de $18 \text{ m}^3/\text{h}$. En aquest projecte s'anomena com a filtre comercial 1 (FC1).



Figura 17. Filtre Regaber.

- Filtre de 500 mm de diàmetre nominal model FA1M (Lama, Sevilla, Espanya) (Figura 18). Aquest filtre disposa d'una superfície de filtració de 1960 cm^2 i cabal de filtració màxim de $23 \text{ m}^3/\text{h}$. En aquest projecte s'anomena com a filtre comercial 2 (FC2).



Figura 18. Filtre Lama.

3.3.5 Injecció de clor

A l'aigua un cop filtrada, s'hi injectava clor, amb una bomba de clor de membrana amb controlador model DosiTec AC1/2 (ITC, Sta. Perpetua de Mogoda, Catalunya) (Figura 19). La bomba estava connectada a un dipòsit de 200 litres de capacitat. En filtració la concentració de clor en l'aigua filtrada era de 2 ppm, que equival a un cabal d'injecció, per part de la bomba de 0,8 l/h. En el moment de rentatge, s'injectava clor per tal que la concentració en l'aigua de rentatge del filtre fos de 4 ppm, representant un cabal d'injecció per part de la bomba d'1,6 l/h.

La finalitat d'injectar el clor a l'aigua un cop filtrada, era garantir l'arribada de clor als laterals de reg per degoteig i evitar un consum innecessari de clor en el procés de filtració. Al principi del lateral de reg ens arriba una concentració de 0,5 ppm i al final no n'hi arriba perquè ja ha reaccionat a mesura que avançava pel lateral de reg.



Figura 19. Equip d'injecció de clor i dipòsit.

3.3.6 Vàlvula proporcional

Com que el cabal necessari per a les subunitats de reg ($2 \text{ m}^3/\text{h}$) era inferior al cabal de treball dels filtres ($6 \text{ m}^3/\text{h}$), una part d'aquest cabal es retornava al dipòsit inicial de capçalera, i aquest per sobreeixidor el retornava a l'arqueta de sortida d'aigua residual tractada de la depuradora. Per regular el cabal que anava a les subunitats de reg s'utilitzava la pressió del transductor de l'entrada a la parcel·la de degoters, més endavant es veurà que és el transductor de pressió 7, que havia d'estar a 1,7 bar per tal de garantir el correcte funcionament de la parcel·la de degoters. Aquesta divisió d'aigües es realitzava amb una vàlvula proporcional de tres vies amb actuator electro-

hidràulic model SKD62 (Siemens, Berlín, Alemanya). La pressió a l'entrada de la subunitat de reg era la consigna que regulava el cabal que utilitzava la subunitat de reg i per tant el cabal que havia de derivar la vàlvula proporcional de tres vies.

3.3.7 Rentatge a contracorrent

Quan la pèrdua de càrrega arribava a la consigna, s'activava el rentatge a contracorrent. Gràcies a una vàlvula de tres vies, situada a l'aspiració de la bomba, model H55 (GENEBRE, Hospitalet de Llobregat, Espanya) s'impulsava aigua del dipòsit d'aigua filtrada a capçalera cap al banc de filtració. Una altra vàlvula de tres vies abans de cada filtre, enviava l'aigua cap a la sortida del filtre, a la part inferior d'aquest, actuant així en sentit contrari al sentit de filtració per tal de rentar el medi filtrant. L'aigua utilitzada pel rentatge a contracorrent era conduïda a l'arqueta d'aigua de sortida de l'EDAR.

3.3.8 Sensors de qualitat

La qualitat de l'aigua d'entrada i de sortida del filtre era caracteritzada en continu. A l'aigua d'entrada (Figura 20) es mesurava la terbolesa, la quantitat d'oxigen, el pH, la temperatura i la conductivitat elèctrica i a la de sortida (Figura 21) es mesurava la terbolesa i el contingut en oxigen, ja que es considerava que la temperatura, la conductivitat i el pH no canviaven a causa de la filtració.

Els sensors que es van utilitzar per a mesurar cada paràmetre van ser els següents:

1. Terbolesa a l'entrada i a la sortida: transmissor LIQUISYS-M CUM253-TU0005 (Endress+Hauser, Gerlingen, Germany) amb sonda CUS31-A2E (Endress+Hauser, Gerlingen, Germany).
2. Oxigen a l'entrada i a la sortida: transmissor LIQUISYS-M COM253-WX0015 (Endress+Hauser, Gerlingen, Germany) amb sonda COS 61-A1F0 (Endress+Hauser, Gerlingen, Germany).
3. Temperatura i pH d'entrada: transmissor LIQUISYS-M CPM253-MR0010 (Endress+Hauser, Gerlingen, Germany) amb sonda CPS11D-7BA21 (Endress+Hauser, Gerlingen, Germany).
4. Conductivitat elèctrica d'entrada: transmissor LIQUISYS-M CLM253-CD0010 (Endress+Hauser, Gerlingen, Germany) amb sonda CLS21-C1E4A (Endress+Hauser, Gerlingen, Germany).



Figura 20. Panell de mesura de la qualitat d'entrada on es pot veure la disposició dels sensors i els transmissors corresponents.



Figura 21. Panell de mesura de la qualitat de sortida on es pot veure la disposició dels sensors i els transmissors corresponents.

3.3.9 Sensors de pressió

Per cada filtre assajat, es van instal·lar transductors de pressió col·locats en diferents punts del recorregut de filtració. Aquests transductors van ser del model TM-01/C TRANSDUCTOR 0-6 BAR IP68 (STEP Automatización y Control, Barcelona, Espanya).

La localització dels transductors de pressió van ser els següents:

- Un a la canonada d'entrada de cada filtre (Transductor 1).
- Un a la sortida de cada filtre (Transductor 6).
- Un a l'inici de la subunitat de reg de cada filtre (Transductor 7).

- Quatre en diferents altures dels filtres prototip i FC1. En el cas del FC2 en tenia tres, ja que no tenia la cavitat que fa de col·lector de sortida d'aigua filtrada. A la Figura 22 i Figura 23 s'observa la disposició dels transductors de pressió en el filtre prototip i FC1. A la Figura 24 podem veure la distribució dels transductors en el filtre FC2, i veure que no té col·lector de sortida.

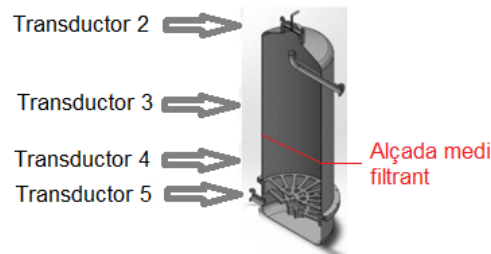


Figura 22. Representació gràfica de la disposició dels transductors de pressió del filtre prototip (Editada a partir de: Environmental assessment of underdrain designs for a sand media filter, 2017).

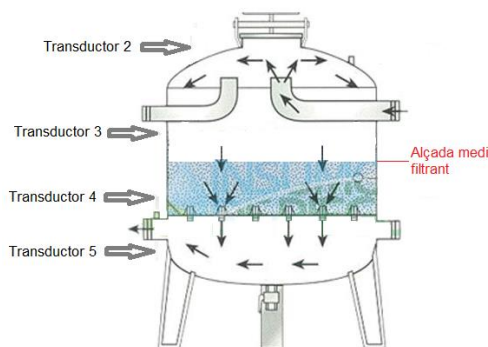


Figura 23. Representació gràfica de la disposició dels transductors de pressió del FC1 (Editada a partir de: Insumos de riego, 2018).

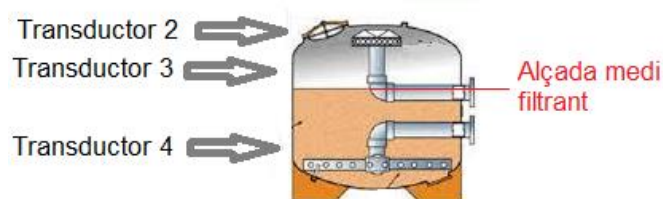


Figura 24. Representació gràfica de la disposició dels transductors de pressió del filtre FC2 (Editada a partir de: EcuRed, 2018).

Així doncs es disposava d'un total de 6 transductors de pressió en el FC2 i 7 en els filtres FC1 i prototip.

Aquesta informació servia per a executar la consigna del rentatge a contracorrent on a partir de la lectura del transductor 1 i el transductor 6 es mesurava la pèrdua de càrrega total del filtre, i si aquesta era superior a la consignada, es procedia a executar un rentatge a contracorrent. La consigna pel rentatge a contracorrent es va establir a 0,5 bar. Segons la revisió bibliogràfica realitzada per Duran-Ros (2008), el rentatge a contracorrent es sol realitzar quan la pèrdua de càrrega assoleix valors d'entre 40 o 50 kPa, és a dir 0,4 o 0,5 bar.

3.4 SUPERVISIÓ, CONTROL I ADQUISICIÓ DE DADES

Per tal de poder monitorar un sistema de reg es pot utilitzar el sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Les funcions que proporciona el sistema SCADA són: adquirir, processar i emmagatzemar dades rebudes; supervisar a través d'un monitor l'evolució de les diferents variables; i controlar el procés per poder-lo modificar a través dels actuadors (Balcells i Romeral, 2003).

Per dur a terme totes aquestes funcions, el sistema SCADA està format per un ordinador amb una interfase amb l'operari i una unitat de control amb un sistema operatiu a temps real. Aquests dos elements han d'estar comunicats entre si, i també als sensors i als automatismes que pugui tenir la instal·lació (Domingo et al., 2003).

Es va proveir a la instal·lació d'un sistema SCADA especialment dissenyat pel maneig, control i adquisició de dades de tots els assajos. Aquest sistema servia per donar ordres a tots els actuadors del banc de filtració i al mateix temps, rebre les dades de registres dels mesuradors. El sistema també ordenava, classificava i arxivava totes les dades que es van creure de rellevant importància per al seu posterior anàlisi. També servia d'interfase de comunicació entre l'usuari i la instal·lació mitjançant un sistema de pantalles d'accés amigable on, a més a més, es podien visualitzar en temps real les dades de la instal·lació.

Un sistema SCADA està constituït per un programari i un maquinari. El maquinari constava d'un ordinador personal, uns autòmats programables i els actuadors i mesuradors (Figura 25). El programari permetia el bon funcionament de la instal·lació segons les instruccions establertes a partir de la configuració de les consignes de treball.

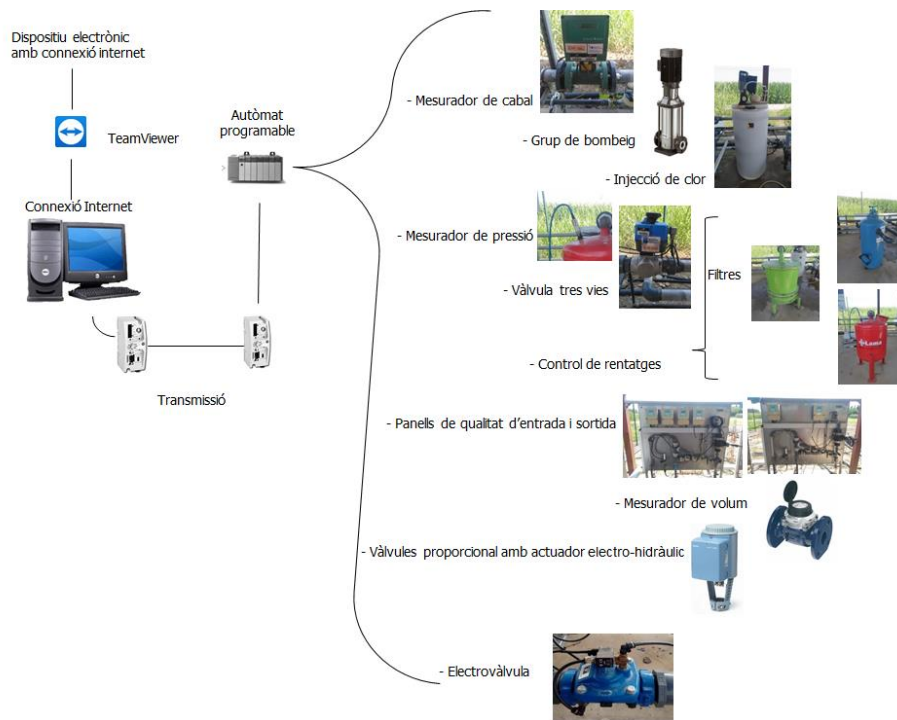


Figura 25. Esquema de comunicacions del sistema SCADA.

3.4.1 Maquinari

3.4.1.1 Ordinador personal

Es trobava a la finca de l'EDAR, on tenia instal·lat el programa SCADA. L'ordinador era un HP (Palo Alto, California, EE.UU.) Intel Core i3-6100, de 3,70 GHz i 8 GB de RAM, com a sistema operatiu Windows 7 Enterprise (Microsoft, Redmond, WA, EE.UU.).

3.4.1.2 Autòmats programables

Es disposava d'un mòdul de 32 entrades/sortides principal model 1769-IQ32 (Allen-Bradley, Milwaukee, Estats Units) que es connectava amb altres mòduls auxiliars per tal de poder donar connectivitat a tots els elements de la instal·lació, ja sigui amb comunicació analògica o digital. La comunicació s'establí gràcies a una capçalera model Ethernet Dual Port 1734-AENTR (Allen-Bradley, Milwaukee, Estats Units).

3.4.1.3 Components de la instal·lació

Tots els actuadors i mesuradors de la instal·lació que s'han anat explicant en apartats anteriors, i que es poden veure a la Figura 25, van ser escollits per tal de poder-se comunicar amb el sistema SCADA plantejat.

3.4.2 Programari

El programari utilitzat per a construir el sistema SCADA va ser el software de programació Logix designer (Rockwell Automation, Milwaukee, Wisconsin, EE.UU.), i el software de l'SCADA, RSVIEW32 Works 100K (Rockwell Automation, Milwaukee, Wisconsin, EE.UU.).

3.4.3 Funcionament del sistema SCADA

Des de l'ordinador personal es podia accedir a les diferents pantalles (Figura 26) construïdes per tal d'accedir a les consignes d'actuació o a les lectures en temps real dels mesuradors. Per tant des de l'SCADA, es podien programar els regs, modificar les condicions per provocar els rentatges a contracorrent dels filtres i poder visualitzar totes les dades en temps real.

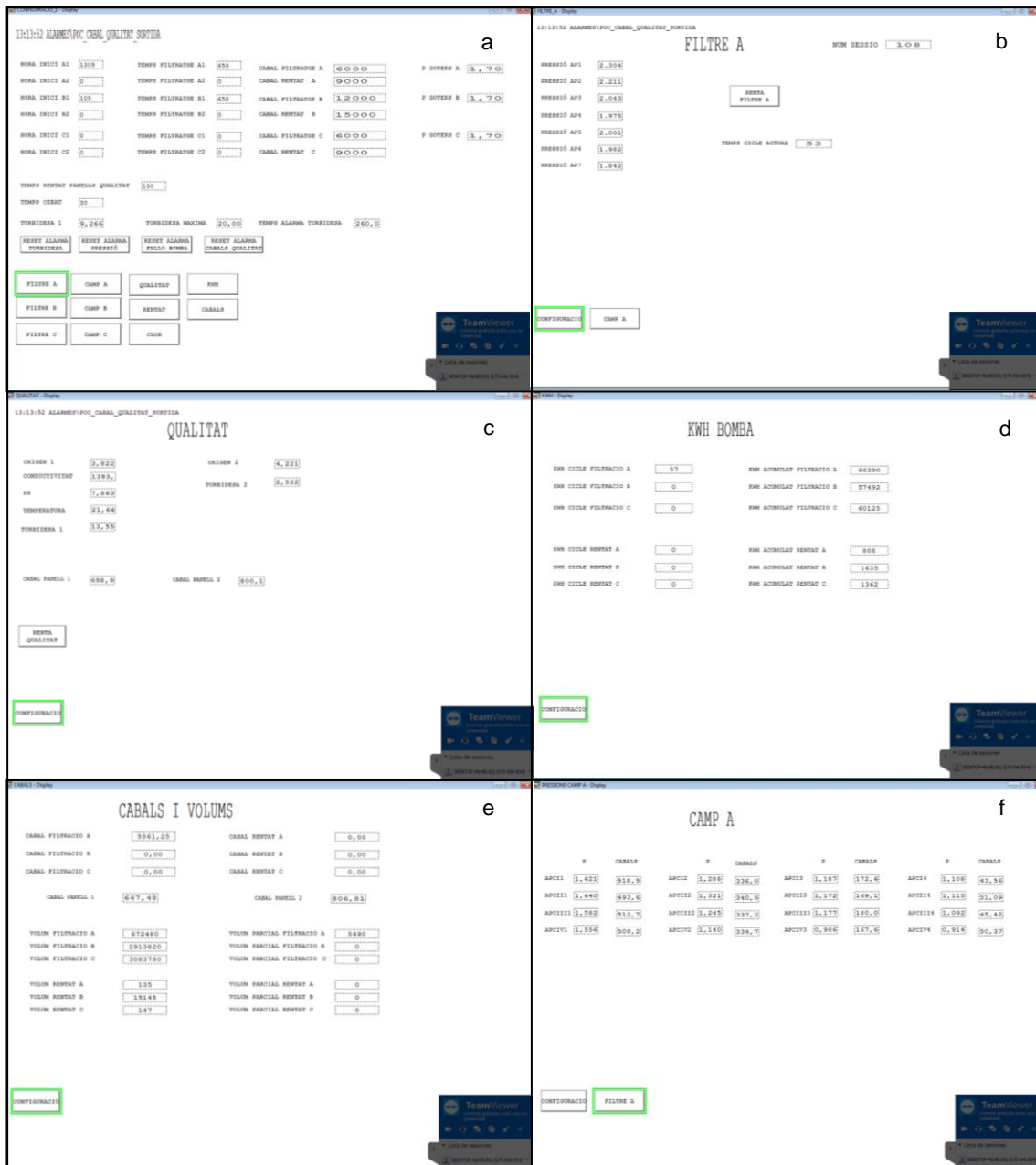


Figura 26. Pantalles del sistema SCADA. a) programació horària dels regs, b) vista en temps reals de les pressions de funcionament del filtre, c) vista en temps real dels valors de la qualitat de l'aigua d'entrada i sortida del filtre, d) vista en temps real dels consums energètics dels filtres, e) vista en temps reals dels cabals de funcionament i volums acumulats, f) vista en temps real de les dades recollides a la parcel·la de reg.

Les consigna que es van programar en el sistema SCADA van ser:

- Hora inici i durada de reg: consigna per a cada filtre on es podia programar l'hora d'inici i la durada del reg.
- Cabal de funcionament a filtració i a rentatge a contracorrent: consigna per a cada filtre on es podia establir els diferents cabals de funcionament.
- Diferència de pressió que provoca el rentatge a contracorrent: consigna per a cada filtre on indicàvem la diferència de pressió al qual s'iniciava el rentatge a contracorrent.
- Durada del rentatge a contracorrent: consigna per a cada filtre on es programava la durada del procés de rentatge a contracorrent.
- Percentatge de clor injectat en situació de filtració i de rentatge a contracorrent: consigna per a cada filtre on es programava la injecció de clor.
- Inici i durada del rentatge automàtic dels sensors: consigna on s'establí que 5 minuts abans d'iniciar el reg es rentaven els sensors.
- Valor màxim de terbolesa entrada permesa i durada: consigna on es programava que si la terbolesa superava un límit màxim durant un temps, la instal·lació es parava.
- Temps per al buidatge automàtic a sortida lliure: consigna on es programava que durant els primers segons, l'aigua no anava a camp i anava a sortida lliure.
- Rentatge forçat del panell d'aigua d'entrada: consigna per a realitzar un rentatge dels sensors de l'aigua d'entrada.
- Rentatge forçat del panell d'aigua de sortida: consigna per a realitzar un rentatge dels sensors de l'aigua de sortida.
- Pressió d'entrada a camp: consigna per regular el cabal d'entrada a camp.

3.4.4 Accés remot a la instal·lació

La instal·lació podia ser controlada a distància a partir del programa informàtic TeamViewer (GFI Software, San Gwann, Malta). El que permetia fer aquest programa era des d'un dispositiu electrònic amb accés a internet, connectar-se amb l'ordinador que es trobava a la parcel·la d'assaig a partir de l'identificador de l'ordinador i una contrasenya. Ambdós dispositius connectats havien de disposar el programari.

3.4.5 Registre de dades

Tal com s'ha comentat, el sistema SCADA enregistrava en arxius consultables amb Excel (Figura 27) totes les dades mesurades considerades d'interès cada minut de funcionament de la instal·lació. Desava la mesura instantània en el moment d'enregistrament.

	Date	Time	AP1	Sts_00	AP2	AP3	AP4	AP5	AP6	AP7	API-AP6	conductivity_s0	oxygen_s1	pH	s2temperature	s3	turbidity	s4
4503	24/03/2018	07:17:36	2,10		2,12	2,08	2,01	1,93	1,97	1,88	0,13	4158,69	1,32	7,09	12,91		13,62	
4504	24/03/2018	07:18:36	2,03		2,04	2,00	1,98	1,88	1,91	1,80	0,12	4136,83	1,30	7,09	12,91		13,77	
4505	24/03/2018	07:19:36	2,08		2,10	2,06	1,99	1,91	1,94	1,85	0,14	4133,06	1,28	7,09	12,92		13,75	
4506	24/03/2018	07:20:36	2,08		2,08	2,04	1,97	1,90	1,92	1,83	0,16	4114,97	1,27	7,09	12,81		13,77	
4507	24/03/2018	07:21:36	2,01		2,05	2,01	1,93	1,85	1,88	1,79	0,13	4126,28	1,26	7,09	12,71		15,23	
4508	24/03/2018	07:22:36	2,02		2,06	2,02	1,93	1,85	1,87	1,79	0,15	4098,39	1,24	7,09	12,71		15,47	
4509	24/03/2018	07:23:37	2,07		2,06	2,03	1,94	1,86	1,87	1,78	0,20	4091,61	1,22	7,09	12,71		15,27	
4510	24/03/2018	07:24:37	2,08		2,08	2,05	1,96	1,87	1,89	1,81	0,19	4096,13	1,20	7,09	12,61		15,19	
4511	24/03/2018	07:25:37	2,07		2,09	2,05	1,95	1,86	1,89	1,80	0,18	4052,41	1,19	7,09	12,61		14,84	
4512	24/03/2018	07:26:37	2,08		2,10	2,06	1,96	1,87	1,90	1,82	0,18	4046,38	1,17	7,09	12,51		14,48	
4513	24/03/2018	07:27:37	2,11		2,12	2,08	1,98	1,89	1,92	1,84	0,19	4068,24	1,15	7,09	12,41		14,01	
4514	24/03/2018	07:28:37	2,11		2,12	2,10	1,98	1,88	1,90	1,82	0,21	4077,28	1,14	7,09	12,31		14,86	
4515	24/03/2018	07:29:37	2,10		2,11	2,08	1,96	1,87	1,89	1,81	0,21	4031,31	1,13	7,09	12,21		14,00	
4516	24/03/2018	07:30:37	2,13		2,14	2,10	1,98	1,89	1,91	1,83	0,22	4055,43	1,12	7,09	12,11		13,38	
4517	24/03/2018	07:31:37	2,10		2,10	2,08	1,94	1,86	1,88	1,78	0,22	4047,14	1,12	7,09	12,11		13,29	
4518	24/03/2018	07:32:37	2,11		2,11	2,08	1,94	1,83	1,86	1,77	0,25	4038,09	1,11	7,09	12,01		12,95	
4519	24/03/2018	07:33:37	2,09		2,11	2,07	1,93	1,82	1,84	1,76	0,25	3984,57	1,11	7,09	12,01		12,56	
4520	24/03/2018	07:34:37	2,06		2,08	2,05	1,90	1,79	1,81	1,72	0,25	4035,83	1,11	7,09	12,01		12,44	
4521	24/03/2018	07:35:37	2,11		2,12	2,09	1,94	1,84	1,87	1,77	0,24	4070,50	1,11	7,09	12,01		12,76	
4522	24/03/2018	07:36:37	2,19		2,19	2,16	2,01	1,91	1,93	1,85	0,26	4051,66	1,11	7,09	12,01		12,43	
4523	24/03/2018	07:37:37	2,12		2,13	2,09	1,92	1,82	1,83	1,74	0,29	4061,46	1,11	7,09	12,01		12,24	
4524	24/03/2018	07:38:37	2,15		2,16	2,12	1,95	1,83	1,86	1,77	0,29	4039,60	1,11	7,10	11,91		12,30	
4525	24/03/2018	07:39:37	2,17		2,18	2,15	1,97	1,86	1,88	1,79	0,29	4053,17	1,11	7,09	11,91		11,62	
4526	24/03/2018	07:40:38	2,12		2,12	2,09	1,88	1,77	1,80	1,72	0,32	4032,06	1,10	7,09	11,91		11,76	
4527	24/03/2018	07:41:38	2,21		2,23	2,19	2,01	1,92	1,93	1,85	0,28	4059,95	1,11	7,10	11,80		11,70	
4528	24/03/2018	07:42:38	2,16		2,17	2,14	1,95	1,84	1,86	1,76	0,30	4078,04	1,12	7,09	11,80		11,36	
4529	24/03/2018	07:43:38	2,26		2,25	2,22	2,03	1,94	1,96	1,87	0,30	4077,28	1,13	7,09	11,80		11,38	
4530	24/03/2018	07:44:38	2,19		2,21	2,16	1,97	1,87	1,90	1,79	0,29	4022,26	1,13	7,10	11,81		10,99	
4531	24/03/2018	07:45:38	2,19		2,22	2,19	2,00	1,88	1,90	1,80	0,29	4021,51	1,14	7,10	11,81		11,07	
4532	24/03/2018	07:46:38	2,20		2,19	2,16	1,96	1,84	1,87	1,78	0,33	4064,47	1,14	7,10	11,81		11,23	
4533	24/03/2018	07:47:38	2,23		2,23	2,20	2,00	1,91	1,92	1,84	0,31	4051,66	1,14	7,10	11,71		11,03	
4534	24/03/2018	07:48:38	2,21		2,22	2,17	1,97	1,87	1,89	1,80	0,32	4047,89	1,14	7,10	11,71		10,99	
4535	24/03/2018	07:49:38	2,21		2,22	2,18	1,98	1,89	1,90	1,82	0,31	4013,97	1,14	7,10	11,71		11,01	

Figura 27. Registre de les dades del sistema SCADA en Excel.

Les dades que s'enregistraven eren les següents:

- Dia i hora de reg.
- Valors de pressió als diferents transductors de pressió de cada filtre.
- Valor de la diferència de pressió que ens marca la pèrdua de càrrega del filtre.
- Paràmetres de qualitat de l'aigua de l'entrada al filtre: conductivitat elèctrica, pH, temperatura, oxigen dissolt i terbolesa.
- Paràmetres de qualitat de l'aigua de sortida: oxigen dissolt en l'aigua i terbolesa.
- Clor injectat.
- Consum energètic parcial durant el procés de filtració per a cada filtre.
- Consum energètic total durant el procés de filtració per a cada filtre.

- Consum energètic parcial durant el procés de rentatge a contracorrent per a cada filtre.
- Consum energètic total durant el procés de rentatge a contracorrent per a cada filtre.
- Cabal del procés de filtració per a cada filtre.
- Cabal del procés de rentatge a contracorrent per a cada filtre.
- Cabal al panell de qualitat d'entrada.
- Cabal al panell de qualitat a sortida.
- Volum total del procés de filtració per a cada filtre.
- Volum parcial del procés de filtració per a cada filtre.

3.5 CARACTERITZACIÓ DE LA SORRA DELS FILTRES

La caracterització de la sorra del filtre es va fer abans de començar els assajos. La sorra utilitzada era sorra CA-07MS (Sibelco Minerales, S.A, Bilbao, Espanya).

Durant la col·locació de la sorra en els diferents filtres es va realitzar la presa de mostra. Es va agafar mostra d'uns 200 grams de medi filtrant en el procés de col·locació de la sorra en cada filtre, per tal de tenir una mostra composta, homogènia i representativa d'abans de ser utilitzada en la filtració. La sorra caracteritzada correspon a l'assaig realitzat en aquest treball final de grau, que consisteix en un llit de 20 cm d'altura i una velocitat de filtració de 30 m/h durant 250 hores de funcionament acumulat per cada filtre.

La caracterització es va realitzar el dia 23 d'octubre de l'any 2017 i va consistir en la determinació de la corba granulomètrica, la densitat aparent, la densitat real i la porositat i es van seguir els procediments descrits a continuació.

3.5.1 Granulometria de la sorra

Es van agafar 100 g de mostra amb una bàscula model GX-4000-EC (A&D Instruments Ltd., Tokyo, Japó), i es va col·locar a una tamisadora model IRIS (Filtro Vibración, Barcelona, Catalunya) (Figura 28), en la que es van disposar uns tamisos amb llums de 0,150, 0,177, 0,200, 0,250, 0,400, 0,630, 0,750, 0,810, 1,000 i 1,200 mm. Un cop col·locats els tamisos en ordre decreixent d'obertura, es van tamisar durant 7 minuts amb una potència de 9 de l'aparell amb una freqüència de vibració de 2 segons. Un cop finalitzat el procés, es va pesar cada tamís amb la mostra retinguda, restant la tara del tamís per tal d'obtenir la massa de la mostra retinguda. Es van realitzar quatre repeticions.



Figura 28. Imatge de la tamisadora amb la columna de tamisos.

A partir de la massa retinguda en cada tamís es va poder calcular el percentatge retingut a cada tamís, i així poder determinar la corba granulomètrica (Figura 29) on s'expressa el percentatge acumulat de sorra alliberada per cada obertura de tamís.

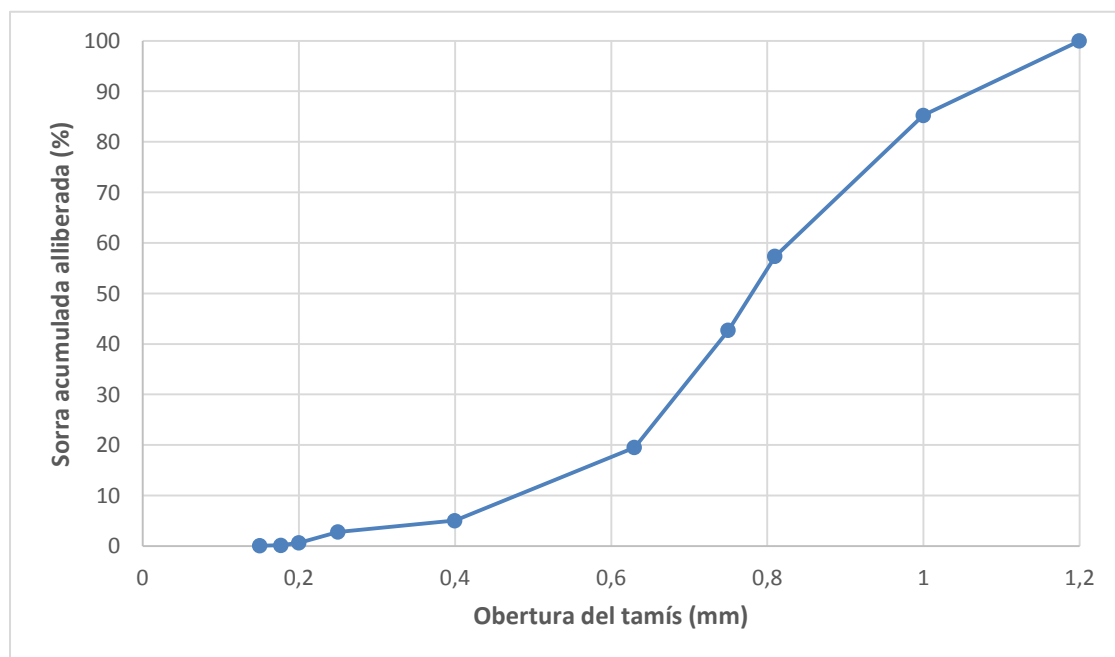


Figura 29. Corba granulomètrica de la sorra silícia utilitzada a l'assaig.

A partir de la corba granulomètrica es va calcular el diàmetre efectiu (D_e), que fa referència a l'orifici de tamís que allibera el 10% de la mostra i el coeficient d'uniformitat (CU), que és la relació entre les obertures de tamisos que alliberen un 60 i un 10% de la sorra. Per obtenir els valors de 10 i 60% es va fer una interpolació tot utilitzant l'Equació 1, s'obtenen els valors de 0,48 mm (10%) i 0,83 mm (60%). Així doncs es va obtenir un diàmetre efectiu de 0,48 mm i un coeficient d'uniformitat d'1,73 (0,83 mm/0,48 mm).

$$y = y_b + (x - x_a) \frac{(y_b - y_a)}{(x_b - x_a)} \quad \text{Equació 1}$$

On: x_a i y_a : punt A de la gràfica.

x_b i y_b : punt B de la gràfica.

x i y : punt a interpolar

3.5.2 Determinació de la densitat aparent del medi filtrant

Per determinar la densitat aparent amb l'Equació 2, es va introduir 50 ml de medi filtrant en una proveta i es va determinar el pes amb una bàscula de 0,02 g de precisió model GX-4000-EC (A&D Instruments Ltd., Tokyo, Japó). Es va efectuar tres repeticions.

$$\rho_a = \frac{m}{V_a} \quad \text{Equació 2}$$

On ρ_a : densitat aparent del medi filtrant (g/ml);

m : massa del medi filtrant utilitzat a l'assaig (g);

V_a : volum aparent del medi filtrant (ml).

Els valors que es van obtenir a data de 23 d'octubre del 2017, abans de l'assaig, es poden veure a la Taula 8.

Taula 8. Determinació de densitat aparent de la sorra utilitzada per als assajos. Valors mitjans i desviació estàndard.

	Massa sorra (g)	V aparent sorra (ml)	ρ_a (g/ml)
M 1	74,00	50	1,480
M 2	71,38	50	1,428
M 3	71,60	50	1,432
Mitjana	72,33 ($\pm 1,45$)	50	1,447 ($\pm 0,029$)

3.5.3 Determinació de la densitat real del medi filtrant

Per determinar la densitat real a partir de l'Equació 3, es necessitava una dada més, el volum aparent, que es va buscar afegint 50 ml d'aigua a la mateixa proveta (Figura 30). D'aquesta manera es va poder determinar l'espai buit del medi filtrant amb la diferència de 100 ml i la suma de volums reals de la sorra i l'aigua. Es va efectuar tres repeticions.

$$\rho_r = \frac{m}{V_r}$$

Equació 3

On

ρ_r : densitat real del medi filtrant (kg/m^3);

m : massa del medi filtrant utilitzat a l'assaig (kg);

V_r : volum real del medi filtrant (m^3).



Figura 30. Determinació del volum aparent.

Els valors que es van obtenir a data de 23 d'octubre del 2017, abans de l'assaig, es poden veure a la Taula 9.

Taula 9. Determinació de densitat real de la sorra utilitzada per als assajos. Valors mitjans i desviació estàndard.

	Massa sorra (g)	V_r sorra aigua (ml)	V_r sorra (ml)	ρ_r (kg/m³)
M 1	74,00	80	30,00	2,467
M 2	71,38	78	28,00	2,549
M 3	71,60	81	31,00	2,310
Mitjana	72,33 (±1,45)	-	29,67(±1,53)	2,438(±0,121)

3.5.4 Determinació de la porositat del medi filtrant

La porositat d'un medi filtrant és la quantitat d'espai lliure, susceptible de ser ocupat pel fluid a filtrar. El seu càlcul pot obtenir-se aplicant l'Equació 4.

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_r}{V_a} \quad \text{Equació 4}$$

On: ε : porositat (adimensional, tant per u);

V_r : volum real del medi filtrant (ml);

V_a : volum aparent del medi filtrant (ml).

Els valors que es van obtenir a data de 23 d'octubre del 2017, abans de l'assaig, es poden veure a la Taula 10.

Taula 10. Determinació de la porositat de la sorra utilitzada per als assajos. Valors mitjans i desviació estàndard.

	Porositat
M 1	0,40
M 2	0,44
M 3	0,38
Mitjana	0,41 (±0,03)

3.5.5 Determinació del diàmetre equivalent de partícula del medi granular

El diàmetre equivalent fa referència al diàmetre d'una esfera de volum igual al volum mitja dels grans. Per tal de calcular-lo es va realitzar recompte de 1000 grans de medi granular, i es van pesar en una balança de precisió HM-200 (A&D Instruments Ltd., Tokyo, Japó). Per trobar-lo s'aplica l'Equació 5:

$$D_{eq} = \left(\frac{6 \cdot m_g}{N \cdot \rho_r \cdot \pi} \right)^{1/3} \quad \text{Equació 5}$$

On D_{eq} : diàmetre equivalent de les partícules del medi granular (m);

m_g : pes del conjunt de grans recomptats (kg);

N : nombre de grans recomptats;

ρ_r : densitat real del medi granular (kg/m³).

Aquesta determinació es va realitzar a partir de tres repeticions per tal d'obtenir el diàmetre equivalent del medi filtrant (Taula 11).

Taula 11. Determinació de la porositat de la sorra utilitzada per als assajos. Valors mitjans i desviació estàndard.

	Pes 1000 grans (mg)	ρ_r (kg/m³)	D_{eq} efectiu (mm)
M 1	1394	2438	1,03
M 2	1372	2438	1,02
M 3	1635	2438	1,09
Mitjana	1467(±145,90)	2438	1,05(±0,04)

3.6 MANEIG DEL BANC DE FILTRACIÓ

Per a la realització dels assajos, la durada de reg de cada filtre es programava de forma que cada filtre assolís les 250 hores de funcionament intentant realitzar els programes de reg els més homogenis possible (6 sessions de 4 hores al dia) per tal de tenir qualitats d'aigua d'entrada similars en els tres filtres. A la pràctica tot es veia modificat per solucionar imprevistos i problemes de maneig.

El rentatge a contracorrent dels filtres es determinava amb la pèrdua de càrrega, establint una consigna de 0,5 bar. Amb aquesta pèrdua de càrrega es considerava que el filtre estava brut i es procedia a rentar-lo.

El temps de rentatge a contracorrent es va establir en 3 minuts, ja que en les proves es va veure que amb aquest temps, els valors de pèrdua de càrrega tornaven a ser acceptables. El cabal que es va utilitzar va ser d'un 50% més que el cabal de consigna de filtració. Així doncs si en filtració s'utilitzava un cabal de 6.000 l/h, en rentatge a contracorrent, el cabal va ser de 9.000 l/h.

Per tal de protegir la instal·lació, quan el valor de terbolesa de l'aigua d'entrada al filtre era superior a 20 FTU durant un temps determinat, entre 60 i 120 segons, la instal·lació s'aturava. El temps es podia variar.

3.7 TRACTAMENT DE DADES

3.7.1 Selecció dels cicles i dades bones

S'entén com a cicle de filtració el temps transcorregut des que el filtre comença a treballar en règim de filtració, després d'haver finalitzat un rentatge a contracorrent, fins que comença el següent rentatge a contracorrent. Durant aquest període, per motius de manegi de la instal·lació, pot ser que el procés de filtració es vegi interromput degut a que es programaven sessions de reg de 6 hores, aquest fet no indicava la finalització del cicle, sinó una pausa fins a la següent inic de sessió de reg.

Previ al tractament i anàlisi de les dades, es varen seleccionar els cicles interessants per a ser tractats i les dades que havien de contenir. El sistema SCADA va enregistrar tot el funcionament de la instal·lació, però no tot aquest temps corresponia a treball en fase d'assaig. Durant l'assaig i per qüestions no controlades hi podien haver errors de funcionament, tals com la pèrdua del correcte calibratge en sensors, funcionament anòmal per obturacions, poc o massa cabal d'entrada entre d'altres. A més també es podien realitzar comprovacions in situ i forçar els rentatges a contracorrent. Per tal d'establir un criteri objectiu de selecció dels cicles i dades es van definir acuradament uns requisits que havia de complir el cicle.

El filtre prototip va ser el primer en posar-se en marxa, i les primeres hores de funcionament corresponien a un període d'ajustatge de paràmetres (consignes), i per tal de tenir una uniformitat en les consignes dels diferents cicles alhora del tractament i anàlisi estadístic, es van descartar les dades.

Perquè un cicle fos considerat com a bo havia de complir els següents criteris:

1. La pèrdua de càrrega entre el transductor 1 i el transductor 6 havia d'assolir els 0.5 bar.

2. Que el cicle de filtració no estigui comprès en les dates en què s'estaven mesurant les uniformitats dels emissors de la parcel·la de degoteig. Durant la mesura de la uniformitat de reg, es va pujar la consigna per tal d'activar el rentatge per contracorrent i es forçaven alguns d'ells per tal que aquests no interferissin en les mesures de la uniformitat de reg.
3. Durant el cicle no hi havia d'haver cap error de funcionament o rentatge forçat.
4. Que el cicle duri més de 30 minuts, ja que es considera que un cicle de filtració inferior a 30 minuts és perquè no ha funcionat bé o bé s'ha realitzat un rentatge a contracorrent que no s'ha detectat.

Dels cicles seleccionats, es van suprimir algunes dades per tal d'evitar que aquestes entressin a l'anàlisi posterior. Les dades que es van suprimir i el motiu que justifica la seva eliminació s'expliquen a continuació:

1. Durant els tres primers minuts un cop s'iniciava el procés de filtratge, sigui després d'una parada o bé després d'un rentatge a contracorrent no es tenien en compte els valors de pressió de tots els transductors i de la qualitat tant d'entrada com de sortida, ja que es va observar que durant el procés d'arrencada no s'assolia un règim de funcionament estabilitzat fins al quart minut.
2. Es van eliminar les dades de terbolesa i d'altres sensors quan s'havia detectat que havia perdut el calibratge
3. Es van eliminar dades de terbolesa de l'aigua d'entrada i de sortida del filtre que eren superiors a 20 FTU, perquè es considerava que no eren condicions de treball normals de l'EDAR. Cal recordar que la instal·lació s'aturava després de registrar durant 2 minuts terboleses superiors a 20 FTU. Amb aquesta acció s'eliminaven els registres puntuals superiors a 20 FTU.

3.8 CARACTERITZACIÓ DE L'AIGUA D'ENTRADA ALS FILTRES

Per a la caracterització de l'aigua d'entrada es van utilitzar les mitjanes de cada cicle i de cada paràmetre, diferenciant per filtres. Amb aquestes dades, es va realitzar un estudi estadístic, tot realitzant un diagrama de caixa i una anàlisi de la variància (ANOVA) de les mitjanes.

En el diagrama de caixa (Figura 31) es pot observar la distribució dels valors. S'hi representen el primer quartil (compren el 25% de dades), tercer quartil (compren el 75% de dades), la mediana (compren el 50% de dades) i els valors atípics.

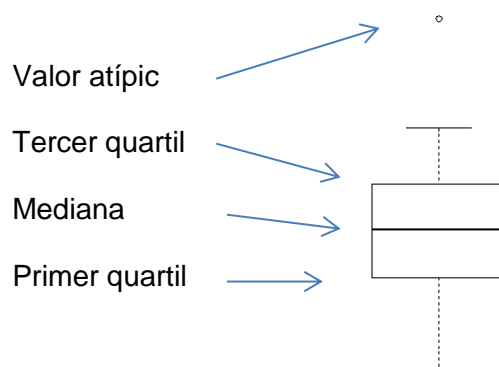


Figura 31. Dades que es poden observar en un diagrama de caixa.

L'ANOVA de les mitjanes que es va realitzar donava informació de si les diferències que hi havia entre els filtres eren estadísticament significatives o no. Es va utilitzar una probabilitat del 0,05. De l'ANOVA es podien concloure dues situacions:

1. Probabilitat superior a 0,05 ($>0,05$): no hi ha diferències estadísticament significatives entre cap filtre.
2. Probabilitat inferior a 0,05 ($<0,05$): hi ha diferències estadísticament significatives entre algun filtre.

3.9 CARACTERITZACIÓ DE L'EFECTE DEL FILTRE EN L'AIGUA

Com ja s'ha explicat, a l'aigua de sortida també es va determinar la qualitat referida en termes d'oxigen dissolt i terbolesa. Així doncs, es va poder calcular el percentatge de reducció d'oxigen i de terbolesa de cada cicle.

3.9.1 Reducció d'oxigen dissolt de l'aigua d'entrada

Per cada filtre assajat i cicle de filtració, es va determinar la reducció en la quantitat d'oxigen dissolt en l'aigua de sortida respecte a la de l'entrada. Es va calcular seguint l'Equació 6, utilitzant les dades de cada minut, enregistrades per l'Scada.

$$R_o = \left(\frac{O_i - O_f}{O_i} \right) \times 100 \quad \text{Equació 6}$$

On: R_o : reducció de l'oxigen dissolt en l'aigua (%);
 O_i : oxigen dissolt en l'aigua abans de la filtració (mg/l);
 O_f : oxigen dissolt en l'aigua després de la filtració (mg/l).

3.9.2 Reducció de terbolesa de l'aigua d'entrada

La reducció de terbolesa de l'aigua de sortida del filtre respecte a la terbolesa de l'aigua d'entrada, per cada cicle de filtració i filtre assajat, es va calcular seguint l'Equació 7, utilitzant les dades de cada minut, registrades per l'SCADA.

$$R_t = \left(\frac{T_i - T_f}{T_i} \right) \times 100 \quad \text{Equació 7}$$

On: R_t : reducció de terbolesa de l'aigua (%);
 T_i : terbolesa de l'aigua abans de la filtració (FTU);
 T_f : terbolesa de l'aigua després de la filtració (FTU).

3.10 DESCRIPCIÓ DELS CICLES DE FILTRACIÓ

A més a més de monitorar l'efecte del filtre en els paràmetres de qualitat de l'aigua, també es van estudiar paràmetres que defineixen el comportament hidràulic del filtre. Aquests paràmetres són el volum d'aigua i el consum energètic, tant en la fase de filtració com en la fase de rentatge. També s'ha descrit la pèrdua de càrrega en fase de filtració, de cada un dels filtres.

En aquest apartat no es van poder utilitzar tots els cicles seleccionats com a bons, ja que el programa SCADA no va registrar les dades de volum filtrat per a tots els cicles. En el filtre prototip es va començar a registrar dades a partir del cicle 16, en el FC1 del 39, i en FC2 del 24, així doncs els filtres posteriors a aquests no es van poder utilitzar per a l'anàlisi de volum.

3.10.1 Volum filtrat per cada cicle de filtració

El sistema SCADA enregistrava el volum filtrat acumulat per a cada filtre. Per trobar el volum filtrat per a cada cicle de filtració, es va seguir l'Equació 8.

$$V_f = V_{max} - V_{min} \quad \text{Equació 8}$$

- On:
- V_f : volum filtrat (m^3);
 - V_{max} : volum filtrat acumulat màxim del cicle (m^3);
 - V_{min} : volum filtrat acumulat mínim del cicle (m^3).

3.10.2 Volum d'aigua utilitzada per cada rentatge a contracorrent

Per obtenir el volum d'aigua de rentatge a contracorrent s'utilitzava el cabal de rentatge de cada cicle seguint l'Equació 9.

$$V_r = \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} * \sum Q_r \quad \text{Equació 9}$$

- On:
- V_r : volum de rentatge a contracorrent (m^3);
 - Q_r : cabal de rentatge a contracorrent de cada minut mentre es realitza el rentatge (l/h).

3.10.3 Percentatge d'aigua pel rentatge a contracorrent

Per a buscar la relació que hi ha entre l'aigua utilitzada en aigua rentatge a contracorrent respecte l'aigua disponible, es va seguir l'Equació 10.

$$C_r = \frac{V_r}{V_r + V_f} * 100 \quad \text{Equació 10}$$

- On: C_r : aigua utilitzada pel rentatge a contracorrent (%).

3.10.4 Relació entre l'augment de la pèrdua de càrrega del filtre i el volum filtrat

Per a buscar aquest paràmetre, es va anotar en quina diferència de pressió (bar) entre el transductor 1 i el transductor 6 s'iniciava el cicle de filtració, i en quina s'acabava el cicle de filtració i començava el rentat. Un cop obtingut aquests dos valors es restaven i es dividien pel volum filtrat (m^3) del mateix cicle, tal com mostra l'Equació 11.

$$Rdp-vf = \left(\frac{DP_f - DP_i}{V_f} \right) \quad \text{Equació 11}$$

- On:
- $Rdp-vf$: relació entre la pèrdua de càrrega i el volum filtrat (bar/m^3);
 - DP_i : diferència de pressió a l'inici del cicle de filtració (bar);
 - DP_f : diferència de pressió al final del cicle de filtració final (bar).

3.10.5 Consum energètic per cada cicle de filtració

El sistema SCADA enregistrava el consum energètic acumulat de la bomba i el variador en la fase de filtració per a cada filtre. Per trobar el consum energètic per a cada cicle de filtració, es va seguir l'Equació 12.

$$CE_f = CEmax - CEmin \quad \text{Equació 12}$$

On:

- CE_f : consum energètic d'un cicle de filtració (kWh);
- $CEmax$: màxim consum energètic acumulat del cicle (kWh);
- $CEmin$: mínim consum energètic acumulat del cicle (kWh).

3.10.6 Consum energètic en el rentatge a contracorrent

El sistema SCADA enregistrava el consum energètic acumulat de la bomba i el variador en la fase de rentatge a contracorrent per a cada filtre, per trobar el consum energètic per a cada cicle de rentatge a contracorrent, es va seguir l'Equació 13.

$$CE_r = CERf - CERi \quad \text{Equació 13}$$

On:

- CE_r : consum energètic d'un cicle de rentatge a contracorrent (kWh);
- $CERf$: consum energètic acumulat final del rentatge a contracorrent del cicle (kWh);
- $CERi$: consum energètic acumulat inicial del rentatge a contracorrent del cicle (kWh).

3.10.7 Percentatge d'energia pel rentatge a contracorrent

Amb les dades de consums energètic es va calcular la relació entre el consum energètic de rentatge i filtració, seguint l'Equació 14.

$$R_{ce} = \frac{CE_R}{CE_r + CE_f} * 100 \quad \text{Equació 14}$$

On:

- R_{ce} : energia utilitzada pel rentatge a contracorrent (%).

3.10.8 Relació entre volum filtrat i el consum energètic en fase de filtració

Per tal d'obtenir el volum filtrat per cada kWh d'energia consumida pel grup de bombament i variador i per cada filtre assajat, es utilitzar l'Equació 15.

$$R_{vc} = \frac{V_f}{CE_f}$$

Equació 15

On: R_{vc} : relació entre volum filtrat i consum energètic en filtració (m^3/kWh).

3.11 DISTRIBUCIÓ DE LA PÈRDUA DE CÀRREGA EN EL FILTRE

Els cicles que es van utilitzar per a fer la distribució de la pèrdua de càrrega al llarg del filtre, van ser aquells cicles seleccionats com a bons anteriorment amb una diferència de pressió inicial entre el transductor 6 i el transductor 1 igual o inferior a 0,15 bar. Es va escollir un llinar per tal de tenir cicles amb un inici de filtració amb pressions similars.

Un cop seleccionats els cicles, es va fer la mitjana de 5 minuts de les mesures dels transductors de pressió en diferents moments del cicle: al moment inicial, a 1/3 i 2/3 de la durada i al final del cicle (abans del rentatge a contracorrent). Aquest procés es va dur a terme pels tres filtres, utilitzant els valors instantanis de cada minut dels transductors de pressió de l'1 al 6.

Aquestes dades es van representar en gràfics per tal d'observar l'evolució de la pèrdua de càrrega en el filtre al llarg de la durada del cicle. A més també es van poder calcular el percentatge de pèrdua de càrrega en cada tram respecte a la pèrdua de càrrega total del filtre tot seguint l'Equació 16.

$$DP_{xy} = \left(\frac{T_y - T_x}{DP_{16}} \right) * 100$$

Equació 16

On: DP_{xy} : pèrdua de càrrega entre els transductors x i y (%);

T_x : pressió registrada en el transductor x (bar);

T_y : pressió registrada en el transductor y (bar);

DP_{16} : diferència de pressió entre el transductor 1 i 6 (bar).

Els trams que es van calcular van ser els següents:

- Tram 1-2: en aquest tram es va poder determinar la pèrdua de pressió entre el transductor 1 i 2. Indica la pèrdua de càrrega que hi ha a l'entrada del filtre amb el deflector.
- Tram 2-3: en aquest tram es va poder determinar la pèrdua de càrrega entre el transductor 2 i 3. Indica la pèrdua de pressió que hi ha al primer tram del filtre.

En el present assaig, a l'haver establert una altura de 20 cm, el transductor 3 encara està per sobre del llit filtrant.

- Tram 3-4: en aquest tram es va poder determinar la pèrdua de càrrega entre el transductor 3 i 4. Indica la pèrdua de pressió que hi ha en el llit filtrant.
- Tram 4-5: en aquest tram es va poder determinar la pèrdua de càrrega entre el transductor 4 i 5. Indica la pèrdua de pressió que hi ha a la crepina.
- Tram 5-6: en aquest tram es va poder determinar la pèrdua de càrrega entre el transductor 5 i 6. Ens indica la pèrdua de pressió que hi ha entre la cavitat que fa de col·lector al filtre i la sortida del filtre.

En el cas del FC2, al no tenir el transductor 5, els trams 4-5 i 5-6, s'uneixen formant el tram 4-6, que indica la pèrdua de càrrega de la crepina i la sortida del filtre.

3.12 EVOLUCIÓ DE LA PÈRDUA DE CÀRREGA EN FUNCIÓ DEL VOLUM D'AIGUA FILTRADA

Per descriure l'evolució de la pèrdua de càrrega en funció del volum d'aigua filtrada, es van utilitzar els cicles escollits en l'apartat anterior amb registre de dades de volum filtrat. En el cas del FC2 i prototip es van poder utilitzar tots els cicles que complien les condicions establertes, però amb el FC1, al tenir un nombre molt elevat de cicles que complien les condicions, se'n van eliminar alguns per tal de poder fer la gràfica entenedora.

Un cop seleccionats els cicles, es va aplicar l'Equació 17 al llarg de tots els minuts dels cicles.

$$R_{do-vm} = \left(\frac{T_{m1} - T_{m6}}{V_m} \right) \quad \text{Equació 17}$$

On: R_{do-vm} : relació entre la pèrdua de càrrega i el volum acumulat (bar/l);

T_{m1} : pressió del transductor 1 (bar);

T_{m6} : pressió del transductor 6 (bar);

V_m : volum filtrat acumulat (l).

4 RESULTATS I DISCUSSIÓ

4.1 CARACTERITZACIÓ DE L'AIGUA D'ENTRADA ALS FILTRES

De la Taula 12 a la Taula 16 es presenten els resultats de l'ANOVA i de la Figura 32 a la Figura 36 els diagrames de caixa dels paràmetres de qualitat d'aigua d'entrada en els tres filtres assajats.

4.1.1 Conductivitat elèctrica

De la Taula 12 s'extreu que, tot i que estadísticament hi hagi diferències significatives ($p=0,019$), la diferència entre el valor de la conductivitat elèctrica de l'aigua d'entrada al filtre prototip i al FC1 és de $340 \mu\text{S}/\text{cm}$, valor relativament baix si es compara amb les desviacions estàndard del paràmetre de cada filtre. A la Figura 32, s'observa la distribució dels valors mitjans dels cicles, amb una àmplia dispersió, fet que genera les desviacions presentades a la Taula 12.

Taula 12. Mitjana i desviació estàndard de conductivitat elèctrica de l'aigua d'entrada als diferents filtres assajats. Lletres diferents indiquen que existeixen diferències significatives ($P<0,05$).

Filtre	Conductivitat ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Prototip	$2686,17 \pm 547,56$ (a)
FC1	$3042,60 \pm 531,42$ (b)
FC2	$2974,41 \pm 401,48$ (ab)

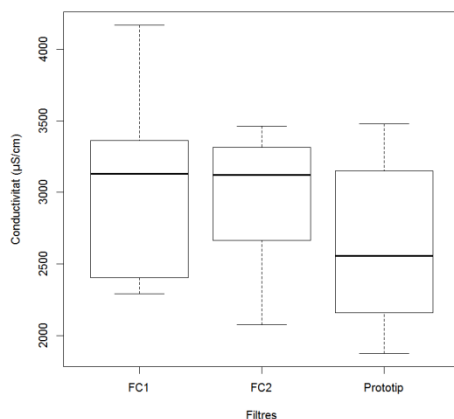


Figura 32. Diagrama de caixa de les dades de conductivitat elèctrica de l'aigua d'entrada als diferents filtres assajats.

4.1.2 Oxigen dissolt

La Taula 13 mostra que no hi ha diferències estadísticament significatives ($p=0,150$) entre filtres pel que fa a l'oxigen dissolt a l'aigua d'entrada. Les mitjanes oscil·len entre 2,5 i 3 mg/l. Segons la Figura 33 el rang de valors de l'oxigen dissolt a l'aigua d'entrada es mou entre 1,5 i 4 mg/l en els tres filtres. Si s'estableix el valor d'oxigen dissolt com a indicador de la qualitat de l'aigua, pel que es refereix a contaminació orgànica, es pot establir en aquest cas, que aquesta contaminació de l'aigua, per als tres filtres ha sigut molt similar.

Taula 13. Mitjana i desviació estàndard de l'oxigen dissolt de l'aigua d'entrada als diferents filtres assajats. Lletres diferents indiquen que existeixen diferències significatives ($P<0,05$).

Filtre	Oxigen dissolt (mg/l)
Prototip	2,59 ± 0,72
FC1	2,95 ± 0,83
FC2	2,77 ± 0,62

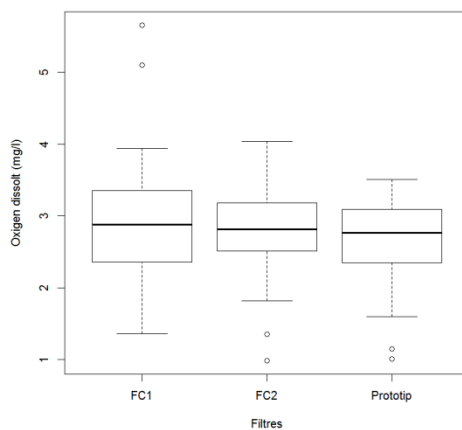


Figura 33. Diagrama de caixa de les dades de l'oxigen dissolt de l'aigua d'entrada als diferents filtres assajats.

4.1.3 pH

De les dades de la Taula 14 s'extreu que no hi ha diferències estadísticament significatives ($p=0,844$) pel que fa a pH, amb valors propers a 7 de mitjana. Els valors del pH de totes les mesures realitzades, i presentats a la Figura 34 estan repartits d'una forma molt similar entre els filtres compresos entre 6,9 i 7,2.

Taula 14. Mitjana i desviació estàndard del pH de l'aigua d'entrada als diferents filtres assajats.

Lletres diferents indiquen que existeixen diferències significatives ($P<0,05$).

Filtre	pH
Prototip	7,04 ± 0,11
FC1	7,06 ± 0,12
FC2	7,05 ± 0,10

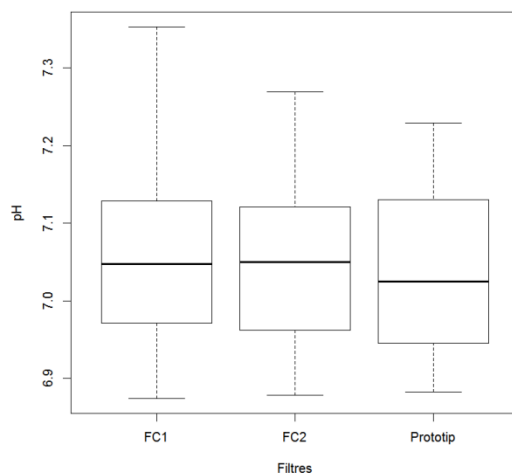


Figura 34. Diagrama de caixa de les dades de pH de l'aigua d'entrada als diferents filtres assajats.

4.1.4 Temperatura

Pel que fa a temperatura, l'ANOVA ha determinat diferències estadísticament significatives ($p=0,011$) del valor registrat en el FC2 respecte els filtres prototip i FC1. El FC2 ha treballat a condicions de temperatura més elevades. La major diferència es presenta entre el FC2 i el prototip, i és d'1,46 °C, és pot considerar que aquest valor es relativament baix tenint en compte les desviacions estàndard obtingudes. A la Figura 35 s'observa com la distribució de la temperatura en el FC2 ha estat en valors lleugerament més elevats. El FC1 ha sigut el que ha registrat temperatures més baixes, properes a 10 °C. Es considera que les diferències presentades entre les temperatures de l'aigua d'entrada al filtre no haurien de tenir un efecte sobre el comportament hidràulic del filtre, ja que 1,46 °C de diferència impliquen pocs canvis en les propietats hidràuliques de l'aigua, com per exemple la viscositat. Tot i no afectar a propietats hidràuliques, aquesta diferència de temperatures sí que podria provocar canvis en les dinàmiques de creixement microbià en els diferents filtres tot i que es consideren canvis menors per la magnitud de la diferència. Aquesta diferència es deu al fet que el filtre prototip va ser el primer en entrar en funcionament (6 març), el FC1 (12 març) en segon lloc i finalment el FC2 (26 març).

Taula 15. Mitjana i desviació estàndard de la temperatura de l'aigua d'entrada als diferents filtres assajats. Lletres diferents indiquen que existeixen diferències significatives ($P < 0,05$).

Filtre	Temperatura (°C)
Prototip	15,28 ± 2,23 (a)
FC1	15,67 ± 2,33 (a)
FC2	16,74 ± 2,07 (b)

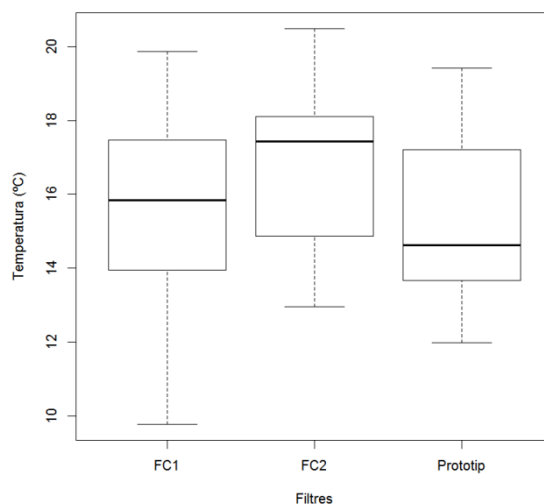


Figura 35. Diagrama de caixa de les dades de temperatura de l'aigua d'entrada als diferents filtres assajats.

4.1.5 Terbolesa

Segons els resultats de l'ANOVA de la Taula 16 no hi ha diferències estadísticament significatives ($p=0,153$) entre els valors d'entrada als tres filtres assajats. La terbolesa de l'aigua d'entrada ha estat al voltant de 8 FTU. En la Figura 36 s'observa que el rang de treball en el FC2 ha sigut més ampli que no en el cas del filtre prototip o FC1, on s'hi troba algun cicle amb dades atípiques. Tenint en compte que la terbolesa és un indicador relacionat directament amb la quantitat de sòlids en suspensió, i aquests estan relacionats amb la quantitat de contaminant, dels resultats s'extreu que els tres filtres varen estar exposats a les mateixes condicions de contaminació pel que fa a sòlids en suspensió.

Taula 16. Mitjana i desviació estàndard de terbolesa de l'aigua d'entrada als diferents filtres assajats. Lletres diferents indiquen que existeixen diferències significatives ($P < 0,05$).

Filtre	Terbolesa (FTU)
Prototip	8,29 ± 1,66
FC1	7,53 ± 2,37
FC2	8,58 ± 3,24

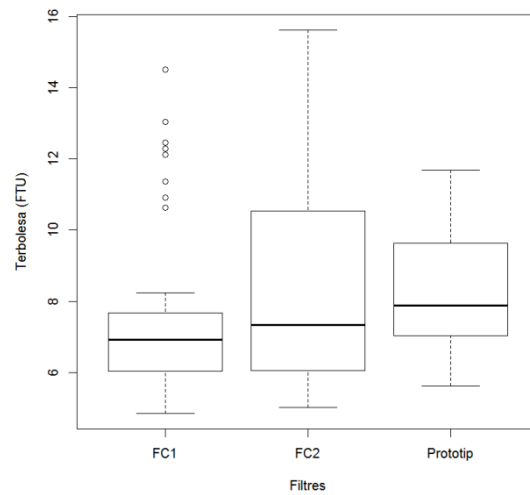


Figura 36. Diagrama de caixa de les dades de terbolesa de l'aigua d'entrada als diferents filtres assajats.

4.2 SELECCIÓ DELS CICLES

De les 250 hores de funcionament de cada filtre, i aplicant els criteris de selecció que s'han descrit a l'apartat 3.7.1 de materials i mètodes es van seleccionar els cicles que es tindrien en compte, per a fer el posterior anàlisi, en el filtre prototip (Taula 17), FC1 (Taula 18) i FC2 (Taula 19).

Taula 17. Selecció dels cicles bons en el filtre prototip.

	Número de cicle	Quantitat de cicles
Cicles totals		29
No arriben a la consigna (rentatge forçat)	4,5	2
Error funcionament (proves amb l'SCADA)	3	1
Sensor de terbolesa descalibrat	6, 7	2
No acaben	29	1
Consignes de rentatge a 0,7	1,2	2
Cicles analitzats		21

Taula 18. Selecció dels cicles bons en el FC1.

	Número de cicle	Quantitat de cicles
Cicles totals		68
No arriben a la consigna (rentatge forçat)	17, 20, 57	3
Error funcionament	7, 35, 36, 68	4
Durada inferior a 30 minuts	58	1
Consigne de rentatge a 0,7	1, 2, 3, 4, 5, 6	6
Sensor de terbolesa descalibrat	14, 15, 16, 18, 19, 21, 22, 23, 24	9
Cicles analitzats		45

Taula 19. Selecció dels cicles bons en el FC2.

	Número de cicle	Quantitat de cicles
Cicles totals		70
Error funcionament	21, 70	2
Mostres CECAM	9	1
Uniformitats	1, 2, 3, 4	4
Sensor de terbolesa descalibrat	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11	7
Cicles analitzats		56

4.3 CARACTERITZACIÓ DE L'EFECTE DEL FILTRE EN LA QUALITAT DE L'AIGUA

4.3.1 Reducció de l'oxigen dissolt de l'aigua d'entrada

A la Taula 20 es presenten les mitjanes de la reducció de l'oxigen dissolt obtingudes pels tres filtres. Aquesta reducció s'ha calculat amb l'Equació 6. A la Figura 37, s'observa la distribució dels valors d'aquesta reducció obtinguts en cada cicle i per cada filtre assajat.

Taula 20. Mitjana i desviació estàndard de la reducció de l'oxigen de l'aigua d'entrada obtinguda en els cicles analitzats de cada filtre assajat. Lletres diferents indiquen que existeixen diferències significatives ($P < 0,05$).

Filtre	Reducció d'oxigen (%)
Prototip	-9,93 ± 4,65
FC1	-7,59 ± 4,10
FC2	-7,94 ± 7,16

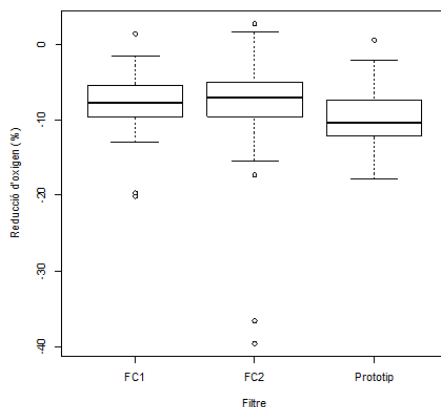


Figura 37. Diagrama de caixa del percentatge de reducció d'oxigen.

Valors negatius de reducció, significa que els valors d'oxigen dissolt a l'aigua a la sortida de filtració eren superiors als valors d'entrada (abans de filtrar). Un percentatge de reducció més negatiu significarà que amb la filtració s'ha disminuït més la presència dels contaminants orgànics a l'aigua.

Tot i que estadísticament no hi ha diferències significatives ($p=0,293$), a la Taula 20 es pot observar que el filtre prototip és el que obté millors resultats amb un percentatge de reducció més baix essent un 30,83% i un 25,06%, més baix que amb el FC1 i FC2, respectivament.

A la Figura 37, es veu com el rang de valors és molt similar pels tres filtres, que estan entre 0 i el -15%.

Duran-Ros (2008) va obtenir un valor de reducció d'oxigen molt menor, del 0,49%, tot i treballar amb velocitat de filtració inferior i una alçada de medi filtrant superior a l'assajada en aquest treball.

4.3.2 Reducció de terbolesa de l'aigua d'entrada

A la Taula 21 es presenten les mitjanes de la reducció de la terbolesa pels tres filtres assajats, calculades amb l'Equació 7. A la Figura 38, es veu la distribució dels valors obtinguts en cada cicle de filtració pels tres filtres.

Taula 21. Mitjana i desviació estàndard de la reducció de la terbolesa per cada filtre. Lletres diferents indiquen que existeixen diferències significatives ($P < 0,05$).

Filtre	Reducció de terbolesa (%)
Prototip	39,00 ± 11,89
FC1	31,69 ± 13,33
FC2	36,20 ± 18,35

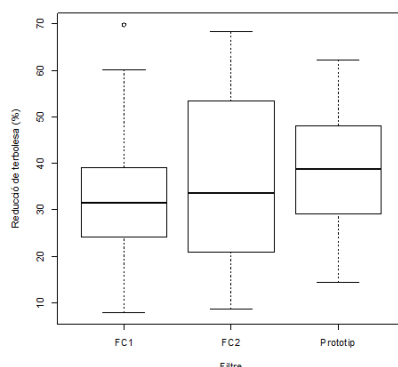


Figura 38. Diagrama de caixa dels valors mitjans de cada cicle de la reducció de terbolesa.

De la Taula 21, s'extreu que el filtre prototip té un percentatge de reducció de terbolesa de l'aigua superior 23,07% i 8,84% als FC1 i FC2, respectivament, tot i no ser estadísticament significativa ($p=0,162$).

Amb la Figura 38 s'observa que el rang de valors de la reducció de terbolesa dels tres filtres és bastant ampli, mostrant valors que van des de 70% fins a valors inferiors al 10%.

Altres autors que han treballat amb efluent secundaris i filtres de sorra, amb granulometria similar a l'assajada en aquest projecte, han obtingut reduccions de terbolesa superiors. Duran-Ros (2008), va obtenir una reducció del 57,57 % ± 21,97 treballant amb una velocitat de filtració de 5,93 l/(m²*s). Elbana (2011) per altra banda va obtenir un 70,60% de reducció de terbolesa treballant amb una velocitat de filtració que oscil·lava entre 13,81 i 15,44 (l/m²*s). Els dos autors obtenen una reducció de terbolesa superior a l'obtinguda amb el filtre prototip, aproximadament un 50% i 80% superior respectivament. Cal destacar que aquests autors van assajar els filtres de sorra amb unes majors alçades de llit de filtració (60 cm) que en el present projecte (20 cm).

4.4 DESCRIPCIÓ DELS CICLES DE FILTRACIÓ

De la Taula 22 a la Taula 29 es presenten les mitjanes, les desviacions estàndards juntament amb l'anàlisi de variància (ANOVA), i de la Figura 39 a la Figura 41 els diagrames de caixa dels diferents paràmetres pels tres filtres.

Aquests paràmetres s'han calculat seguint les equacions presentades a l'apartat 3.10.

4.4.1 Volum filtrat

El filtre prototip presenta volums de filtració més elevats, és a dir, els cicles de filtració més llargs. A partir de l'ANOVA s'observa que hi ha diferències estadísticament significatives ($p=4,83 \cdot 10^{-7}$) entre el filtre prototip i els altres dos filtres. Els filtres FC1 i FC2 presenten uns cicles de filtració d'un 50% menys volum respecte el filtre prototip.

Duran-Ros (2008), tot i treballar amb dos filtres de sorra iguals als FC1 en paral·lel i una alçada de filtració superior, va obtenir un volum d'aigua filtrada de mitjana pels cicles de filtració de $38,5 \text{ m}^3$, valor que representa un 15% més respecte a l'obtingut amb el filtre prototip.

La Figura 39, mostra que el filtre prototip, tot i tenir una mitjana de 33 m^3 de filtració, ha arribat fins als 60 m^3 d'aigua filtrada en un cicle, i a 10 m^3 en el cicle més curt. En el cas dels FC1 i FC2, el seu volum filtrat màxim ha estat al voltant de 40 i 30 m^3 respectivament, mentre que el volum mínim de filtració inferior al 10 m^3 .

Taula 22. Mitjana i desviació estàndard del volum filtrat per cada filtre assajat. Lletres diferents indiquen que existeixen diferències significatives ($P < 0,05$).

Filtre	Volum filtrat (m^3)
Prototip	$33,06 \pm 17,03$ (b)
FC1	$17,43 \pm 8,48$ (a)
FC2	$15,69 \pm 6,88$ (a)

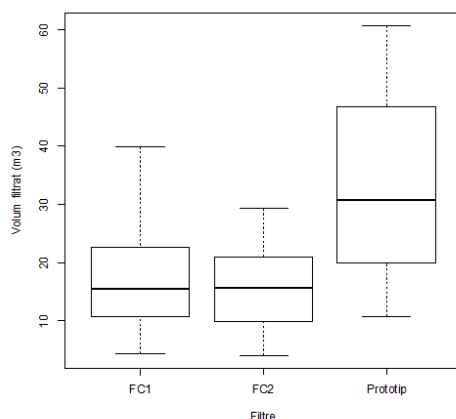


Figura 39. Diagrama de caixa dels valors mitjans de cada cicle filtració del volum filtrat per cada filtre assajat.

4.4.2 Volum de rentatge a contracorrent

La Taula 23 mostra que no hi ha diferències estadísticament significatives ($p=0,907$) entre els volums utilitzats en els rentatges a contracorrent entre els diferents filtres. Això s'explica pel fet que el rentatge a contracorrent estava estipulat, per tots tres filtres, a 3 minuts de durada i amb un cabal de $9 \text{ m}^3/\text{h}$. Amb els resultats obtinguts s'afirma que els tres filtres van tenir un rentatge a contracorrent igual. En la Figura 40, s'observa que hi ha valors que són atípics, aquest fet és degut al fet que en alguns cicles van coincidir el rentatge a contracorrent amb la finalització de la sessió de reg, de manera que provocava que el rentatge no durés els 3 minuts que estava estipulat i per tant el volum en aquests casos era menor.

Taula 23. Mitjana i desviació estàndard del volum utilitzat en el rentatge a contracorrent. Lletres diferents indiquen que existeixen diferències significatives ($P<0,05$).

Filtre	Volum del rentatge a contracorrent (m^3)
Prototip	$0,43 \pm 0,06$
FC1	$0,42 \pm 0,07$
FC2	$0,43 \pm 0,06$

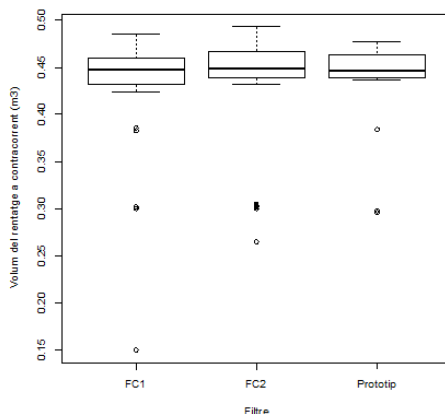


Figura 40. Diagrama de caixa dels valors mitjans de cada cicle del volum de rentatge a contracorrent per cada filtre assajat

4.4.3 Percentatge d'aigua de rentatge a contracorrent

D'acord amb els resultats mostrats a la Taula 29 i Figura 41 els percentatges d'aigua de rentatge a contracorrent dels filtres comercials són molt similars, a diferència del filtre prototip, que presenta diferències estadísticament significativament ($p=0,007$). El FC1 i FC2 tenen un percentatge d'aigua de rentatge 50% superior que el prototip. Això és gràcies al fet que els cicles de filtració han sigut més llargs en el cas del prototip, ja que han treballat amb les mateixes condicions de rentatge a contracorrent, com s'ha esmentat anteriorment.

A la Figura 41 s'observa que els tres filtres tenen un mínim de percentatge d'aigua de rentatge a contracorrent similar, al voltant de 0,5%, però pel que fa al màxim, el filtre prototip està a 3,2%, en canvi, els comercials estan a valors superiors a 6,5%.

Duran-Ros (2008), amb dos filtres de sorra en paral·lel iguals al FC1 va obtenir un percentatge d'aigua de rentatge a contracorrent de l'1,5%, similar al d'Elbana (2011), amb un 1,3%, que també treballava amb dos filtres de sorra en paral·lel. Ravina et al. (1997) va obtenir valors d'entre 0,5 i 1,5% d'aigua de rentatge a contracorrent. El filtre prototip ha obtingut un valor molt pròxim al de Duran-Ros (2008) i Elbana (2011), amb un $1,63\% \pm 0,76$ treballant amb un sol filtre i amb una alçada de filtració inferior.

Taula 24. Mitjana i desviació estàndard del percentatge d'aigua de rentatge a contracorrent. Lletres diferents indiquen que existeixen diferències significatives ($P < 0,05$).

Filtre	Aigua de rentatge a contracorrent (%)
Prototip	1,63 ± 0,76 (a)
FC1	3,25 ± 2,09 (b)
FC2	3,24 ± 1,57 (b)

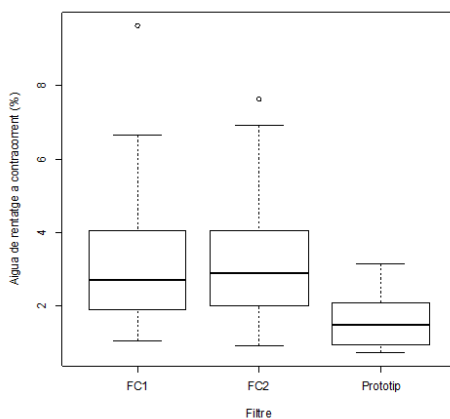


Figura 41. Diagrama de caixa dels valors mitjans de cada cicle del percentatge d'aigua de rentatge a contracorrent.

4.4.4 Relació entre l'augment de la pèrdua de càrrega i el volum filtrat

A partir dels resultats presentats a la Taula 25, s'observa que la pèrdua de càrrega per unitat de volum filtrat és 46,88% inferior en el prototip, i amb diferències estadísticament significatives ($p=0,015$) dels valors obtinguts pels filtres comercials assajats. A partir de la Figura 42, s'observa que els valors obtinguts en tots els cicles de filtració en el filtre prototip han sigut inferiors que als obtinguts amb els filtres comercials. El valor màxim obtingut amb el filtre prototip, ha sigut d'uns 0,03 bar/m³, valor obtingut de mitjana amb els altres dos filtres.

Aquests resultats estan estretament vinculats al volum filtrat, presentat anteriorment, on el filtre prototip ha presentat uns valors de volums filtrats per cicle superiors als altres dos. Cal recordar que el valor de pèrdua de pressió que implicava la finalització del cicle es va establir en 0,5 bar per als tres filtres, mentre que la pèrdua de càrrega inicial dels cicles de filtració va ser de mitjana, 0,15, 0,14 i 0,18 bar per al filtre prototip, FC1 i FC2, respectivament.

Taula 25. Mitjana i desviació estàndard de la relació entre la pèrdua de càrrega i el volum filtrat. Lletres diferents indiquen que existeixen diferències significatives ($P < 0,05$).

Filtre	Relació pèrdua de càrrega i volum filtrat (bar/m^3)
Prototip	$0,017 \pm 0,009$ (a)
FC1	$0,032 \pm 0,017$ (b)
FC2	$0,032 \pm 0,019$ (b)

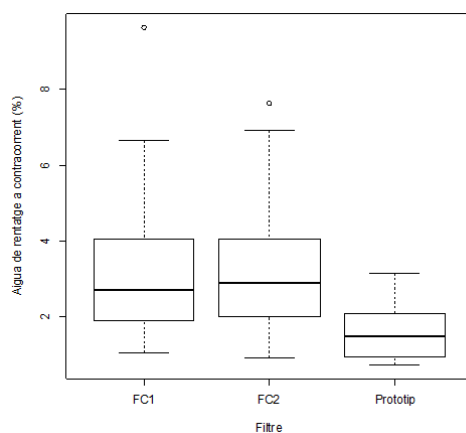


Figura 42. Diagrama de caixa dels valors mitjans de cada cicle de filtració de la relació entre la pèrdua de càrrega i el volum filtrat per cada filtre assajat.

4.4.5 Consum energètic dels cicles de filtració

L'ANOVA aplicat indica que hi ha diferències estadísticament significatives ($p = 1,45 \cdot 10^{-4}$) entre el filtre prototip respecte als altres dos filtres comercials (Taula 26). A partir de la Figura 43 es veu que el rang de valors més ampli es produeix amb el filtre prototip, igual com passava amb el volum filtrat, ja que van estretament lligats. El prototip té un consum d'energia més elevat per cada cicle de filtració, però els seus cicles de filtració són més llargs aconseguint filtrar un major volum.

Taula 26. Mitjana i desviació estàndard del consum energètic de la filtració. Lletres diferents indiquen que existeixen diferències significatives ($P < 0,05$).

Filtre	Consum energètic de la filtració (kWh)
Prototip	$3,12 \pm 1,87$ (b)
FC1	$2,02 \pm 1,02$ (a)
FC2	$1,85 \pm 0,87$ (a)

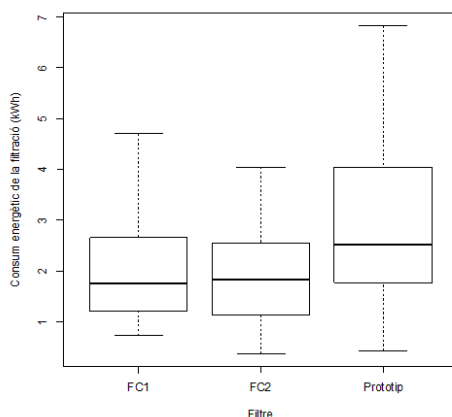


Figura 43. Diagrama de caixa dels valors mitjans de cada cicle de filtració del consum energètic per cada filtre assajat.

4.4.6 Consum energètic del rentatge a contracorrent

Els resultats presentats a la Taula 27 i a la Figura 44 indiquen que no hi ha diferències estadísticament significatives ($p=0,175$) entre els tres filtres. Com ja s'ha comentat, el rentatge a contracorrent estava estipulat a 3 minuts i $9 \text{ m}^3/\text{h}$. Tot i així, sembla que el filtre prototip presenti més resistència al rentatge a contracorrent, ja que mostra un consum lleugerament més elevat que els filtres comercials. A la Figura 44 hi ha valors atípics, pels mateixos motius que al volum de rentatge a contracorrent. Per tant es pot afirmar que el consum de rentatge a contracorrent ha estat similar als tres filtres.

Taula 27. Mitjana i desviació estàndard del consum energètic del rentatge a contracorrent.

Lletres diferents indiquen que existeixen diferències significatives ($P<0,05$).

Filtre	Consum energètic del rentatge a contracorrent (kWh)
Prototip	$0,030 \pm 0,004$
FC1	$0,028 \pm 0,006$
FC2	$0,028 \pm 0,005$

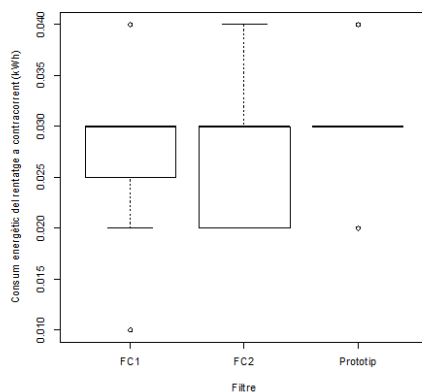


Figura 44. Diagrama de caixa dels valors mitjans de cada cicle de filtració del consum energètic del rentatge a contracorrent per cada filtre assajat.

4.4.7 Percentatge d'energia utilitzada en el rentatge a contracorrent

Amb l'ANOVA presentada a la Taula 28 s'observa que no hi ha diferències estadísticament significatives ($p=0,148$) entre cap dels tres filtres assajats, amb mitjanes que oscil·len entre 1,42 i 2%. Encara que les diferències no siguin estadísticament significatives, el filtre prototip ha obtingut un 18% i 29% menys que el filtre FC1 i FC2 respectivament. Això significa que el filtre prototip dedica menys energia en el rentatge a contracorrent en relació a l'energia utilitzada en el cicle de filtració.

El rang de valors dels tres filtres és notablement diferent, presentant un màxim al voltant del 2% pel filtre prototip i 4% pel que fa als filtres comercials (Figura 45).

Taula 28. Mitjana i desviació estàndard del percentatge d'energia de rentatge a contracorrent. Lletres diferents indiquen que existeixen diferències significatives ($P<0,05$).

Filtre	Energia de rentatge a contracorrent (%)
Prototip	1,42 ± 0,98
FC1	1,73 ± 0,87
FC2	2,00 ± 1,45

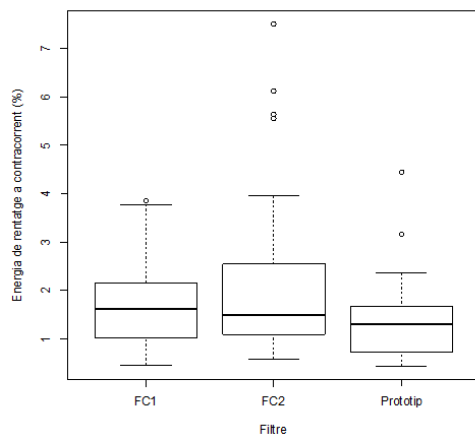


Figura 45. Diagrama de caixa dels valors mitjans de cada cicle del percentatge d'energia de rentatge a contracorrent.

4.4.8 Relació entre volum filtrat i consum energètic en fase de filtració

Tot i que el prototip s'havia diferenciat amb els altres dos filtres en el volum filtrat i el consum energètic del filtratge, quan es relacionen aquests dos valors, segons l'ANOVA de la Taula 29 només s'obté diferències estadísticament significatives ($p=0,019$) entre el filtre prototip i FC1, mentre que el FC2 no es diferencia de cap. Tot i així, el filtre prototip és el que fa un ús més eficient de l'energia, aconseguint un 3,91% i un 2,10% més de volum filtrat per cada kWh consumit que FC1 i FC2 respectivament.

El rang de valors del filtre prototip (Figura 46) és més petit, presentant tots els valors entre 8,5 i 9 l/kWh, en canvi els filtres comercials tenen un rang de valors més ampli.

Taula 29. Mitjana i desviació estàndard de la relació entre el volum filtrat i consum energètic de filtració. Lletres diferents indiquen que existeixen diferències significatives ($P<0,05$).

Filtre	Volum filtrat/consum energètic filtració (l/kWh)
Prototip	8,76 ± 0,13 (b)
FC1	8,43 ± 0,53 (a)
FC2	8,58 ± 0,24 (ab)

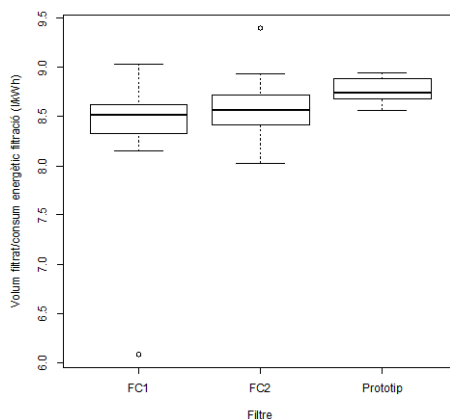


Figura 46. Diagrama de caixa dels valors mitjans de cada cicle de filtració de la relació entre volum filtrat i consum energètic per cada filtre assajat.

4.5 DISTRIBUCIÓ DE LA PÈRDUA DE CÀRREGA EN ELS FILTRES

4.5.1 Distribució de la pèrdua de pressió en el filtre prototip

Dels 21 cicles determinats com a bons a l'apartat 4.2, es van escollir els que començaven amb una diferència de pèrdua de càrrega igual o inferior a 0,15 bar obtenint així un total de 10 cicles.

Si s'observa la Taula 30, es comprova que a l'inici del cicle la major pèrdua de càrrega està concentrada al tram 1-2, corresponent majoritàriament a la pèrdua de càrrega realitzada pel deflector, però a mesura que avança el cicle, el seu percentatge es va reduint arribant a valors del 10% al final del cicle. A la resta de durada del cicle, a on hi ha més pèrdua de càrrega és al tram 3-4, que correspon al medi filtrant, arribant gairebé a un 70% al final del cicle. Els trams 2-3 i 4-5, que corresponen al primer tram del filtre i a la crepina respectivament, van disminuint el percentatge de pèrdua de càrrega al llarg de la durada del cicle amb un 6,56% i un 4,25% respectivament. El tram 5-6, que correspon a la sortida del filtre, es manté molt estable. Així doncs, l'augment de la pèrdua important de pressió es genera en el llit filtrant.

A la Figura 47, s'observa que els valors dels transductors 4, 5 i 6 són molt similars al llarg de la durada del cicle, això s'explica per la baixa variabilitat en la pèrdua de càrrega en la crepina i col·lector de sortida durant tot el cicle.

Taula 30. Mitjana del percentatge de pèrdues de càrrega en els diferents trams del filtre prototip en diferents moments del cicle de filtració

Temps	Tram 1 - 2	Tram 2 - 3	Tram 3 - 4	Tram 4 - 5	Tram 5 - 6
Inici cicle	-36,26	-18,81	-29,71	-14,26	-0,96
1/3 de cicle	-22,03	-16,95	-45,52	-13,96	-1,54
2/3 de cicle	-12,26	-15,27	-59,26	-12,02	-1,19
Final cicle	-10,57	-12,25	-67,16	-10,00	0,02

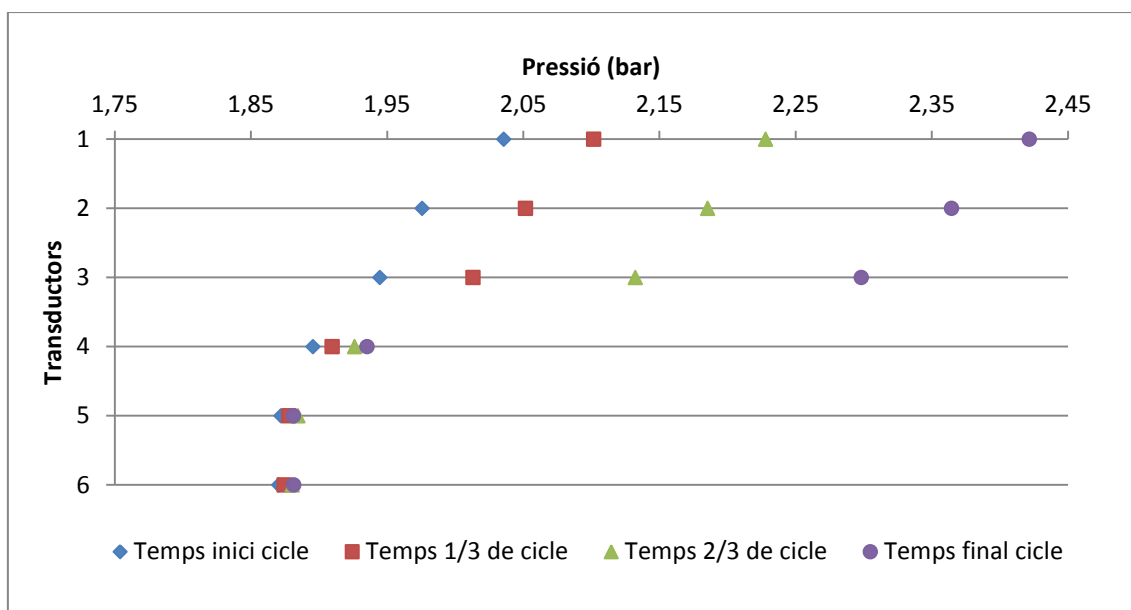


Figura 47. Mitjana de lectures dels transductors al llarg del filtre prototip en diferents moments del cicle.

4.5.2 Distribució en la pèrdua de pressió en el FC1

Dels 45 cicles determinats com a bons a l'apartat 4.2, es van escollir els que començaven amb una diferència de pèrdua de càrrega igual o inferior a 0,15, obtenint així un total de 33 cicles.

De la Taula 31 se n'extreu que a l'inici del cicle, on hi ha més pèrdua de càrrega és el tram 1-2 i en el 5-6, que són els trams que inclouen els elements auxiliars per a l'entrada i sortida de l'aigua al filtre i a mesura que avança el cicle la importància va disminuint arribant a valors del 8,12% i del 7,25% respectivament en el final del cicle. El tram 2-3, que és el que inclou el primer tram del filtre, es manté estable, augmentant un 3% des de l'inici del cicle al final. Els trams 3-4 (llit filtrant) i 4-5 (crepina), van augmentant el percentatge de pèrdua de càrrega a mesura que el cicle avança. A

partir d'1/3 del cicle, els trams 3-4 i 4-5 tenen un pes molt important en la pèrdua de càrrega amb més del 60%, i arribant a més d'un 75% al final del cicle.

A la Figura 48, s'observa que els valors dels transductors 5 i 6 són similars, però que la resta de mesures s'allunyen a causa de l'evolució del percentatge de pèrdua en cada temps.

Bové et al. (2015), que va treballar amb aigua neta i amb velocitats i medi similar a l'assajat, però alçada de filtració superior (31,7 cm) a la del projecte (20 cm), va obtenir que la pèrdua de càrrega generada pel medi filtrant i per la crepina (similar a la del FC1) era del 50% en cada un. FC1 ha obtingut a l'inici del cicle (quan el filtre esta net), una pèrdua de càrrega del medi filtrant del 84,27 % i de la crepina del 15,73%. Tarrés (2014), treballant a les mateixes condicions que el present projecte però amb velocitat inferior (3,63 m³/h) a la del projecte (6,00 m³/h) va obtenir un 83,37% de pèrdua de càrrega a la crepina i un 16,63% al medi.

Taula 31. Mitjana del percentatge de pèrdues de càrrega al llarg del FC1 en diferents moments del cicle.

Temps	Tram 1 - 2	Tram 2 - 3	Tram 3 - 4	Tram 4 - 5	Tram 5 - 6
Inici cicle	-35,06	-4,75	-24,16	-4,51	-31,52
1/3 de cicle	-13,72	-7,85	-35,98	-25,15	-17,30
2/3 de cicle	-11,04	-6,46	-38,69	-33,88	-9,93
Final cicle	-8,12	-7,96	-40,44	-36,23	-7,25

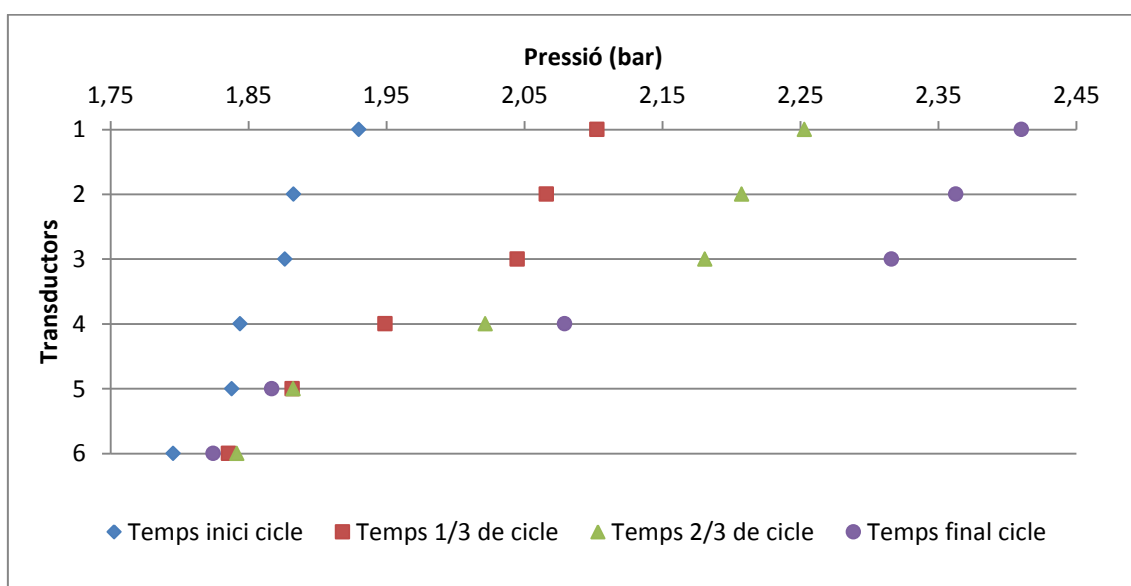


Figura 48. Mitjana de lectures dels transductors al llarg del FC1 en diferents moments del cicle.

4.5.3 Distribució en la pèrdua de pressió en el FC2

Dels 56 cicles determinats com a bons a l'apartat 4.2, es van escollir els que començaven amb una diferència de pèrdua de càrrega igual o inferior a 0,15, obtenint així un total d'11 cicles.

De la Taula 32 se n'extreu que els trams 1-2 i 2-3 comencen amb percentatges de pèrdua de càrrega del 20% i a mesura que avança el cicle la pèrdua de càrrega perd importància acabant en valors inferiors al 10%. En aquest filtre, on es troba més pèrdua de càrrega és en els dos trams últims: en el 3-4 es produeix la pèrdua de càrrega del medi filtrant i en el 4-6 la de la crepina i sortida del filtre.

En la primera part del cicle, la importància de la pèrdua de càrrega té lloc en el llit filtrant (tram 3-4). En la segona part la importància passa a estar més igualada però amb valors superiors al tram de la crepina i col·lector de sortida (tram 4-6).

A la Figura 49 s'observa que els transductors 1, 2 i 3 tenen valors que disminueixen amb el mateix pendent, això és a causa de la similitud de la pèrdua de càrrega entre el tram 1-2 i 2-3 en els quatre temps del cicle.

És difícil extreure la pèrdua de càrrega generada pel llit de filtració respecte la crepina, ja que el tram 4-6 inclou la crepina i la sortida de filtració. Tenint en compte això, el FC2 té un repartiment de la pèrdua de càrrega a parts iguals entre el llit filtrant (tram 3-4) i la crepina i sortida de filtració (tram 4-6).

Taula 32. Mitjana del percentatge de pèrdues de càrrega al llarg del FC2 en diferents moments del cicle.

Temps	Tram 1 - 2	Tram 2 - 3	Tram 3 - 4	Tram 4 - 6
Inici cicle	-21,30	-23,64	-41,32	-13,74
1/3 de cicle	-16,11	-14,92	-37,44	-31,53
2/3 de cicle	-10,75	-8,88	-39,21	-41,16
Final cicle	-9,33	-6,91	-40,09	-43,67

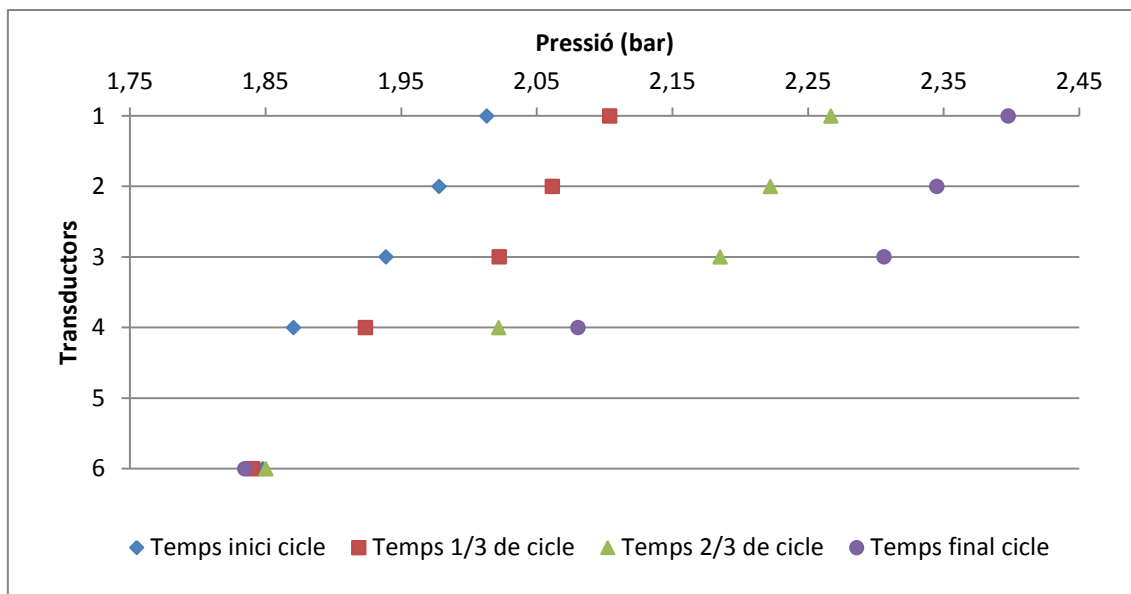


Figura 49. Mitjana de lectures dels transductors al llarg del FC2 en diferents moments del cicle.

4.6 EVOLUCIÓ DE LA PÈRDUA DE CÀRREGA EN FUNCIÓ DEL VOLUM D'AIGUA FILTRADA

Dels resultats que es mostren en les Figura 50 a 52 s'extreuen diferents comportaments de l'evolució de la pèrdua de càrrega. En el cas del prototip (Figura 50) la pèrdua de càrrega en un inici és baixa, i aproximadament als 7.500 litres filtrats la diferència de càrrega augmenta. En el cas dels FC1 i FC2, tenen una evolució bastant lineal, tot i que el FC2 presenta una evolució amb major pendent, indicant una pèrdua de pressió més elevada amb volums de filtració més baixos que no en el FC1.

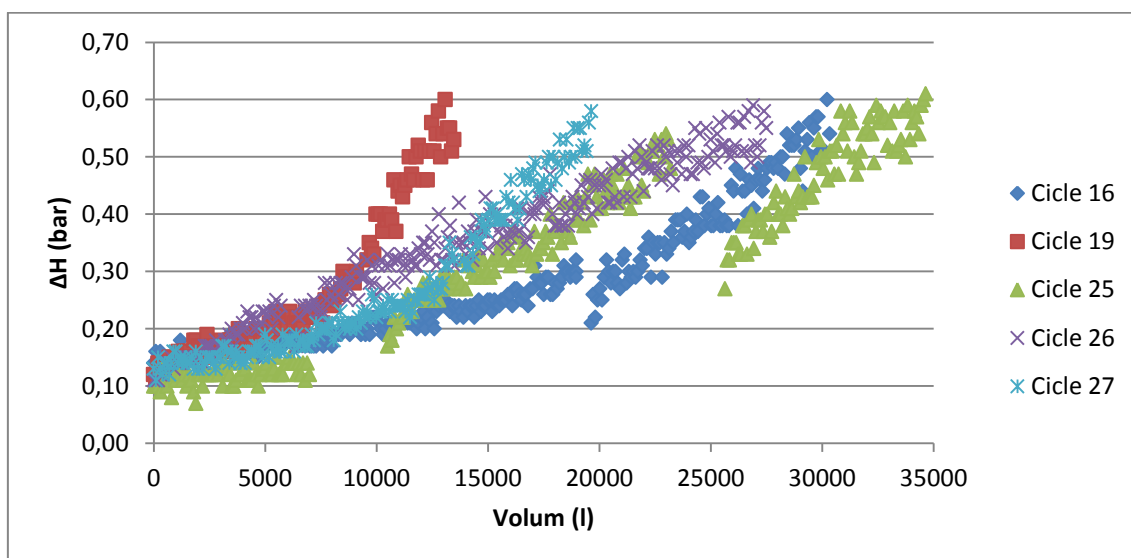


Figura 50. Evolució de la pèrdua de càrrega en funció de l'aigua filtrada en el prototip.

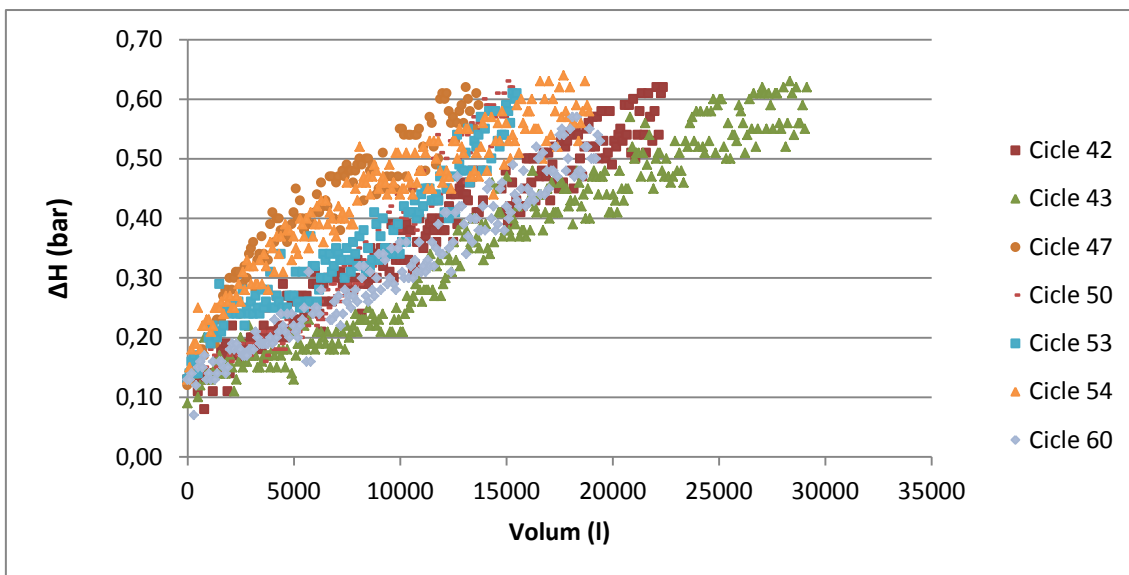


Figura 51. Evolució de la pèrdua de càrrega en funció de l'aigua filtrada en el FC1.

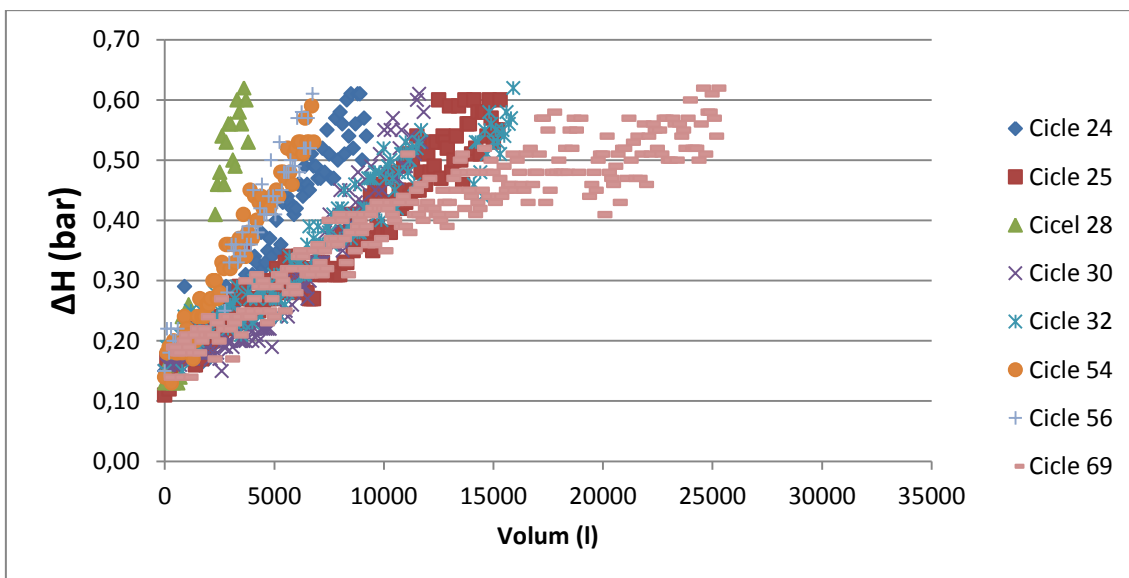


Figura 52. Evolució de la pèrdua de càrrega en funció de l'aigua filtrada en el FC2.

5 CONCLUSIONS

Les principals conclusions obtingudes en les condicions de treball en què s'ha desenvolupat l'assaig són les següents:

–Els tres filtres assajats han treballat en les mateixes condicions de pH, de terbolesa i d'oxigen dissolt a l'aigua d'entrada, però el filtre prototip ha treballat amb condicions de conductivitat elèctrica estadísticament diferents del FC1, similar ha passat amb la temperatura, on el filtre comercial 2 ha treballat a condicions estadísticament diferents que el filtre prototip i el FC1. Tot i mostrar diferències estadísticament significatives, per la reduïda magnitud de la diferència es considera que tenen poca rellevància i per tant es conclou que les característiques de l'aigua filtrada han estat les mateixes.

–La utilització de diferents tipus de crepines, no ha generat diferències estadísticament significatives pel que fa a qualitat de l'aigua de sortida en els filtres, ni en reducció de terbolesa ni en oxigen dissolt. Tot i no presentar diferències estadístiques, el filtre prototip ha obtingut millors resultats en els dos paràmetres.

–El filtre prototip ha realitzat cicles de filtració del 89,67% i 110,71% més llargs que FC1 i FC2, respectivament.

–Per cada metre cúbic filtrat, el filtre prototip presenta una pèrdua de pressió del 46,88% inferior que els filtres comercials, fet que implica que els cicles de filtració puguin ser més llarg.

–El percentatge d'aigua utilitzada en el rentatge a contracorrent del filtre prototip representa un 49,85% i 49,70% menys a l'observat en el FC1 i FC2 respectivament, així doncs s'afirma que en termes d'eficiència de l'ús de l'aigua, el filtre prototip és millor.

–En la crepina del filtre prototip no hi ha tant percentatge de pèrdua de càrrega respecte els filtres comercials. El repartiment de la pèrdua de càrrega a 2/3 del cicle de filtració, en el filtre prototip va ser del 16,86% en la crepina i 83,14% en el medi filtrant, i en el cas del FC1 va resultar un 46,69% a la crepina i un 53,31% en el medi filtrant.

–Per cada kWh d'energia utilitzat en fase de filtració, el filtre prototip és el que presenta un major volum de filtració. Estadísticament només ha obtingut diferències significatives amb el FC1. Així doncs, per temes d'eficiència d'energia, el filtre prototip és el que obté millors resultats.

6 BIBLIOGRAFIA

ACA. 2016. *Evaluació anual del volum d'aigua reutilitzat per usos (hm^3)*. Recuperat de: http://aca-web.gencat.cat/aca/documents/Abastament/Recursos/reutilitzacio/grafic_reutilitzacio.pdf

AEMET. Data de consulta: 21 Juny 2018. *Resúmenes climatológicos. España. Anuales*. Recuperat de: http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/resumenes?w=0&datos=2&n=1

Balcells, J. i Romeral, J. L. 2003. *Autómatas programables*. Mercombo Boixareu Editores, Barcelona.

BOE. 2007. *Real Decreto 1620/2007*. Recuperat de: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2007-21092>

Bové, J.; Arbat, G.; Pujol, T.; Duran-Ros, M.; Ramírez de Cartagena, F.; Velayos, J. i Puig-Bargués, J. 2015. *Reducing energy requirements for sand filtration in microirrigation: improving the underdrain and packing*. Biosyst. Eng. 140, 67–78, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.09.008>.

Bové, J.; Puig-Bargués, J.; Arbat, G.; Duran-Ros, M.; Pujol, T.; Pujol J. i Ramírez de Cartagena, F. 2016. *Development of a new underdrain for improving the efficiency of microirrigation sand media filters*. ABiosystems engineering 197, 126-136, <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2016.06.031>

Bové, J.; Pujol, J.; Arbat, G.; Duran-Ros, M.; Ramírez de Cartagena, F. i Puig-Bargués, J. 2017. *Environmental assessment of underdrain designs for a sand media filter*. Agricultural Water Management 179, 296-305, <http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.01.005>

Burt, C. M. i Styles, S. W. 2000. *Riego por goteo y microaspersión para árboles, vides y cultivos anuales*. Irrigation Training & Research Center, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, California.

Capra, A. i Scicolone, B. 2017. *Recycling of poor quality urban wastewater by drip irrigation systems*. Journal of Cleaner Production 15, 1529-1534. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965260600285X>

Comisión Europea. 2005. *Riego de cultivos con agua residuales*. Recuperat de: https://cordis.europa.eu/result/rcn/80805_es.html

Corominas, J. 2010. *Agua y energía en el riego, en la época de la sostenibilidad*. Ingeniería del Agua, Vol. 17, No 3. <https://polipapers.upv.es/index.php/IA/article/view/2977>

Doorenbos, J. i Kassam, A. H. 1979. *Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos*. ESTUDIO FAO: RIEGO Y DRENAJE 33. Roma.

Domingo, J.; Gámiz, J.; Grau, A. i Martínez, H. 2003. *Diseño y aplicaciones con autómatas programables*. Editorial UOC, Barcelona.

Duran-Ros, M. 2008. *Filtración y uniformidad de riego en los sistemas de microirrigación con efluentes de estaciones depuradoras de aguas residuales*. ETSEA, Universitat de Lleida.

Duran-Ros, M.; Puig-Bargués, J.; Arbat, G.; Barragán J. i Ramírez de Cartagena, F. 2009. *Effect of filter, emitter and location on clogging when using effluents*. Agricultural wáter management 96, 67-79. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377408001558>

EcuRed. 2018. *Filtro de arena*. Recuperat de: https://www.ecured.cu/Filtro_de_arena

Elbana, M. A. 2011. *Comparison between surface and subsurface drip irrigation Systems using effluents*. ETSEA, Universitat de Lleida.

FAO. 2011. *EL ESTADO DE LOS RECURSOS DE TIERRA Y AGUAS DEL MUNDO PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA*. La gestión de los sistemas en situación de riego. Recuperat de: www.fao.org/3/a-i1688s.pdf

FAO. 2017. *AQUASTAT. Hoja informativa nacional*. Recuperat de: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/cf/readPdf.html?f=ESP-CF_esp.pdf

FAO. Data de consulta: 15 de juny 2018. *AQUASTAT*. Recuperat de: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/results.html?regionQuery=true&yearGrouping=SURVEY&showCodes=false&yearRange.fromYear=1958&yearRange.toYear=2017&varGrpIds=4250%2C4251%2C4252%2C4253%2C4257&cntIds=®Ids=9805%2C9806%2C9807%2C9808%2C9809&edit=0&save=0&query_type=WUpage&lowBandwidth=1&newestOnly=true&_newestOnly=on&showValueYears=true&_showValueYears=on&categoryIds=1&_categoryIds=1&XAxis=VARIABLE&showSymbols=true&_showSymbols=on&_hideEmptyRowsColumns=on&lang=es

Fuentes Yagüe, J. L. 2003. *Técnicas de riego*. 4a. Ed. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación: Ediciones Mundi-Prensa, cop.

ICGC. 2018. *Ortofoto*. Recuperat de: <http://www.icc.cat/vissir3/>

Idescat. 2018. *El municipi en xifres. Celrà*. Data de consulta: 25-06-2018. Recuperat de: <https://www.idescat.cat/emex/?id=170499&lang=es>

INE. Data de consulta: 21 juny 2018. *Estadística sobre el suministro y saneamiento del agua. Serie 2000-2014. Uso del agua reutilizada por comunidades i ciudades autónomas, tipo de fuente y periodo*. Recuperat de: <http://www.ine.es/jaxi/Tabla.htm?path=/t26/p067/p01/serie/l0/&file=01007.px>

INE. Data de consulta: 25 de juny 2018. *Encuesta sobre el uso del agua en el sector agrario. Serie 2000 – 2015*. Recuperat de: <http://www.ine.es/jaxi/Tabla.htm?path=/t26/p067/p03/serie/l0/&file=02003.px>

Ingemecánica. 2018. *Tutorial nº 207, Cálculo de una Instalación de Riego por Goteo*. Recuperat de: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn207.html>

Insumos de riego. 2018. *Filtro de anilla 1 pulgada*. Recuperat de: http://www.insumosderiego.com.ar/riego_agricola_parques_jardines_agro_aspersion_goteo_eurodrip.php?titulo=filtro-de-anilla-1-pulgada-filtro-de-anilla-1-pulgada&ELID=1132

Insumos de riego. 2018. *Filtro para riego, de grava.Filtro de grava IDRA 2"*. Recuperat de: http://www.insumosderiego.com.ar/filtro_para_riego_de_grava.php?titulo=filtro-de-grava-idra-2-filtro-de-grava-idra-2&ELID=1751

MAPAMA. 2017. *Encuesta anual de superficies y rendimientos de cultivos. Informe metodológico estandarizado*. Recuperat de: http://www.mapama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/01023_ENCUESTA%20ANUAL%20DE%20SUPERFICIES%20Y%20RENDIMIENTOS%20DE%20CULTIVOS_tcm30-122312.pdf

MAPAMA. 2018 a. *Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos. Resultados 2017*. Recuperat de: http://www.mapama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/boletin2017_tcm30-454170.pdf

MAPAMA. 2018 b. *Fruto de la modernización de los regadíos y el uso eficiente del agua: Aumenta la superficie regada en España pero se mantiene una tendencia a la baja en el volumen de agua de riego utilizada en el sector agrario*. Recuperat de:

http://www.mapama.gob.es/es/prensa/15.03.18%20Regad%C3%ADo%20en%20Espa%C3%B1a_tcm30-288707.pdf

MAPAMA. Març 2018 c. *Boletín Hidrológico Semanal. Informe Hidrológico de Tendencia número 11.* Recuperat de: https://www.spancold.es/BHS_MAGRAMA/iht.pdf

MAPAMA. Data de consulta: 21 juny 2018 d. *Gestión sostenible de regadíos.* Recuperat de: <http://www.mapama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/>

MTE. Juny 2018. *Boletín Hidrológico Semanal. Informe Hidrológico de Tendencia número 25.* Recuperat de: <http://www.seprem.es/boletin/tendencia.pdf>

OCWUS. 2008. *Elementos de un sistema de riego localizado.* Recuperat de: http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%2010.Riego%20goteo/tutorial_06.htm/skinless_view

Pizarro, F. 1987. *Riegos localizados de alta frecuencia.* Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.

Ravina, I.; Paz, E.; Sofer, Z.; Marcus, A.; Sagi, G.; Yechiely, Z. i Lev, Y. 1997. *Control of clogging in drip irrigation with stored treated municipal sewage effluent.* *Agricultural Water Management*, 33, 2-3, 127-137.

Rodrigo, J.; Hernández, J. M.; Pérez, A. i González, J.F. 1997. *Riego Localizado.* Ediciones Mundi-Prensa y MAPA-IRYDA, Madrid.

Solé, C.; Bové, J.; Duran-Ros, M. i Puig-Bargués, J. 2017. *Llaços de control, registres i alarmes de la instal·lació experimental de reg.*

Tarrés, N. 2014. *Eficiència energètica en filtres de matriu granular per a reg localitzat.* Universitat de Girona

UNESCO. Data de consulta: 21 juny 2018. *Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP). Hecho 24: La Agricultura de regadío.* Recuperat de: <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-24-irrigated-land/>

Vermeiren, L. i Jobling, G. A. 1986. *Riego llocalizado: ESTUDIO FAO RIEGO Y DRENAJE 36.* Roma.